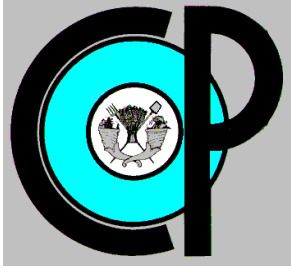


COLEGIO DE POSTGRADUADOS



INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA, MICROORGANISMOS Y PROPIEDADES HIDROLÓGICAS DE LOS SUELOS EN EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ARBOLES FRUTALES

ANA MAGDALENA ARRIAGA VÁZQUEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

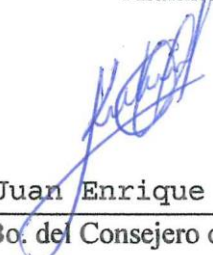
2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, “**Ana Magdalena Arriaga Vázquez**”, Alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor “**Dr. Juan Enrique Rubiños Panta**”, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “**Dinámica de la materia orgánica, microorganismos y propiedades hidrológicas de los suelos en el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF)**”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.



Firma del
Alumno (a)



Dr. Juan Enrique Rubiños Panta
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 30 de julio de 2019

La presente tesis titulada: **Dinámica de la materia orgánica, microorganismos y propiedades hidrológicas de los suelos en el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF)**, realizada por la alumna: **Ana Magdalena Arriaga Vázquez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)



DR. JUAN ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR (A)



DR. DEMETRIO SALVADOR FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR (A)



DR. JULIÁN DELGADILLO MARTÍNEZ

ASESOR (A)



DR. ANTONIO VÁZQUEZ ALARCÓN

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2019

DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA, MICROORGANISMOS Y PROPIEDADES
HIDROLÓGICAS DE LOS SUELOS EN EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON
ARBOLES FRUTALES (MIAF)

Ana Magdalena Arriaga Vázquez, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

El manejo agrícola del suelo en zonas de laderas del trópico húmedo de México determina los procesos erosivos e influye en las propiedades físicas y químicas del suelo; las cuales están relacionadas con las propiedades hídricas de los suelos y con los escurrimientos superficiales. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el impacto hidrológico, las características físicas, químicas y biológicas en el Sistema de Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) y compararlas con los sistemas de manejo agrícola tradicional y de labranza de conservación. Se muestrearon los suelos de las partes donadoras y receptoras del MIAF, de la milpa tradicional y de la manejada con labranza de conservación; para determinar el tamaño de partículas y de agregados, las propiedades hidrodinámicas, características químicas y biológicas en suelos de Axochío, San Andrés Tuxtla, Veracruz. Los resultados indican que el sistema MIAF mejoró el estado de agregación de los suelos, el índice de estabilidad de agregados, la capacidad de retención del agua en el suelo y la velocidad de infiltración inicial del agua en la zona de recepción y filtro de sedimentos; en comparación con la zona media y donadora de sedimentos del MIAF y con los sistemas de agricultura tradicional y labranza de conservación. Esta misma tendencia se presentó con la actividad de grupos funcionales de microorganismos, además de un pH más cercano a la neutralidad, mayor contenido de materia orgánica, N inorgánico, N total, P total, P extractable y K en la zona del filtro.

Palabras clave: *estabilidad de agregados, infiltración, comunidades microbianas, captura de carbono, materia orgánica.*

DYNAMICS OF ORGANIC MATTER, MICROORGANISMS AND HYDROLOGICAL PROPERTIES OF SOILS IN MILPA INTERSPERSED SYSTEM IN FRUIT TREES (MIAF)

Ana Magdalena Arriaga Vázquez, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

The agricultural management of the soil in zones of hillside of the rain forest of Mexico determines erosion and changes on physical and chemical soil properties; which are related to the hydrological properties of soils and surface runoff. The objective of this research was to evaluate the hydrological impact, the physical, chemical and biological characteristics in the milpa interspersed system in fruit trees (MIAF) and compare this with traditional agricultural and conservation tillage systems. The soils of the donor and recipient parts of the MIAF, of the traditional milpa and of the manageable with conservation tillage, are sampled; to determine the size of the particles and aggregates, the hydrological properties, the water infiltration rate, the chemical and biological characteristics in the soils of Axochío, San Andrés Tuxtla, Veracruz. The results indicate that the MIAF system improves particles aggregation of the soils, its index of stability, the capacity of water retention and water infiltration within the zone of reception and filter of sediments; in comparison with the medium and donor zone of the MIAF and with traditional agriculture and conservation tillage systems. The same occurred with the activity of groups of microorganisms, in addition to a pH closer to neutrality, higher content of organic matter, inorganic N, total N, total P, extractables P and K in filter zone.

Key words: stability of aggregates, infiltration, microbial diversity, carbon capture, organic matter.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Colegio de Postgraduados, por brindarme el apoyo para mi formación científica y humana.

Al Dr. Mario Martínez Menes[†], por haber dirigido esta tesis, por su apoyo incondicional en lo académico y por sus consejos de vida.

A los Doctores Juan Enrique Rubiños Panta, Demetrio S. Fernández Reynoso, Julián Delgadillo Martínez, Antonio Vázquez Alarcón, por el tiempo dedicado, por compartir sus conocimientos y consejos que me ayudaron a finalizar esta tesis de investigación.

A las personas que me apoyaron de alguna manera en esta investigación.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1 General	3
2.2 Específicos	3
III. HIPÓTESIS.....	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 Suelo.....	4
4.2 Calidad del suelo	4
4.2.1 Indicadores de calidad.....	5
4.2.1.1 Parámetros químicos.....	7
4.2.1.2 Carbono (C)	7
4.2.1.3 Nitrógeno (N)	7
4.2.1.4 Fósforo (P).....	9
4.2.1.5 Materia orgánica (MO).....	9
4.2.2 Parámetros físicos	10
4.2.2.1 Agregados del suelo.....	10
4.2.3 Parámetros biológicos	11
4.3 Degradación del suelo	11
4.4 Conservación de suelo.....	12
4.4.1 Terrazas de muro vivo.....	17
4.4.2 Sistema agrícola milpa intercalada con árboles frutales (MIAF).....	19
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
5.1 Localización del Sitio de estudio	25
5.2 Descripción del medio físico del área de estudio.....	26
5.2.1 Clima.....	26
5.2.2 Orografía	29

5.2.3	Hidrografía.....	30
5.2.4	Uso del suelo.....	30
5.2.5	Tipo de suelos	30
5.3	Descripción del sitio experimental.....	32
5.3.1	Componentes del Sistema MIAF	32
5.3.2	Sistema de muestreo de suelos para el MIAF, labranza tradicional y de conservación.....	33
5.4	Análisis de laboratorio de las muestras de suelos, pruebas de campo y topografía.....	35
5.5	Análisis estadístico.....	40
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
6.1	Propiedades físicas	41
6.2	Parámetros químicos	45
6.3	Propiedades biológicas.....	51
6.4	Propiedades hidrológicas.....	54
6.5	Características topográficas del terreno	56
VII.	CONCLUSIONES	59
VIII.	LITERATURA CITADA	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del N. Fuente: Bernot et al., (2010).	8
Figura 2. Esquema de ciclo de P. Fuente (Atlas y Bartha, 2002).	9
Figura 3. Sistemas de terrazas de formación sucesiva (a) y de banco (b).	14
Figura 4. Terrazas de formación sucesiva con maguey (a) y de terrazas de banco con pasto, nopal y especies arbóreas (b).	14
Figura 5. Módulo MIAF típico en terrenos con pendiente moderada (>20%) que muestra el arreglo espacial de las tres especies (Cortés et al., 2010).	20
Figura 6. Estrategia de capacitación y divulgación del MIAF (Morales et al., 2007)	24
Figura 7. Ubicación del sitio de estudio en la comunidad Axochío, San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave.	25
Figura 8. Distribución de la precipitación mensual en la zona de estudio.....	27
Figura 9. Frecuencia relativa y acumulada de la precipitación diaria en la zona de estudio.	28
Figura 10. Medio biofísico del municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave.....	31
Figura 11. Localización del área experimental de la comunidad de Axochío, Veracruz Ignacio de la Llave.....	32
Figura 12. Sistema MIAF ubicado dentro del sitio experimental ATF en la comunidad Axochío, San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave.....	33
Figura 13. Localización de los sitios de muestreo en el módulo MIAF y en las parcelas de maíz tradicional y de conservación.....	34
Figura 14. Posición de los puntos de lectura topográfica.	39
Figura 15. Levantamiento de los perfiles longitudinales en el Sistema MIAF.....	40
Figura 16. Distribución de tamaño de agregados en seco.....	43
Figura 17. Distribución de tamaño de agregados en húmedo.....	44
Figura 18. Propiedades químicas dentro de los sistemas de manejo e intervalo de variación.....	47
Figura 19. Propiedades químicas dentro de los sistemas de manejo MIAF e intervalo de variación. ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona del filtro y ZD=zona donadora.....	50

Figura 20. Respiración diaria en muestras de suelos en parcelas a nivel. Muestras Filtro (eje derecho). LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.	51
Figura 21. Actividad metabólica funcional (Determinada mediante placas Biolog EcoPlate) de las comunidades microbianas en las diferentes zonas muestreadas. ZD= zona donadora, ZM= zona media, ZF= zona del filtro, LT= labranza tradicional y LC= labranza de conservación.	53
Figura 22.. Índice de Shannon-Weaver para diversidad metabólica en las zonas de muestreo....	54
Figura 23. Velocidad de infiltración en 180 minutos en los sitios de muestreo. ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona filtro, ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.....	55
Figura 24. Infiltración acumulada del agua en el suelo en los sitios de muestreo. ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZCF=zona cercana al filtro ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.	56
Figura 25. Área formada por los filtros de escurrimiento en el sistema MIAF en el área experimental ATF, Axochío, Veracruz Ignacio de la Llave.	57
Figura 26. Curvas a nivel del sistema MIAF en el campo experimental ATF	58

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Indicadores de la calidad del suelo y su función (tomado de García et al., 2012).	6
Cuadro 2. Coeficientes de escurrimientos, pérdidas de suelo y nutrimentos en tres sistemas de producción.....	22
Cuadro 3. Precipitación anual del sitio experimental en el periodo 2006 a 2016.....	26
Cuadro 4. Precipitación máxima en 24 h para diferentes periodos de retorno.	28
Cuadro 5. Impacto de la precipitación y el escurrimiento en la erosión del suelo en un lote de maíz tradicional de la región de los Tuxtlas, Veracruz (Francisco, 2006).....	29
Cuadro 6. Determinación de parámetros del suelo y topografía del terreno.	35
Cuadro 7. Tamaños de partículas en los diferentes sitios tratamientos del área experimental ATF.	41
Cuadro 8. Tamaños de partículas en los diferentes sitios de muestreo del MIAF.....	41
Cuadro 9. Diámetro medio ponderado de agregados tamizados en secos y húmedo e índice de estabilidad en los tres sistemas de manejo en el módulo experimental ATF, San Andrés Tuxtla, Veracruz.	42
Cuadro 10. Diámetro medio ponderado de agregados secos y húmedos e índice de estabilidad estructural en sistema de manejo MIAF en el módulo experimental ATF, San Andrés Tuxtla, Veracruz.	43
Cuadro 11. Contenido de CC, PMP, HA, Hum y Dap en zonas del MIAF, y en LC y LT.	45
Cuadro 12. Contenido de CC, PMP, HA, Hum y Dap en zonas del MIAF, y en LC y LT.	45
Cuadro 13. Variables químicas en los tres sistemas de labranza.	46
Cuadro 14. Propiedades químicas dentro del sistema de manejo del suelo MIAF.....	49
Cuadro 15. Carbono desprendido a través de la respiración en los tres sistemas de producción.	52
Cuadro 16. Diversidad funcional de las comunidades microbianas en las distintas zonas del sistema MIAF y en los sistemas de labranza tradicional y de conservación presentes en la parcela de estudio.	54
Cuadro 17. Suelo retenido en los filtros de escurrimiento de la parcela MIAF.....	57

I. INTRODUCCIÓN

En México más del 15% del territorio nacional presenta una orografía accidentada con pendientes mayores de 10%, donde se desarrollan actividades productivas y los suelos están expuestos a la degradación física, química y biológica. Debido a la erosión hídrica y eólica a causa del manejo intensivo de maquinaria en las zonas de cultivos, la excesiva fertilización en zonas productivas, la acelerada descomposición de la materia orgánica, el sobrepastoreo, el manejo irracional de los bosques, selvas altas y bajas y las zonas de agostadero (SEMARNAT, 2016).

Los problemas de degradación por erosión reducen los rendimientos de los cultivos, la producción de biomasa, la infiltración, la retención de agua, la calidad de los suelos, los costos de producción y la rentabilidad de los sistemas de producción que impacta en los ingresos de las familias rurales y la producción de alimentos para la población en general (Pimentel *et al.*, 1995). La erosión acelerada de los suelos en terrenos de ladera implica una reducción de la capa arable, fertilidad, contenidos de materia orgánica, actividad microbiológica, capacidad de retención de la humedad y propiedades hidrológicas de los suelos; lo que impacta en su capacidad para producir.

Se han establecido sistemas para atender los problemas de erosión como terrazas de formación sucesiva con el bordo sembrado con maguey, nopal y frutales para reducir los escurrimientos y la erosión de los suelos. Así mismo, se diseñó un sistema de manejo del suelo y vegetación que no solo reduce la erosión y los escurrimientos, sino que mejora la fertilidad de los suelos en pequeñas unidades de producción. Este sistema considera como base la milpa asociada con frutales conocida como milpa intercalada con árboles frutales (MIAF, Cortés *et al.*, 2010).

El MIAF se ha establecido en los estados de Oaxaca, Puebla, Veracruz, Chiapas, Guerrero, estado de México, demostrando su eficiencia para reducir la degradación de los suelos, producir granos básicos para la alimentación y frutas para su comercialización, por ende, mejorando los ingresos familiares (Cortés *et al.*, 2004).

El MIAF, permite un aprovechamiento integral del suelo, agua, luz solar, mano de obra familiar, captura de carbono y la actividad microbiana que es básica para mejorar la calidad de los suelos (Cortés *et al.*, 2010). Es un sistema agrícola de producción diversificada que proviene del patrón tradicional de los pequeños agricultores, diseñado para diversificar e incrementar la producción

agrícola; la combinación entre especies perennes y anuales permiten conformar una estructura vegetal ordenada en espacio y tiempo (Juárez y Fragoso, 2014) y es una defensa que tienen los productores frente a riesgos de clima y mercado (Mendoza *et al.*, 2006).

En el MIAF los árboles frutales junto con los residuos de cosecha tienen la capacidad de estabilizar el suelo y controlar la erosión hídrica, así como la captura de carbono, atributos importantes para el desarrollo del sistema agrícola adaptado a laderas abruptas (Cortés *et al.*, 2010). La descomposición de residuos de cosecha en el suelo es un proceso biológico que involucra la asimilación parcial de carbono (C) por la biomasa del suelo, la recirculación de la mayor parte hacia la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂), y la transformación y polimerización para formar sustancias húmicas (García, 2008). Este proceso de descomposición depende de varios factores: las condiciones ambientales, la composición química inicial de los residuos, los organismos del suelo y el tiempo (Swift *et al.*, 1979). Los microorganismos del suelo juegan un papel central en la retención y liberación de nutrientes en ecosistemas naturales, siendo al mismo tiempo una fuente y almacén de estos (Harte y Kinzing, 1993).

Los efectos del sistema MIAF para mejorar el desarrollo de biodiversidad de los suelos tiene una alta variabilidad espacial y temporal, por lo que se espera que, con el tipo de frutal, el uso de filtros, el manejo del sistema y el tiempo tendrán una influencia en la captura y secuestro de carbono. La descomposición de los residuos que se usan como filtros son fuentes para la captura y secuestro de carbono, así como de la liberación y retención de nutrientes en el suelo. Por esta razón, se propone esta investigación que consiste en cuantificar los cambios en las actividades microbianas del sistema MIAF con diferentes especies y años de establecimiento, comparados con el sistema de labranza tradicional y de conservación.

Este proyecto de investigación propone conocer la dinámica de la biodiversidad en el sistema MIAF en las laderas basadas en los muestreos de suelos para identificar la actividad biológica de microorganismos del suelo para conocer las funciones de descomposición de los residuos, la captura, secuestro de carbono, la liberación y acumulación de materia orgánica, nutrimentos y su relación con la conductividad hidráulica y contenido de humedad del suelo.

II. OBJETIVOS

2.1 General

Evaluar propiedades físicas, químicas, hidrológicas y biológicas en una parcela manejado con sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF).

2.2 Específicos

Comparar las propiedades físicas, químicas, hidrológicas y biológicas en el sistema MIAF y relacionarlas con labranza de conservación y labranza tradicional.

Comparar las propiedades físicas, químicas, hidrológicas y biológicas en el sistema MIAF.

Medir la acumulación de suelo retenido en el MIAF.

III. HIPÓTESIS

El sistema MIAF mejora las características físicas, químicas, hidrológicas y biológicas del suelo en comparación con el sistema tradicional y el de labranza de conservación.

En el sistema MIAF la zona donde se coloca el filtro tiene mejores características físicas, químicas, biológicas e hidrológicas del suelo en comparación con las demás zonas dentro del sistema.

El sistema MIAF retiene suelo.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Suelo

El suelo es un sistema estructurado, heterogéneo y discontinuo, fundamental e irremplazable, desarrollado a partir de una mezcla de materia orgánica (MO), minerales y nutrientes capaces de sostener el crecimiento de los organismos (García *et al.*, 2012).

El desarrollo del suelo implica, a partir del intemperismo, la transformación de los materiales que lo forman, modificando en el tiempo las propiedades químicas, físicas y biológicas. Los cambios físicos se dan por la variación de la temperatura y la humedad del suelo entre el día y la noche y las estaciones del año, provocando el acomodo y la reducción del tamaño de las partículas. La alteración química se da por la separación y agregación de las partículas minerales. Los cambios biológicos se llevan a cabo por la transformación de los componentes del suelo por organismos (microorganismos y plantas), tales como el aporte y mineralización de la MO en el suelo (Ortiz, 2010).

El aprovechar el recurso natural del suelo para la producción de cultivos, la producción de forraje para el ganado y la producción de biomasa (forestal, arbórea y rastrera) ocasiona que con el tiempo existan cambios en las propiedades físicas, químicas, biológicas y por ende en la calidad del suelo. La labranza convencional ocasiona que los contenidos de MO disminuyan por la extracción de la mayoría de los residuos vegetales en la cosecha, lo que incrementa la susceptibilidad de los suelos a los procesos de erosión por efectos de la lluvia y el viento (Jamioy *et al.*, 2015). Se estima que 40% de la superficie agrícola se ha degradado por la desertificación en los últimos 50 años (García *et al.*, 2012).

4.2 Calidad del suelo

La calidad del suelo se puede definir como la capacidad del suelo de funcionar y se asocia con los usos eficientes del agua, nutrientes y plaguicidas y por ende de un incremento en la producción agrícola (Navarro *et al.*, 2008). En la actualidad la definición de la calidad del suelo dependerá del tipo de uso que se le quiere dar, ya sea agrícola, forestal o ambiental. La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo define la calidad del suelo como **"la capacidad de un tipo específico de**

suelo para funcionar, dentro de los límites naturales o de manejo de los ecosistemas, para mantener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar el agua y la calidad del aire y contribuir con la salud humana y su habitación" (Karlen *et al.*, 1997).

La calidad del suelo no se puede determinar directamente, se mide a través de propiedades o indicadores del suelo, estáticos o dinámicos que se evalúan a través del tiempo. Se analizan los cambios temporales en los indicadores del suelo como consecuencia de un cambio en el sistema de aprovechamiento. Las propiedades del suelo son modificadas de acuerdo a las necesidades productivas de diferentes cultivos, por lo que las propiedades químicas del suelo son alteradas con el manejo.

4.2.1 Indicadores de calidad

Aunque no existen criterios universales de evaluación de la calidad del suelo se han tomado indicadores que constituyen una herramienta poderosa para la toma de decisiones (García *et al.*, 2012).

Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, o los procesos que ocurren en él (SQI, 1996). Según Hünne Meyer *et al.* (1997), los indicadores deberían permitir: a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible, b) analizar los posibles impactos antes de una intervención, c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas, y d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Algunos indicadores que pueden ser tomados para medir la calidad del suelo de acuerdo con la función que tienen en el suelo se menciona en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Indicadores de la calidad del suelo y su función (tomado de García *et al.*, 2012).

Indicador	Relación con funciones del suelo
Físicos	
Textura	Retención y transporte de agua y minerales. Erosión del suelo.
Profundidad	Estimación del potencial productivo y de erosión.
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosión.
Capacidad de retención de agua	Relacionado con el contenido de humedad, temperatura y erosión del suelo.
Estabilidad de agregados	Erosión potencial de un suelo y la capacidad de infiltración.
Químicos	
pH	Actividad química y biológica. Existe restricción para el crecimiento de plantas y la actividad microbiana.
Materia orgánica (C y N)	Fertilidad del suelo, estabilidad y grado de erosión. Es un factor del potencial de erosión.
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y de las plantas. Igual que el pH, hay límites para el crecimiento de plantas y la actividad microbiana.
N, P ,K (Extraíbles)	Disponibilidad de nutrimentos para plantas. Indicador del potencial productivo y la calidad ambiental.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Relacionado con la fertilidad y el potencial productivo de un suelo.
Biológicos	
Biomasa microbiana (C y N)	Potencial catalizador microbiano y determina las tasas de reciclado de C y N.
N potencial mineralizable	Productividad del suelo y aporte en los contenidos de N.
Respiración edáfica	Actividad microbiana
Número de lombrices	Relacionado con la actividad microbiológica

4.2.1.1 Parámetros químicos

Entre los indicadores químicos para evaluar la calidad del suelo son el pH, el carbono orgánico, el Ca y Mg intercambiables, la acidez intercambiable, el contenido de Fe, la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico. Estas propiedades determinan en gran medida la fertilidad del suelo y su capacidad para el desarrollo de algunas plantas y microorganismos (García *et al.*, 2012).

