



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**EROSIÓN HÍDRICA, PRODUCTIVIDAD, CAPTURA DE
CARBONO Y USO DE LA RADIACIÓN SOLAR Y AGUA EN
TRES SISTEMAS DE MANEJO, PARA LA AGRICULTURA DE
LADERA EN EL TRÓPICO SUBHÚMEDO DE MÉXICO**

ROBERTONY CAMAS GÓMEZ

T E S I S

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

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2011

La presente tesis titulada: **Erosión hídrica, productividad, captura de carbono y uso de la radiación solar y agua en tres sistemas de manejo, para la agricultura de ladera en el trópico subhúmedo de México**, realizada por el alumno: **Robertony Camas Gómez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. JOSÉ ISABEL CORTÉS FLORES

DIRECTOR DE TESIS: 
DR. ANTONIO TURRENT FERNANDEZ

ASESOR: 
DR. MANUEL LVERA MUÑOZ.

ASESOR: 
DR. BERNARDO VILLAR SÁNCHEZ

ASESOR: 
DR. NÉSTOR ESPINOSA PAZ

ASESOR: 
DR. ADRIAN GONZALEZ ESTRADA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2011

EROSIÓN HÍDRICA, PRODUCTIVIDAD, CAPTURA DE CARBONO Y USO DE LA RADIACIÓN SOLAR Y AGUA EN TRES SISTEMAS DE MANEJO, PARA LA AGRICULTURA DE LADERA EN EL TRÓPICO SUBHÚMEDO DE MÉXICO

Robertony Camas Gómez, DR.

Colegio de Postgraduados, 2011

En el trópico subhúmedo de México, la mayor parte de la agricultura se lleva a cabo en pequeñas unidades de producción en laderas abruptas truncadas donde la erosión del suelo es la principal causa de los bajos rendimientos e ingresos económicos. Con el objetivo de encontrar alternativas tecnológicas sostenibles, se evaluaron a nivel de microcuenca los sistemas: maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP); maíz en barreras de muro vivo (MBMV) y milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), en términos del control de la erosión, productividad, uso del agua y radiación solar, y captura de carbono. En los tres sistemas se determinó la relación entre la posición del suelo en la ladera en función de la pendiente con las condiciones de fertilidad del mismo, lo cual indicó que es conveniente considerar diferentes dosis de fertilización. También se determinó que los sistemas MIAF y MBMV contribuyeron a mejorar la fertilidad del suelo. Este efecto fue mayor sobre las áreas receptoras establecidas aguas arriba del filtro de escurrimientos por efecto del incremento en la acumulación de sedimentos, nutrimentos y la infiltración del agua de lluvia. El sistema MIAF y MBMV redujeron en 36% la entrega de sedimentos en las microcuencas con respecto al sistema MLCP, a la vez el sistema MIAF contribuyó a disminuir la pérdida de fósforo y nitrógeno en el escurrimiento y MBMV sólo el del fósforo. El sistema MIAF presentó mayor rentabilidad y eficiencia relativa de la tierra, uso más eficiente de la radiación solar y del agua, así como mayor captura de carbono por unidad de área con respecto a los sistemas MBMV y MLCP. Esto se debe a la interacción agronómica positiva entre los árboles frutales, maíz y frijol que permite una mayor eficiencia en el uso de los recursos, lo que da lugar a una productividad sostenible de las pequeñas unidades de producción, contribuyendo además con servicios ambientales.

WATER EROSION, PRODUCTIVITY, CARBON CAPTURE, AND USE OF SOLAR RADIATION AND WATER IN THREE MANAGEMENT SYSTEMS FOR HILLSIDE AGRICULTURE IN THE MEXICAN SUB-HUMID TROPICS

Robertony Camas Gómez, DR.

Colegio de Postgraduados, 2011

In the Mexican sub-humid tropics, most agriculture is done in small production units on broken hillsides, where soil erosion is the main cause of low yields and low economic incomes. With the objective of finding sustainable technological alternatives, the following systems were evaluated at the micro-basin level: corn with no tilling and grazing (MLCP), corn in live fence barriers (MBMV), and mixed crops with fruit trees (MIAF). They were evaluated with regard to: erosion control, productivity, use of water and solar radiation and carbon capture. In all three systems, the relationship between the position of the land on the hillside with regard to the hillside and its fertility conditions was determined. This indicated that it is convenient to consider different fertilization doses. Also determined was that the MIAF and MBMV systems contributed to improve soil fertility. This effect was greater in receptor areas located upstream from the seepage filter by effect of the increase in sediment and nutrient accumulation, as well as rainwater infiltration. The MIAF and MBMV systems reduced sediment delivery in micro-basins by 36%, with regard to the MLCP system. Also, the MIAF system contributed to decrease phosphorus and nitrogen loss due to seepage, while the MBMV system only did so with phosphorus. The MIAF system showed a greater profitability and relative land efficiency, a more efficient use of solar radiation and water, and greater carbon capture per area unit than did MBMV or MLCP. This is because of the positive agronomic interaction between the trees and corn and beans, which allows for a greater efficiency in the use of resources. This, in turn, means a sustainable productivity for small production units, also contributing with environmental services.

DEDICATORIAS

A Sary, por ser mi amor, mi cómplice y todo, por apoyarme, motivarme y enseñarme que siempre hay algo por aprender para mejorar como persona. Gracias porque en mi ausencia has sabido ser padre y madre a la vez en el cuidado de nuestras hijas. Esto es parte de tus triunfos. Dios te ha de premiar por ser como eres.

A mis amadas hijas, Verónica y Julia Natalia, por llenarme de pensamientos buenos y enseñarme que vale la pena vivir. Gracias por ser buenas estudiantes y por demostrar su valentía en todos estos años que la distancia nos separó, pero no el amor.

A mis padres, René y Natividad quienes, siempre han sido ejemplo de entusiasmo, honestidad y trabajo. Gracias por darme una buena educación y enseñarme que no hay imposibles cuando se persevera en pos de objetivos buenos.

A mis hermanos, Enelyi, Rausel, María Leticia, Mario y María de Jesús. A mis sobrinos Enelyi Daniela, María Ximena, Rausel, Armando Isaac, Mariana, Leticia Anahí, René, Cristina del Rocío y Armandito. Gracias por su apoyo y por dar testimonio que somos una familia unida en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados por el apoyo brindado para realizar mis estudios de Doctorado; así como también a todos los profesores del Colegio de Postgraduados por compartir sus conocimientos y contribuir en mi formación profesional.

Al Dr. José Isabel Cortés Flores, gracias por guiarme con profesionalismo sin escatimar tiempo y esfuerzo al ser un excelente consejero y asesor de tesis. Por eso, este logro también es en buena parte suyo.

A mi Director de tesis, el Dr. Antonio Turrent Fernández quien, desde hace varios años, ha contribuido en mi formación profesional y ha sido un pilar indiscutible al dirigir acertadamente esta investigación. Gracias, ha sido un privilegio trabajar con usted.

Al Doctor Manuel Livera Muñoz, excelente profesor y asesor. Gracias por su amistad y todo el tiempo dedicado en la revisión del presente trabajo.

A los Doctores Néstor Espinosa Paz, Bernardo Villar Sánchez y Adrián González Estrada, por ser parte de mi consejo particular y contribuir con sus sugerencias para la culminación de esta tesis.

Al MC. José Donaldo Ríos Berber, agradezco todo el apoyo brindado en la asesoría para el procesamiento de los datos de escurrimiento y en la interpretación de resultados. Ha sido un excelente profesor y asesor, gracias por su amistad.

Al Dr. Eliseo Sosa Montes jefe del laboratorio de nutrición animal de la Universidad Autónoma Chapingo, por todo el apoyo para la determinación de los valores calorimétricos de las especies.

Al Dr. Néstor Espinosa Paz, Jefe del Campo Experimental Centro de Chiapas y Director en el estado de Chiapas del INIFAP y al Dr. Bernardo Villar Sánchez, gracias por el apoyo logístico brindado para desarrollar con eficiencia la fase de investigación en campo.

Al Lic. Rausel Camas Gómez porque su contribución ha sido de gran valor y apoyo en la revisión y corrección en la redacción de la presente tesis. Desde la Licenciatura has sido un gran apoyo, gracias infinitas viejo.

A mis colegas MC. Jaime López Martínez, Dr. Pedro Cadena Iñiguez y Dr. Francisco Cruz Chávez, gracias por todo el apoyo brindado que me ayudó a superar los inconvenientes que surgieron, siempre estaré agradecido con ustedes. Dios los bendiga.

Al MC. Juan Uriel Avelar Robledo por estar siempre dispuesto a brindarme su apoyo en el desarrollo de imágenes y formato de la tesis.

Al Sr. René Camas Borraz, Rausel Camas Gómez, René y Rausel Camas Pereyra, quienes formaron parte de mi equipo de trabajo devengando sólo la satisfacción de apoyarme en el arduo trabajo de campo; así como también agradezco a los ingenieros Jesús Andrey González y Domitilo Camacho, becarios del programa primer empleo.

CONTENIDO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.2 HIPÓTESIS GENERAL.....	6
1.3 SUPUESTO	6
1.4 LITERATURA CITADA.....	7
CAPÍTULO II. PRODUCTIVIDAD, EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA Y RADIACION SOLAR DE TRES SISTEMAS DE USO Y MANEJO DEL SUELO EN LADERAS	8
2.1 INTRODUCCIÓN	8
2.2 OBJETIVOS	11
2.2.1 Objetivo general	11
2.2.2 Objetivos específicos	11
2.3 HIPÓTESIS.....	11
2.3.1 Hipótesis general	11
2.3.2 Hipótesis específicas	12
2.4 SUPUESTO	12
2.5 REVISIÓN DE LITERATURA.....	12
2.5.1 Efectos del dosel.....	14
2.5.2 Competencia por agua del suelo	16
2.5.3 Competencia por nutrientes	19
2.6 MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.6.1 Localización y características edafo-climáticas del área de estudio	21
2.6.2 Microcuencas experimentales.....	22
2.6.3 Diseño experimental	24
2.6.4 Factores de estudio y su descripción	25
2.6.5 Materiales genéticos	29
2.6.6 Establecimiento y manejo de los experimentos	31
2.6.6.1 Milpa intercalada con árboles frutales.....	31
2.6.6.2 Módulos de cultivo simple de maíz, frijol y guayaba en la microcuenca MIAF, para la determinación de la eficiencia relativa de la tierra.....	36
2.6.6.3 Maíz con barreras de muro vivo	37
2.6.6.4 Maíz en labranza cero con pastoreo	39

2.6.7 Caracterización de la fertilidad del suelo.....	39
2.6.7.1 Muestreo del suelo previo al establecimiento de los experimentos	39
2.6.7.2 Muestreos del suelo a tres años del establecimiento del sistema MIAF y dos años para los sistemas MLCP y MBMV	40
2.6.7.3 Muestreo del suelo para determinar la fertilidad del suelo en la franja ocupada por la hilera de árboles y estatus nutricional del árbol de guayaba.....	41
2.6.8 Métodos de laboratorio	42
2.6.9 Estimación del rendimiento de grano de maíz y frijol, y fruto guayaba	42
2.6.10 Índice de área foliar y radiación fotosintéticamente activa interceptada en el maíz y el frijol	43
2.6.11 Contenido de clorofila	44
2.6.12 Evaluación de la productividad de los sistemas.....	45
2.6.12.1 Análisis financiero	45
2.6.12.2 Eficiencia relativa de la tierra	46
2.6.12.3 Eficiencia en la conversión de la radiación solar.....	46
2.6.12.4 Eficiencia en el uso del agua	47
2.6.13 Análisis estadístico.....	47
2.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
2.7.1 Calidad física y química del suelo	50
2.7.2 Calidad física y química del suelo tres años después bajo el sistema MIAF y dos años después bajo los sistemas MLCP y MBMV	53
2.7.2.1 Sistema MIAF.....	53
2.7.2.2 Sistemas MBMV y MLCP	56
2.7.3 Calidad del suelo en la franja de árboles de guayaba	60
2.7.4 Rendimiento, índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila en la hojas del maíz en el sistema MIAF	62
2.7.5 Rendimiento, índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila en la planta de frijol en el sistema MIAF	71
2.7.6 Rendimiento de guayaba, índice de área foliar y RFA interceptada por el árbol de guayaba.....	79
2.7.7 Rendimiento, índice de área foliar y RFA interceptada en antesis, y contenido de clorofila del maíz en los sistemas de barrera de muro vivo y labranza cero con pastoreo	84
2.7.8 Productividad de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP.....	90
2.7.8.1 Rendimiento de los cultivos en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP	91
2.7.8.2 Eficiencia relativa de la tierra del sistema MIAF	94
2.7.8.3 Análisis financiero	96

2.7.8.3.1 Costos	96
2.7.8.3.2 Beneficios.....	97
2.7.8.3.3 Calculo del rendimiento de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP	97
2.7.8.3.4 Costos y beneficios de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP	98
2.7.8.3.5 Rentabilidad económica de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP	100
2.7.9 Eficiencia en la conversión de radiación solar en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP.....	102
2.7.10 Eficiencia en el uso del agua de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP	106
2.8 CONCLUSIONES.....	109
2.9 LITERATURA CITADA.....	110
CAPÍTULO III. IMPACTO DE TRES SISTEMAS DE USO Y MANEJO DEL SUELO EN EL CONTROL DE LA EROSION HIDRICA Y PÉRDIDA DE NITROGENO Y FOSFORO EN TERRENOS DE LADERA EN CHIAPAS	121
3.1 INTRODUCCIÓN	121
3.2 OBJETIVO	125
3.3 HIPÓTESIS.....	125
3.4 MATERIALES Y METODOS	125
3.4.1 Variables evaluadas y análisis estadístico	126
3.4.1.1 Precipitación pluvial.....	126
3.4.1.2 Escurrimientos y pérdida de suelo	127
3.4.1.3 Contenido de nutrientes en el sedimento y agua escurrida	128
3.4.1.4 Análisis estadístico.....	128
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	128
3.5.1 Precipitación pluvial	128
3.5.2 Escurrimiento superficial y pérdida de suelo.....	130
3.5.3 Pérdida de nutrimentos	135
3.6 CONCLUSIONES.....	137
3.7 LITERATURA CITADA.....	138
CAPÍTULO IV. CAPTURA DE CARBONO y CO ₂ EN TRES SISTEMAS DE USO Y MANEJO DEL SUELO Y AGUA PARA LA AGRICULTURA SUSTENTABLE DE LADERAS	142
4.1 INTRODUCCIÓN	142
4.2 OBJETIVO	147
4.3 HIPOTESIS.....	147

4.4 MATERIALES Y METODOS	148
4.4.1 Experimentación	148
4.4.2 Muestreos de campo.....	150
4.4.2.1 Muestreo para la estimación de la producción de biomasa en maíz y frijol en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP	150
4.4.2.2 Evaluación de la biomasa de maíz y frijol en los módulos de cultivo simple en la microcuenca con el sistema MIAF	151
4.4.2.3 Evaluación de la biomasa de guayaba en la microcuenca bajo el sistema MIAF y módulo en cultivo simple dentro de la misma microcuenca.....	152
4.4.2.4. Estimación de la producción de biomasa de <i>Gliricidia sepium</i> en el sistema MBMV	153
4.4.3 Métodos de laboratorio	154
4.4.3.1 Separación de las diferentes partes de la planta, secado y determinación del peso	154
4.4.3.2 Porcentaje de materia seca	154
4.4.3.3 Determinación de la fracción de carbono por calorimetría	155
4.4.3.3.1 Estimación del valor calórico de la biomasa aérea, raíz, fruto, y grano	155
4.4.3.3.2 Estimación de la fracción de carbono fijado.....	155
4.5 RESULTADOS	156
4.5.1 Valor calórico de las especies evaluadas	156
4.5.2 Biomasa y carbono capturado en las diferentes partes de las plantas	158
4.5.3 Rendimiento de biomasa total, carbono y CO ₂ capturado en el maíz, frijol y guayaba en tres sistemas de uso y manejo del suelo y agua.....	160
4.5.4 Carbono y dióxido de carbono capturado en la biomasa total del maíz, frijol y guayaba en el sistema MIAF y su equivalente en área al obtenido en cultivo simple.....	162
4.6 CONCLUSIONES.....	163
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES	167
CAPITULO VI. RECOMENDACIONES.....	170

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Características generales de las microcuencas experimentales.	23
Cuadro 2.2. Reacción del suelo, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (Da), contenido de materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K) bajo tres sistemas de manejo.....	51
Cuadro 2.3. Análisis de varianza del efecto de la sección la ladera (SL), fertilización mineral (F) y sección del módulo (Sm) sobre el pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónica (CIC), pedregosidad (Ped), humedad volumétrica (θ_v), materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K) del suelo, tres años después de estar sujeto bajo el sistema MIAF.	53
Cuadro 2.4. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y sección del módulo (Sm) sobre el pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), pedregosidad (Ped), humedad volumétrica (θ_v), materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K) del suelo, dos años después de estar sujeto bajo el sistema MBMV.	57
Cuadro 2.5. Efecto de la sección de la ladera (SL), sobre el pH, materia orgánica (MO) fósforo (P), potasio (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC), humedad volumétrica (θ_v) y pedregosidad (Ped), dos años después de estar sujeto a los sistemas maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).	57
Cuadro 2.6. Efecto de la sección del módulo sobre el contenido de la materia orgánica (MO) y fosforo (P), capacidad de intercambio de cationes (CIC) y humedad del suelo (θ_v) en base a volumen, dos años después de estar bajo el sistema maíz con barreras de muro vivo.	59
Cuadro 2.7. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL) y fertilización mineral (F) sobre el pH, materia orgánica (MO), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y capacidad de intercambio	

catiónico (CIC) del suelo en la franja ocupada por los árboles de guayaba.	60
Cuadro 2.8. Efecto de la sección de la ladera (SL) sobre el pH, la materia orgánica (MO), magnesio (Mg) y capacidad de intercambio de cationes (CIC), en la franja ocupada por el árbol de guayaba.	61
Cuadro 2.9. Efecto de la fertilización mineral (F)) sobre el fósforo, la capacidad de intercambio de cationes (CIC), potasio (K) y calcio (Ca) en la franja de suelo ocupada por el árbol de guayaba.	61
Cuadro 2.10. Análisis de varianza del rendimiento de grano de maíz en el sistema MIAF.....	63
Cuadro 2.11. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y posición de la hilera (Ph) sobre el índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada del maíz, en la fase de floración del frijol y del maíz y contenido de clorofila (CC) en el sistema milpa intercalada con árboles frutales.....	63
Cuadro 2.12. Transmisión de radiación fotosintéticamente activa (RFA, %) en dos alturas del perfil de la planta de maíz en la fase de floración, en el sistema MIAF y en cultivo simple.	68
Cuadro 2.13. Análisis de varianza del rendimiento de frijol en el análisis combinado de dos ciclos de cultivo. Primavera – verano y otoño invierno.....	72
Cuadro 2.14. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la posición de la hilera sobre el rendimiento de grano de frijol ($t\ 0.3\ ha^{-1}$) en el sistema MIAF, en el análisis combinado de dos ciclos de cultivo. Primavera – verano y otoño invierno.....	73
Cuadro 2.15. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y posición de la hilera de frijol (Ph) sobre el rendimiento (Rend), índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada del frijol en las etapas	

de floración del frijol y del maíz, y contenido de clorofila (CC) en el sistema MIAF en el ciclo primavera-verano.	74
Cuadro 2.16. Efecto de la fertilización mineral sobre el rendimiento de grano de frijol, índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada en las etapas de floración del frijol y maíz, y el contenido de clorofila del frijol bajo el sistema MIAF en el ciclo primavera-verano.	75
Cuadro 2.17. Análisis de varianza de dos años de producción de fruto de guayaba....	79
Cuadro 2.18. Efecto del año de producción en interacción con la sección de la ladera y la fertilización mineral sobre el rendimiento ($\text{kg } 0.3 \text{ ha}^{-1}$) de fruto de guayaba.	80
Cuadro 2.19. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera y fertilización mineral en la concentración de elementos mayores en hojas de árboles de guayaba de tres años de edad.	82
Cuadro 2.20. Efecto de la fertilización mineral y sección de la ladera en la concentración de los principales elementos en hojas de árboles de guayaba de tres años de edad y sus intervalos de suficiencia.	83
Cuadro 2.21. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y posición de la hilera de maíz (Ph) sobre el rendimiento de grano de maíz, índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada, y contenido de clorofila (CC) en los sistemas MBMV y MLCP.	85
Cuadro 2.22. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral y posición de la hilera sobre el rendimiento de grano de maíz ($\text{t } 0.868 \text{ ha}^{-1}$) en el sistema maíz con barreras de muro vivo.	86
Cuadro 2.23. Efecto de la posición de la hilera de maíz sobre el índice de área foliar y contenido de clorofila en el maíz, en el sistema maíz con barreras de muro vivo.	88
Cuadro 2.24. Rendimiento del maíz, frijol y guayaba bajo el sistema MIAF, en módulos de cultivo simple en la microcuenca MIAF, y rendimiento	

de maíz en cultivo simple en los sistemas MBMV y MLCP en el año 2009.	92
Cuadro 2.25. Rendimiento del maíz ($t\ 0.3\ ha^{-1}$), frijol ($t\ 0.3\ ha^{-1}$) y guayaba ($t\ 0.4\ ha^{-1}$) en el sistema MIAF y su equivalencia del rendimiento en área con respecto al rendimiento ($t\ ha^{-1}$) en los módulos de cultivo simple en la microcuenca MIAF y MLCP, y en 0.868 ha en la microcuenca con MBMV.	93
Cuadro 2.26. Eficiencia relativa de la tierra (ERT) parcial del maíz, frijol de primavera-verano (P-V), de otoño-invierno (O-I) y de guayaba en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y ERT total de este sistema.	95
Cuadro 2.27. Costos y beneficios del sistema milpa intercalada con árboles frutales para un período de 10 años.	99
Cuadro 2.28. Costos y beneficios de los sistemas maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP) para un período de 10 años.	99
Cuadro 2.29. Valor actual neto (VAN), relación beneficio costo (B/C) y tasa interna de retorno (TIR) en los sistemas MIAF ^z , MBMV ^y y MLCP ^x para un período de cuatro y diez años.	100
Cuadro 2.30. Eficiencia en la conversión de radiación solar en la materia seca del maíz, frijol y guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).	103
Cuadro 2.31. Eficiencia en la conversión de radiación solar en grano de maíz y frijol, y fruto de guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).	104
Cuadro 2.32. Eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa total de maíz, frijol y guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en	