4.2.1.2 Carbono (C)

El carbono es el elemento más importante en la estructura celular de los seres vivos, porque está presente en los tejidos vegetales y células microbianas, alrededor del 40 al 50% del peso seco, y en los procesos de transformación, la fuente principal de carbono en los ecosistemas es el CO₂. El CO₂ es transformado en carbono orgánico por los organismos que realizan fotosíntesis, que después estos elementos son aprovechados por los organismos y microorganismos heterótrofos (Alexander, 1980).

El ciclo del carbono comprende procesos principales como la fotosíntesis, la respiración vegetal, animal y microbiana, y la actividad de los microorganismos autotróficos (Alexander, 1980).

Los seres vivos son los componentes involucrados en los procesos del ciclo del carbono, al tomar el CO₂ de la atmosfera para llevar a cabo su metabolismo y conducirlo por las cadenas tróficas hasta que este regresa al suelo para ser degradado por los microorganismos saprobios. Las plantas realizan el proceso de fotosíntesis y transforman el CO₂ en carbohidratos, parte del CO₂ es regresado a la atmosfera; sin embargo, una cantidad importante es fijada en los tejidos vegetales (Lal, 2005).

4.2.1.3 Nitrógeno (N)

El ciclo del nitrógeno es otro aspecto importante en los procesos de descomposición de la MO en los suelos, ya que en gran medida este nutriente determina la capacidad para que las plantas se puedan establecer en los suelos. El 99% del N combinado en el suelo está presente en la materia orgánica. Una proporción de este elemento presente en el suelo se encuentra en formas orgánicas y su distribución coincide con la de la MO en el perfil del suelo (Thompson, 1983). El N es el

componente que se encuentra en mayor proporción en la atmosfera, constituyendo aproximadamente el 78% de esta (Pacheco *et al.*, 2002).

El ciclo del N involucra procesos que determinan la disponibilidad, fijación o su inmovilización de este elemento en los sistemas naturales. La Figura 1 es un esquema de estos principales procesos que componen el ciclo del N (Bernot *et al.*, 2010) que son: amonificación, mineralización, nitrificación, reducción de nitrato, inmovilización, desnitrificación, fijación de N_2 no simbiótica y la fijación simbiótica de N_2 .

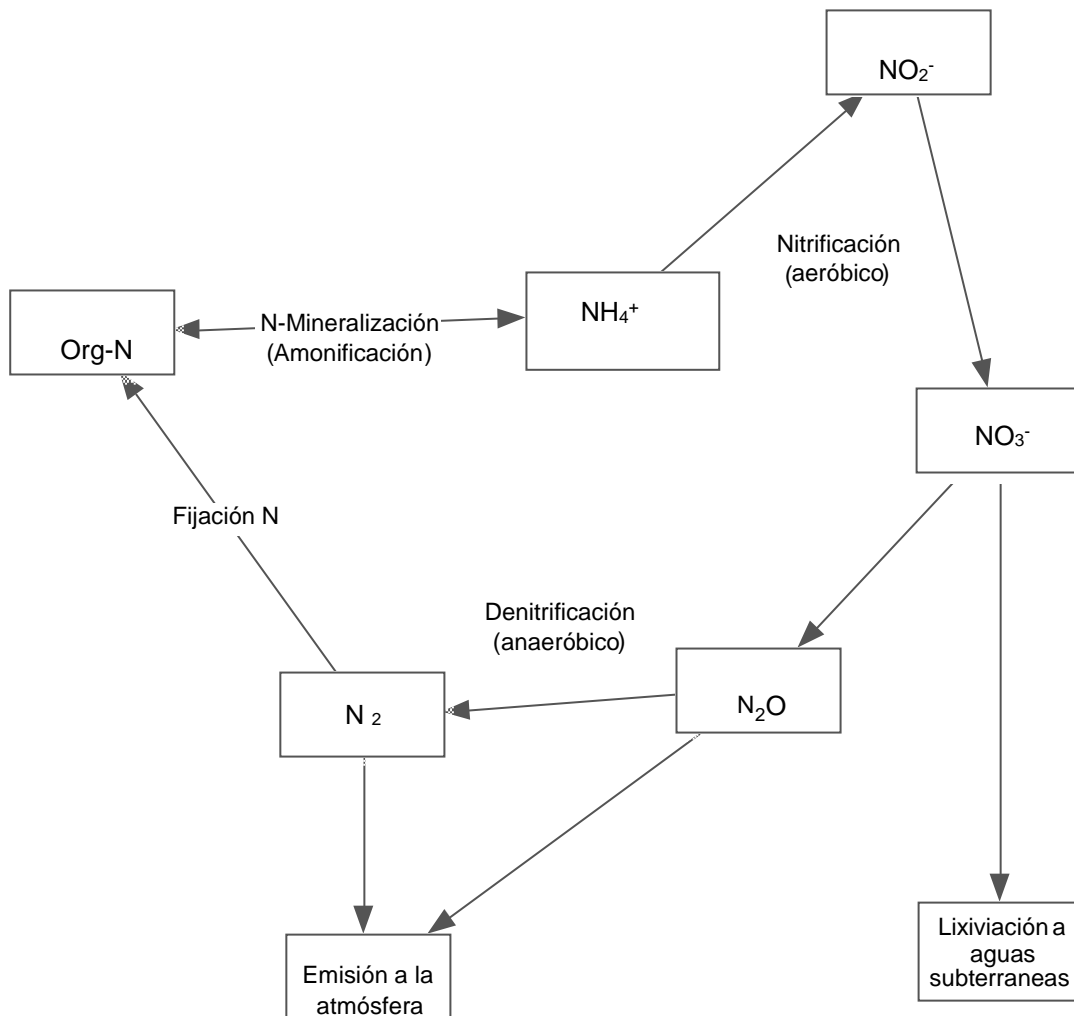


Figura 1. Ciclo del N. Fuente: Bernot *et al.*, (2010).

4.2.1.4 Fósforo (P)

El P es un elemento esencial en los seres vivos. Las formas más abundantes de P en los sistemas son los ésteres de fosfato y ácidos nucleicos. El fosfato forma parte de esencial de la molécula de ATP y también es constituyente de los ácidos nucleicos de RNA y DNA, de azúcares fosfatados. El P no es un elemento abundante en los ecosistemas y muchas veces en un factor limitante para el crecimiento vegetal y microbiano por su presencia en formas no disponibles. Los microorganismos del suelo transforman el P inorgánico a orgánico; de ahí su importancia para los microorganismos y para las plantas que necesitan de este elemento. En la Figura 2 se observa un esquema del ciclo de P donde se menciona que las plantas y los animales son los que se encargan de transformar en las formas solubles a este elemento, además de que es un elemento limitado en el medio, y se prevé que se tendrán problemas en un futuro por su alta explotación de sus reservorios (Atlas y Bartha, 2002).

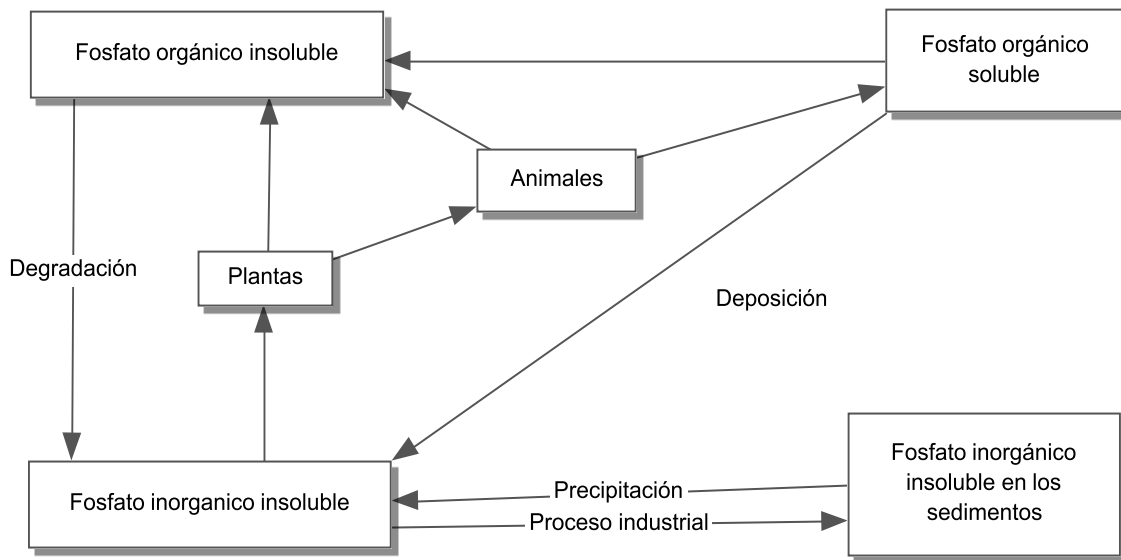


Figura 2. Esquema de ciclo de P. Fuente (Atlas y Bartha, 2002).

4.2.1.5 Materia orgánica (MO)

La MO del suelo contiene elementos esenciales para las plantas como el N, Mg, Ca, S y diversos micronutrientes (Graetz, 1997). La MO es el pilar en la calidad del suelo. Del contenido y calidad de ésta, dependen las tasas de mineralización de la MO en el suelo (Álvarez, 2005).

La MO en el suelo pasa por dos procesos. El primero, la humificación donde actúan los microorganismos dando como resultado el humus. El segundo, la mineralización donde otros microorganismos actúan sobre el humus liberando minerales que absorberán las plantas pasando por la amonificación y nitrificación. El humus influye en las propiedades físicas formando agregados, favorece la penetración y retención del agua, el intercambio gaseoso. En cuanto a las propiedades químicas, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, la reserva de nutrientes y la capacidad tampón. En las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, desarrollo de la cubierta vegetal y sirve de alimento para microorganismos (Julca *et al.*, 2006).

Magdoff y Van (2009) indican que la MO es pieza importante en la conservación del suelo. La MO influye directamente en la estructura del suelo, en la formación de agregados y en la capacidad de flujo de aire y agua dentro del suelo. Las malas prácticas agrícolas actuales disminuyen la cantidad de MO en el suelo e incrementan el potencial de erosión.

4.2.2 Parámetros físicos

Las propiedades físicas que se utilizan para evaluar la calidad del suelo, son las relacionadas con disponibilidad de agua, temperatura, además de las que ayudan a medir el grado de resistencia que tiene un suelo a la erosión. Entre estas propiedades están la textura, la profundidad, infiltración, la densidad aparente, la capacidad de retención de humedad y la estabilidad de los agregados (Acevedo *et al.*, 2005).

4.2.2.1 Agregados del suelo

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual sus partículas arena, limo y arcilla, se unen formando unidades secundarias, agregados, debido a la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes también de la actividad microbiana (Soil Science Society of America, 1997).

La estabilidad de agregados se considera un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Gabioud, 2011). Suelos con buena estructura favorecen el flujo de aire, de agua y de nutrientes a través de los espacios porosos, y ofrecen una resistencia natural a los implementos utilizados en las actividades agrícolas y al impacto de la lluvia y del viento (Meza y Geissert, 2003).

Los agregados del suelo están sujetos a múltiples fuerzas disruptivas relacionadas con la labranza, el tráfico de vehículos y animales, la abrasión por el flujo del agua y del viento, el golpeteo de las gotas de lluvia y los ciclos de humedecimiento y secado (Collis-George y Figueroa, 1984).

4.2.3 Parámetros biológicos

Entre las propiedades biológicas utilizadas para evaluar la calidad del suelo están la biomasa microbiana, su contenido de C y N y la respiración edáfica. Estos parámetros determinan las tasas de mineralización de la MO y la disponibilidad de algunos nutrientes.

Como indicador de calidad del suelo se tienen a los microorganismos. Estos se adaptan a las diferentes condiciones ambientales y las características del suelo, la actividad, cantidad, diversidad estructural y funcional influye en gran parte en los procesos bioquímicos del suelo y en su productividad (Galazka y Furtak, 2019).

4.3 Degradación del suelo

La degradación del suelo implica la reducción de su capacidad para producir bienes, la productividad agrícola, el mantenimiento de la calidad del agua, el aire y la capacidad de los ecosistemas de producir bienes y servicios (Lal, 1998 y FAO). Los procesos de degradación de los suelos son causados por actividades agrícolas, sobrepastoreo, deforestación, urbanización y actividades agropecuarias. La degradación puede ser químicos, físicos, biológicos, de erosión hídrica o eólica y se presentan en diferentes niveles: ligero, moderado, fuerte y extremo (SEMARNART y CP, 2003).

La erosión es el proceso que implica el desprendimiento, transporte y deposición del suelo, cuando existe erosión del suelo existe la degradación y viceversa (Lal, 2001). En general, la pérdida de suelo por erosión repercute en las propiedades del suelo, como la fertilidad, la formación de agregados del suelo y disminuye la profundidad de enraizamiento de las plantas, entre otros factores (Lal, 2003). La erosión del suelo provoca la reducción de la capa superficial, la remoción y arrastres de nutrimentos y MO, la disminución de la tasa de infiltración y retención de agua (SEMARNAT, 2012).

A nivel nacional, el 45% (89 millones de ha) del territorio presenta problemas de degradación de suelos; destacando la degradación química con 18% (36 millones de ha), la erosión hídrica 12% (24 millones de ha), la erosión eólica 9% (18 millones de ha) y la degradación física 6% (12 millones de ha) (SEMANART, 2012). La degradación de los suelos impacta en la pérdida de nutrientes, disminución de la capacidad de retención del agua, modificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo y la pérdida física del material del suelo y de la capa arable.

El 76% de la superficie nacional tiene algún grado de afectación por erosión hídrica, que corresponde a 6.79% con un grado de erosión extrema, 5.79% fuerte, 26.37% moderada y 37.06% leve (González *et al.* 2019). Estudios han reportado que 57.96% del territorio nacional no tiene erosión ($0-5 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$), 10.95% tiene erosión ligera ($5-10 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$), 20.48% reporta erosión moderada ($10-50 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$), 7.83% una erosión alta ($50-200 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) y el resto pérdidas mayores a $200 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ (SEMANART-UACH, 2003). Bolaños *et al.* (2016) reportaron que el 76% de la superficie nacional tiene algún grado de afectación por erosión hídrica, que considera 6.79% con un grado de erosión extrema, el 5.79% fuerte, 26.37% moderada y 37.06% leve. Esta información se generó a partir de modelos predictivos de la erosión del suelo y reflejan las tasas de erosión del suelo a partir de parámetros que contrasta con la erosión actual que fue identificada en el momento del levantamiento.

Por otro lado, INEGI (2014a y 2014b) reporta que la erosión hídrica originada por lluvia, granizadas y por los escurrimientos (en forma laminar, torrentes, arroyadas y crecidas de ríos) cubre el 52.8% del territorio nacional. La superficie erosionada en grado extremo cubre el 0.25% del país, fuerte el 3.12%, moderado el 18.17% y leve 31.32%. En relación con las formas de erosión reportan que las cárcavas cubren el 1.99%, dunas 0.26%, laminar 47.51%, montículos 0.40% y surcos 3.36%.

Con los datos que se tienen del grado de erosión en el país, es importante continuar con las técnicas de conservación de suelos de los que se han obtenido resultados favorables.

4.4 Conservación de suelo

La conservación son los métodos apropiados del manejo de la tierra que ayudan a revertir la degradación del recurso suelo, agua y biológicos, para aumentar la producción de cultivo y

ganadería. También se consideran aquellas actividades que mantienen o aumentan la capacidad productiva de la tierra en áreas afectadas por o propensas a la degradación (FAO, 2019). Las acciones consideran la prevención o la reducción de la erosión del suelo, consolidación y la salinidad; la conservación o drenaje del suelo; el mantenimiento o mejoramiento de la fertilidad del suelo.

Las acciones de conservación en general se han agrupado en prácticas agronómicas, vegetativas, mecánicas o estructurales y de gestión para controlar la degradación de los suelos y para aumentar la productividad de la tierra.

En México se han implementado acciones como: manejo de la vegetación como cultivos al contorno, rotación de cultivos, abonos verdes, barreras vivas, reforestaciones y revegetaciones; manejo agronómico como preparación del suelo (sistema de laboreo), encalados, mejoradores de suelo, uso de abonos orgánicos, fertilización y manejo de residuos de cosecha; mecánicas, como nivelación de tierras, surcado al contorno, terrazas de diferentes tipos, zanjas de desviación y obras de control de cárcavas y de almacenamiento del agua de lluvia que en conjunto se han implementado para la conservación del suelo y del agua (SAGARPA, SEMANART y CONAGUA).

Destacan las acciones de conservación del suelo encaminadas al control de la erosión en terrenos de laderas; en las cuales, domina la erosión laminar y en pequeños surcos. Esta puede ser controlada con el manejo de la vegetación y el movimiento de suelo para conformar pequeñas terrazas. Las acciones de conservación del suelo y agua para reducir la erosión han sido mediante el establecimiento de terrazas de formación sucesiva (Figura 3a) y terrazas de banco (Figura 3b); especialmente en el altiplano nacional.

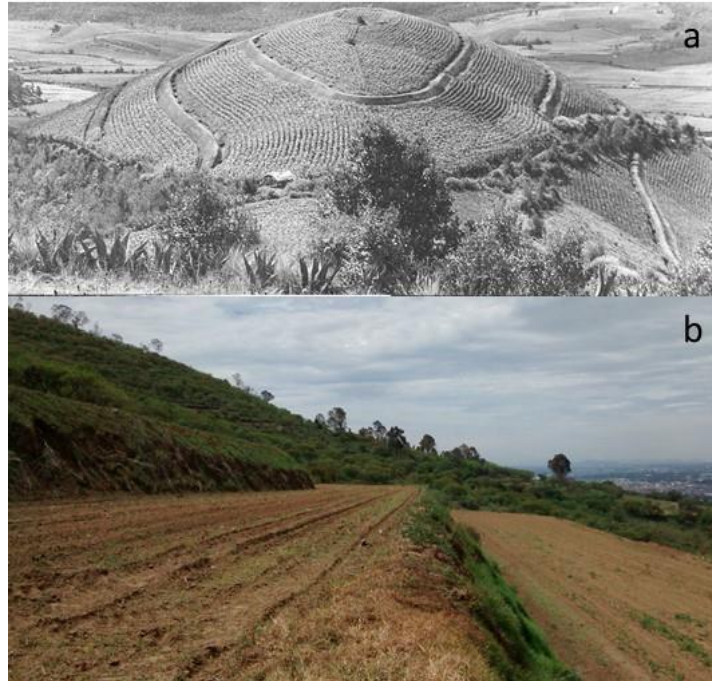


Figura 3. Sistemas de terrazas de formación sucesiva (a) y de banco (b).

Las terrazas de formación sucesiva compuesta por zanja bordo, requieren de mantenimiento para conservar su sección transversal de acuerdo con las especificaciones de diseño y algunas veces en la corona del bordo se colocan especies de maguey, nopal o frutales para fortalecerlos(Figura 4a). Las terrazas de banco presentan problemas en la estabilidad de los taludes por lo que se empastan y se plantan diferentes especies como nopal, frutales, agaves para darle estabilidad al bancal (Figura 4b).



Figura 4. Terrazas de formación sucesiva con maguey (a) y de terrazas de banco con pasto, nopal y especies arbóreas (b).

La SAGARPA (2015) para complementar las acciones de conservación de suelos, recomienda y apoya el uso de la vegetación para recuperar terrenos degradados, proteger los taludes de las cárcavas, manejo de agostaderos y protección de terrazas para evitar su degradación. Entre las prácticas vegetativas señaladas se consideran las siguientes:

- **Reforestación con especies nativas.** La reforestación o revegetación se recomienda para la regeneración de áreas altamente o totalmente deforestadas, con la plantación de especies nativas a fin de reducir la erosión hídrica, estabilizar terraplenes de bordos o terrazas. Las reforestaciones con plantas nativas tienen mayor adaptabilidad y rápida colonización que una especie introducida y contribuye a la conservación de la diversidad genética de la región, y preservar la identidad del sitio. Este tipo de reforestaciones se pueden acompañar de zanja de infiltración, tipo trinchera y terraceo.
- **Empastado de taludes.** Método para estabilizar taludes en cárcavas o de terrazas de banco que se basa en el establecimiento de pastos que por su densidad del sistema radicular y la capacidad de cobertura vegetal del terreno protegen los taludes contra la erosión hídrica, ya que disminuye la velocidad de escurrimiento, aumenta la rugosidad, da firmeza y estabilidad al suelo del talud. El empastado se efectúa al inicio de la temporada de lluvias plantando estolones o sembrando semillas sobre una capa de suelo orgánico. El zacate Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pasto Rhodes (*Chloris gayana*), pasto Llorón (*Eragrostis curvula*) y pasto Green Panic (*Panicum clandestinum*), son los más recomendables para este propósito, ya que por sus características de reproducción y a su sistema radical han demostrado gran eficiencia para disminuir la pérdida de suelo.
- **Repastización de agostaderos o resiembra de pasto.** Consiste en el establecimiento de especies forrajeras perennes por la producción ganadera, en terrenos no aptos para los cultivos anuales o áreas desprovistas de vegetación, para proteger a los suelos contra la erosión hídrica o eólica, reducir la velocidad del agua del flujo superficial y producir forraje para la alimentación del ganado. El empastado se realizará con especies de valor nutricional, palatables al ganado, de fácil adaptación, rápido crecimiento y tolerancia al pisoteo y esta se efectuará al inicio de la temporada de lluvias.

El uso de la vegetación como sistemas de bioingeniería y barreras vivas ha tomado gran relevancia para el control de la erosión ya que el follaje intercepta la lluvia, reduce su poder erosivo y proporciona humedad a la planta para la evapotranspiración. Los tallos y las hojas, reducen la velocidad del flujo superficial y aumentan la infiltración. Las raíces penetran en el suelo abren la superficie y favorecen la infiltración; además, el agua que es absorbida por las raíces, disminuye la presión capilar y aumenta la estructura del suelo.