labranza cero con pastoreo (MLCP).	107
Cuadro 2.33. Eficiencia en el uso del agua en la producción de grano de maíz, frijol y fruto de guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).	108
Cuadro 3.1. Características generales de las microcuencas estudiadas.	126
Cuadro 3.2. Clasificación de los eventos de lluvia en base a milímetros de precipitación, intensidad y erosividad durante los meses de junio a noviembre del año 2009.	145
Cuadro 3.3. Escurrimiento superficial y pérdida de suelo acumulados por sistema de manejo del suelo durante los meses de junio a octubre del 2009.	131
Cuadro 3.4. Características de la lluvia del 3 de agosto del 2009 y escurrimiento superficial.	135
Cuadro 3.5. Pérdida de nutrimentos en el suelo de tres sistemas de conservación. ...	136
Cuadro 4.1. Valor calórico de la biomasa de maíz, frijol, guayaba y <i>Gliricidia</i> , y valores de referencia reportados en la literatura.	157
Cuadro 4.2. Carbono capturado en la biomasa del maíz, frijol y guayaba en tres sistemas de uso y manejo del suelo y agua.	159
Cuadro 4.3. Carbono (C) y dióxido de carbono (CO ₂) (t ha ⁻¹) capturado en la biomasa del maíz, frijol, guayaba y <i>Gliricidia</i> en tres sistemas de uso y manejo del suelo y agua.	161
Cuadro 4.4. Carbono y dióxido de carbono capturado en la biomasa total del maíz, frijol y guayaba en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y su equivalente en área al obtenido en cultivo simple en los módulos de la misma microcuenca MIAF, y en los sistemas maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y labranza cero con pastoreo (MLCP).	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización geográfica del sitio de estudio en la localidad Unión Agrarista Municipio de Jiquipilas, Chiapas, México.....	21
Figura 2.2. Condición topográfica de las microcuencas en los sistemas: (a) maíz en labranza cero con pastoreo; (b) maíz con barreras de muro vivo; y (c) milpa intercalada con árboles frutales.....	22
Figura 2.3. Condición topográfica con forma cóncava y convexa de la Microcuenca MIAF	23
Figura 2.4. Esquema de la distribución de los factores de estudio sección de la ladera y fertilización.	26
Figura 2.5. Posición de las hileras de maíz y frijol con respecto a las hileras de árboles de guayaba en el módulo MIAF.....	28
Figura 2.6. Posición de las hileras de maíz con respecto a los setos de <i>Gliricidia</i> en el módulo MBMV.....	29
Figura 2.7. Diseño del módulo milpa intercalada con árboles frutales.....	32
Figura 2.8. Árboles de guayaba en formación con los principios del sistema de poda Tatura modificado.	35
Figura 2.9. Filtro de escurrimientos aguas arriba de la hilera de árboles de guayaba. .	36
Figura 2.10. Ubicación de los módulos de cultivo simple de maíz, frijol y guayaba en la microcuenca MIAF, para la determinación de la eficiencia relativa de la tierra.....	37
Figura 2.11. Seto de <i>Gliricidia</i> (a) con filtro de escurrimientos aguas arriba de la base del seto y (b) podados.	38
Figura 2.12. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la sección del módulo sobre el contenido de fósforo en el suelo, tres años después de estar sujeto al sistema MIAF.....	54
Figura 2.13. Efecto de la sección del módulo en interacción con la fertilización mineral sobre el contenido de fósforo en el suelo, tres años después de estar sujeto al sistema MIAF.	55

Figura 2.14. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre el contenido de calcio en el suelo, tres años después de estar sujeto al sistema MIAF.....	62
Figura 2.15. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre el rendimiento de maíz en el sistema MIAF.	64
Figura 2.16. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización sobre la RFA interceptada por la planta de maíz en las fechas de (a) floración del frijol y (b) floración del maíz, en el sistema MIAF.	65
Figura 2.17. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización sobre el contenido de clorofila del maíz en el sistema MIAF.	67
Figura 2.18. Efecto del ciclo de cultivo en interacción con la fertilización mineral sobre el rendimiento de grano de frijol en el sistema MIAF, en el análisis combinado de los ciclos de cultivo primavera-verano y otoño-invierno.	72
Figura 2.19. Distribución quincenal de la precipitación pluvial en el año 2009 en el sitio experimental Unión Agrarista Mpio. de Jiquipilas, Chiapas. ...	73
Figura 2.20. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la posición de la hilera de frijol sobre (a) el rendimiento de grano de frijol, (b) índice de área foliar (b) y (c) RFA interceptada en la fecha de floración del maíz en el sistema MIAF.....	76
Figura 2.21. Índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada en el maíz y el frijol en el sistema MIAF y cultivo simple del frijol.	78
Figura 2.22. Efecto de la sección de la ladera en el índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por el árbol de guayaba.	81
Figura 2.23. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre el rendimiento de grano de maíz en el sistema MLCP	86
Figura 2.24. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre (a) el índice de área foliar, (b) RFA interceptada y	

(c) contenido de clorofila en la planta de maíz en el sistema MBMV.	87
Figura 2.25. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre (a) el índice de área foliar, (b) RFA interceptada y (c) contenido de clorofila en la planta de maíz en el sistemas MLCP.	89
Figura 3.1. Instrumentación de la microcuenca con el sistema milpa intercalada con árboles frutales.	127
Figura 3.2. Distribución quincenal de la precipitación pluvial en el año 2009, en el sitio experimental Unión Agrarista Mpio. de Jiquipilas, Chiapas.	129
Figura 3.3. Relación de la pérdida de suelo (Y , kg ha^{-1}) con el escurrimiento (X , $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) para los sistemas a) maíz en labranza cero con pastoreo, b) maíz con barreras de muro vivo, y milpa intercalada con árboles frutales.	133
Figura 3.4. Hidrograma del evento del 3 de agosto del 2010 en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP.	134
Figura 4.1. Esquema de la distribución de los tratamientos sección de la ladera y fertilización inorgánica en maíz, frijol y guayaba en el sistema MIAF y maíz en MBMV y MLCP.	149
Figura 4.2. Esquema del tratamiento posición de la hilera de maíz y frijol en el sistema MIAF.	149
Figura 4.3. Esquema del tratamiento posición de la hilera de maíz en el sistema MBMV.	150
Figura 4.4. Extracción (a) y lavado del sistema radical del maíz (b).	151
Figura 4.5. Muestreo para la estimación de la producción de biomasa aérea, de fruto y radical de guayaba en el sistema MIAF.	152
Figura 4.6. Lavado (a) y extracción del sistema radical del árbol de guayaba (b).	153
Figura 4.7. Muestreo de (a) biomasa aérea y (b) extracción del sistema radical de <i>Gliricidia sepium</i>	154

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

En las últimas décadas, el aumento de la población y la extrema pobreza han provocado la devastación de la vegetación natural en el sureste de México, principalmente por el cambio de uso de suelo a agrícola y ganadero (Pool, 1997). Esto se debe a que en suelos de ladera y marginales, la escases de tierra de labor no permite periodos de descanso del suelo, además de que el desarrollo de una agricultura con sistemas de producción tradicionales como la roza, tumba y quema ocasionan la remoción de la cobertura y sin prácticas de conservación del suelo, propician la erosión hídrica (Kirby y Morgan, 1994; Palma y Triano, 2002). Por lo tanto, la fertilidad y productividad del suelo disminuyen debido al impacto negativo en sus características físicas, químicas y biológicas, y a procesos de degradación como compactación y acidez (Tollan, 2002).

La degradación del suelo como principal problema de la agricultura trae como consecuencia, pérdidas de su capacidad productiva de alimentos, disminución de la cantidad y calidad del recurso agua, pérdida de la biodiversidad y el cambio climático global. Así como también una producción con déficits cada vez mayores que no cubre las necesidades de una población en crecimiento poniendo en riesgo su seguridad alimentaria.

Por otra parte, la erosión del suelo sobre todo en la agricultura de ladera ha incrementado la fragilidad del agroecosistema, haciéndolo cada vez más vulnerable a desastres naturales tales como los huracanes, que afectan los cultivos y la infraestructura rural, tanto en la zona donde inicia el proceso erosivo, como en las partes bajas de las cuencas. La seguridad alimentaria es particularmente importante en las comunidades de las cuencas altas, donde la mayoría de las familias no tienen los recursos necesarios para producir y satisfacer sus requerimientos alimenticios diarios y donde el acceso a servicios básicos como salud, educación y agua es limitado.

Ante esta situación, ha sido y seguirá siendo necesario generar nuevas tecnologías de producción que permitan obtener una producción adecuada de alimentos para

satisfacer las necesidades de la familia, y generen ingresos económicos que cubran las necesidades mínimas de salud y educación de los productores, sin poner en riesgo la conservación de los recursos naturales.

En el estado de Chiapas, aproximadamente el 60% de las 860,000 hectáreas dedicadas al cultivo del maíz se encuentra en laderas (Cadena, 2004). En estos suelos marginales, las unidades de producción son menores de 5 hectáreas. Los cultivos principales son el maíz y frijol en condiciones de temporal, aunque existen regiones como en la Frailesca donde además se establece una segunda siembra de frijol de otoño-invierno que hace uso de la humedad residual del suelo.

En las laderas, predomina la agricultura tradicional que implica la quema de residuos; sin embargo, está disminuyendo por la adopción creciente de la labranza de conservación (LC). Este sistema incluye el manejo de residuos de cosecha con una cobertura al suelo mayor al 30%. Este requisito no se cumple en el estado de Chiapas debido a que la práctica de pastoreo es común en la época estiaje que se presenta en el período de noviembre a abril, en el cual no se dan las condiciones de humedad necesarias para el buen crecimiento de los pastizales y por consiguiente resultan insuficientes para alimentar al ganado. Por lo tanto y debido al uso de menos del 30% de cobertura al suelo, en realidad lo que los productores establecen es un sistema de labranza cero con pastoreo LCP, que resulta insuficiente para controlar la erosión hídrica sobre todo en laderas abruptas.

Dos sistemas de uso y manejo del suelo en laderas con roturación del suelo que han demostrado un efectividad similar a labranza de conservación en el control de la erosión hídrica y sostenibilidad en los rendimientos de maíz son, la terraza de muro vivo (TMV) en el trópico subhúmedo de México y el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en la sierra norte del estado de Oaxaca. El sistema MIAF, además tiene la capacidad para incrementar de manera significativa el ingreso neto de la familia, y coadyuvar en la mitigación del cambio climático (Cortés *et al.*, 2005). En laderas abruptas con pendientes mayores al 35%, el sistema MIAF no considera la roturación del suelo para el cultivo del maíz y frijol; es decir, se manejan bajo el sistema de labranza cero, pero sin pastoreo durante el año, aunque si los suelos son profundos

podría recomendarse la roturación ya que de esta manera el proceso de formación de terrazas se incrementaría. Esta variante MIAF ha sido evaluada solamente sobre la base de los rendimientos de fruto de durazno y grano de maíz y/o frijol, en algunas parcelas de productores de la sierra norte del estado de Oaxaca.

Por lo anterior, y ante la necesidad de definir un sistema de uso y manejo sustentable del suelo en laderas abruptas truncadas del estado de Chiapas dedicadas al cultivo de básicos, se estableció el presente trabajo de investigación con el objetivo de evaluar a nivel de microcuenca las tecnologías maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP) y maíz con barreras de muro vivo (MBMV), ambas con una cobertura al suelo menor del 30%, y milpa intercalada con árboles frutales sin roturación del suelo (MIAF) en términos del control de los escurrimientos y entrega de sedimentos, rendimiento de fruto y grano, uso eficiente del agua y radiación solar, y captura de carbono.

En el sistema maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP) se esperaría que el control sobre la erosión hídrica no sea del todo eficiente y por lo tanto su contribución a la sostenibilidad de los recursos sea limitada. En una segunda propuesta, se mejora el sistema anterior con la adición del uso de setos de *Gliricidia sepium* en contorno a la pendiente a lo que se denomina maíz con barreras de muro vivo (MBMV). En ésta los animales siguen haciendo uso de los residuos de cosecha para su alimentación y también del follaje de *Gliricidia* la cual es una fuente rica en proteínas. También incluyen un filtro de escurrimientos establecido sobre la base de los setos que es una práctica que contribuye de forma más eficiente al control de la erosión hídrica; sin embargo, fuera de estos beneficios no redundan en ingresos económicos sustanciales para el productor por lo que su adopción se ve limitada.

La tercera propuesta de escalamiento para la conservación de los recursos es el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). El dominio de recomendación de este sistema incluye pequeñas unidades de producción ubicadas en terrenos planos y laderas. En este estudio sólo se tomó en cuenta una fracción de este dominio que consistió en laderas abruptas y truncadas, en una región donde las fuertes precipitaciones pluviales y el inadecuado manejo de los suelos son consecuencia de altas tasas de erosión y del deterioro de estos suelos.

Éste consiste en la siembra de hileras alternas de maíz y frijol intercalados en árboles frutales que se establecen en contorno a la pendiente y al igual que en el sistema MBMV se maneja un filtro de escurrimientos (Cortés *et al.*, 2007). La cobertura al suelo es mayor del 30%, lo cual es posible ya que no se permite el pastoreo de los animales en el afán de evitar el daño sobre los árboles frutales.

Todo lo anterior permite que el sistema MIAF a diferencia del sistema MBMV, además de conservar y hacer un uso más eficiente de los recursos, también incluya diversidad de opciones alimentarias y aumento del ingreso neto a través del año. Además de ser una alternativa viable para mejorar la seguridad alimentaria, lo es también para mantener la calidad de los recursos en laderas de las regiones subhúmedas de México por tener un alto grado de resiliencia a extremados déficits y excesos de agua durante períodos de alta precipitación pluvial. Esta resiliencia ha sido atribuida entre otros factores a la cobertura permanente que protege el suelo de la intensidad de las gotas de lluvia y minimiza la evaporación. Al mismo tiempo, los residuos superficiales favorecen el ciclaje de nutrientes, mejorando la fertilidad y capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo.

En todos los sistemas y específicamente en el sistema MIAF que incluye en su diseño el establecimiento de tres especies en interacción agronómica, es importante el estudio de aspectos de conversión de la radiación solar, uso del agua y captura de carbono, y su relación con las condiciones biofísicas de las laderas. Además, tomando en cuenta que todos estos aspectos se encuentran relacionados con la productividad, se considera una necesidad ineludible el generar conocimiento que coadyuve al entendimiento y mejoramiento de cada sistema, que permitan contribuir a su sustentabilidad.

La evaluación a nivel de microcuenca, fue planteada debido a que la mayoría de las evaluaciones de los sistemas de conservación sobre la erosión hídrica se han realizado en lotes de escurrimientos, los cuales en general sobreestiman las tasas de escurrimiento y entrega de sedimentos. Por lo anterior, parte de la justificación de este estudio radica en que plantea una evaluación *in situ* a nivel de microcuenca que toma en cuenta los factores físicos y de manejo del suelo (Mutchler *et al.*, 1988), y por

consiguiente permite un análisis integral del proceso erosivo y una extrapolación de los resultados más fiable y acorde a las condiciones reales del productor.

Por otra parte, como lo menciona Francisco (2005) en general la complejidad de la interacción entre erosión hídrica del suelo, posición del suelo en la ladera, prácticas de conservación y productividad del suelo, con frecuencia es simplificada por los investigadores, con el uso de un enfoque específico y con supuestos que pueden afectar la magnitud y dirección de la respuesta de la productividad de los cultivos. Lo anterior, también es válido para las interacciones que se presentan en el aprovechamiento de los recursos agua y radiación solar entre especies en sistemas de cultivo múltiple como el MIAF. Por lo anterior, resulta de vital importancia estudiar los sistemas de manejo del suelo en el control de la erosión hídrica a nivel de microcuena de manera que se tome en cuenta que existen zonas de remoción y sedimentación que afectan este proceso.

En este contexto, la presente investigación comprende el estudio de tres sistemas de manejo del suelo y agua, en términos de: a) la entrega de sedimentos y agua a nivel de microcuencas, b) productividad y eficiencia relativa de la tierra, c) rentabilidad económica, d) eficiencia en la conversión de la radiación solar y agua en biomasa, y c) servicios ambientales como son la disminución de la contaminación del agua por nitratos y fosfatos, y captura de carbono.

El trabajo se desarrolló en 6 capítulos. El primero lo constituye esta introducción general. El segundo capítulo trata en primer lugar, sobre la descripción y análisis de las características físicas y químicas del suelo de las tres microcuencas donde se establecieron los sistemas de manejo MIAF, MBMV y MLCP. En segundo lugar, cómo estas características interactúan con la sección de la ladera en dirección de la pendiente, el nivel de fertilización, la posición de la hilera de maíz y frijol en el módulo MIAF y MBMV, y como afectan la productividad de los tres sistemas de manejo. Así también incluye la evaluación de los tres sistemas de manejo, en términos de eficiencia relativa de la tierra, rentabilidad económica y eficiencia en la conversión de la radiación solar y agua en biomasa. El capítulo tercero y cuarto trata sobre la

eficiencia de los tres sistemas de uso y manejo en la captura de carbono y control de la erosión hídrica; así como en el quinto y sexto se refiere a las conclusiones y recomendaciones generales del estudio, respectivamente

1.1 OBJETIVO GENERAL

Potenciar la productividad y competitividad de las laderas abruptas truncadas en el estado de Chiapas manejadas con la tecnología labranza cero con pastoreo, mediante el sistema milpa intercalada con árboles frutales, como una estrategia hacia un manejo sostenible de los recursos escasos que caracterizan a las pequeñas unidades de producción.

1.2 HIPÓTESIS GENERAL

Mediante el sistema milpa intercalada con árboles frutales, se puede fortalecer de manera sostenible el uso y manejo del suelo en laderas abruptas truncadas manejadas con labranza cero y pastoreo, y lograr que el pequeño productor sin dejar de producir granos básicos por ser estratégicos para la seguridad alimentaria de las familias rurales, mejoren su ingreso neto y se contribuya a satisfacer sus requerimientos mínimos de salud, vivienda y educación.

1.3 SUPUESTO

En laderas abruptas truncadas de Chiapas manejadas con labranza cero con pastoreo se puede mejorar el control de la erosión hídrica de manera sostenible. La inclusión de barreras vivas de *Gliricidia sepium*; no obstante que es eficiente en el control de la erosión no impacta significativamente en los ingresos económicos del productor, lo cual si es factible de lograr con la introducción de árboles frutales e hileras intercaladas de maíz y frijol mediante el sistema milpa intercalada con árboles frutales, el cual además es más eficiente en el aprovechamiento de la radiación solar, agua, y en la captura de carbono.

1.4 LITERATURA CITADA

- Cadena, I.P. 2004. Actores, estrategias y dinámicas de organización en el agro de la Frailesca, Chiapas. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de postgraduados. Montecillo, estado de México. 145 p.
- Cortes, F.J.I., Turrent, F.A., Díaz, P., Jiménez, L., Hernández, E. y Mendoza, R. 2005. Hillside agriculture and food security in México: Advances in the sustainable hillside management project. *In: Climate change and global food security*. Lal, R., Uphoff, N., Stewart, A.B. y Hansen, D. (eds). CRC Taylor & Francis Group. United States of America. 569-588 pp.
- Cortés, F.J.I.; Turrent, F.A.; Díaz, V. P.; Claro, C.P.; Hernández, R.E.; Aceves, R. E. y Mendoza, R.R. 2007. La milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) una tecnología multiobjetivo para las pequeñas unidades de producción. In *Desarrollo agropecuario forestal y pesquero. Agenda para el desarrollo*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Coordinador José Luis Calva. p.105.
- Francisco, N.N. 2005. Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo simple doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México. tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.121 p.
- Kirby, M.J. y Morgan, R.P.C. 1994. Erosión de suelos. Grupo Noriega Editores. México, D.F.132 p.
- Mutchler, C.K., Murphree, C.E. y McGregor, K.C. 1988. Laboratory and field plots for soil erosion studies, in Lal (ed.): Soil erosion research methods. SWCS Publ., Ankeny. 9-38 pp.
- Palma, L. y Triano, S.A. 2002. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco, Vol. II. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 118 p.
- Tollan, A. 2002. Land use changes and floods: what do we need most, research or management? *Water Sci. Technol.* 44(8):183-190.

CAPÍTULO II. PRODUCTIVIDAD, EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA Y RADIACION SOLAR DE TRES SISTEMAS DE USO Y MANEJO DEL SUELO EN LADERAS

2.1 INTRODUCCIÓN

Aproximadamente el 60% de las 860,000 hectáreas dedicadas al cultivo del maíz en el estado de Chiapas se encuentra en laderas (Cadena, 2004). Las unidades de producción son menores de 5 hectáreas y se ubican en tierras marginales donde la degradación del suelo tiene un alto costo agroecológico que afecta su productividad; por lo que la producción obtenida es insuficiente para satisfacer las necesidades de alimentos e ingreso económico de las familias campesinas. En la región Frailesca, principal zona maicera ubicada en la parte central del estado de Chiapas, aproximadamente 23,000 agricultores siembran anualmente 140,000 hectáreas de maíz en condiciones de temporal bajo diversas condiciones de topografía y suelos; de éstas, un 40% se encuentran ubicadas en zonas de ladera con pendientes máximas de hasta 70%.

En las laderas, predomina la agricultura tradicional que implica la quema de residuos y por consiguiente cero cobertura al suelo. Sin embargo, ésta ha ido disminuyendo en la medida que se ha adoptado la agricultura en sistema de labranza de conservación, que debería incluir el manejo de residuos de cosecha con una cobertura al suelo mayor al 30%. Sin embargo, este requisito no se cumple por lo que en este estudio la labranza de conservación se ha adaptado a las condiciones de manejo de menos del 30% de cobertura del suelo con residuos de cosecha que es insuficiente para controlar la erosión hídrica (Nieuwkoop *et al.*, 1992), a lo que se denominará labranza cero con pastoreo. La causa principal de esta escasa cobertura es el uso que se hace de los residuos de cosecha como alimento de los animales en la época de estiaje, cuando el forraje se vuelve escaso. La aplicación de ambos sistemas ocasiona serios problemas tales como la degradación del suelo causada por la erosión hídrica que está estrechamente relacionada con la intensidad de las lluvias. Además del costo ecológico, la erosión del suelo también afecta negativamente su productividad por lo que cuando el rendimiento ya no es atractivo para el productor, los terrenos son destinados como zonas de pastoreo, generalmente con pastos nativos.

Otro de los problemas de la agricultura en ladera, es que a diferencia de la empresarial, se desarrolla sin acceso a la asistencia técnica por parte del estado y menos del sector privado. De hecho la mayor parte de las tecnologías disponibles para la producción de cultivos básicos se han generado para terrenos planos, por lo que su extrapolación a las laderas donde existen gradientes marcados de fertilidad del suelo en sentido vertical y horizontal debido a las condiciones topográficas del terreno no responde a una recomendación apropiada.

Dentro del aspecto de sostenibilidad ecológica, además de minimizar el proceso erosivo del suelo en las laderas, se atribuye a los sistemas de manejo conservacionistas, la conservación y/o aumento de la fertilidad del suelo; sin embargo, la mayoría de los estudios al respecto se han realizado en lotes de escurrimientos, los cuales al estar circunscritos a áreas pequeñas no permiten un análisis integral de la dinámica de la fertilidad del suelo, ya que las laderas presentan variantes en su topografía que dan lugar a zonas de remoción y acumulación de sedimentos y por consiguiente de nutrimentos (Mutchler *et al.*, 1988).

Para minimizar la situación antes expuesta se han desarrollado tecnologías para lograr el mantenimiento de la productividad en las laderas, tales como la terraza de muro vivo, barreras vegetativas y labranza cero con manejo de residuos en la superficie del suelo. Estas tecnologías contribuyen eficientemente a la disminución del proceso erosivo aunque los beneficios económicos por incremento en la productividad del suelo se obtienen a mediano y largo plazo en virtud que se necesita de un período de acondicionamiento del suelo, y además resultan insuficientes para satisfacer las necesidades de las familias campesinas, dado el tamaño de la unidad de producción que es menor a 5 hectáreas.

Una tecnología más reciente es la Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) (Cortés *et al.*, 2007). Este es un agrosistema que puede ser más eficiente para aprovechar los recursos del agricultor y atenuar las variaciones del ambiente que los cultivos simples de una u otra especie. Este sistema, además de la sostenibilidad ecológica que caracteriza a las anteriores, también considera resolver el problema de bajo ingreso en las pequeñas unidades de producción en laderas, por medio de una

mayor diversidad de opciones alimentarias, aumentando el ingreso neto a través del año, mayor oportunidad de empleo mejor remunerado, reducción de riesgos por clima y mercado, y captura de carbono.