La función mecánica de la vegetación para controlar la erosión radica en que retienen las partículas del suelo, aumentan su resistencia a la remoción por el escurrimiento superficial, ofrecen anclaje al penetrar al estrato profundo y son contrafuerte para evitar el transporte de partículas. La vegetación aporta material orgánico y mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

La vegetación como barreras vivas se han utilizado para el control de la erosión en laderas, reforzar las terrazas de formación sucesiva, proteger los taludes de terrazas de banco, recuperar zonas con movimiento en masa, proteger taludes en carreteras, corrientes y control de la erosión en los taludes, lecho y en la parte alta de la cárcava (erosión remontante). Las barreras vivas están conformadas por especies arbóreas, arbustivas, herbáceas y se combinan con bordos de tierra, zanjas o residuos de vegetación y de cosecha.

Las especies que se utilizan son palo Brasil (*Dracaena fragrans*), colorín (*Erythrina americana*), bambú (*Bambusa vulgaris*), zacate vetiver (*Vetiveria zizanioides*), cocoite (*Gliricidia sepeuim*), nopal (*Opuntia ficus-indica*), maguey (*Agave salmiana*) y frutales de diferentes géneros y especies; como tejocote, manzana, durazno, entre otras; que al plantarse en el suelo desarrollan raíces y conforman una barrera viva.

De acuerdo con el INIFAP¹ las barreras vivas (terrazas de muro vivo) son especies de plantas que se establecen entre los cultivos en forma perpendicular a la pendiente, ya sea en curvas de nivel o en hileras, las cuales tienen la función de reducir la velocidad de escorrentía, provocan la sedimentación y la infiltración; con esto se disminuye la degradación del suelo y se prolonga el

¹ <http://www.campopotosino.gob.mx/modulos/tecnologiasdesc.php?id=111>

uso de la tierra, al mismo tiempo da oportunidad a que la vegetación secundaria (“acahual”) se recupere de la deforestación, reduciendo así el ciclo nómada de la agricultura de roza-tumba-quema (RTQ). Las principales ventajas de las barreras vivas en las laderas son:

- Es una práctica de conservación de suelo aplicable a todos los sistemas agrícolas de ladera.
- Retiene la tierra erosionada.
- Soporta flujos de agua relativamente altos.
- Proporcionan mayor eficiencia en el control del escurrimiento superficial por la acción filtrante de la vegetación, misma que provoca la acumulación de tierra deslavada, de sedimentos y la formación de capas orgánicas.
- La capa orgánica (mulch) formada reduce la velocidad de escurrimiento, favorece la filtración de agua al subsuelo y el suelo almacena mayor humedad, de tal forma que se mejoran las condiciones para los cultivos.
- Se disminuyen las pérdidas de suelo, agua y nutrientes.
- Son sencillas, de simplicidad en el diseño y facilidad de mantenimiento.
- Son económicas y de fácil adopción por parte de los productores.

4.4.1 Terrazas de muro vivo

Las terrazas de muro vivo son una técnica que permite la disminución de la pérdida de suelo por erosión en terrenos agrícolas con pendiente pronunciada. La técnica consiste en establecer la vegetación (árboles, frutales, pastos) al contorno para retener el suelo removido, disminuir la pendiente, reducir los escurrimientos, incrementar los contenidos de MO, la estructura del suelo y la infiltración de agua en el suelo.

Turrent *et al.*, (1998) encontraron que existe un incremento en los rendimientos en la producción de maíz en parcelas de laderas con pendiente de 6% con sistemas de terrazas de muro vivo y que el contenido de arcillas en la parte donadora hacia la zona receptoras de la terraza disminuyó 4%.

Uribe *et al.* (2002) evaluaron la labranza tradicional, terrazas de muro vivo con setos a 1 m de desnivel y tracción mecánica, terrazas de muro vivo con setos a 1 m de desnivel y tracción animal y labranza de conservación. Reportaron pérdidas de suelo promedio de 199, 13, 3 y 1 t ha⁻¹ año⁻¹ y escurrimiento superficial de 31, 16, 15 y 17% de la lluvia, respectivamente; para un periodo de

1995 a 1999 en los Tuxtlas, Veracruz. La pérdida promedio de nitratos en los tratamientos con terrazas fue 23 kg ha^{-1} , debido tal vez al aporte de N por la descomposición de los residuos de la poda de los setos que se colocaron en la superficie del suelo. La mayor pérdida de bases se registró con labranza tradicional ($19, 21$ y 25 kg ha^{-1} de K, Ca y Mg, respectivamente). El costo ecológico fue $40.0, 3.0, 0.5$ y 0.2 kg de suelo perdido por cada kg de maíz producido, para el mismo orden de los tratamientos.

Corrales (2001), evaluó y comparó el efecto de las especies de barreras vivas *Gliricidia sepium*, *Cajanus cajan* y *Vetiveria* sobre el control de erosión. Se establecieron barreras vivas de madero negro, gandul y vetiver con cultivo en contorno de maíz en primera y frijol en postrera y un tratamiento control que consistía en cultivo en contorno de maíz en primera y frijol en postrera sin barrera viva. Ese estudio se realizó en la finca San Marcos, localizada en el Municipio de Diría en Nicaragua. Las prácticas de barreras vivas lograron reducir las pérdidas de suelo y agua de 41.11% y 7.6% respectivamente con relación al tratamiento control. Las menores pérdidas de suelo y agua se obtuvieron con las barreras con $55.86 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y 158.8 mm .

Pérez *et al.* (2004) mencionan que, en cultivos de ladera, los sistemas de conservación de suelos de terrazas con barreras vivas y labranza de conservación, existe una disminución en los coeficientes de escurrimientos con la aplicación de estas técnicas en laderas con 15% de pendiente. Además, la pérdida de suelo disminuyó de 199 t ha^{-1} con sistemas de producción tradicionales a 1 t ha^{-1} con el sistema de terrazas de muro vivo.

Francisco *et al.* (2010) evaluaron los coeficientes de escurrimientos medios en terrazas de muro vivo con tracción animal (TMV), labranza de conservación y labranza tradicional (LT) $0.15, 0.15$ y 0.30 respectivamente. El sistema TMV mostró valores de curva numérica (CN) similares a LC, desde 78 a 82 ; en contraste, el sistema LT se asoció con valores de CN mayores del orden de 86 a 91 , lo que indica que las barreras vivas y el uso de residuos de cosecha en labranza de conservación fueron más eficientes para reducir los escurrimientos superficiales y aumentar la infiltración del agua en el suelo.

Thangata y Hildebrand (2012) reportaron que la adopción de las tecnologías de agroforestería en los trópicos aumenta la producción de biomasa, el mejoramiento de la fertilidad y almacenes de carbono en los suelos. En 40 fincas simulieron escenarios de secuestro de carbono como (a) línea

base, (b) agroforestería con incentivos de créditos de carbono y (c) agroforestería con incentivos de crédito de carbono y opciones de venta de semilla y encontraron que; en el escenario (a) el C secuestrado fue de 103 t año⁻¹, de las cuales el 12% corresponde al C del suelo; en el escenario (b) el C secuestrado promedio fue de 239 t de los cuales el 62% fue contribución de la agroforestería y en el escenario (c) la captura de C promedio fue de 393 t con 39% de la agroforestería.

Kaur *et al.*, (2000) analizaron el papel que juega la agroforestería en mejorar los contenidos de MO del suelo, la actividad microbiana y el N disponible como un manejo efectivo para mejorar la fertilidad de suelos alcalinos. El sistema analizado fue agrosilvocultural (acacia y eucalipto) y encontraron una biomasa microbiana de 133.80–153.40 µg g⁻¹ de suelo que corresponde a 42% y 13% de C y N en comparación con un monocultivo. La biomasa microbiana inmovilizó de 2.32 a 2.57% del carbono del suelo y de 4.08 a 4.48% del nitrógeno del suelo en el sistema basado en árboles. El carbono del suelo se incrementó de 11% a 52% debido a la integración de los árboles en el sistema después de seis a siete años y tuvieron influencia en la producción de CO₂, la actividad respiratoria específica de la biomasa y la tasa de mineralización del N. Albrecht y Kandji (2003) reportaron la importancia de la agroforestería como una agricultura sustentable importante en el cambio climático, ya que analizaron el almacenamiento de carbono un sistema agroforestal tropical y la reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera. El C secuestrado fue de 12 y 228 t ha⁻¹ con un promedio de 95 t ha⁻¹.

4.4.2 Sistema agrícola milpa intercalada con árboles frutales (MIAF)

El sistema MIAF es un sistema agroforestal de cultivo intercalado, constituido por tres especies, el árbol frutal (epicultivo), el maíz (mesocultivo) y frijol u otra especie comestible, de preferencia leguminosa (sotocultivo); en intensa interacción agronómica (Turrent *et al.*, 2017). El propósito de esta tecnología es la producción de maíz y frijol como elementos estratégicos para la seguridad alimentaria de las familias rurales, así como la producción de frutales con la finalidad de incrementar de manera significativa el ingreso neto familiar.

El MIAF es una técnica del tipo de muro vivo que consiste en establecer árboles frutales al contorno asociados con cultivos anuales y con filtros vivos que se forman por residuos orgánicos en la parte aguas arriba de la barrera viva. Los objetivos son incrementar la productividad de la tierra, disminuir la pendiente, incrementar los contenidos de MO, mejorar la estructura y la

infiltración de agua en el suelo, reducir la emisión de CO₂ a la atmósfera, controlar la erosión hídrica, lograr un uso más eficiente del agua de lluvia en el corto, mediano y largo plazo; todo esto de manera sustentable ante el cambio climático inminente (Cortés *et al.*, 2012; Cortés y Turrent, 2012).

El sistema MIAF, agrónomicamente, es un cultivo múltiple que incluye al maíz, una o dos leguminosas comestibles, entre ellas el frijol, u otra especie anual y comercial de porte bajo, y árboles frutales. El MIAF se maneja bajo el sistema de cultivos intercalados en franjas lo suficientemente anchas para permitir el cultivo independiente, pero lo suficiente angosta para que las especies interaccionen agrónomicamente (Cortés *et al.*, 2012). Las medidas para un módulo con un terreno de pendiente >20% consiste en una franja de tierra de labor de 14.4 m de ancho, que equivalen a 18 surcos con una anchura del surco de 0.80 m para maíz y frijol y árboles frutales que ocupan una serie de seis surcos (Cortés y Turrent, 2012; Figura 5).

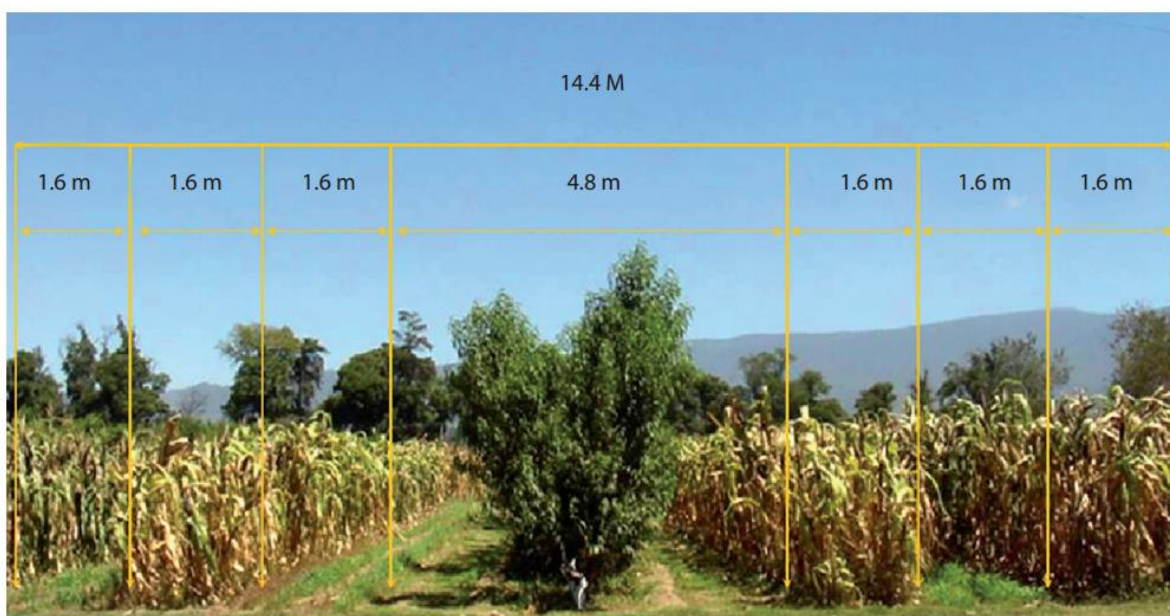


Figura 5. Módulo MIAF típico en terrenos con pendiente moderada (>20%) que muestra el arreglo espacial de las tres especies (Cortés *et al.*, 2010).

Aunado a lo anterior, es una tecnología económicamente y socialmente viable (León *et al.*, 2005), además de ser eficiente para la producción de granos básicos y con ello lograr la seguridad alimentaria sustentable de las familias rurales (Cortés *et al.*, 2004).

Esta tecnología demostró en su puesta en marcha en la zona mazateca de Oaxaca ser rentable. La mayor rentabilidad la proporcionan los árboles de vivero local y en siembra directa en campo. Esta tecnología incrementa la producción de alimentos básicos, ofrece fuentes de ingresos en efectivo con la venta de frutos, conserva el suelo y la humedad e incrementa la captura de carbono en el medio ambiente, mostrando así ser sustentable. Además, aporta beneficios concretos a la familia del productor. Aumenta el rendimiento de maíz de 0.7 a 1.2 t ha⁻¹ y de 2.5 t ha⁻¹ de durazno a partir del cuarto año y al décimo quinto año; además de ofrecer empleos a 50 jornales ha⁻¹ (López *et al.*, 2008).

Las diferencias fisiológicas y morfológicas contribuyen a un uso eficiente de los recursos naturales ambientales disponibles. En el análisis del efecto del arreglo espacial del maíz y el frijol en el sistema MIAF, en la distribución de raíces, de la radiación fotosintética activa en el dosel de las plantas y la producción de biomasa de ambas especies, en la zona experimental del INIFAP, la distribución de los cultivos en el sistema MMFF (dos surcos de maíz y dos surcos de frijol), incrementó su biomasa y el rendimiento del grano, permitió una distribución lateral de las raíces del 18% y el cultivo de exploración fue 15% mayor que un cultivo simple (Albino *et al.*, 2015).

Albino *et al.* (2016) realizaron un estudio para determinar la mejor dosis de fertilizante y densidad de plantación para cultivos de maíz H-155 y frijol negro arbustivo 8025 en tres arreglos topológicos: 1) cultivo simple de maíz y frijol (CSMF), 2) intercalados en dos surcos alternos (MMFF), 3) intercalados en un surco alterno (MFMF). La mayor ganancia se obtuvo en MMFF (\$33 942) con la combinación 34-0-40 kg de N-P-K y 29 500 plantas en 0.5 ha de maíz y 11-0-30 kg de N-P-K y 80 000 plantas en 0.5 ha de frijol. La mayor eficiencia relativa de la tierra (ERT), en el sistema MFMF fue 1.27 que refleja un mayor rendimiento con el mismo nivel de insumos al arreglo topológico que se le da al cultivo de maíz y frijol.

Salinas (2015) reportó la caracterización topográfica y las propiedades físicas y químicas de un terreno de ladera manejado por cinco años con el sistema MIAF en la región Mixe del estado de Oaxaca. La topografía de la parcela se modificó por la presencia de los árboles frutales colocados en curvas a nivel asociados con un filtro de residuos de cosecha, conformando terrazas con la acumulación de suelo erosionado que variaron de 1.75, 0.75 y 0.74 m³ por metro lineal; generando así unos bordos denominados como terrazas. Las propiedades físicas de los suelos como densidad aparente, humedad al momento del muestreo y partículas del suelo entre la zona donadora y

receptora de sedimentos del sistema mostraron algunas diferencias significativas. Las características químicas del suelo se modificaron mostrando un gradiente de concentración por sitio de muestreo (zona donadora y receptora), hallándose diferencia de 0.06 %, 28.81 mg kg⁻¹, 0.27 (C mol (+) kg⁻¹), 27.25, 0.80, y 0.60 mg kg⁻¹ en N, P, K, Fe, Cu, y Zn, respectivamente.

Camas *et al.* (2012) evaluaron los escurrimientos y producción de sedimentos y pérdidas de N y P en los sistemas: maíz en labranza de conservación (MLC); maíz en barreras de muro vivo (MBMV) y milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). Los coeficientes de escurrimiento y la degradación específica de suelo fueron similares en los sistemas MIAF (0.12, 5.8 t ha⁻¹) y MBMV (0.13, 6.3 t ha⁻¹) comparado con MLC (0.19, 16.8 t ha⁻¹), respectivamente. En los sistemas con muros de barreras vivas y frutales los coeficientes de escurrimientos y las pérdidas de suelo fueron menores que en el MLC. En cuanto a los nutrientes se determinó una mayor pérdida de nitratos en el sistema MBMV, posiblemente debido al aporte de N por los residuos de la poda de *Gliricidia sepium*. Respecto al P, el sistema MIAF presentó una pérdida mayor, atribuyéndose a la fertilización fosfórica anual que se realizó a los árboles de guayaba durante tres años (Cuadro 2).

Cuadro 2. Coeficientes de escurrimientos, pérdidas de suelo y nutrimentos en tres sistemas de producción.

Tratamiento	Coeficiente de escurrimiento	Pérdida de suelo t ha ⁻¹	Pérdidas de nutrimentos (mg kg ⁻¹)		
			NO ₃	NO ₂	Fósforo
Maíz asociado con árboles frutales (MIAF)	0.12	1.9	13.0	6.4	15.4
Maíz en barrera de muro vivo (MBV)	0.13	1.2	31.9	5.4	10.7
Maíz labranza de conservación (MLC)	0.18	2.5	17.3	5.9	21.8

Juárez *et al.* (2008) reportaron que utilizando acolchados orgánicos (mulch), de paja de frijol y rastrojos de maíz, sobre la franja de suelo que ocupan las especies perennes, a razón de 10 cm de espesor por año, después de seis años se logró un incremento de los contenidos de MO en el suelo; pasando de 0.71 a 1.74% en los primeros 30 cm. Este incremento es muy importante ya que la mayoría de los suelos agrícolas de Puebla tienen un pobre contenido de MO. En Oaxaca, el contenido de MO registrado en la base de los árboles frutales osciló entre 5.3 y 12.6%, similar al contenido en los suelos de sus áreas de bosque. Esta información afirma el incremento de los

contenidos de MO en los terrenos cuando se dejan residuos de cosecha en toda la superficie del terreno o en filtros de residuos aguas arriba de los árboles frutales.

El sistema MIAF se ha desarrollado en campo con la participación de instituciones (Colegio de Postgraduados, INIFAP, Gobierno federal, estatal y municipal), Organizaciones de productores y productores quienes en conjunto han establecido y evaluado parcelas en diferentes regiones del país; destacando el Proyecto de Manejo de Suelos de Ladera (PMSL) (Cortés *et al.*, 2004; Cortés *et al.*, 2010; Mendoza *et al.*, 2006 y Morales *et al.*, 2007).

A partir de estos esfuerzos, se elaboraron manuales técnicos y se realizaron sistemas de capacitación y divulgación del sistema de producción MIAF. Estos últimos que consistían en analizar las etapas de trabajo como el establecimiento de escuelas de campo, demostraciones de campo, giras de intercambio, uso de videos, platicas y cursos, asesoría técnica y fortalecimiento organizativo para la promoción y escalamiento de esta tecnología. Lo anterior fue propuesto en el “Manual Técnico de Capacitación y Divulgación de la Tecnología de Maíz Intercalado con Árboles Frutales” (Morales *et al.*, 2007).

En esta estrategia participan los actores como los coordinadores de escuelas de campo, productor-promotor y técnicos de campo. Las demandas existentes son requerimientos, el apoyo institucional, participación de grupos de trabajo, normas de operaciones de los programas de gobierno y de las escuelas de campo (Figura 6).