Aunque los sistemas antes mencionados se han estudiado en términos del control de la erosión, hace falta ampliar su estudio a los aspectos fisiológicos y de aprovechamiento de los recursos como el agua y la radiación global y fotosintéticamente activa por el área foliar y las relaciones suelo-planta-atmósfera. Es decir, definir la productividad de los recursos basados en la cantidad de grano producido por unidad de recurso (radiación solar y agua) disponible durante el año (Caviglia *et al.*, 2004). Este concepto integra la eficiencia en el uso del recurso (cantidad de grano producido por unidad de recurso capturado) con la eficiencia de captura (cantidad de recurso capturado por unidad de recurso disponible).

Esto tiene mayor importancia en cultivos múltiples, en los que la diferencia en la distribución de la cubierta vegetal condiciona la intercepción de la radiación solar por cada especie y define a la vez la cantidad de ésta que es transformada en biomasa. En este contexto, Francis *et al.* (1977) mencionan que es necesario comprender cómo los sistemas múltiples utilizan los recursos y el grado en que el microambiente de este sistema difiere en relación con el cultivo simple, siendo una base científica para elegir cultivares que se adapten al sistema en diferentes áreas agroecológicas.

Al respecto, se han hecho algunos estudios en el sistema de terraza de muro vivo con *Gliricidia sepium*, sobre algunas interacciones entre los cultivos anuales y los setos de *Gliricidia*, y como éstos afectan el rendimiento del maíz como cultivo principal (Friday y Fownes, 2002; Kang *et al.*, 2008); sin embargo, en el sistema MIAF, a la fecha no existen estudios que documenten las interacciones en relación al aprovechamiento de la radiación solar y agua entre el maíz y frijol como cultivos anuales y los árboles frutales, y como éstas repercuten en el rendimiento de los tres cultivos. Este trabajo busca generar información de cómo los componentes de los tres sistemas interactúan en el aprovechamiento del agua y radiación solar. De esta manera a la vez sea posible

realizar adecuaciones de los sistemas para una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales que conduzca a una actividad agrícola sustentable.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo general

Cotejar a nivel de microcuenca el efecto de los sistemas Milpa Intercalada con Árboles Frutales; Maíz con Barreras de Muro Vivo (MBMV) y Maíz en Labranza Cero con Pastoreo (MLCP), en el rendimiento, rentabilidad y uso eficiente de la radiación solar y agua, y eficiencia agronómica y sustentabilidad en un suelo Typic haplustepts del trópico subhúmedo de Chiapas, México.

2.2.2 Objetivos específicos

1. Describir y analizar las características físicas y químicas relevantes del suelo, y su relación con la productividad de los cultivos bajo los tres sistemas de manejo del suelo a nivel de microcuenca.
2. Determinar el efecto de la sección de la ladera en función de la pendiente, niveles de fertilización y posición de la hilera de maíz y frijol en los módulos MIAF y MBMV, sobre la productividad de los cultivos bajo los sistemas de manejo de suelo.
3. Evaluar el efecto del sistema de manejo del suelo en la eficiencia relativa de la tierra, rentabilidad económica, y eficiencia del uso de la radiación solar y agua en la producción de biomasa.

2.3 HIPÓTESIS

2.3.1 Hipótesis general

El sistema milpa intercalada con árboles frutales debido al arreglo topológico de los árboles frutales, maíz y frijol, es más eficiente en el uso de la radiación solar y agua del suelo, con respecto al maíz en cultivo simple con barreras de muro vivo y en labranza cero con pastoreo, lo que conduce a una mayor productividad e ingresos económicos sin perder capacidad de conservación del suelo y agua.

2.3.2 Hipótesis específicas

1. Los tres sistemas presentan diferentes valores de las características físicas y químicas del suelo en las secciones de la ladera en el sentido de la pendiente debido al manejo de cada sistema, que influyen sobre la productividad de los cultivos.
2. La sección de la ladera en función de la pendiente, el nivel de fertilización mineral y la posición de la hilera de maíz y frijol en los módulos MIAF y MBMV, presentan diferente productividad que está relacionada al efecto de los sistemas de manejo del suelo.
3. Los tres sistemas por sus características de manejo del suelo y sus componentes presentan diferente eficiencia relativa de la tierra, rentabilidad económica y eficiencia del uso de la radiación solar y agua.

2.4 SUPUESTO

1. La implementación del experimento bajo un diseño sistemático, y el error de muestreo dentro de los tratamientos de parcela grande no subestiman el error experimental y permiten calcular una aproximación razonable del error experimental.

2.5 REVISIÓN DE LITERATURA

El crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos dependen de procesos fisiológicos cuya expresión a su vez dependen del genotipo, del ambiente y de interacciones complejas entre el estado de las plantas y el ambiente, y la propia naturaleza de los procesos fisiológicos y físicos. Las complejas interacciones entre el cultivo y su ambiente, particularmente con factores de su microclima, determinan los niveles de intercambio de masa y energía que a su vez determinan en alto grado la productividad del cultivo (Livera, 1991; Altieri, 1994).

Dos factores ambientales juegan un papel preponderante en la producción agrícola, la radiación solar y el agua. El primero tiene como función primaria proveer la energía para la fotosíntesis, proceso que transforma la energía física a química y que

conjuntamente con el proceso respiratorio determinan el balance de carbono y, por tanto, el crecimiento y producción de la planta (Caviglia *et al.*, 2004). En condiciones de cultivo no limitantes, con riego o buen temporal, nutrición adecuada, etc., existe una relación lineal entre la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA) y la productividad primaria (acumulación de biomasa), y el principal factor limitante para incrementarla es la distribución deficiente de la radiación solar en la cubierta o dosel vegetal, lo que limita la eficiencia en la conversión de la radiación solar incidente a biomasa. Al respecto, Rosenberg *et al.* (1983), mencionan para maíz una eficiencia en la conversión de radiación a biomasa total de 1% a 1.5%.

Con respecto al agua, ésta es necesaria en el proceso fotosintético, para la absorción de nutrientes y para proveer el medio para las reacciones bioquímicas. De manera general, el ajuste de la producción de biomasa depende de la disponibilidad de agua. La razón está en que el proceso base de la producción de biomasa (la fotosíntesis) y el del gasto de agua (transpiración) ocurren a la vez, y la entrada del dióxido de carbono y la salida del agua utilizan la misma vía, los estomas en las hojas. Cuanto más abiertos están más fácilmente entra el CO₂, pero también más rápidamente se escapa el agua. Por lo tanto, el agua gastada para la producción de biomasa, es inevitable y alto. La producción de biomasa sin agua es imposible para las plantas y resulta en el uso de altas cantidades de agua.

Solo 3% de la radiación total que incide sobre el cultivo es usada para la fotosíntesis. Parte de la energía remanente calienta el follaje y este calor en parte es disipado por medio de la transpiración y la evaporación de agua sobre las hojas. La evaporación del agua requiere 2.54 kJ por gramo de agua. Un cultivo de maíz bien irrigado transpira cerca de 350 gramos de agua por cada gramo de materia seca producidos sobre la tierra (Hay y Walker, 1989; Medrano *et al.*, 2007). De esta biomasa solo una fracción forma parte del grano, lo que significa que un cultivo con buena disponibilidad de agua usa alrededor de 800 a 1000 gramos de agua por cada gramo de grano producido (Lafitte, 2001). En maíz se tiene una eficiencia de 2.76 g de biomasa por kg⁻¹ agua (Shantz y Piemeisel, 1927 citado por Medrano *et al.*, 2007). En el caso del frijol se tiene

una eficiencia de 1.4 g y de 0.4 g, de biomasa total y de grano por kg⁻¹ de agua, respectivamente (Morales *et al.*, 2005).

Poca investigación ha sido conducida acerca de las interacciones entre árboles frutales y cultivos anuales, siendo más comunes las relacionadas a las que se llevan a cabo entre árboles y cultivos anuales. Por ello es necesario analizar la eficiencia con que se utilizan el agua y la luz en los diferentes sistemas con objeto de determinar si existe potencial para incrementar la productividad a través del mejor uso de dichos recursos. Los árboles frutales pueden tener características relacionadas a la fenología y sincronía que los hacen más adecuados para cultivos mixtos que árboles multipropósitos de rápido crecimiento o especies maderables. Las interacciones que se presentan a continuación están relacionadas al dosel y al ambiente aéreo o de la superficie del suelo y aquellas que involucran a la raíz dentro del perfil del suelo.

2.5.1 Efectos del dosel

Temperatura. En cultivos asociados el dosel de la especie más alta puede reducir la temperatura de las hojas de otras especies sombreadas. Por ejemplo, en sistemas agroforestales con *Inga jinicuil* y *Coffea arabica* en Veracruz, México a 1225 msnm donde la temperatura promedio era de 18.5 °C, se redujo la temperatura diurna promedio de la segunda especie en un intervalo de 7.1 °C en comparación a su establecimiento a pleno sol (Barradas y Fanjul, 1986, citado por Bellow, 2004). Por su parte, se considera que las altas temperaturas de las hojas pueden incrementar la respiración y disminuir la fotosíntesis neta, por lo que el efecto que una cobertura pueda brindar, en términos del efecto amortiguador de la temperatura, a cambios en la demanda evaporativa o a una combinación de las dos, resultan en efectos benéficos para los cultivos. En Túnez, se observaron incrementos en el rendimiento de grano de *Vicia faba* arriba de 17%, y de 39% en el número de vainas como un efecto del dosel de los árboles en la reducción de la velocidad del viento, en comparación con un cultivo sin protección (Ben Salah *et al.*, 1989).

Humedad y transpiración. Dentro y bajo el dosel de árboles asociados con cultivos, la humedad relativa se incrementa y las tasas de evapotranspiración disminuyen a

diferencia de condiciones sin sombra. Li *et al.* (2002) midieron la transpiración de *Malus domestica* por el método de pulso de calor y evaluaron esto en relación a una variedad de parámetros ambientales en Israel. La transpiración aumentó con la temperatura y el déficit de presión de vapor, y disminuyó con incrementos de la humedad relativa. Adicionalmente, cuando el dosel de los árboles se desarrolla más temprano que el dosel de los cultivos, la sombra puede ayudar a conservar la humedad en las capas superiores del suelo que más tarde puede ser usada por los cultivos. Sin embargo, es de esperarse que la demanda adicional de humedad del suelo por los árboles tenga un efecto en la reducción de humedad total disponible para los cultivos asociados.

Luz. Cuando los cultivos están creciendo con árboles o arbustos, la competencia por luz es una obvia preocupación. Estos con sus tallos leñosos y hábito de crecimiento perenne sobrepasan con su dosel a los cultivos de porte más bajo y pueden capturar una mayor cantidad de la luz incidente. Esto, sin embargo, es una función del tamaño del dosel, elevación y densidad de los árboles o cobertura del dosel. Donde los nutrientes del suelo, agua, temperatura o plagas no son un problema, el crecimiento de los cultivos asociados y su rendimiento biológico están estrechamente relacionados a la cantidad interceptada de la radiación fotosintéticamente activa incidente a través de la estación de crecimiento (Monteith, 1977).

Los sistemas mixtos de árboles frutales con cultivos, como otros sistemas agroforestales, interceptan mayores fracciones de radiación incidente cuando el dosel perenne está presente durante los estados iniciales de crecimiento del cultivo cuando el dosel de éste es bajo. A diferencia de otros tipos de árboles, los frutales son frecuentemente manejados para presentar un dosel abierto permitiendo la penetración de luz y aire a sitios de fructificación y subsecuentemente a cultivos por debajo de éstos. Por ejemplo los árboles de pera son podados en forma de líder central o piramidal lo cual puede incrementar la cantidad relativa de radiación fotosintéticamente activa transmitida al sotocultivo comparado a formas comunes de poda en manzanas o ciruelo (Horn, 1971, citado por Bellow, 2004).

La transmisión de la luz difiere dependiendo de la especie frutal y dentro de estas incluso entre cultivares. Singh y Dhaliwal (2007) determinaron la influencia de la interceptación de la radiación solar sobre las características físicas de los frutos de guayaba cv. Sardar en tres espaciamientos diferentes (6 x 4 m, 6 x 5 m, y de 6 x 6 m) en Punjab, India. Los árboles espaciados a 6 x 6 m presentaron niveles más altos de radiación interceptada en la parte superior del árbol. El tamaño y el peso de los frutos cosechados de los árboles espaciados a 6 x 6 m fueron significativamente más altos que los árboles espaciados a 6 x 5 m, y 6 x 4 m. Sin embargo, la producción de frutos/árbol disminuyó con la disminución de la distancia.