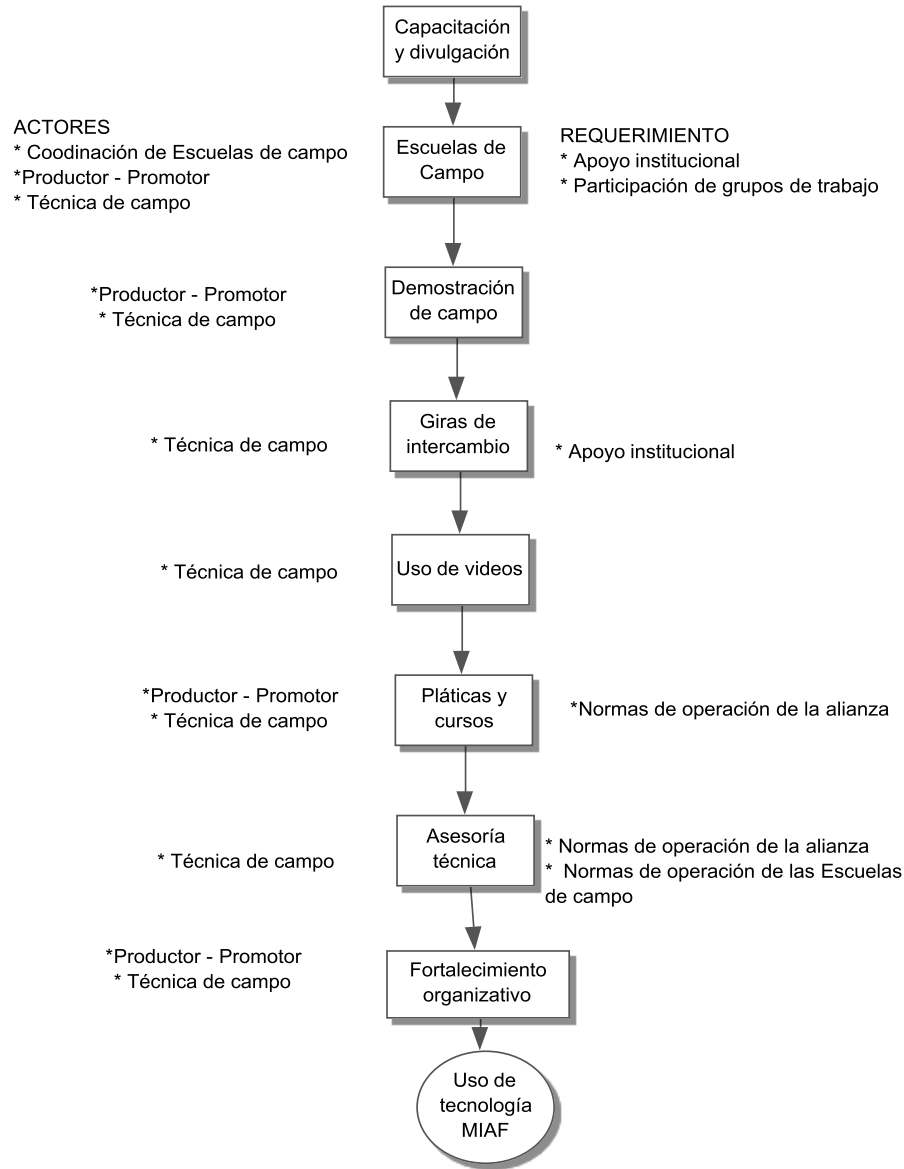


Figura 6. Estrategia de capacitación y divulgación del MIAF (Morales *et al.*, 2007)

Orozco *et al.*, (2009) estudiaron el impacto del nivel de conocimiento tecnológico, otorgado mediante el método de las Escuelas de Campo (EC), sobre el índice de adopción de tecnología agrícola localmente validada en la región Cuicateca, Oaxaca, México. Las variables analizadas fueron: índice de adopción inicial, nivel inicial de conocimientos, número de sesiones de EC, índice de adopción final y nivel final de conocimientos. El índice de adopción final de los participantes en las EC tuvo incrementos estadísticamente significativos respecto al inicial, debido al aumento en el nivel de conocimiento tecnológico, concluyendo que los campesinos con mayor participación en las EC tuvieron mayor conocimiento y adopción tecnológica.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización del Sitio de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en el área experimental del Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) “Antonio Turrent Fernández” (ATF), ubicada en la comunidad Axochío perteneciente al municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave, en las coordenadas $95^{\circ} 17' 57.44''$ O y $18^{\circ} 20' 1.01''$ N a 63 msnm (Figura 7).

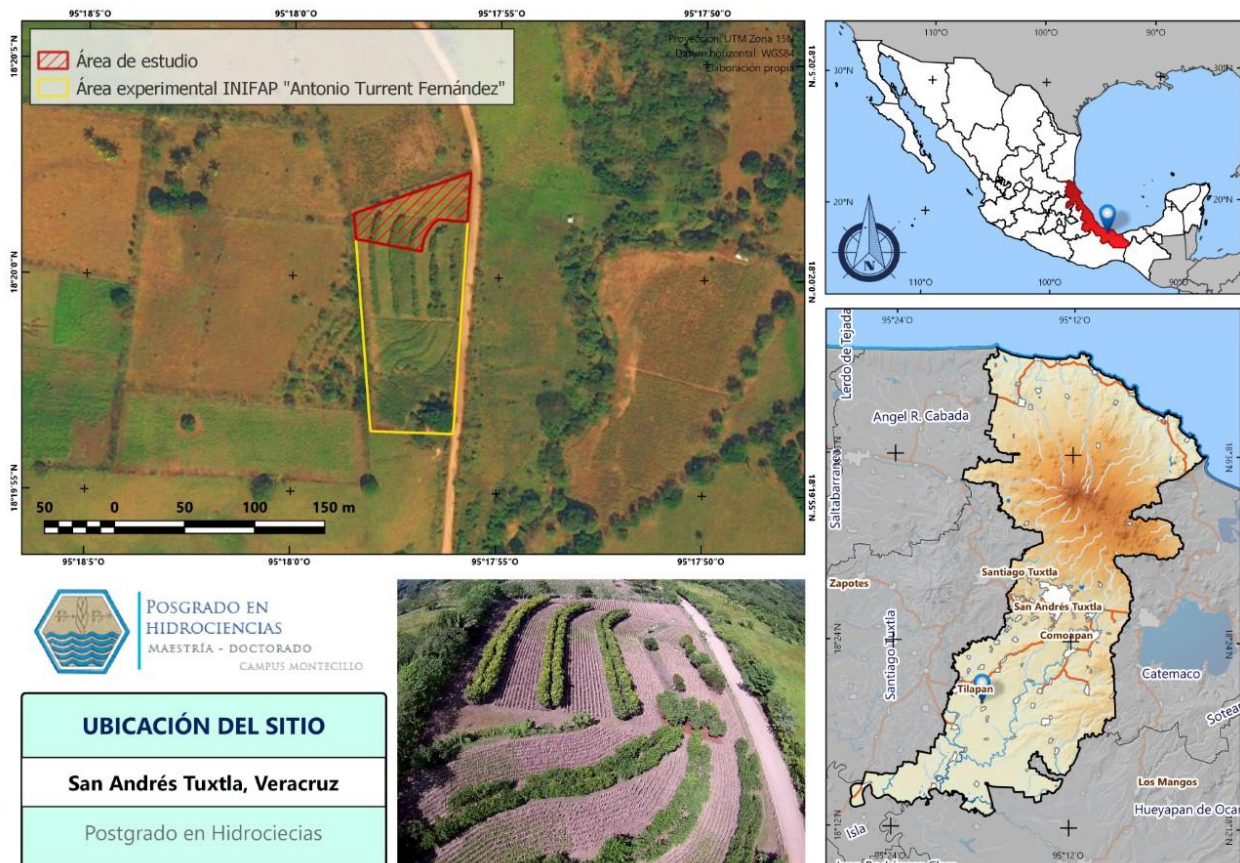


Figura 7. Ubicación del sitio de estudio en la comunidad Axochío, San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave.

5.2 Descripción del medio físico del área de estudio

En este apartado se revisarán las condiciones del medio biofísico de la región de estudio, la variación temporal de la precipitación, las características geomorfológicas de la región, los tipos y usos del suelo de la región, que son importantes para explicar el impacto del uso agrícola en terreno de ladera sobre la erosión de los suelos y analizar la eficiencia del sistema MIAF para reducirla.

5.2.1 Clima

En la región se reporta un cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw_2) (Comisión del Papaloapan, 1975) con precipitación anual que varía entre 1,497 a 2,703 mm con un promedio anual de 2,006 mm en el periodo 2006 a 2016. El comportamiento de la precipitación mensual muestra una distribución unimodal con un verano húmedo que reporta lluvias más altas en los meses de junio a noviembre (que varía de más de 170 mm a 419 mm mensuales) y disminuye en los meses de diciembre a mayo de 16 a 61 mm mensuales, periodo que es considerado como seco en la región (Cuadro 3 y Figura 8).

Cuadro 3. Precipitación anual del sitio experimental en el periodo 2006 a 2016.

Mes	Años											Promedio
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Ene	64.50	91.80	116.80	27.60	88.00	57.90	182.10	0.90	28.90	10.60	3.90	61.18
Feb	13.90	23.90	72.20	62.40	9.40	0.00	1.40	9.00	0.00	0.30	1.20	17.61
Mar	8.10	6.60	38.40	22.50	2.10	59.40	24.90	7.70	4.70	64.90	0.80	21.83
Abr	4.50	27.30	33.00	41.00	23.50	4.70	29.80	0.00	0.00	5.50	7.60	16.08
May	80.00	33.30	85.60	116.80	10.50	4.80	50.70	166.90	128.70	17.10	0.50	63.17
Jun	243.10	49.40	282.70	140.80	85.50	28.10	220.80	293.70	292.70	59.10	289.90	180.53
Jul	491.90	122.70	157.80	187.00	380.10	133.10	221.60	114.60	343.50	369.10	133.90	241.39
Ago	238.10	290.50	162.10	406.00	743.20	314.40	246.10	383.60	181.60	247.20	629.30	349.28
Sept	156.10	195.20	687.10	309.60	461.40	421.70	626.40	676.80	359.50	423.10	299.40	419.66
Oct	247.90	381.10	247.50	231.50	61.60	332.00	403.60	438.40	590.10	598.60	968.80	409.19
Nov	303.70	162.40	31.80	169.10	32.50	135.00	34.20	539.00	20.70	323.10	163.30	174.07
Dic	123.80	94.80	32.70	57.90	6.80	6.60	25.30	4.50	9.40	15.60	204.80	52.93
Total	1,975.60	1,479.00	1,947.70	1,772.20	1,904.60	1,497.70	2,066.90	2,635.10	1,959.80	2,134.20	2,703.40	2,006.93

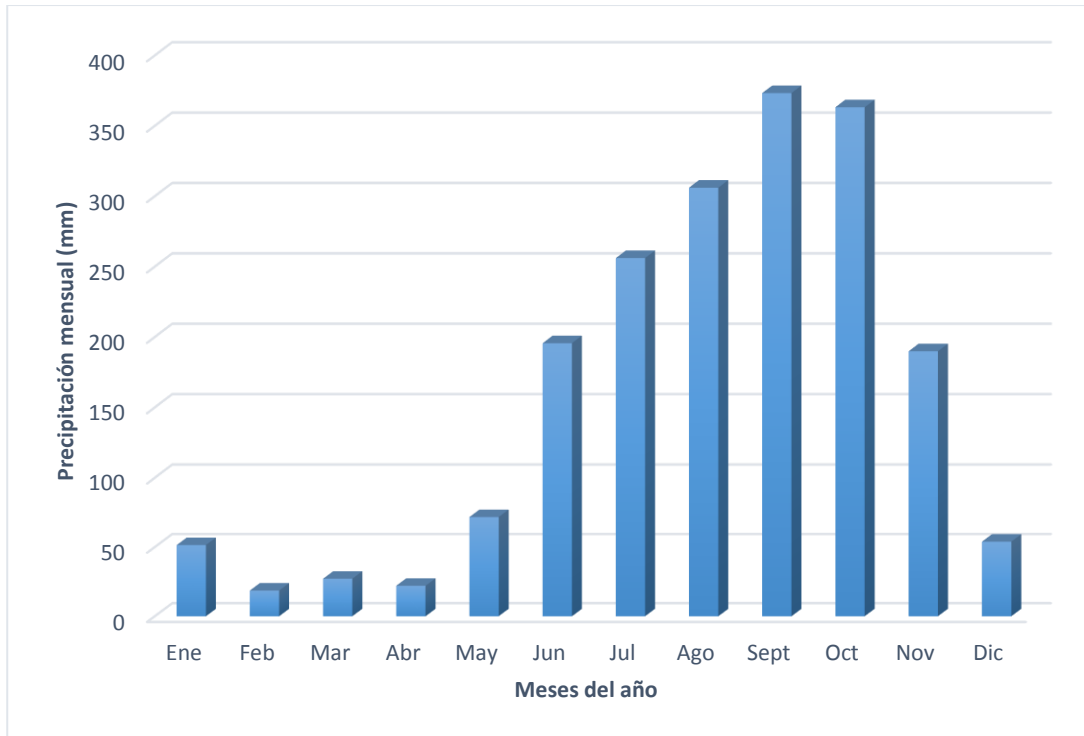


Figura 8. Distribución de la precipitación mensual en la zona de estudio.

En el periodo de 1996 a 2016 se reporta precipitaciones diarias que varían de 1 mm a 248 mm diarios y el análisis de frecuencias relativas de la precipitación diaria para el periodo muestra que más del 50% de eventos reportan una precipitación menor de 5 mm, lo que indica que son precipitaciones que ayudan al buen desarrollo de la vegetación. Lo anterior contrasta con que el 12% de los eventos reportan precipitaciones mayores de 40 mm, lo que sugiere la presencia de eventos de alta magnitud que generan escurrimientos de gran capacidad erosiva en esta zona tropical (Figura 9).

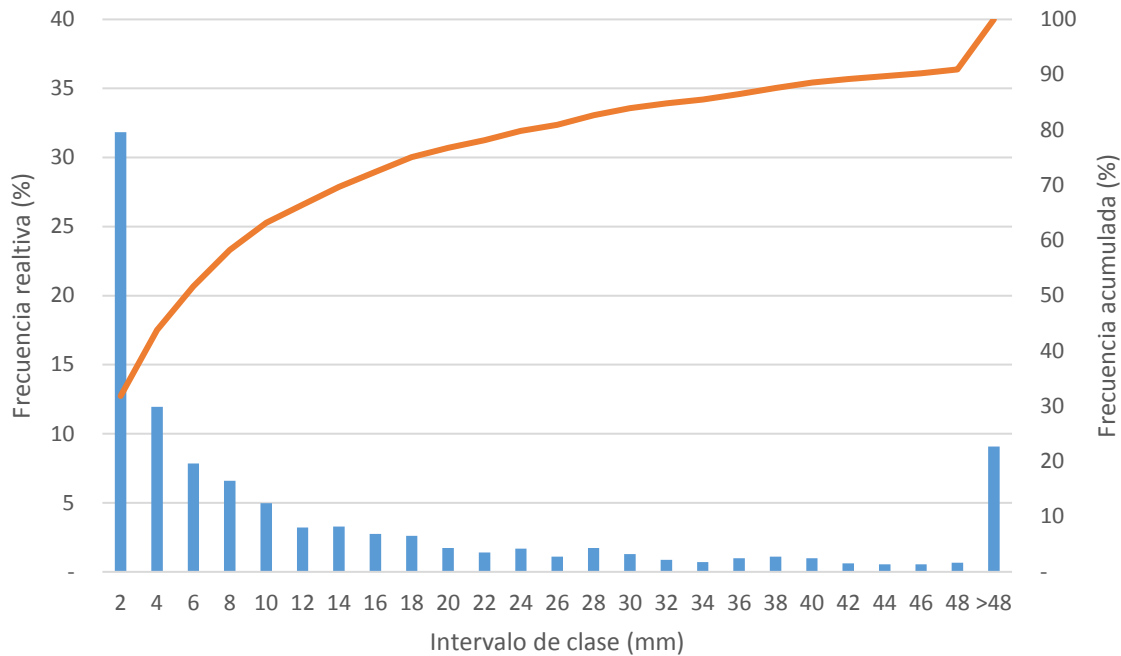


Figura 9. Frecuencia relativa y acumulada de la precipitación diaria en la zona de estudio.

La precipitación máxima en 24 horas que se reporta en el periodo de 1996 al 2006, varía de 50 mm hasta 248 mm, lo que indica que existen eventos de alta magnitud cada año y que la precipitación máxima en 24 h para un periodo de retorno de 2 años (promedio es de 167.4 mm), que sugiere un alto escurrimiento que se incrementa potencialmente cuando el periodo de retorno aumenta (Cuadro 4). Las precipitaciones máximas en 24 h para diferentes periodos de retorno son indicadores del potencial de la zona para generar los escurrimientos máximos instantáneos por evento y los daños que pueden originar.

Cuadro 4. Precipitación máxima en 24 h para diferentes periodos de retorno.

Período de retorno	Precipitación máxima en 24 h
años	mm
2	167.40
5	195.87
10	216.12
20	243.12

En Vista Hermosa región de los Tuxtlas, Veracruz Ignacio de la Llave, Francisco (2006) reportó que en un lote de escurrimiento sembrado con maíz tradicional en el periodo de 1995 a 2002, la precipitación media fue de 1,756 mm con variación de 1,254 a 2,691 mm. La erosividad media de la lluvia (EI_{30} Energía cinética multiplicado por la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos) fue de 9,610 con variación de 5,160 a 17,172 $Mj\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ y los escurrimientos anuales variaron de 202 a 1,007 mm con un promedio de 508 mm por año con un coeficiente de escurrimiento de 0.28 con variación de 0.10 a 0.41, factores que son responsables por su capacidad de remover y transportar las partículas del suelo como lo indica la tasa erosión de erosión anual promedio de 146.23 en un rango de variación de 44.53 a 344.67 $t\ ha^{-1}$ lo que indica la alta agresividad de la lluvia para remover las partículas del suelo y la alta capacidad de transporte de las partículas del suelo por el flujo superficial (Cuadro 5).

Cuadro 5. Impacto de la precipitación y el escurrimiento en la erosión del suelo en un lote de maíz tradicional de la región de los Tuxtlas, Veracruz (Francisco, 2006).

Año	Precipitación (mm)	EI_{30} ($Mj\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$)	Escurrimiento (mm)*	Coefficiente de escurrimiento*	Pérdidas de suelo ($t\ ha^{-1}$)*
1995	1,254	NR	202	0.16	44.53
1996	1,529	6,115	454	0.30	81.73
1997	1,354	7,122	554	0.41	240.53
1998	1,391	10,210	408	0.29	285.17
1999	2,691	14,063	1,007	0.37	344.67
2000	2,088	7,426	424	0.20	39.50
2001	2,313	17,172	871	0.38	93.17
2002	1,425	5,160	142	0.10	40.57
Promedio	1,756	9,610	508	0.28	146.23

* Lote de escurrimiento sembrado con maíz tradicional.

5.2.2 Orografía

La zona de estudio se encuentra enclavada sobre las estribaciones del conjunto montañoso de los Tuxtlas y presenta una amplia división de zonas que van desde la clasificación "Ondulado o suavemente ondulado, pasando por el quebrado o suavemente quebrado", "Cerril" hasta "Escarpado" y "Muy Escarpado". Los terrenos forman parte de la Llanura Costera del Golfo Sur,

que se conforma por la Sierra de los Tuxtlas y los lomeríos típicos donde se ubica el sitio experimental reportan alturas de 50 a 350 msnm.

5.2.3 Hidrografía

La región de los Tuxtlas donde se localiza en el la Región hidrológica del Papaloapan y se presenta una red hidrográfica conformada por los ríos San Andrés, Tecolapilla, Blanco y algunas corrientes intermitentes.

5.2.4 Uso del suelo

El municipio donde se localiza el área de estudio tiene una superficie de 957.21 km², de los cuales el 42% se dedica a la agricultura, el 41% a pastizales, el 14% a selvas, el 1% es bosque y el 1% restante es zona urbana. En el área de estudio se encuentran cultivo de maíz, frijol, sorgo, tabaco, caña de azúcar, potreros y frutales en laderas con pendientes de más de 10% donde está establecido el lote con árboles frutales, maíz y frijol (Figura 10).

5.2.5 Tipo de suelos

De acuerdo con INEGI en el municipio se presentan los materiales geológicos, como rocas ígneas extrusivas: basalto – toba básica, brechas volcánicas; rocas sedimentarias como areniscas y conglomerados, mismos que ha dado origen a los suelos del tipo andosoles, arenosoles, cambisoles, luvisoles y vertisoles (Figura 10). Los suelos que predominan en la zona de estudio son los cambisoles, que se caracterizan por ser profundos (más de 140 cm de profundidad), de textura arcillosa y migajón arcillosa con contenidos medios de materia orgánica (más de 2%) y pH ligeramente ácidos (5 a 5.5).

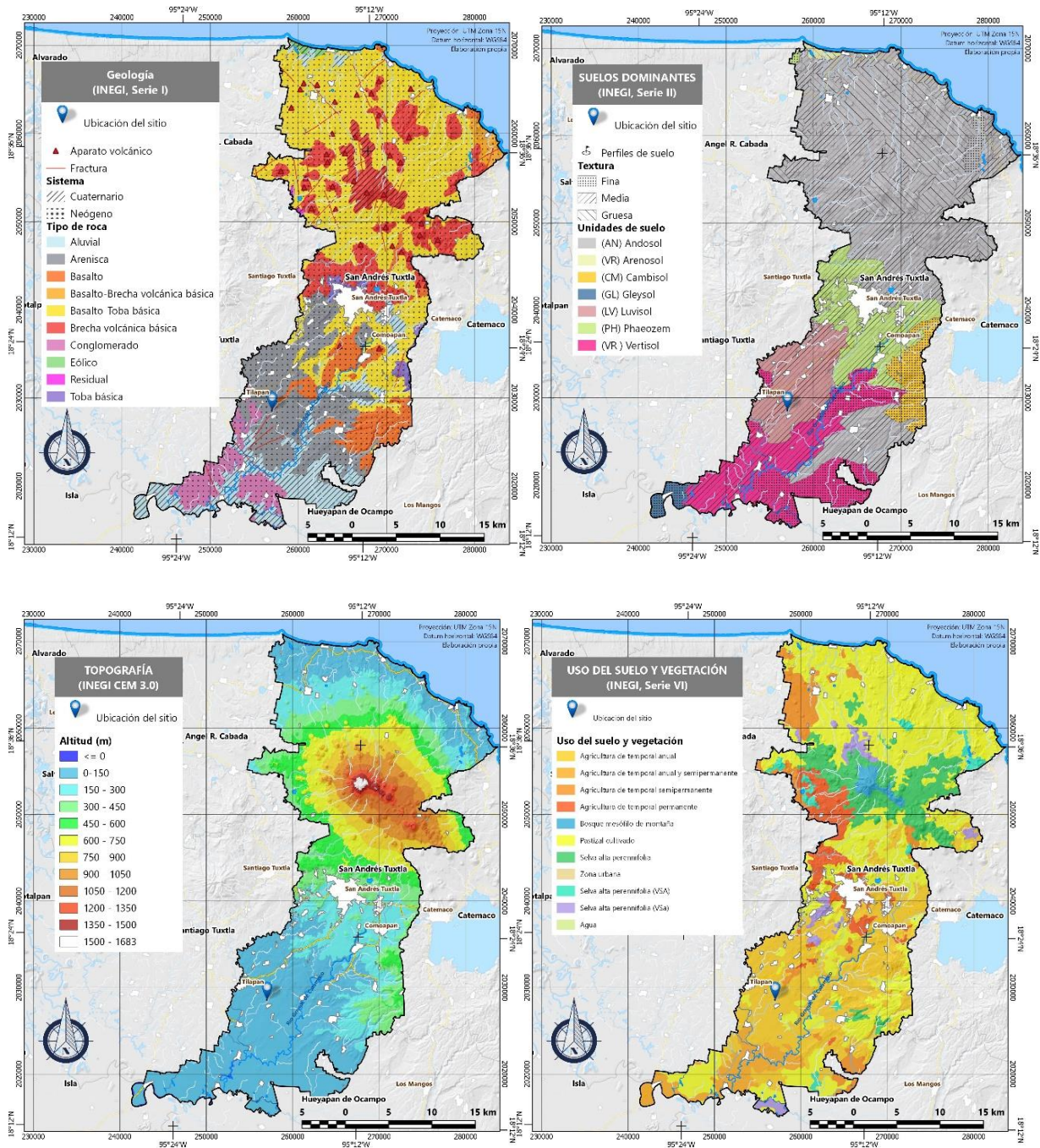


Figura 10. Medio biofísico del municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave.

5.3 Descripción del sitio experimental.

En el área experimental ATF existen tres sistemas de manejo del suelo, cada uno tipificado como tratamiento del suelo; los cuales son objeto de evaluación y son descritos a continuación: a) sistema MIAF, establecido en el ciclo primavera-verano del año 2003, con hileras de frutal de chicozapote, patrón de cultivo intercalado maíz-frijol, labranza mínima con tracción mecánica, b) labranza tradicional establecida en primavera-verano de 2003, patrón de cultivo maíz-maíz, labranza mínima con tracción mecánica, y c) un sistema de labranza de conservación establecida en 2015, patrón de cultivo maíz-maíz con labranza mínima de tracción animal (Figura 11).



Figura 11. Localización del área experimental de la comunidad de Axochío, Veracruz Ignacio de la Llave.

5.3.1 Componentes del Sistema MIAF

El sistema MIAF consiste en hileras de árboles de Chicozapote espaciadas cada 2 m, con espaciamiento entre hilera de árboles de 12 m en una ladera de 16% de pendiente. Entre hilera de árboles se encuentra la Zona Donadora (ZD) de escurrimientos y sedimentos, la Zona Media (ZM) donde conservan las condiciones del terreno natural y la Zona Receptora (ZR) donde se acumulan los sedimentos acarreados y los volúmenes escurridos (Figura 12a). Aguas arriba de la línea de

árboles frutales se coloca un filtro de residuos de cosecha (rastrajo de maíz y ramas de árboles cortadas en las podas), que tiene la función de retener los azolves y dejar pasar los excesos de agua que llegan de la ZD y ZM (Figura 12b). Los sedimentos acumulados en el tiempo se van acumulando aguas arriba de la barrera de árboles y del filtro como se muestra en la Figura 12c.



Figura 12. Sistema MIAF ubicado dentro del sitio experimental ATF en la comunidad Axochío, San Andrés Tuxtla, Veracruz de Ignacio de la Llave.

5.3.2 Sistema de muestreo de suelos para el MIAF, labranza tradicional y de conservación

En el sistema MIAF se definieron tres líneas de muestreo (1, 2 y 3) perpendiculares a la pendiente y a los árboles frutales, en cada una se seleccionaron 13 sitios dando un total de 39 puntos de muestreo de suelos. Las muestras fueron tomadas en sentido perpendicular a la pendiente. Cada línea de muestreo del módulo MIAF se dividió en cuatro zonas con referencia a la pendiente; la Zona Donadora (ZD) con tres sitios de muestreo ZD1, ZD2 y ZD3, localizados aguas abajo de la línea de árboles frutales y el filtro de escurrimiento, la Zona Receptora (ZR) ubicada en la parte aguas arriba de la línea de árboles frutales con los sitios de muestreo ZR1, ZR2 y ZR3, el área de filtro (F) donde se colocan los residuos de cosecha aguas arriba de los árboles frutales depositan los sedimentos aguas arriba del filtro con sitios de muestreo F1, F2 y F3 y la Zona Media (ZM) localizada entre la ZD y ZR con los sitios de muestreo ZM1, ZM2, ZM3 y ZM4 (Figura 13).

En los lotes con sistemas de labranza de conservación (LC) y labranza tradicional (LT) se tomaron tres puntos de muestreo (parte, media y baja de la parcela) dando un total de seis muestras. El número total de puntos de muestreo fue de 45 (Figura 13).

Descripción	Sitio de muestreo	
Zona media	ZM	ZM1, ZM2, ZM3 y ZM4
Zona receptora	ZR	ZR1, ZR2 y ZR3
Zona del filtro	ZF	F1, F2 y F3
Zona donadora	ZD	ZD1, ZD2 y ZD3
Labranza tradicional	LT	PMT, PBT y PBT
Labranza de conservación	LC	PMC, PBC y PBC

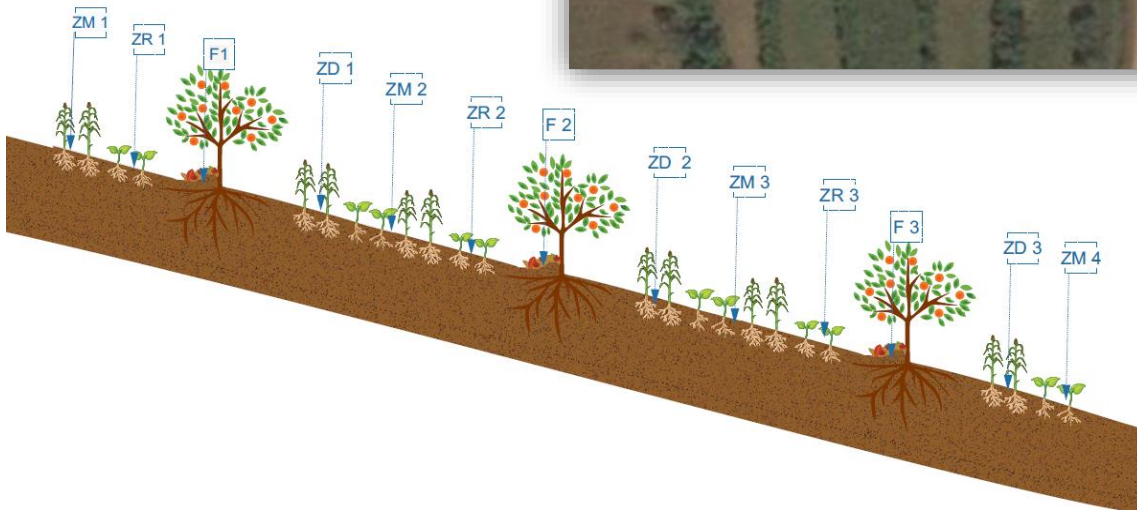
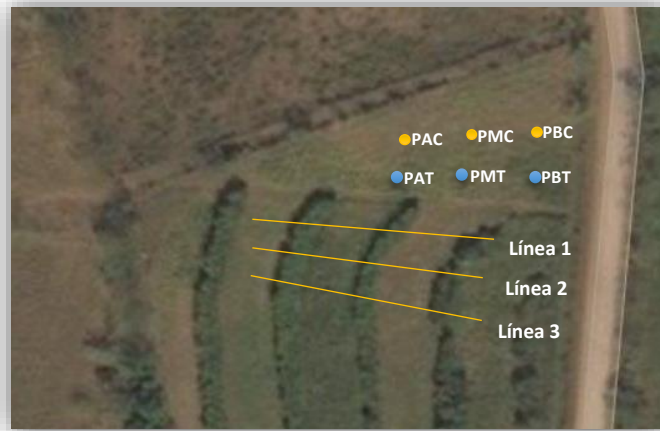


Figura 13. Localización de los sitios de muestreo en el módulo MIAF y en las parcelas de maíz tradicional y de conservación.

En cada punto se tomó una muestra de suelo con una pala recta a una profundidad de 0-20 cm, se identificaron, se colocaron en bolsa de plástico para ser llevadas al laboratorio.

El muestreo de suelos para el análisis de comunidades microbianas se realizó en las zonas donadora, receptora y filtro de escurrimiento de cada línea y se obtuvo una muestra compuesta de cada sitio. En LT y en LC se tomó una muestra en la parte alta, media y baja de cada parcela para formar una muestra compuesta.

5.4 Análisis de laboratorio de las muestras de suelos, pruebas de campo y topografía

Las muestras de suelo fueron tratadas en laboratorio para determinar las características físicas, hídricas, químicas, biológicas y microbianas con los métodos que se muestran en el Cuadro 4. También se realizaron trabajos de campo para determinar la capacidad de infiltración del agua en el suelo y el levantamiento de las curvas a nivel y los perfiles longitudinales de las laderas con el MIAF (Cuadro 6).

Cuadro 6. Determinación de parámetros del suelo y topografía del terreno.

Variables	Determinación	Método
Propiedades físicas	Contenido de humedad del suelo	Gravimétrico
	Textura del suelo	Bouyoucos
	Densidad aparente	Método del cilindro (Hossne, 2012)
	Distribución de agregados	Yoder, modificado por Kemper y Rosenau, 1986
	Estabilidad de agregados	Yoder, modificado por Kemper y Rosenau, 1986
Propiedades hidrológicas	Infiltración del agua en el suelo	Doble cilindro
	Capacidad de campo	Olla de presión
	Porcentaje de marchitamiento permanente	Membrana de presión
Propiedades químicas	pH	Potenciómetro relación 2:1
	Materia orgánica	Walkley y Black (Walkley y Black, 1934)
	Nitrógeno inorgánico	Kjeldhal
	Fosforo	Método Bray
	Potasio	Acetato de sodio
Propiedades biológicas	Respiración del suelo	Oxitop (Veeken <i>et al.</i> 2003)
	Comunidades microbianas	Placas Biolog EcoPlate
Topografía	Curvas de nivel y perfiles longitudinales	Nivel precisión y manguera

Propiedades físicas. Las determinaciones físicas de las muestras se llevaron a cabo basados en la Norma Oficial Mexicana NOM-021 -SEMARNAT-2000. El contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico; densidad aparente por el método del cilindro; textura por el método de Bouyoucos. La estabilidad y distribución de agregados se determinó con el método de Yoder en seco y húmedo utilizando 8 tamices de diámetros de 3.36, 2.00, 1.00, 0.5, 0.25, 0.10, 0.05 y >0.05 mm.

Propiedades químicas. Una vez recolectadas las muestras de suelo estas se secaron en la sombra, para el análisis químico las muestras se molieron en un mortero de porcelana y se tamizaron con una malla de 2 mm. El pH se determinó con una relación de suelo agua 1:2 (Van Reeuwijk, 1999); carbono orgánico del suelo (COS) Walkley y Black (Walkley y Black, 1934); materia orgánica del suelo a partir del carbono orgánico del suelo multiplicado por el factor 1.724 de Van Benmelen (Jackson, 1964); nitrógeno total estimado a partir materia orgánica (Carreón, *et al.* 1995), nitrógeno inorgánico por el método de Kjeldhal; fósforo extractable Bray-1 (Bray y Kurtz, 1945); potasio extractado-con solución Morgan (Acetato de Sodio pH 4.8).

Propiedades hidrológicas. En las muestras de suelo de los diferentes sitios, se determinó la humedad a capacidad de campo (CC) por método de la olla de presión y punto de marchitez permanente (PMP) con la membrana de presión.

Infiltración del agua en el suelo. Se determinó por el método de doble cilindro en cinco sitios de muestreo: lote de LC, zona de LT y en tres sitios del sistema MIAF (la primera en ZD, la segunda en ZM, la tercera en la ZR). Se colocó el infiltrómetro de doble anillo, para aplico agua en ambos anillos y se tomaron lecturas del nivel del agua en el anillo interior a diferentes intervalos de tiempo hasta obtener tres lecturas consecutivas más o menos constantes.

Respiración del suelo. Para cuantificar la respiración del suelo se usó una muestra de 30 g de suelo previamente secado al sol y tamizado en malla 10 (2 mm), colocados en charolas de aluminio con 25% de humedad en relación al peso seco. La muestra húmeda se colocó en los frascos del equipo OxiTop OC110 ® con 1 g de hidróxido calcio. Los incubaron por 10 días a 25°C (Barrales *et al.*, 2014). Finalmente se hacen los cálculos del consumo de O₂ y el CO₂ emitido por día y el total se realizó con la siguiente ecuación (Veeken *et al.*, 2003):

$$\text{Res} = \frac{M_{O_2}}{R \times T} \times \frac{V_{fr}}{m_{Bt}} \times |\Delta P|$$

Donde:

Res= Respiración del suelo (mg L⁻¹)

M O₂= Peso molecular del O₂ (31998 mg mol⁻¹)

R = Constante universal de los gases (83.14 L h Pa K mol⁻¹)

T = Temperatura en grados Kelvin

Vfr= Volumen de oxígeno disponible (L)

M m Bt= Masa de mantillo (kg)

| ΔP | = Cambio de presión en (hPa)

Para el cálculo de la cantidad de CO₂ que se emitió por la muestra de suelo, se hace por estequiometría química, usando los pesos equivalentes de O₂ y CO₂ y la cantidad de O₂ calculada con la ecuación general de los gases.

$$mg\ CO_2 = \left[\frac{O_2\ (mg)}{PE\ (O_2)\ (eq\ g)} \right] / PE\ (CO_2)\ (eq\ g)$$

O₂ = oxígeno consumido en la incubación (mg kg⁻¹)

PE= Peso Equivalente

Eq g= Equivalente gramo

Diversidad microbiana. Para la evaluación de las comunidades microbianas en el suelo, se utilizaron placas Biolog EcoPlate™; las cuales contienen 96 pozos con 31 fuentes de carbono y cloruro de trifetil tetrazolio (este compuesto adquiere un color violeta cuando la fuente de carbono se degrada) como indicador colorimétrico de actividad microbiana. Estas fuentes de carbono están destinadas a la determinación de los microorganismos pertenecientes a seis grupos funcionales: aminas (Putresceína y Feniletilancina), polímeros (Glicógeno, α-Ciclodextrin, Tween 40 y Tween 80), aminoácidos (L Treonina, L-Fenilalanina, L-Asparagina, L-Arginina, L-Serina y Glicil ácido L-Glutámico), carbohidratos (D-Manitol, D-Celobiosa, D-Xilosa, β-Metil-D-lucósido, i-Erythritoly, α-D-Lactosa y N-Acetil-D-Glucosamina), ácidos carboxílicos (Ácido D-

Galacturónico, Ácido D-Málico, Ácido Itaconico, Ácido D-Glucosaminico, Lactona de Ácido D-Galacturónico, Ácido α -Ketobutirico, Ácido γ -Hidroxibutirico, Ácido 2-Hidroxibenzoico y Ácido 4-Hidroxibenzoico) y misceláneos (Metil éster de ácido pirúvico, D, L- α -glicerol fosfato, Glucosa-1-Fosfato). Además, agua destilada como testigo. Cada fuente de carbono con tres repeticiones (Garland y Mills, 1991; Galazka and Furtak, 2019). En cada pozo se inocularon 100 μ L de disolución 10^{-3} preparada con 10 g de la mezcla de suelo compuesta de la zona más 90 mL de agua destilada, agitando por un min. De esta mezcla se tomó un 1 mL y se transfirió a otro tubo con 9 mL de agua destilada esterilizada. Se repitió el proceso dos veces más. Después de la incubación de las placas Biolog EcoPlate a 28°C, se tomaron lecturas de densidad óptica del contenido de los pozos con espectrofotómetro (Biotek, modelo Synergy 2 con el programa Gen5), cada 24 h por tres días. Con las lecturas resultantes, se calcularon los promedios del desarrollo de color (AWCD, por sus siglas en inglés) por cada fuente de carbono. Así mismo, el índice de Shannon-Weaver que se aplica para calcular la diversidad de organismos (Tian *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2013): Este método se basa en un análisis matemático utilizando la siguiente fórmula:

$$AWCD = \sum_{i=1}^s \frac{OD_i}{n}$$

Donde:

AWCD: Desarrollo promedio de color

s = Representa el valor individual de cada fuente de carbono (pozo)

n = Fuentes de carbono totales (31)

OD = Densidad óptica en el pozo *i*

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

H = Índice de Shannon-Weaver de diversidad de microorganismos

P_i = Valor que representa el cambio de color del sustrato *i*

Levantamiento topográfico. Para cuantificar el efecto del sistema MIAF en la remoción y deposición del suelo en la ladera después de 14 años de su establecimiento, se realizó un levantamiento topográfico en una cuadrícula de 2 x 2 m, utilizando una estación total Sokkia SET630RK3. Se tomaron lecturas cada dos metros en el área de cultivo (zona entre hileras de frutales) y en las hileras de los árboles se tomaron lecturas al inicio del filtro (1), en donde cambia la pendiente (3), en la parte alta del filtro (2), y en la base del árbol (4), con la finalidad de determinar cómo cambia el nivel del terreno por efecto de los sedimentos que se acumulado en los 13 años de establecido el sistema MIAF (Figura 14). Esta información permitió obtener un plano topográfico con curvas a nivel a cada metro en la zona con MIAF.

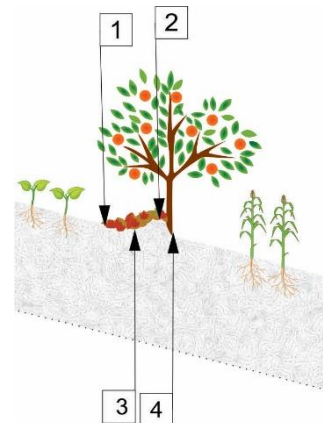


Figura 14. Posición de los puntos de lectura topográfica.

Perfil longitudinal. Para conocer la variación de la pendiente en el área con el sistema MIAF se seleccionaron tres líneas perpendiculares a los árboles frutales y en cada una se levantaron los perfiles longitudinales (cambio de nivel a lo largo del transecto) utilizando un nivel de manguera (Figura 15a). En cada transecto se tomaba el nivel del suelo a cada metro de longitud y en la zona de filtro y los árboles se tomaban las lecturas del nivel del suelo a cada 50 cm, con lo finalidad de estimar los cambios del nivel del terreno producto de los sedimentos acumulados en el terreno (Figura 15b).



Figura 15. Levantamiento de los perfiles longitudinales en el Sistema MIAF.

5.5 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, el diseño de tratamientos se evaluó dentro de un diseño experimental completamente al azar. Con la finalidad de identificar diferencias en las propiedades físicas, hídricas, químicas, biológicas y de microorganismo entre los sitios de muestreo de los tres tratamientos evaluados (sistema MIAF, Labranza de conservación y Labranza tradicional), se realizó un análisis de varianza (ANOVA), y una comparación de medias de los tratamientos con base en la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El software que se utilizó para este fin fue Statistical Analysis System (SAS) 9.4.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Propiedades físicas

Distribución del tamaño de partículas. Por la distribución del tamaño de partículas en el suelo en el MIAF se observó que predomina la fracción de limos, que son las partículas más fáciles de transportar por el escurrimiento (Wischmeier y Smith, 1978). En los tres sistemas no existen cambios significativos en la fracción de arenas, arcillas y arcillas (Cuadro 7)

Cuadro 7. Tamaños de partículas en los diferentes sitios tratamientos del área experimental ATF.

Zonas de muestreo	Textura		
	Arena	Limo	Arcilla
	%	%	%
MIAF ¹	31.31 a	22.23 a	46.51 a
LC ²	39.73 a	18.36 a	41.91 a
LT ³	36.64 a	16.79 a	46.57 a

1 (ZD, ZM, ZR y F), 2 (labranza de conservación) y 3 (labranza tradicional). Valores de medias con igual letra dentro de las columnas, son estadísticamente iguales (Tukey, 5%).

En las zonas de muestreo del sistema MIAF (F, ZM, ZD y ZR) no se muestra una clara tendencia de los cambios de contenidos de arenas, limos y arcillas, ya que se esperaría que en la ZR y ZF predominaran las fracciones más finas y en la ZD las más gruesas (Cuadro 8), sin embargo, esta información coincide con lo reportado por Salinas (2015).

Cuadro 8. Tamaños de partículas en los diferentes sitios de muestreo del MIAF.

Zonas de muestreo en MIAF	Textura		
	Arena	Limo	Arcilla
	%	%	%
Media ¹	31.97 a	20.14 b	47.89 a
Receptora ²	34.80 a	22.10 ba	43.09 a
Filtro ³	29.40 a	25.36 a	44.61 a
Donadora ⁴	28.66 a	22.36 ba	50.44 a

1, 2, 3 y 4 zona de muestreos (12, 9, 9, y 9 número de muestras obtenidas en cada zona respectivamente). Valores de medias con igual letra dentro de las columnas, son estadísticamente iguales (Tukey, 5%).

Distribución y estabilidad de agregados. En el Cuadro 9 se muestra que para el DMP medido en seco, los valores indican que los suelos son estables, mientras que los resultados de DMP evaluado en la prueba de tamizado en húmedo manifiestan que los suelos son estables a excepción del suelo obtenido en el área del filtro (F), en este caso, el valor de DMP indica que es muy estable con un DMP de 2.51 mm según la clasificación de Le Bissonnais (Le Bissonnais, 1996), es decir, son suelos con capacidad para resistir la infiltración de agua sin desagregarse o sin dispersarse (Barthes y Roose, 2002). Además, la acumulación de MO en esta zona favorece una mayor agregación de las partículas del suelo.

Cuadro 9. Diámetro medio ponderado de agregados tamizados en secos y húmedo e índice de estabilidad en los tres sistemas de manejo en el módulo experimental ATF, San Andrés Tuxtla, Veracruz.