Barile y Sangalang (1990) en las Filipinas midieron la reducción en intensidad de la luz bajo nueve variedades diferentes de coco sembrados a 7.5 x 7.5 m en un patrón triangular. Encontraron que la reducción de la luz solar en la variedad Laguna fue más alta que en todos los otros cultivos restantes, debido a características como el largo de la hoja, número de hojas y largo de los pecíolos. Así, recomiendan que en el desarrollo o selección de cultivos adecuados para los cultivos asociados, pudiera dejarse a consideración de los que tengan menos hojas, hojas más cortas así como pecíolos. En este sentido y para un mayor aprovechamiento de la luz por los frutales y cultivos asociados, Moss (1992) menciona que es necesario generar mayor información acerca de la eficiencia de luz para determinar arreglos de espacio óptimos para los frutales y cultivos asociados. Estudiar la eficiencia de cultivos bajo sombra, es por lo tanto una línea de investigación que pudiera ser útil en determinar el manejo óptimo de sistemas de cultivos múltiples.

2.5.2 Competencia por agua del suelo

En sistemas mixtos de árboles frutales y cultivos, como en otros sistemas agroforestales, la complementariedad en la distribución de raíces y el acceso al agua y nutrientes del suelo es un factor crítico en la determinación del grado de competencia y ventajas de los sistemas. Previo al establecimiento de un sistema agroforestal y sobre todo cuando se intercalan tres especies como es el caso del sistema MIAF motivo de este estudio, es conveniente conocer la distribución de las raíces y de que parte del suelo extraen agua, y cuánto pueden extraer durante el verano cuando la superficie

esté seca. Lo ideal sería que los árboles frutales a asociar sean capaces de utilizar sus sistemas de raíces profundas para extraer agua del subsuelo a tasas elevadas durante los períodos secos, mientras que no absorban con sus raíces laterales demasiada agua o nutrientes que pueden aprovechar los cultivos anuales con raíces poco profundas.

La disponibilidad de agua depende de la lluvia y riego, la capacidad de retención de agua del suelo, la profundidad del suelo así como la del manto freático, la evaporación del suelo, y la transpiración a través de la vegetación. La sombra incrementada en el suelo por medio de los cultivos asociados, y la cobertura natural de las hojas caídas de los cultivos asociados, podían estabilizar la temperatura del suelo y reducir considerablemente la pérdida de agua por evaporación.

Nair (1979) encontró que la evaporación diaria en una combinación de cacao y coco fue solamente un 40% de la de un área abierta. Sin embargo, el consumo de agua a través de la transpiración podría aumentar cuando los cultivos asociados crecen bajo palmas de coco, pero en este caso el agua es usada y no se pierde. Hay indicaciones de que el consumo total de agua de una mezcla de cultivos asociados pudiera no diferir mucho de la de un monocultivo, pero en este caso se define por la disponibilidad total de agua y minerales. En Sri Lanka, pruebas experimentales mostraron que no había una competencia severa para la humedad del suelo entre el cultivo de coco y los cultivos asociados siempre que la lluvia anual sea mayor a 1900 mm. Pero aunque alguna competencia por el agua se presentara, ésta pudiera ser aceptable, siempre que los ingresos combinados del sistema agrícola sean más altos que los del cultivo simple (Liyanage *et al.*, 1986).

El problema de competencia por agua puede volverse más crítico cuando las especies asociadas presentan sistemas radicales similares. Por ejemplo Odhiambo *et al.* (2001) en un experimento en Kenia, determinaron que *Gliricidia* y *Grevillea* ambas de rápido crecimiento radical fueron altamente competitivas con el maíz en el espacio radical. En contraste, los árboles frutales en climas templados no compiten exitosamente con las malezas o césped por nutrientes y agua, debido a su baja densidad de raíces.

Mediante la asociación, se tiene que al combinar plantas con raíces profundas y con raíces superficiales, como es el caso de árboles con pastos o cultivos anuales, se evita la competencia por agua (Berendse, 1979) y se tiene la ventaja de que los árboles presentan la capacidad de absorber agua y nutrientes de las partes profundas del perfil, que después de su transporte al follaje, pueden depositarse en la superficie del suelo con la caída de las hojas. Un estudio de asociación de maíz con leucaena realizado por Kang *et al.* (1985) en un Entisol degradado confirma lo anterior, ya que encontraron que el maíz aprovechó la humedad presente de 0 a 30 cm de profundidad, mientras que la leucaena aquella de 60-90 cm.

Además de esta complementariedad entre los sistemas radicales de los cultivos asociados que permite la poca competencia por agua y nutrientes, existe el fenómeno de ascenso hidráulico, por el cual el agua se redistribuye por las raíces en la dirección del gradiente de potencial hídrico. De esta manera el agua producto de las precipitaciones se puede almacenar a mayor profundidad en el suelo para su uso posterior cuando se devuelve a la capa superior (Burges, 1998).

La redistribución hidráulica (RH) no tiene mucha importancia bajo condiciones de riego o en tierras bajas donde generalmente no existen problemas de falta de humedad. Sin embargo, en zonas más secas, e incluso en las zonas húmedas en suelos ácidos, la competencia entre el seto y el cultivo por nutrientes y la humedad pueden ser muy graves ya que tanto las especies leñosas como los cultivos tienen una tendencia a concentrar sus raíces en la superficie del suelo debido a la acidez del subsuelo. Estudios realizados por Fernández *et al.* (1990) y Evensen y Yost (1984) mostraron reducciones significativas en el rendimiento de los cultivos anuales sobre todo cuando se cultiva en las primeras filas junto a los setos. La poda de las raíces de los setos parcialmente puede reducir la competencia, pero no siempre es efectiva en el largo plazo.

El sistema MIAF es un sistema de cultivo para pequeños productores, con escasos recursos y que generalmente desarrollan una agricultura de temporal muchas veces con lluvias erráticas y en zonas de ladera. Se considera que la RH por medio de los árboles frutales beneficiaría a este sistema, por sus efectos en la aportación de agua

tanto para las raíces superficiales del frutal como para los cultivos anuales, sobre todo en época de secas. Lo anterior se sustenta en diversas investigaciones que tratan sobre el mecanismo de la redistribución hidráulica y sus efectos en los cultivos asociados (Eastham y Rose, 1988; Bayala *et al.*, 2008; Caldwell *et al.*, 1998)

Por otra parte, el establecimiento de árboles puede resultar en incrementos de los niveles de la humedad del suelo en la superficie del suelo comparado con un suelo desnudo. Arachi y Liyilage (2003) citado por Bellow (2004) encontraron que suelos bajo cuatro especies de árboles fijadores de nitrógeno presentaron una mayor humedad en la superficie del suelo respecto a un suelo desnudo. Jackson *et al.* (2000) reportaron que en sistemas agroforestales con *Grevillea robusta* con maíz en una región semiárida de Machakos, Kenia resultó en mayor uso de la humedad disponible del suelo comparado con solo cultivos o árboles. De no ser así, el agua no usada durante la estación de cultivo se perdería por evaporación o drenaje.

2.5.3 Competencia por nutrientes

Generalmente se considera que las raíces de los árboles al penetrar hasta capas profundas cumplen con la función de extracción de nutrimentos y depositación de éstos en capas superficiales (reciclaje). Sin embargo esto no ocurre en todas las condiciones, pues depende de la morfología y fisiología del sistema radical de las especies que comprenden el sistema y del manejo de defoliación que se les aplique. Por ejemplo, Pezo e Ibrahim (1996), citado por Casanova *et al.* (2007) encontraron que en bancos forrajeros de *Erythrina poeppigiana* y *Gliricidia sepium* propagadas por estacas y sometidos a defoliaciones frecuentes, los sistemas radicales son superficiales. En tal caso, más bien puede haber competencia por nutrientes entre las raíces de las plantas leñosas y las forrajeras herbáceas, ya que las raíces de ambas se encuentran muy cerca una de otra. Para evitar esto se debe fomentar la complementariedad entre los sistemas radicales de los cultivos asociados que permita la poca competencia por agua y nutrimentos

En relación a lo antes expuesto se considera que para evitar la competencia entre los árboles y cultivos anuales debe tomarse en cuenta la distribución y densidad de las

raíces de manera que explore diferentes horizontes en el suelo de cada cultivo, así como su capacidad de extracción de agua y nutrimentos. En este sentido Bowen (1985), menciona que un árbol destina de un 20 a 30% de su biomasa total en la producción y mantenimiento de raíces, mientras que los cereales y pastos utilizan de un 20, 35 y hasta 90% de su biomasa total en la formación de raíces, lo cual les atribuye una mayor eficiencia en condiciones limitantes de agua.

Cuando se considera el aspecto de competencia con árboles frutales, es importante tomar en cuenta la naturaleza multi-anual de los ciclos de crecimiento y respuesta. En el cultivo de pera, Quartieria *et al.* (2002) citado por Bellow (2004) mostraron que el nitrógeno absorbido antes o después de la cosecha fue preferentemente usado durante el siguiente año para crecimiento y fructificación, de manera que la fertilización temprana en el año fue mucho menos efectiva en el incremento de reservas. Esto sugiere diferencias temporales en la necesidad por nitrógeno entre el cultivo que puede necesitar este nutriente mucho más temprano, y el árbol frutal que hace un mejor uso del nitrógeno que está disponible más tarde.

Lo antes expuesto plantea que no existe mucha información sobre las interacciones que se presentan entre los recursos disponibles; suelo, agua y luz en las asociaciones de cultivos anuales y árboles frutales, siendo ésta mayor para árboles de uso múltiple. También indican que existe un gran potencial de estos recursos por medio de los cuales podría incrementarse la productividad a través de su mayor captura y uso; no obstante, estos no son eficientemente utilizados en muchas asociaciones, posiblemente debido a la falta de conocimiento de las interacciones y la magnitud con que se presentan. Por lo anterior, es pertinente la generación de información que permita el entendimiento de los procesos que suceden entre los recursos suelo, planta y ambiente a manera de brindar un manejo más eficiente y sostenible de los sistemas agrícolas.

2.6 MATERIALES Y MÉTODOS

2.6.1 Localización y características edafo-climáticas del área de estudio

Este estudio se realizó en la cuenca del río Catarina, en la localidad Unión Agrarista Municipio de Jiquipilas, Chiapas, durante el ciclo primavera-verano, otoño-invierno bajo condiciones de temporal que se encuentra a una altitud de 625 msnm entre los $16^{\circ} 26' 47''$ y $16^{\circ} 26' 49''$ de latitud norte y $93^{\circ} 39' 11''$ y $93^{\circ} 39' 15''$ de longitud oeste (Figura 2.1).