Zona de muestro	IE	Diámetro medio ponderado	
		Seco	Húmedo
MIAF ¹	1.66 a	2.64 a	1.79 a
LT ²	1.24 a	2.34 a	1.36 a
LC ³	1.60 a	2.02 a	1.24 a

1 (ZD, ZM, ZR y F), 2 (labranza tradicional) y 3 (labranza de conservación); IE=Índice de estabilidad. Valores de medias con igual letra dentro de columnas, son estadísticamente iguales (Tukey, 5%).

El índice de estabilidad estructural (IE) promedio de los sitios de muestreo del sistema MIAF es mayor que el obtenido en los suelos del sistema tradicional, lo que indica que el sistema de manejo MIAF ha favorecido una mejor estructuración del suelo con mayor estabilidad de los agregados. Sin embargo, dentro del sistema MIAF en la ZM y ZD el índice de estabilidad promedio tiende a disminuir y solo en el caso de la ZF alcanza su mayor valor con 3.80 (Cuadro 10). La estabilidad estructural de los suelos es un indicador de una alta capacidad de infiltración del agua. Lo anterior se explica por la acumulación de material fino y MO, lo que se aprecia como zona de acumulación de sedimentos, según lo reportado por Sanchez (2015).

Cuadro 10. Diámetro medio ponderado de agregados secos y húmedos e índice de estabilidad estructural en sistema de manejo MIAF en el módulo experimental ATF, San Andrés Tuxtla, Veracruz.

Zonas de muestreo en el MIAF	IE	Diámetro medio ponderado	
		Seco	Húmedo
Media ¹	1.03 a	2.61 a	1.56 bc
Receptora ²	1.23 a	2.09 b	1.20 c
Filtro ³	3.80 b	2.93 a	2.51 a
Donadora ⁴	0.97 a	2.92 a	1.94 b

1, 2, 3 y 4 zona de muestreos (12, 9, 9, y 9 número de muestras obtenidas en cada zona respectivamente). IE=Índice de estabilidad. Medias con diferentes literales por columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha=0.05$).

Se puede apreciar en la Figura 16 el diámetro promedio agregados en seco, que los diámetros abundantes de los agregados se encuentran entre 3.36 a 2.69 mm, en todos los puntos de muestreo incluidos los de LC y LT. Para el intervalo de diámetros de agregados de 1.5 a 3.36 mm, dentro de cada sistema se aprecia que es más alto el porcentaje de agregados dentro del MIAF (ZM, ZD y ZR) que en el LC o LT. Cuanto mayor es el agregado y más estable, entonces esa combinación implica una menor susceptibilidad de estar sujeto el suelo a la pérdida por erosión. Como se ha mencionado, la infiltración del agua se ve favorecida por el efecto descrito.

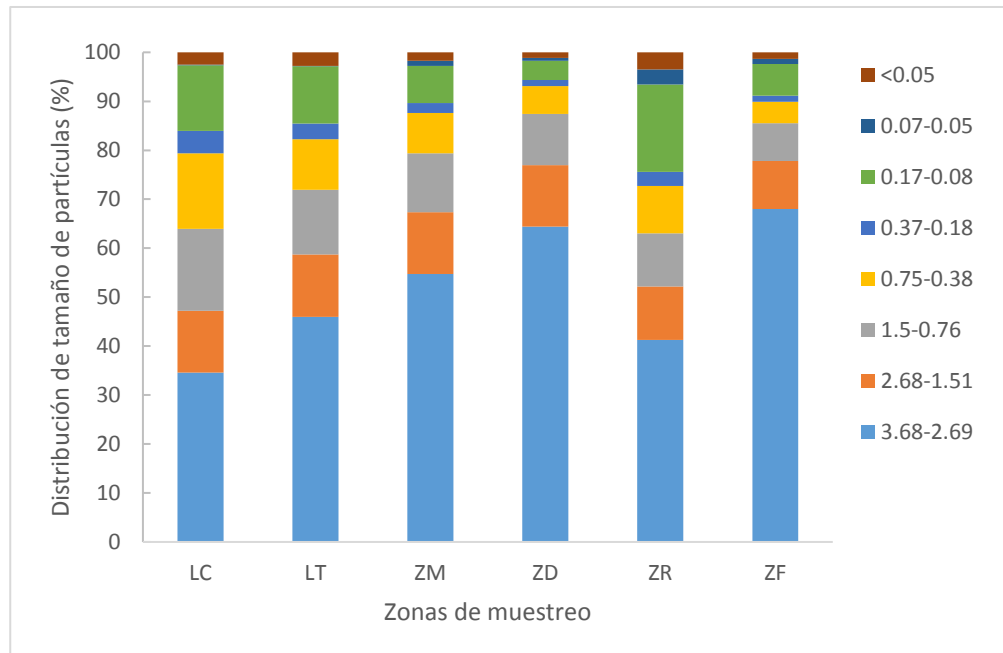


Figura 16. Distribución de tamaño de agregados en seco

Después del tamizado en húmedo, el tamaño de los agregados en ZF se encontró el mayor porcentaje (53.24%) de agregados con mayor tamaño, es en esta zona donde se encuentra el mayor contenido de materia orgánica la cual influye en la formación de agregados, y flujo de agua en el suelo, esto se vio reflejado en la infiltración de esta zona. En las LC, LT, ZM, ZD y ZR los tamaños con mayor porcentaje son 0.75-0.38 mm con 37.06%, 38.25%, 33.76%, 26.85% y 31.48% respectivamente.

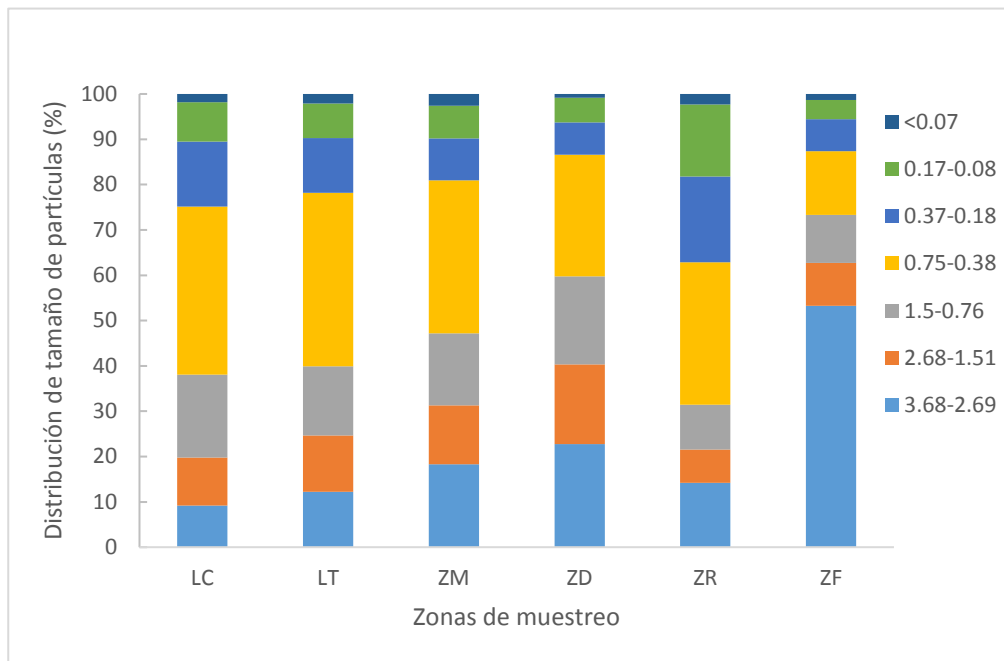


Figura 17. Distribución de tamaño de agregados en húmedo

Otras variables físicas en los tres sistemas de producción al momento del muestreo CC, HA y Hum no tuvieron diferencias significativas (Cuadro 12). Dentro del MIAF la ZD y ZF presentaron el mayor CC y PMP, y en ZF la humedad al momento de muestreo de 28.78% fue el mayor y significativo.

Cuadro 11. Contenido de CC, PMP, HA, Hum y Dap en zonas del MIAF, y en LC y LT.

Zonas de muestreo	CC	PMP	HA	Hum	Dap
	%	%	%	%	g cm⁻³
MIAF ¹	33.30 a	22.01 a	13.70 a	24.31 a	1.12 a
LT ²	31.77 a	23.39 a	8.38 a	26.42 a	1.11 a
LC ³	31.65 a	23.71 a	7.94 a	27.05 a	0.97 a

1 (ZD, ZM, ZR y F), 2 (labranza tradicional) y 3 (labranza de conservación); Literales por columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha=0.05$). CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente; HA= Humedad aprovechable; Hum=Humedad al momento del muestreo; Dap= Densidad aparente; ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona del filtro, ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.

Cuadro 12. Contenido de CC, PMP, HA, Hum y Dap en zonas del MIAF, y en LC y LT.

Zonas de muestreo	CC	PMP	HA	Hum	Dap
	%	%	%	%	g cm⁻³
Media	32.85 ab	21.52 ab	12.20 a	22.22 ab	1.16 a
Receptora	26.78 b	17.42 b	14.35 a	19.45 a	1.22 a
Filtro	36.54 a	24.35 a	15.40 a	28.78 b	0.98 b
Donadora	37.18 a	25.17 a	13.58 a	27.47 a	1.10 ba

Literales por columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha=0.05$). CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente; HA= Humedad aprovechable; Hum=Humedad al momento del muestreo; Dap= Densidad aparente; ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona del filtro, ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.

6.2 Parámetros químicos

De acuerdo con las características químicas en el Cuadro 13, se puede observar que entre los tratamientos (sistemas de manejo del suelo), existe una diferencia significativa en las variables; materia orgánica (MO) y nitrógeno total (Nt). Para el caso de la MO se puede apreciar que el sistema MIAF ocasionó que se registrara un incremento de 1.02% con relación al sistema LT. Por las características del Sistema MIAF de disponer árboles intercalados hace que la preparación del terreno para la siembra de maíz y frijol sea en menor intensidad que la labranza tradicional. Además, se minimiza la remoción de residuos de cosecha y hay una acumulación de la hojarasca que produce el árbol frutal. Todo ello contribuye a que haya una mayor persistencia y acumulación

de la MO. De acuerdo con la clasificación de la MO de Velasco (1983), el sistema MIAF se considera rico en MO mientras que en LC y LT los valores los ubican como medianamente ricos.

Cuadro 13. Variables químicas en los tres sistemas de labranza.

Propiedades químicas	Medias de tratamientos		
	MIAF¹	LT²	LC³
pH	5.5 a	5.2 a	5.1 a
MO (%)	3.85 a	2.83 b	2.66 b
N inorgánico (mg kg ⁻¹)	83.81 a	79.23 a	74.28 a
N total (mg kg ⁻¹)	1,923.6 a	1,417.6 b	1,327.9 b
P (mg kg ⁻¹)	23.96 a	22.82 a	18.75 a
K (mg kg ⁻¹)	210.26 a	146.67 a	146.67 a

1 (ZD, ZM, ZR y F), 2 (labranza tradicional) y 3 (labranza de conservación).

Valores de medias con igual letra dentro de la misma fila son estadísticamente iguales (Tukey, 5%).

Para el caso del N total, el cual, al estar presente en los residuos de cosecha, su acumulación aumenta en el suelo, estos valores están constituidos por N orgánico e inorgánico. Por la magnitud de Nt de 1,923.6 mg kg⁻¹, se puede apreciar que es una reserva importante de N en el suelo que corresponde a 4.223 t ha⁻¹. El N inorgánico en los tres sistemas de manejo resultó estadísticamente igual y por su magnitud promedio de 79.1 mg kg⁻¹ se puede afirmar que, a pesar de existir una amplia reserva de N en el suelo, su disponibilidad para los cultivos es baja y corresponde a 4.11% del Nt en el sistema MIAF. Según la clasificación Moreno (1978) el sistema MIAF es rico en Nt, a diferencia de LC y LT que están en la clase de suelos medianamente ricos. Diversos autores (Jackson, 1964; Carreón 1995) han encontrado una proporción del 5% del Nt que es disponible para los cultivos, relación que se aproxima a los valores del presente estudio.

Para el contenido de P extraíble por el método Bray en los tres sistemas de manejo, se encontró que no hubo diferencias estadísticas significativas entre sí. El método de extracción de P Bray es un estimador de la disponibilidad de P para los cultivos, su magnitud es baja, inferior al nivel crítico de 40 mg kg⁻¹ que reportan Sánchez *et al.* (2015). Lo anterior coincide con la clasificación de contenido medio según la clasificación *CSTPA* (1980). La baja disponibilidad de P, debe estar relacionada a la baja mineralización de la MO del suelo y al valor de pH ácido (Figura 18). Cuando el pH es inferior a 5.5, el mecanismo de retención de P por parte de minerales ricos en Al, se activan y fijan al elemento; por lo que disminuye su disponibilidad en la solución del suelo (Sparks, 2003).

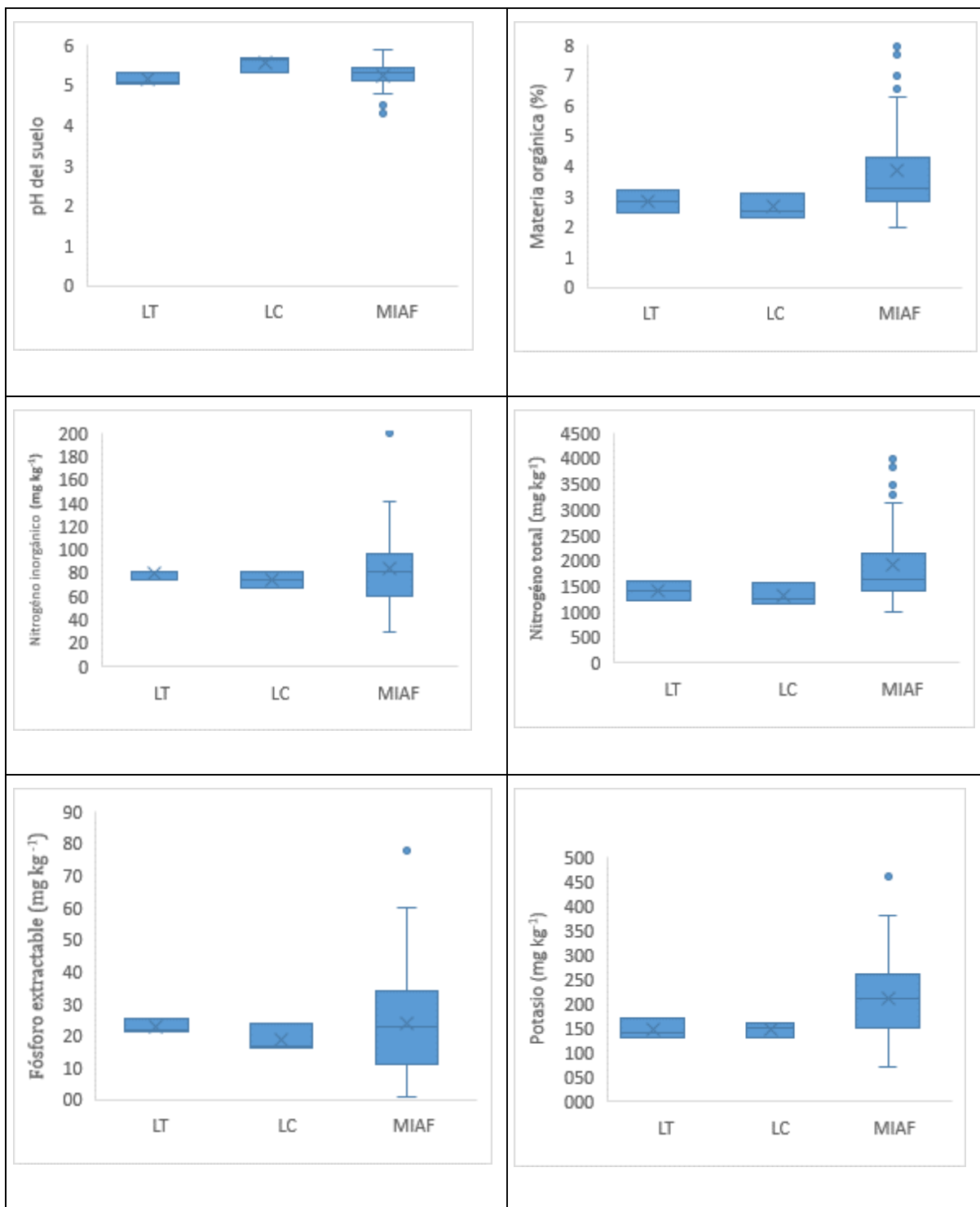


Figura 18. Propiedades químicas dentro de los sistemas de manejo e intervalo de variación. LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.

En el Cuadro 14, se puede observar que los valores de; pH, MO, Nt, P y K muestran diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de confianza del 5%. El área denominada Filtro, al ser receptora de escurrimientos superficiales, también capta las sales disueltas y la fracción húmica de la MO, que propician la inactivación de las especies de Al que hayan sido disueltas (Gerke, 1994). Como el Al disuelto es la fuente principal de H^+ en la solución del suelo, al ser inactivado por la MO humificada, propicia que el valor de pH ascienda hasta 5.5, valor de referencia que señala la inactivación del Al^{3+} (Bohn *et al.* 2001). El cambio en el valor del pH, al ser menos ácido, propicia mejores condiciones para el desarrollo de especies vegetales como el maíz y el frijol, por lo que el sistema MIAF se le puede atribuir que favorezca una mejor calidad del suelo y la posibilidad de cultivar una mayor variedad de especies vegetales.

En el presente estudio, se registraron apreciables diferencias en el contenido de MO dentro del sistema MIAF. Destaca el valor de 6.38% (en el área denominada Filtro), que comparada con el valor del área donadora 2.72%, lo cual representa un incremento directo de 3.66%. Dicha diferencia significa que dentro del sistema MIAF, habrá un sitio que no logren acumular MO (ZD y ZM), mientras que se favorecerá la acumulación dentro del sitio denominado filtro y que, por lo tanto, sea el filtro un espacio importante para el almacenamiento de carbono orgánico. En esta parte se concentran los residuos de cosecha y del resultado de la poda de los frutales, por ende, las formas solubles de MO.

En el Cuadro 14, se muestra el contenido de Nt, el cual muestra alta variabilidad asociada al punto donde fue tomada la muestra de suelo. Debido a la asociación que hay entre la MO y el Nt, es de esperar que tengan un comportamiento similar a lo largo de la parcela experimental.

El incremento del P-Bray, en el filtro, también se explica por el efecto en el incremento del valor del pH, dado que disminuyen las formas de cationes como Al^{3+} y Fe^{3+} los cuales pueden inmovilizar al ion fosfato presente en la solución del suelo. Además, también puede deberse al efecto quelante que tiene la fracción húmica del suelo sobre el Al. Ambos procesos contribuyen a que exista mayor disponibilidad de fosfatos en el suelo.

Para el K intercambiable cuantificado dentro del filtro, tiene el valor más alto comparado con el resto de puntos donde fueron tomadas las muestras de suelo. Dicho incremento se debe a que, al ser una especie soluble, su movilidad dentro del escurrimiento que se registra dentro del área de

estudio, propicia su acumulación. Resultados similares fueron reportados por Bertol *et al.* (2007) quienes evaluaron el contenido de P, K y carbono orgánico en el agua de escorrentía procedente de lotes bajo tres sistemas de labranza. Los resultados que reportaron indican que los sistemas de manejo bajo labranza cero tienen mayores concentraciones de P, K y carbono orgánico en los sedimentos de escorrentía. De manera similar en un experimento de largo plazo, Procházka *et al.* (2019), encontraron que en el agua de escurrimiento que se captó en tres cuencas bajo evaluación, se incrementó el contenido de diversos iones, entre ellos el K.

Cuadro 14. Propiedades químicas dentro del sistema de manejo del suelo MIAF.

Propiedad química	Zona de muestreo en el MIAF			
	Filtro ¹	Receptora ²	Media ³	Donadora ⁴
Ph	5.5 a	5.1 b	5.1 b	5.2 a
MO	6.38 a	3.31 b	3.19 b	2.72 b
N inorgánico (mg kg ⁻¹)	108.9 a	78.4a	76.7 a	73.5 a
N total (mg kg ⁻¹)	3,188.1 a	1,656.6 b	1,596.9 b	1,361.5 b
P (mg kg ⁻¹)	36.4 a	31.39 a	20.83 b	8.27 b
K(mg kg ⁻¹)	335.6 a	185.6 b	169.2 b	164.4 b

1, 2, 3 y 4 zona de muestreos (9, 9, 12 y 9 número de muestras obtenidas en cada zona respectivamente). Valores de medias con igual letra dentro de líneas, son estadísticamente iguales (Tukey, 5%).

Acorde con lo analizado, se puede inferir que el sistema MIAF, favorece la acumulación de la MO en sectores donde por prácticas propias del sistema se depositan y acumulan residuos orgánicos del sistema. El sistema MIAF, favorece la inactivación de iones tóxicos como el Al³⁺ en ciertos sectores del mismo, con las implicaciones correspondientes en términos de mayor disponibilidad de nutrientes. Esto se ha visto reflejado en la producción de maíz en en la región de los Tuxtlas en los ciclos primavera verano (P-V-) y otoño invierno (O-I) en 2015 y 2016, el rendimiento promedio obtenido para maíz fue de 2.2 a 2.5 t y de 0.5 t en O-I. coincidente con lo reportado por López (2008) en la región mazateca del estado de Oaxaca, el rendimiento incremento de 0.7 a 1.2 t ha⁻¹ de maíz en el MIAF, en labranza tradicional la producción promedio es de 1.22 de t ha⁻¹ en maíz y 0.08 de frijol sin embargo se reportan pérdidas económicas.

Se puede afirmar que el sistema de manejo del suelo MIAF, desde el punto de vista de las propiedades químicas evaluadas, propicia que haya sectores dentro del área que incrementen su

magnitud, mientras que en otras áreas dichos valores se mantiene relativamente constantes (Figura 19).

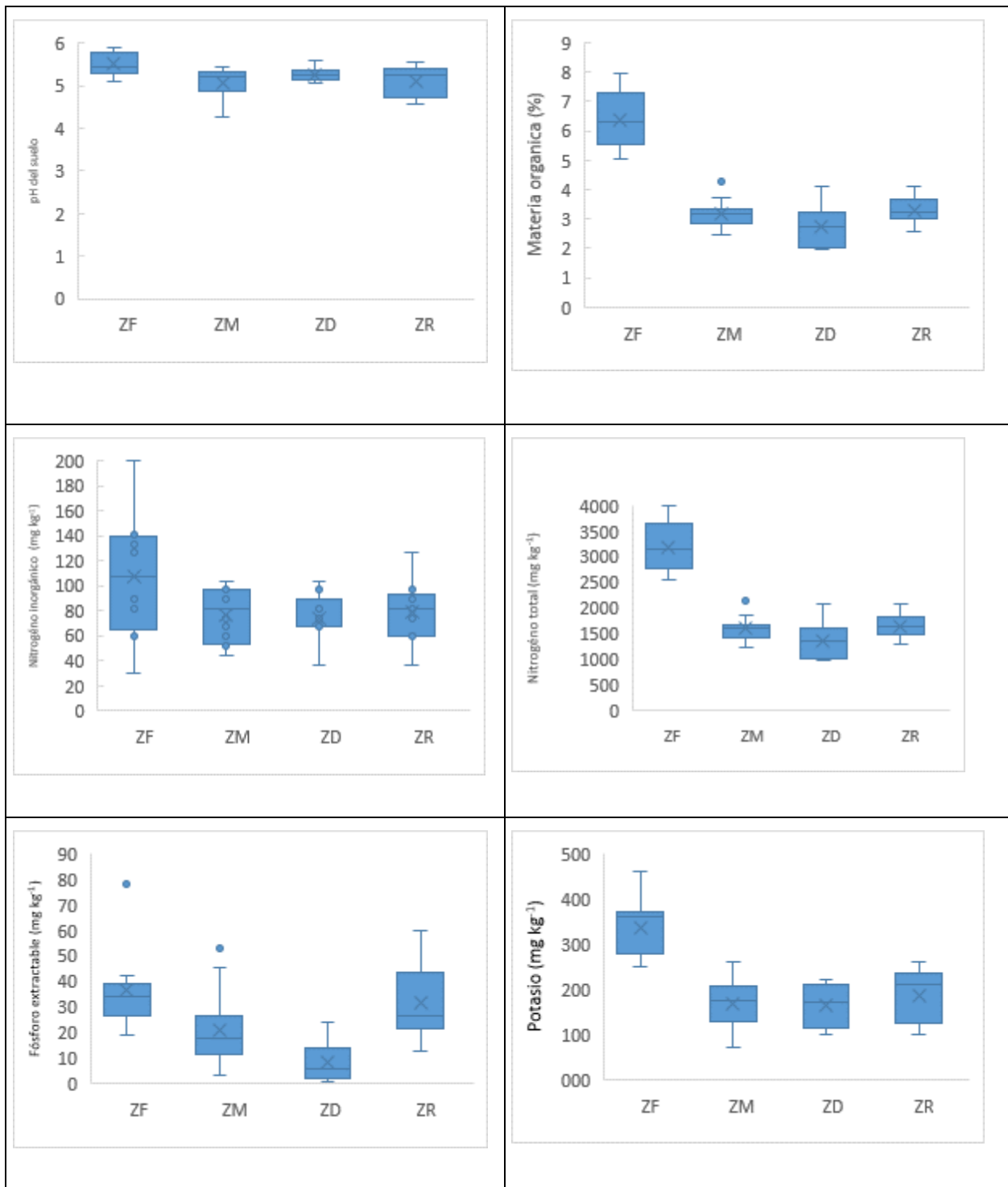


Figura 19. Propiedades químicas dentro de los sistemas de manejo MIAF e intervalo de variación. ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona del filtro y ZD=zona donadora.

6.3 Propiedades biológicas

Variación de CO₂ por tratamiento y sistema de manejo. La cantidad de CO₂ registrada en 10 días (Figura 20) en el filtro tiene valores cercanos a 90 mg de CO₂ por kg de muestra. Esto se debe a la cantidad de MO acumulada por la colocación de residuos de cosecha, poda y por la caída de hojarasca para su posterior mineralización. Además, en diferentes localizaciones de las parcelas, se encontró que la cantidad de CO₂ está acorde con la cantidad de MO que tienen. La cantidad de CO₂ es diferente en las distintas ubicaciones de la parcela. La cantidad de CO₂ disminuyó de la siguiente manera: Filtro > intermedia > baja > alta, lo cual tiene concordancia con las concentraciones de MO en el suelo.

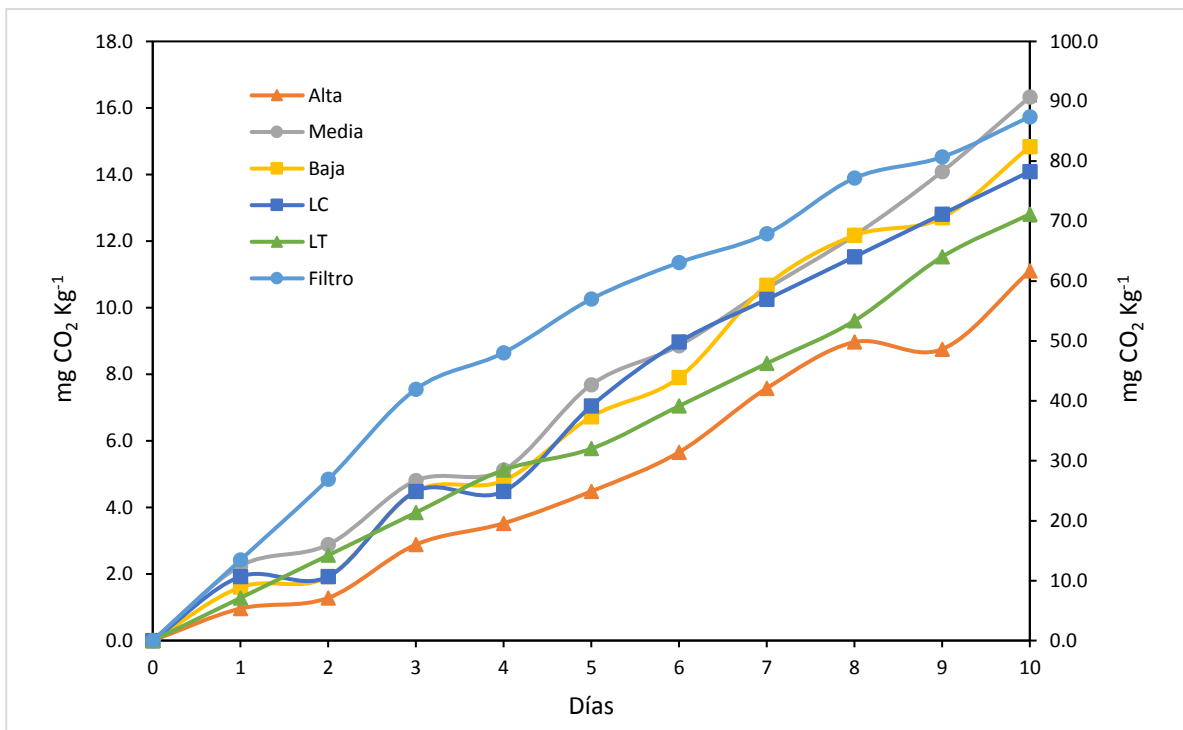


Figura 20. Respiración diaria en muestras de suelos en parcelas a nivel. Muestras Filtro (eje derecho). LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.

En el

Cuadro 15 se puede observar los valores de Carbono (C) desprendido desde el suelo con respecto al carbono almacenado en el suelo en una hectárea se observa que en el sistema MIAF se desprende 0.6% más C que en los sistemas LC y LT, debido a la mayor aportación de residuos de

cosecha en el MIAF lo que concuerda con la actividad metabólica de los microorganismos en dicho sistema.

Cuadro 15. Carbono desprendido a través de la respiración en los tres sistemas de producción.

Zona muestreada	CO ₂	C desprendido	C almacenado	C org desprendido*
	mg kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	%
ZD	55.19	0.033	34.23	0.10
ZF	563.62	0.338	81.37	0.42
ZM	84.76	0.051	35.29	0.14
ZR	77.82	0.047	46.89	0.10
LT	67.89	0.041	36.51	0.11
LC	77.5	0.047	34.20	0.14
MIAF total	781.39	0.469	185.04	0.76

MIAF=total del sistema, ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona del filtro, ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación. *C org con respecto al almacenado en el suelo.

Actividad y diversidad metabólica microbiana

De los resultados de AWCD (desarrollo de color), en las lecturas tomadas a las 72 h se encontraron tendencias más evidentes, comparado con las lecturas antes y después. Se observaron cambios en la actividad metabólica estimada a partir del AWCD en cada una de los diferentes sitios de muestreo. En la parte baja la zona de receptora se concentra la mayor diversidad de microorganismos debido a la cantidad de materia orgánica (6.38%), esto se debe a que la actividad metabólica es mayor debido al consumo de sustratos orgánicos y las comunidades microbianas dependen de la cantidad de MO disponible (Galazka y Furtak, 2019); además, la descomposición por la biomasa del suelo recircula a la atmosfera C en forma de CO₂ (García, 2008) lo que coincide con los resultados obtenido en los sitios de muestreo (Figura 21).

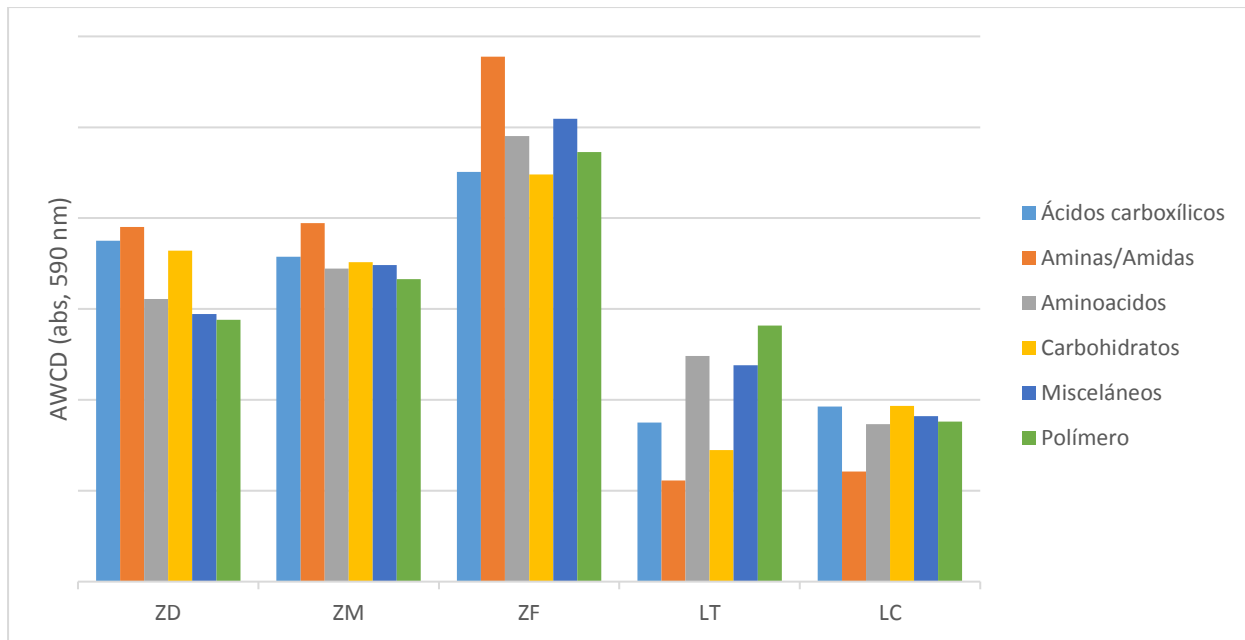


Figura 21. Actividad metabólica funcional (Determinada mediante placas Biolog EcoPlate) de las comunidades microbianas en las diferentes zonas muestreadas. ZD= zona donadora, ZM= zona media, ZF= zona del filtro, LT= labranza tradicional y LC= labranza de conservación.

Las diversidades funcionales de las comunidades microbianas de las zonas de muestreo en cada sistema presentaron diferencias significativas en las en los grupos de fuentes de carbono. Se observaron índices mayores en las zonas del MIAF; especialmente, en la zona del filtro; en la cual se concentra la materia orgánica del sistema (Cuadro 16 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Es por eso que también la respiración es mayor en esta zona del filtro. En contraparte, las comunidades de microorganismos y la respiración son menores en la zona alta del sistema MIAF; es decir, en la zona donadora de materiales. Adicionalmente, los grupos funcionales pertenecientes al ciclo del N en los suelos (microorganismos que utilizan aminoácidos, aminas y amidas como fuentes de C) presentaron un aumento evidente en las zonas del filtro, comparado con las zonas media y alta del sistema MIAF y los valores más bajos se presentaron en labranza tradicional y de conservación (Figura 21). En este sentido, los valores más bajos de respiración se presentaron en la parte alta del sistema MIAF, labranza tradicional y de conservación, en ese orden.

Así mismo, esta mayor actividad de grupos funcionales de microorganismos encontrada en la zona del filtro del sistema MIAF se relaciona con otras variables en las que los valores más destacados

se presentaron en esta misma zona. Por ejemplo, el pH más cercano a la neutralidad, mayor contenido de MO, N inorgánico, N total, P total, P extractable y K (Figura 19).

Cuadro 16. Diversidad funcional de las comunidades microbianas en las distintas zonas del sistema MIAF y en los sistemas de labranza tradicional y de conservación presentes en la parcela de estudio.

Zona	Ácidos carboxílicos	Aminas/ Amidas	Aminoácidos	Carbohidratos	Misceláneos	Polímeros
Donadora	1.054 a	0.243 a	0.618 b	0.809 a	0.297 c	0.390 c
Media	1.003 ba	0.24 a	0.653 b	0.775 a	0.329 bac	0.425 cb
Filtro	0.959 bc	0.254 a	0.68 b	0.744 ba	0.349 a	0.441 b
Labranza Tradicional	0.922 c	0.14 c	0.788 a	0.499 c	0.300 bc	0.561 a
Labranza conservación	0.998 ba	0.164b	0.638 b	0.657 b	0.337 ba	0.425 cb

De manera similar a lo presentado con la diversidad microbiana expresada en desarrollo de color (AWCD); los índices de diversidad de Shannon-Weaver presentaron una tendencia (Figura 22).

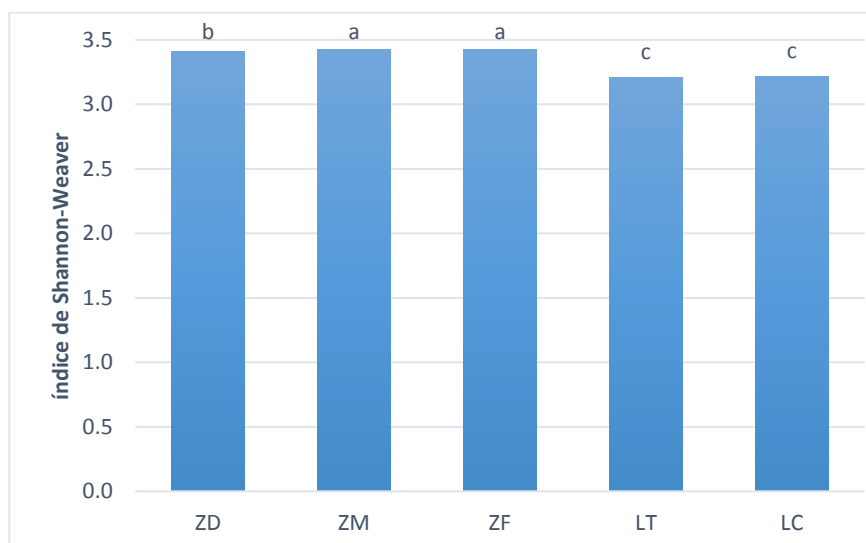


Figura 22.. Índice de Shannon-Weaver para diversidad metabólica en las zonas de muestreo.

6.4 Propiedades hidrológicas

La velocidad de infiltración inicial más rápida se presentó en la zona ZM donde se presentó menor contenido de humedad al momento del muestreo (22.2 %). La infiltración básica de los suelos es muy similar en todos los sitios de muestreo, lo que indica que hay una tendencia a ser un constante. Esto sugiere que, para tormenta de alta intensidad inicial, el sistema MIAF tiene la capacidad de propiciar la infiltración del agua del suelo. Después de los 180 min las lecturas de infiltración se

estabilizaron, la zona con mayor infiltración fue en ZF que por su rápida infiltración la toma de lectura no fue exacta, seguida por LC, ZR, ZM, LT y ZD (

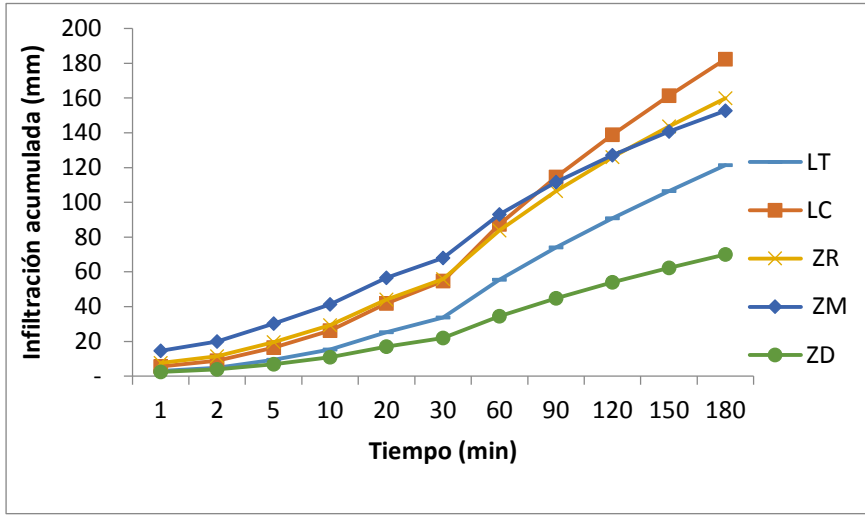


Figura 24).

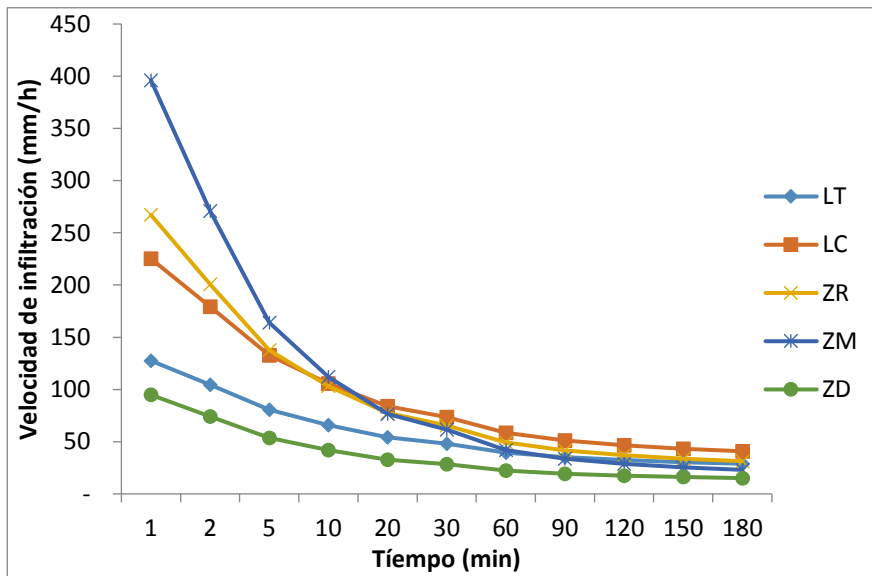


Figura 23. Velocidad de infiltración en 180 minutos en los sitios de muestreo. ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZF=zona filtro, ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.

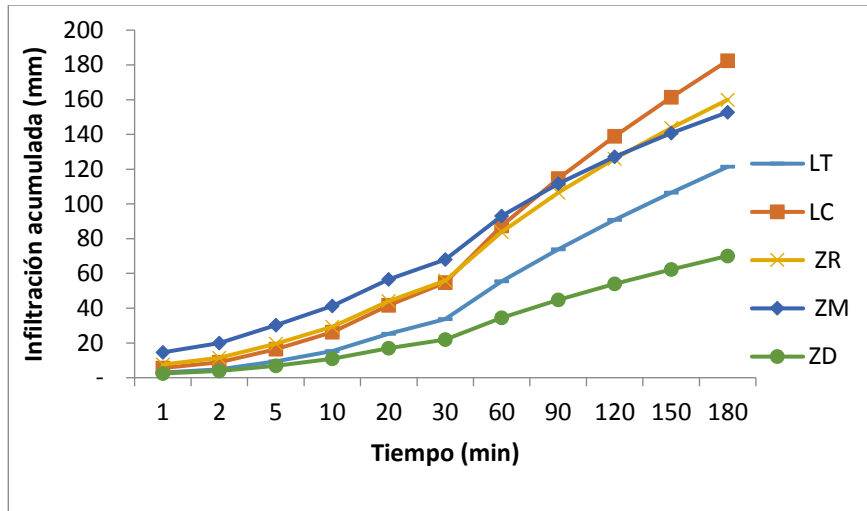


Figura 24. Infiltración acumulada del agua en el suelo en los sitios de muestreo. ZM=zona media, ZR=zona receptora, ZCF=zona cercana al filtro ZD=zona donadora, LT=labranza tradicional y LC=labranza de conservación.

Las propiedades hidrodinámicas de los suelos bajo el sistema MIAF muestran su capacidad para retener y desalojar los escurrimientos a través del filtro colocado aguas arriba de los árboles frutales y de la estabilidad estructural de los suelos que permite las altas tasa de infiltración del agua en el suelo.