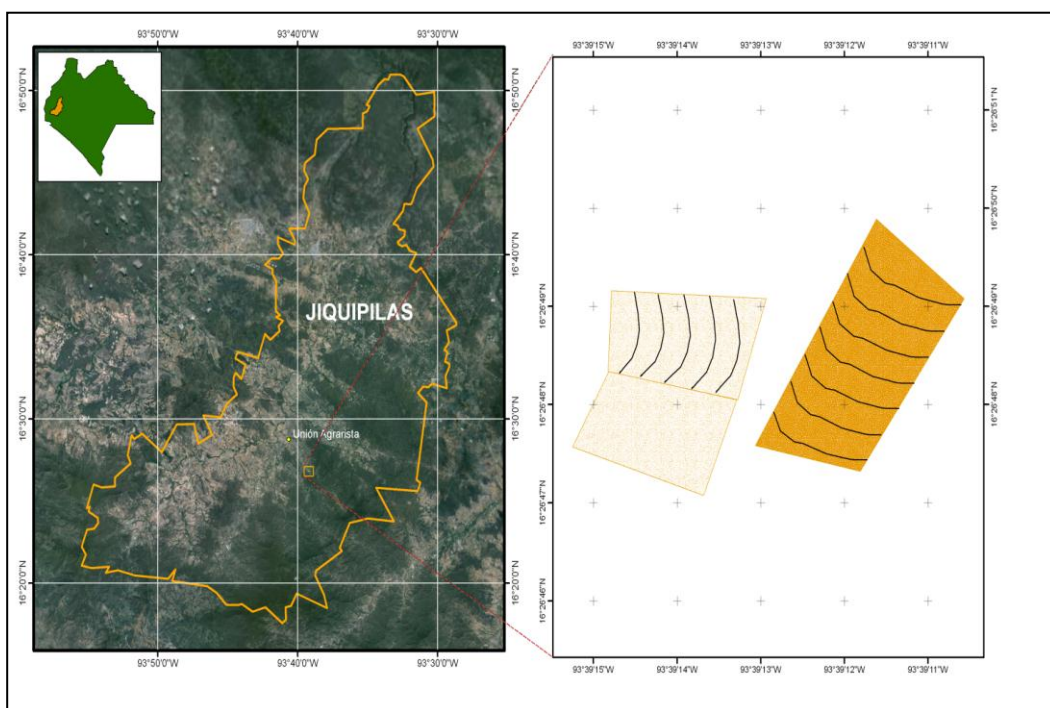


Figura 2.1. Localización geográfica del sitio de estudio en la localidad Unión Agrarista Municipio de Jiquipilas, Chiapas, México.

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por García (1987), el clima es Aw1, cálido subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación media anual es de 1457 mm siendo marzo el mes más seco con solo 25.6 mm de precipitación y junio el más lluvioso con más de 241.4 mm. La temperatura mínima media anual de 19.9°C y la temperatura máxima media anual de 32.5°C . El suelo se clasifica como Typic haplustepts de acuerdo a Soil Survey Staff (2006). Pertenece al orden Inceptisol, que son suelos inmaduros con rasgos de perfiles expresados más débilmente que los

suelos maduros y que conservan cierta semejanza con el material original (Buol *et al.*, 2008). El suelo es de textura ligera, alta compactación, drenaje bueno, contenido de materia orgánica moderado, pH moderadamente ácido y moderada capacidad de intercambio catiónico.

De acuerdo al Manual de Diagnóstico Prescripción para el Cultivo de Maíz en Chiapas (López *et al.*, 1999) el sitio de estudio fue definido como el agrosistema 23 por presentar: temporal estricto, altitud menor de 1200 msnm, maíz unicultivo, temporal con alto riesgo de sequía intraestival, pendiente del terreno mayor de 15%, drenaje bueno y materia orgánica de 1 a 3%.

2.6.2 Microcuencas experimentales

Fueron seleccionadas tres microcuencas para el establecimiento de los sistemas de manejo Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), Maíz con Barreras de Muro Vivo (MBMV) y Maíz en Labranza Cero con Pastoreo (MLCP) (Figura 2.2). En el Cuadro 2.1, se puede observar las principales características de las microcuencas, sobresaliendo en la que se estableció el sistema MIAF por presentar mayor área, longitud y porcentaje de pendiente, así como una topografía más irregular denotada por la combinación de forma convexa y cóncava (Figura 2.3).



a)

b)

c)

Figura 2.2. Condición topográfica de las microcuencas en los sistemas: a) maíz en labranza cero con pastoreo; b) maíz con barreras de muro vivo; y c) milpa intercalada con árboles frutales.

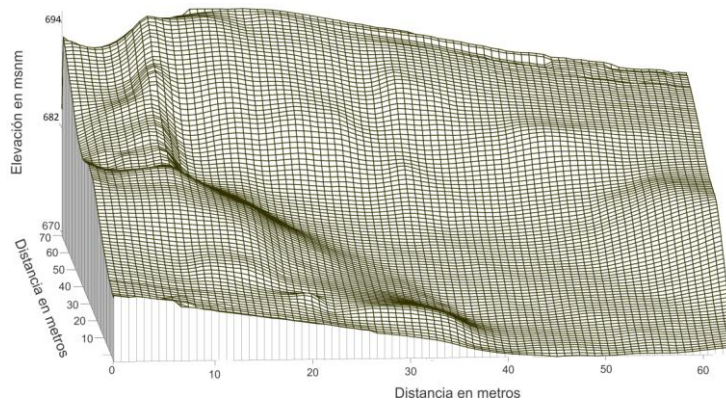


Figura 2.3. Condición topográfica con forma cóncava y convexa de la microcuenca MIAF.

Cuadro 2.1. Características generales de las microcuencas experimentales.

Características	Microcuencas		
	MIAF ^z	MBMV ^y	MLCP ^x
Área (m ²)	3339	1886	1515
Forma	Cóncava convexa	Convexa	Convexa
Longitud de la pendiente (m)	60	48	50
Pendiente (%)	42	30	30
Años de cultivo previos	10	5	5
Años con quema residuos	6	0	0
Años con < 30% cobertura	4	5	5
Años bajo estudio	3 ^u	2 ^v	2 ^w
Número de hileras de árboles frutales o setos de <i>Gliricidia</i>	7	6	0

^zMilpa intercalada con árboles frutales.

^yMaíz con barreras de muro vivo.

^xMaíz en labranza cero con pastoreo.

^wDurante los dos años la cobertura siguió siendo <30%, por el uso de los residuos como alimento de los animales.

^vDurante los dos años la cobertura siguió siendo <30% pero debido en menor parte al uso como alimento para los animales, ya que se adicionó parte de los residuos al filtro de sedimentos.

^uDurante los tres años con MIAF, no se hizo uso de los residuos para alimento de los animales. La cobertura fue del 40% ya que parte de los residuos se adicionó al filtro de sedimentos.

En las tres microcuencas se ha cultivado maíz con el sistema de cero labranza con pastoreo que se caracteriza por manejar menos del 30% de cobertura al suelo con residuos de maíz, debido a la práctica común del uso de éstos para alimento del

ganado en pastoreo intensivo en la época de estiaje; sin embargo, la microcuenca MIAF se incorporó al cultivo cinco años antes que las microcuencas MBMV y MLCP, razón por lo cual presenta signos más evidentes de los efectos erosivos.

En la microcuenca MIAF el componente árbol frutal se estableció desde el año 2007 junto con el filtro de escurrimientos. El maíz se siguió cultivando hasta el año 2009 cuando se adicionó el cultivo de frijol (sotocultivo) y las tres especies se manejaron con el arreglo característico de un módulo MIAF como se describirá en secciones siguientes. Para proteger los árboles frutales del posible daño que pudieran ocasionar los animales se cercó esta microcuenca. Por ello la cantidad de rastrojo de maíz como cobertura del suelo aumentó respecto a las microcuencas MBMV y MLCP donde los animales siguieron haciendo uso de éste para su alimentación. El sistema MBMV se estableció a partir del ciclo PV 2008, por la necesidad de conocer sus ventajas y limitaciones, y para compararlo con el sistema MIAF y con MLCP.

2.6.3 Diseño experimental

El diseño experimental corresponde a un parcelas subdivididas sin repeticiones con arreglo sistemático. Se establecieron tres experimentos correspondientes a los tres sistemas de uso y manejo del suelo: Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), Maíz con Barreras de Muro Vivo (MBMV) y Maíz en Labranza Cero con Pastoreo (MLCP).

El sistema MIAF incluyó a la vez un sub-experimento para el maíz, frijol y guayaba. Cada sistema agrícola tuvo diferente patrón de cultivo como se describe posteriormente. El hecho de no establecer repeticiones en cada experimento obedece a que el estudio se realizó a nivel de microcuenca y ello implica un alto costo económico en la operatividad por la mayor área manejada con cada sistema.

Se estudiaron tres factores: 1) la sección de la ladera en el sentido de la pendiente (SL) con tres niveles que corresponde a la parcela grande (PG); 2) la fertilización mineral (F) con dos niveles, que corresponde a la parcela dividida (PD), y 3) la posición de la hilera del cultivo anual (Ph) dentro de un módulo MIAF o MBMV con tres niveles, que conforman la parcela subdividida (Ps), en arreglo factorial; por lo tanto, se

tuvieron 18 tratamientos para el maíz en los tres sistemas de manejo y sólo para frijol en el sistema MIAF. En este último sistema, el experimento con guayaba incluyó únicamente los dos primeros factores que conformaron 6 tratamientos.

Para el caso específico de los muestreos de suelo realizados en el año 2009 en la microcuencia MIAF, se mantuvieron los mismos tratamientos de parcela grande y dividida, modificando la parcela subdividida (Ps) que incluyó dos secciones del módulo MIAF (donante y receptora).

En resumen, se tuvieron 3 factores: el tratamiento de parcela grande (PG), sección de la ladera con tres niveles; el tratamiento de parcela dividida (PD) fertilización, con dos niveles y el tratamiento de parcela subdividida (Ps) sección del módulo con dos niveles para un total de 12 tratamientos. La determinación de cada una de las variables en cada parcela subdividida se hizo en base a tres muestreos, mismos que como posteriormente se hará mención se utilizaron para determinar los grados de libertad del error. La descripción de los factores se hace en la siguiente sección.

En relación al establecimiento de algunos factores de estudio bajo un diseño sistemático, Cox (1952), Kempthorne (1975) y Correa (2007), mencionan que este es factible de aplicar cuando se tiene un conocimiento a priori de la superficie de respuesta por lo que el orden de experimentación o toma de observaciones debe seleccionarse de forma sistemática y no aleatoriamente manipulando las condiciones externas de variación, con el fin de hacer frente a la influencia de factores ajenos a la experimentación sin perder la eficiencia del análisis. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que no hay posibilidad de estimar los errores de comparaciones de tratamiento para los diseños sistemáticos, incluso cuando la aditividad se mantiene, sin duplicación considerable o conocimiento previo sistemático.

2.6.4 Factores de estudio y su descripción

Sección de la ladera (SL). En cada microcuencia la ladera se dividió perpendicularmente a la pendiente en tres secciones denominadas posiciones; baja, media y alta (Figura 2.4). En la microcuencia MIAF, las secciones correspondieron al primero, cuarto y sexto de los módulos MIAF, con una pendiente de 4, 20 y 42%,

respectivamente. En la microcuenca MBMV correspondieron al primero, tercero y cuarto de los setos de *Gliricidia*, con una pendiente de 5, 18 y 30%, respectivamente, y en la microcuenca MLCP que no incluyó ningún seto, las secciones se delimitaron extrapolando las de la microcuenca aledaña con MBMV.

Fertilización mineral (F). Cada microcuenca se dividió horizontalmente por la mitad de la ladera. En primer lugar se ubicó su parte media en sentido horizontal y a partir de ésta, se delimitó un transecto desde la parte de mayor a menor pendiente (alta a la baja) dividiéndola en una zona este y oeste. En cada una de las dos parcelas así definidas a través de las tres posiciones de la ladera (baja, media y alta) se aplicaron los dos niveles de fertilización mineral (N, P); 100% y 50% de manera alterna (Figura 2.4).