6.5 Características topográficas del terreno

En la Figura 25 se observa en el sistema MIAF las alturas de cada una de las hileras, que de acuerdo a la dinámica de remoción y depositación del suelo en la parcela de estudio con el sistema MIAF, el suelo erosionado es retenido en los filtros de escurrimiento, actualmente la pendiente de la sección del módulo experimental de estudio es de 16%.

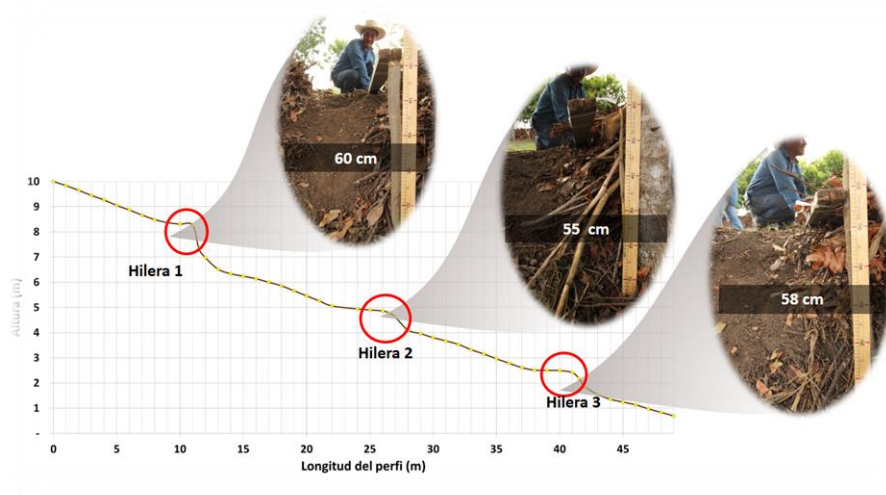


Figura 25. Área formada por los filtros de escurrimiento en el sistema MIAF en el área experimental ATF, Axochío, Veracruz Ignacio de la Llave.

En el Cuadro 17 se muestran la cantidad de suelo retenido en $t\ ha^{-1}$, considerando la Dap en las zonas filtro y el área obtenida de las lecturas medidas en los perfiles longitudinales, considerando los años desde que se implementó el sistema hasta el momento de la toma de datos. Los filtros de escurrimiento permiten la retención del suelo, agua y nutrimentos a diferencia de los sistemas LC y LT.

Cuadro 17. Suelo retenido en los filtros de escurrimiento de la parcela MIAF

Posición	Área	Volumen	Dap	Peso	Long de hileras	Peso suelo retenido	Peso suelo retenido
	m^2	m^3m	$t\ m^{-3}$	$t\ m$	mha^{-1}	$t\ ha^{-1}\ 14\ años$	$t\ ha^{-1}\ año^{-1}$
Hilera 1	1.18	1.18	1.22	1.4396	700	1,007.72	71.98
Hilera 2	1.44	1.44	1.22	1.7568	700	1,229.76	87.84
Hilera 3	1.77	1.77	1.22	2.1594	700	1,511.58	107.97

Dap=Densidad aparente.

En la Figura 26 se muestra el plano topográfico con curvas a nivel a cada metro del terreno con MIAF, las hileras de árboles plantados modificación de la pendiente del terreno debido a la formación de las terrazas perpendicular a la pendiente en curvas de nivel lo que permite la formación de terrazas.

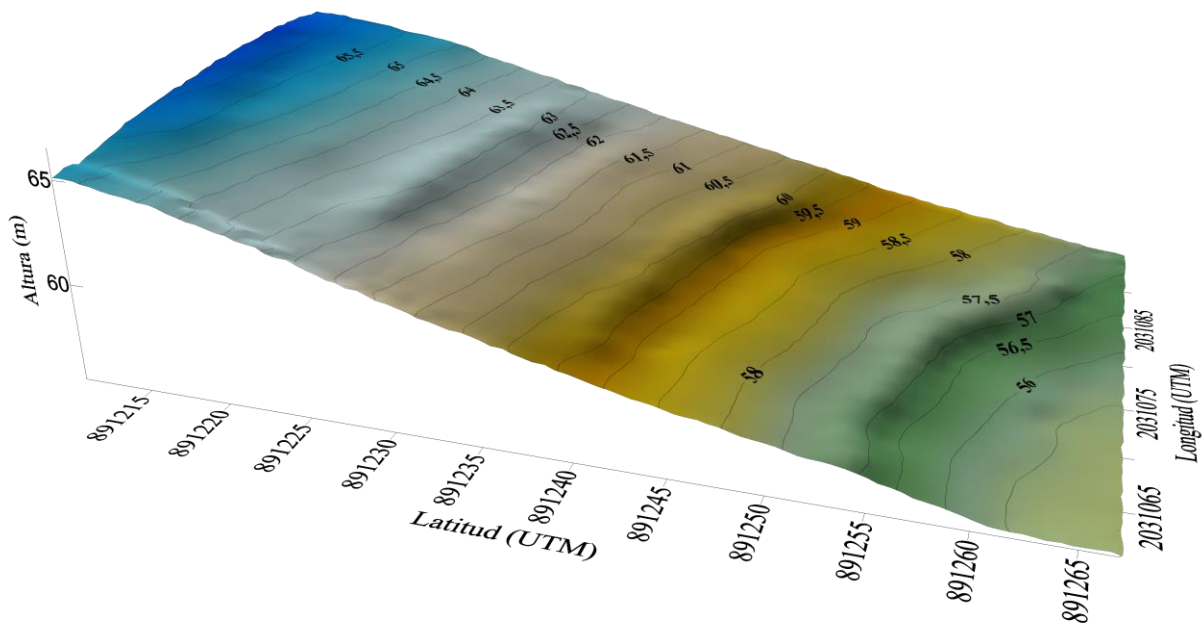


Figura 26. Curvas a nivel del sistema MIAF en el campo experimental ATF

Por lo anterior mencionado se puede inferir que el MIAF modifica la topografía del terreno al retener sedimentos, lo que coincide con el registro promedio de ocho años, esta tecnología resultó eficiente en el control de la erosión ($2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), ya que disminuyó significativamente la pérdida de suelo en comparación con la tecnología tradicional en la que se llegan a perder hasta $146 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Francisco-Nicolás *et al.*, 2006).

VII. CONCLUSIONES

El sistema MIAF es eficiente para mejorar las propiedades hidrodinámicas de los suelos con una alta capacidad de almacenamiento del agua en el suelo y paso del agua a través del perfil del suelo.

Las propiedades físicas no tuvieron cambios significativos entre los tres sistemas de producción.

En el sistema MIAF la zona del filtro el índice de estabilidad, diámetros medio ponderado, humeado y humedad aprovechable fue mayor y presentó la menor densidad aparente que en las demás zonas.

Las propiedades químicas que tuvieron efecto significativo en el sistema MIAF fue materia orgánica y nitrógeno total.

Dentro del MIAF las propiedades químicas fueron mayores en la zona del filtro de escurrimiento.

Las propiedades biológicas la pérdida de C orgánico desprendido como CO₂ es muy baja respecto a la magnitud de C almacenado en el suelo, a pesar de ser más alta la actividad microbiana en el sistema MIAF. La zona filtro tiene mayor actividad metabólica pero menor diversidad de microorganismos.

VIII. LITERATURA CITADA

- Acevedo, S.O., Valera P.M., Prieto P.M. 2010. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan Hidalgo México. *Uciencia* 26(2):137-15
- Albino-Garduño, R., A. Turrent-Fernández, J.I. Cortés-Flores, A. González-Estrada, M. C. Mendoza-Castillo, V. H. Volke-Haller, and H. Santiago-Mejía, Horacio. 2016. Optimización económica de N, P, K y densidades de plantación en maíz y frijol intercalados. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 7(5): 993-1004.
- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, Antonio, Cortés-Flores, J. Isabel, Livera-Muñoz, Manuel, & Mendoza-Castillo, M. Carmen. 2015. Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5), 513-531
- Albrecht, A. and Kandji, S. T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 15–27. doi:10.1016/s0167-8809(03)00138-5.
- Alexander, M. 1980. *Introducción a la microbiología del suelo*. Ed. Libros y editoriales S.A. México D.F. pp. 491.
- Álvarez, S. 2005. La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. *Ecosistemas* 14 (2): 17-29.
- Atlas, R.M y Bartha R. 2002. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. 4 edición Pearson Eduaction S.A. Madrid, España pp.: 386-406.
- Barrales-Brito, E., D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno, F. Paz-Pellat y V. Saynes-Santillán. 2014. In vitro determination of CO₂ emission in forest litter. *Agrociencia* 48(7), 679-690.
- Bernot, M.J., E.C. Martin, and R.J. Bernot. 2010. The influence of trophic complexity on preferential uptake of dissolved inorganic and organic nitrogen: a laboratory microcosm experiment. *J. North Am. Benthol. Soc.* 29 (4), 1199e1211.

- Bertol, F.L. I., Engel, A.L. Mafra, O.J. Bertol and S.R. Ritter. 2007. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil and Tillage Research* 94(1):142-150.
- Bohn H. L. B. L. McNeal and G. A. O'Connor. 2001. *Soil Chemistry*. 3rd ed. New York: Wiley and Sons. USA.
- Bolaños-González, M. A., F. Paz-Pellat, C. O. Cruz-Gaistardo, J. A. Argumedo-Espinoza, V. M. Romero Benítez and J. C. de la Cruz Cabrera. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34(3):271-288.
- Bray, R. H. y L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59(1):39-46.
- Camas-Gómez R., A. Turrent-Fernández, J. I. Cortes-Flores, M. Livera-Muñoz, A. González-Estrada, B. Villar-Sánchez, J. López-Martínez, N. Espinoza-Paz y P. Cadena-Iñiguez. 2012. Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(2):231-243.
- Carreón-Cruz P. 1995. Obtención de un modelo matemático para determinar el nitrógeno total de un suelo en función del contenido de materia orgánica, pH y textura. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos.
- Carreón-Cruz, P., A. Vázquez Alarcón y H. Hugo Rebolledo Robles. 1995. Modelo matemático para cuantificar el nitrógeno total en suelos, en función de su contenido de materia orgánica. XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas. noviembre de 1995.
- Chen, F., Zheng, H., Zhang, K., Ouyang, Z., Lan, J., Li, H., and Shi, Q. 2013. Changes in soil microbial community structure and metabolic activity following conversion from native *Pinus*

- massoniana plantations to exotic Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management* 291:65-72.
- Collis-George, N. and Figueroa, B.S. 1984. The use of soil moisture characteristics to assess soil stability. *Australian Journal of Soil Research*. 22:349-356.
- Comisión del Papaloapan. 1975. Atlas Climatológico e Hidrológico de la Cuenca del Papaloapan. Secretaría de Recursos Hidráulicos, México. 19 p.
- Corrales-Pérez, D. 2001. Evaluación de tres especies de barreras vivas, sobre el control de erosión, ingresos económicos y la producción de maíz (*Z. mays* L.) y frijol (*P. vulgaris* L.). Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria, UNA.
- Cortés, F. J. I., Torres J. P. Z., Turrent, F. A., Hernández E. R., Ramos, S. A. y Jiménez, S. L. 2010. Manual actualizado para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados, México. 30 p.
- Cortés F., J. I. 2004. Tecnologías alternativas sostenibles. *In* Proyecto Manejo Sostenible en Laderas. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco. México.
- Cortés, F. J. I. y Turrent, F. A. 2012. Una tecnología multiobjetivo para pequeñas unidades de producción. *In*: Calva, J. L. (Coord.). Políticas agropecuarias, forestales y pesqueras. Juan Pablos Editor. 162-178 pp.
- Cencil soil testing and plant analysis (CSTPA). 1980. Handbook on reference methods for soil testing (Revised edition). Concil Soil Testing and plant analysis. Athens Georgia, USA.
- FAO. 2019. Conservación del Suelo [En línea]. Disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/conservacion-del-suelo/es> (revisado el 12 enero 2019).
- Francisco-Nicolás, N., A. Turrent-Fernández, J. L. Oropeza-Mota, M. R. Martínez-Menes y J. I. Cortés-Flores. Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. 2006. Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana* 24 (2):253-260.

- Francisco-Nicolás, N., A. Turrent-Fernández, H. E. Flores-López, M. R. Martínez-Menes, y J. F. Enríquez-Quiroz. 2010. Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana* 28(1), 71-78.
- Fred Magdoff and Harold van Es. 2009. *Building soils for better crops: sustainable soil management* 3rd ed. USDA. Series: Sustainable Agriculture Network handbook series; book. 10. 294 p.
- Gabioud, E. A., Wilson, M.G. and Sasal, M. C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del suelo* 29 (2):129-13
- Gałązka, A. and Furtak K. 2019. Chapter 20 Functional Microbial Diversity in Context to Agriculture. *Functional Microbial Diversity in the genomic era* 347-358. doi:10.1016/b978-0-12-814849-5.00020-4
- García, Y., W. Ramírez y S. Sánchez. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 35(2): 125-138.
- García, A., (2008). “La materia orgánica (MOS) y su papel en la lucha contra la degradación del suelo”. XI Congreso Ecuatoriano de la ciencia del suelo. 29-31 de octubre de 2008, Quito, Ecuador.
- Garland, J. L. y Mills, A. L., 1991. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon source utilization. *Applied and Environmental Microbiology* 57(8):2351-2359.
- Gerke, J. 1994. Aluminum complexation by humic substances and aluminum species in the soil solution. *Geoderma* 63 (2):165-175.
- Graetz, H. A. 1997. *Suelos y su fertilización*. F. Luna Orozco. Trillas México p. 80
- Harte, J. and Kinzig, A. P. 1993. Mutualism and competition between plants and decomposers: Implications for nutrient allocation in ecosystems. *American Naturalist* 141:829-846.

- Hünнемeyer, J.A. De Camino, R. y S. Müller.. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 157 p.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014a. Guía para la interpretación de cartografía de erosión del suelo escala 1:250 000, serie I.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014b. Conjunto de datos de erosión de suelos, escala 1:250 000 serie I, continuo nacional.
- Jackson, M. L. 1964. Análisis químicos de suelos (Traducido por J. Beltrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.
- Jamioy-Orozco, D. D., J. C. Menjivar-Flores y Y. Rubiano-Sanabria. 2015. Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica* 64 (4): 302-307.
- Juárez-Ramón, D. y Fragoso, C. 2014. Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. *Acta Zoológica Mexicana* 30(3):637-654.
- Juárez-Ramón, D., C. Fragoso G., A. Turrent F., J. Ocampo M., E. Sandoval C., I. Ocampo F., Ronald Ferrera C., Ernesto Hernández R. 2008. Mejoramiento del suelo en la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). *LEISA revista de agroecología*. Septiembre 30-31 p.
- Julca, O. A., Meneses F. F. Blas S. R. y Bello A. S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESA (Chile)* 24:49-61
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Schuman. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- Kaur, B., Gupta, S. R., & Singh, G. (2000). Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India. *Applied Soil Ecology* 15(3):283–294. doi:10.1016/s0929-1393(00)00079-2

- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development* 12(6): 519-539
- Lal, R. 2003. Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation & Development*, 14(3):309–322. doi:10.1002/ldr.562
- Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220:242–258.
- Lal, R. 1998. Soil Quality and sustainability. In: Lal, R., W.H. Blum, C. Valentine y B.A. Stewart (Eds). *Methods for assessment of soil degradation. Advances in Soil Science*. Boca Raton, New York, CRC Press.
- Le Bissonnais. Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology *European Journal of Soil Science* 47:425-437
- León, A, M. M, Hernández, J., O L, Figueroa, R., E, Valtierra, P., J F, Núñez, E., M, Escalona, M., A, Quispe, L., L. Jiménez, S. y F. Medina, S. 2005. Evaluación socioeconómica en comunidades indígenas. En Informe de actividades 1999-2005. 2005. VII Reunión del comité técnico de coordinación y seguimiento. Colegio de Postgraduados, México.
- López-Gaytán, J., L. Jiménez-Sánchez, A. León-Merino, O. L. Figueroa-Rodríguez, M. Morales-Guerra, y V. González-Romero. 2008. Escuelas de campo, para capacitación y divulgación con tecnologías sustentables en comunidades indígenas. *Agricultura técnica en México* 34: 33-42.
- Mendoza-Robles, R., J.I. Cortés-Flores, A. Turrent-Fernández, F. Parra-Inzunza y N. Estrella-Chulim. 2006. Proyectos de investigación-transferencia del sistema frutales-cultivos anuales en Puebla y Oaxaca, México. *In X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos* Valencia, 13-15 septiembre.
- Meza-Pérez, E. y D. Geissert-Kierntz. 2003. Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 5(2):57-61

- Morales-Guerra, M., L. Jiménez-Sánchez y A. Ramos-Sánchez. 2007. Manual de capacitación y divulgación de la tecnología de maíz intercalado con árboles frutales. Libro técnico No. 9. INIFAP. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. Santo Domingo Barrio Bajo, Etna, Oaxaca. México 164 pág.
- Moreno, D.R., 1978. Clasificación de pH del suelo, contenido de sales y nutrimentos asimilables. INIA-SARH, México, D.F.
- Navarro-Bravo, A., B. Figueroa-Sandoval, M. R. Martínez-Menes, F. González-Cossio y E. S. Osuna-Ceja. 2008. Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México* 34(2): 151-158.
- Ortíz, S. C. A. 2010. Edafología 8ª Edición. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Texcoco, México.
- Orozco-Cirilo, S., Ramírez-Valverde, B., Ariza-Flores, R., Jiménez-Sánchez, L., Estrella-Chulim, N., Peña-Olvera, B., Ramos-Sánchez, Á. y Morales-Guerra, M. 2009. Impacto del conocimiento tecnológico sobre la adopción de tecnología agrícola en campesinos indígenas de México. *Interciencia* 34 (8): 551-555
- Pacheco A.J., Pat C.R., Cabrera S.A. 2002. Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. Artículo de divulgación, *ingeniería* 6(3): 73-81.
- Pérez-Nieto, J., E. Valdés-Velarde, M. E. Hernández-San Román y V. Ordaz-Chaparro. 2004. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia* 39: 409-418.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Blair, R. 1995. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science* 267(5201):1117-1123.
- Procházka, J., Pokorný, J., Vácha, A., Novotná, K. and Kobesová, M. 2019. Land cover effect on water discharge, matter losses and surface temperature: Results of 20 years monitoring in the Šumava Mts. *Ecological Engineering* 127: 220–234.

- Salinas, S, R. 2005. Caracterización topográfica, física y de fertilidad de un suelo de ladera manejado con el Sistema de Milpa Intercalado con Árboles Frutales durante cinco años. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Salinas-García J. R., A. D. Báez-González, M. Tiscareño-López, E. Rosales-Robles. 2002. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil and Tillage Research* Volume 59, Issues 1–2: 67–79
- Sánchez -Alcalá I., M. C. del Campillo and J. Torrent. 2015. Critical Olsen P and CaCl₂-P levels as related to soil properties: results from micropot experiments. *Soil Use and Management* 31 (2): 233-240. DOI: 10.1111/sum.12184
- SEMARNAT-UACH 2003. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000.
- SEMARNAT y CP. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México. 2003.
- SEMARNAT, Dirección de Geomática. (01 de 12 de 2012). Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Obtenido de Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000:
- SEMARNAT. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México. 2013.
- SEMARNAT. Resumen Ejecutivo. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México. 2016
- Soil Science Society of America. 1997. Glossary of Soil Science Terms 1996. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Sparks D. L. 2003. Environmental soil chemistry. Second edition. Academic Press. San Diego Cal. USA.

- SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA. df
- Swift, M. J., O. W. Heal and J.M. Anderson. 1979. Descomposición en terrestres ecosistemas. Blackwell Scientific Publications, Oxford. Reino Unido.
- Thangata, P. H., and Hildebrand, P. E. (2012). Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: Mechanisms for “reducing emissions from deforestation and forest degradation” (REDD+). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 172–183. doi:10.1016/j.agee.2012.06.007
- Thompson, L.M and Troeh F.R. 1982. Los suelos y su fertilidad 4 edición. Ed. Reverte S.A. Madrid España. pp. 649.
- Tian, Y., Zhang, X., Wang, J. y Gao, L. 2013. Soil microbial communities associated with the rhizosphere of cucumber under different summer cover crops and residue management: A 4-year field experiment. *Scientia Horticulturæ* 150:100-109.
- Turrent-Fernández. A., J. I. Cortés-Flores, A. Espinosa-Calderón, E. Hernández-Romero, R. Camas-Gómez, J. P. Torres-Zambrano y A. Zambada-Martínez. 2017. MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(5): 1169-1185.
- Turrent-Fernández, A., N. Francisco-Nicolás, S. Uribe-Gómez y R. Camacho-Castro. 1998. La terraza de muro vivo una tecnología para la explotación sostenible de laderas roturadas del trópico subhúmedo de México. *Agric. Tec. Mex.* 24: 67-81.
- Uribe-Gómez, S. y N. Francisco-Nicolás y A. Turrent-Fernández. 2002. Pérdida de suelo y nutrientes en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia*, 36 (2), 161-168.
- Van Reeuwijk, L. P. (ed.). 1999. Procedimientos para Análisis de Suelos. 1ª ed. Español. Montecillo: Colegio de Postgraduados.

- Veeken, A. H. M., V. Wilde, and H. V. M. Hamelers. 2003. OxiTop® measuring system for standardised determination of the respiration rate and N mineralization rate of organic matter in waste material, compost and soil. Department of Environmental Technology, Wageningen University & NMI, Netherlands.
- Velasco, M., H. A. 1983. *Uso y Manejo del Suelo: Estudios de Campo, Determinaciones Físicas y Químicas, Prácticas de Recuperación y Manejo*. Limusa. México. 191 p.
- Walkley, A.J. and Black, I.A. 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29-38.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses*. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. 58 pp.