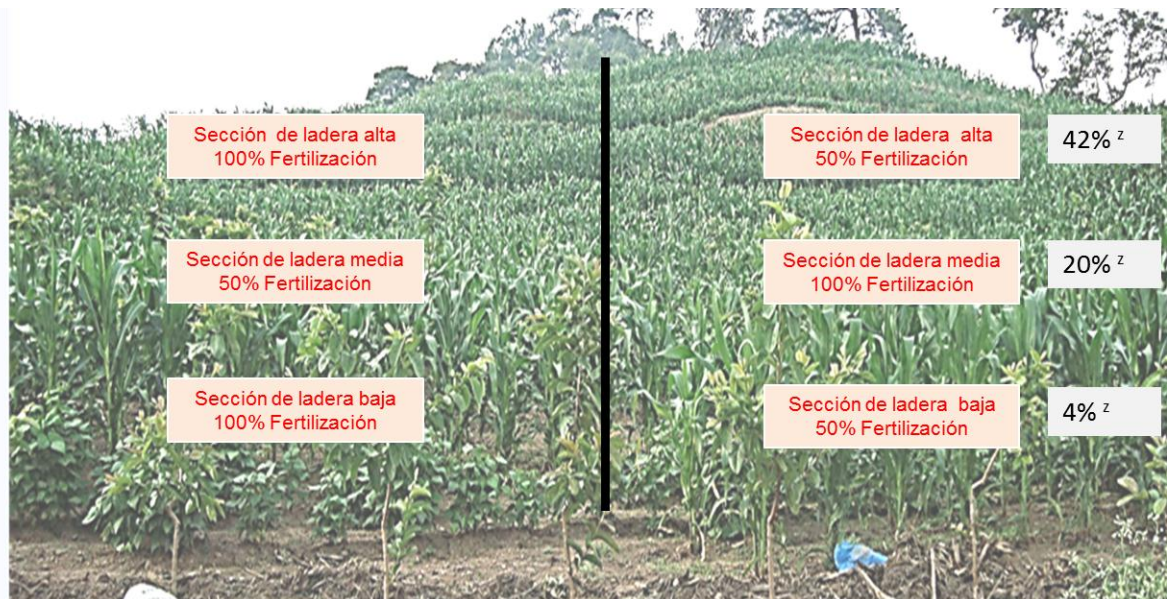


Figura 2.4. Esquema de la distribución de los factores de estudio sección de la ladera y fertilización.

^z Pendiente a la que se encuentran ubicadas la sección baja, media y alta de la ladera

En el maíz, el nivel de fertilización al 100% fue el tratamiento 95-50-00, que se recomienda para el agrosistema 23 de acuerdo al Manual de Diagnóstico Prescripción para el Cultivo de Maíz en Chiapas (López *et al.*, 1999) definido como: temporal estricto, altitud menor de 1200 msnm, maíz unicultivo, temporal con alto riesgo de sequía intraestival, pendiente del terreno mayor de 15%, drenaje bueno y contenido de materia orgánica de 1 a 3%. Para el nivel 50% se aplicó el tratamiento 45-25-00.

Para el frijol se aplicó el tratamiento 40-40-00 como la fertilización al 100% y como 50% el 20-20-00. Para los árboles de guayaba el tratamiento al 100% fue de 30 gr de N, P₂O₅ y K₂O por árbol, respectivamente en el primer año, y el doble y triple para el segundo y tercer año, y para el tratamiento 50%, 15 gr de cada uno.

Posición de la hilera de maíz y frijol (Ph) con respecto a la hilera de árboles de guayaba en el módulo MIAF, y con el seto de *Gliricidia* en el módulo MBMV

a) Posición de la hilera de maíz en el módulo MIAF (Figura 2.5)

1. Maíz-frijol receptora. Corresponde a la primera hilera de maíz ubicada a 4.3 m aguas arriba de la hilera del árbol de guayaba y contigua a la segunda hilera de frijol.
2. Maíz-frijol donante. Corresponde a la segunda hilera de maíz ubicada a 3.5 m aguas abajo de la hilera de guayaba y contigua a la primera hilera de frijol.
3. Maíz-guayaba donante. Corresponde a la primera hilera de maíz ubicada a 2.7 m aguas abajo de la hilera de guayaba.

b) Posición de la hilera de frijol en el módulo MIAF (Figura 2.5)

1. Frijol-guayaba receptora. Corresponde a la primera hilera de frijol ubicada a 2.7 m aguas arriba de la hilera de guayaba.
2. Frijol-maíz receptora. Corresponde a la segunda hilera de frijol ubicada a 3.5 m aguas arriba de la hilera de guayaba y contigua a la primera hilera de maíz.
3. Frijol-maíz donante. Corresponde a la primera hilera de frijol ubicada a 4.3 m aguas abajo de la hilera de guayaba y contigua a la segunda hilera de maíz.

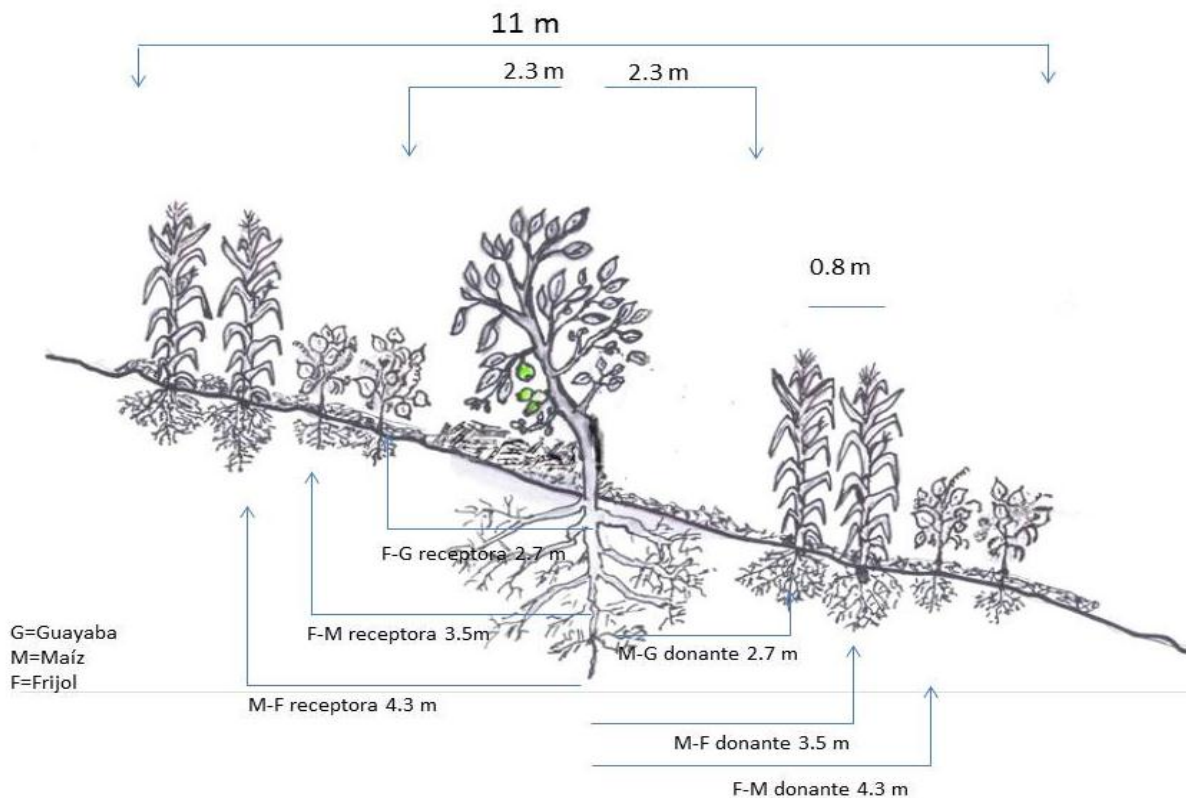


Figura 2.5. Posición de las hileras de maíz y frijol con respecto a las hileras de árboles de guayaba en el módulo MIAF.

c) Posición de la hilera de maíz en medio de dos setos de *Gliricidia* en el módulo MBMV (Figura 2.6). Un módulo de MBMV se considera dos setos de *Gliricidia* y las hileras de maíz establecidas entre ellos.

1. Maíz receptora. Ubicada de 1.4 a 2.2 m aguas arriba del seto ubicado en la sección receptora del módulo MBMV.
2. Maíz donante. Ubicada de 1.4 a 2.2 m aguas abajo del seto ubicado en la sección donante del módulo MBMV.
3. Maíz media. Ubicada en la parte media delimitada por dos setos de *Gliricidia*, del módulo MBMV en cada sección de la ladera.

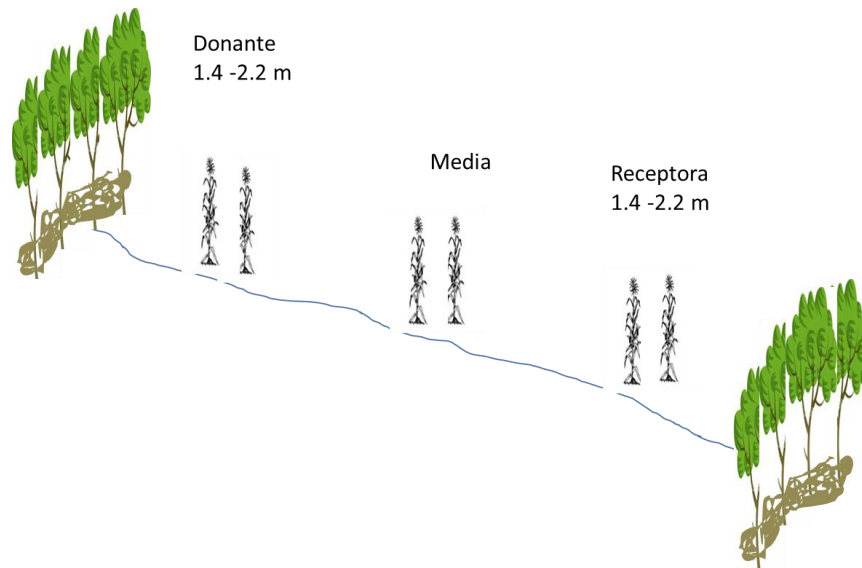


Figura 2.6. Posición de las hileras de maíz con respecto a los setos de *Gliricidia* en el módulo MBMV.

Posición de la hilera de maíz en el Sistema MLCP. En este caso como no existen hileras de árboles de guayaba o setos de *Gliricidia* como en los casos anteriores, la delimitación de las tres posiciones de las hileras de maíz se hizo tomando como referencia las delimitadas en el sistema MBMV, el cual estaba aledaño.

2.6.5 Materiales genéticos

Maíz. Se utilizó la variedad V-424, también llamada “Tuxpeño precoz”, la cual fue liberada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en 1983, en el Campo Experimental Valle del Yaqui, Sonora y es proveniente de 17 ciclos de selección recurrente de la Población Tuxpeño Crema-1. Alcanza una altura a flor masculina menor a 150 cm y altura de mazorca de 65 cm. Presenta 55 días a floración masculina, 105 días a cosecha, un índice de cosecha de 0.4 y rendimiento promedio en temporal de 5.5 t ha^{-1} . Por sus características de precocidad y alta resistencia a sequía cuando está en floración ha tenido amplia aceptación entre los agricultores de las regiones maiceras de Chiapas, sobre todo en la región Cintalapa-

Jiquipilas que tiene un alto riesgo de sequía intraestival y es donde está enmarcado el sitio de estudio.

Frijol. Se utilizó la variedad Negro Grijalva liberada por el INIFAP en el Campo Experimental Centro de Chiapas y es proveniente de la línea DOR 445. Esta variedad cuenta con características de precocidad, resistencia al virus del mosaico amarillo del frijol y tolerancia a la acidez del suelo y alta saturación de aluminio.

Las principales características agronómicas de la variedad Negro Grijalva son: hábito de crecimiento indeterminado y erecto, la altura de planta promedio es de 42 cm, planta arbustiva tipo II, con guías cortas en siembras de temporal y de riego, y largas cuando se siembra en el ciclo otoño-invierno bajo condiciones de humedad residual. Es precoz, ya que inicia su floración a los 30 días después de la siembra y madura a los 70 días. La flor es morada y la vaina de color amarillo en la etapa de madurez fisiológica y blanca en la cosecha, con granos negros. Por sus características de precocidad y otras ya mencionadas, así como su rendimiento promedio de 1219 kg ha⁻¹ que supera entre 20 a 36% al obtenido con el Negro INIFAP que ha sido la variedad más utilizada últimamente, hacen del Negro Grijalva una variedad idónea para las áreas tropicales de Chiapas y regiones similares.

Guayaba. Se utilizó el cultivar Guayaba Pera, que ha sido propagada por semilla de manera local en viveros del centro del estado de Chiapas. A diferencia de las variedades del tipo China o Media China cultivadas en Calvillo, Aguascalientes, esta variedad presenta un epicarpio tan grueso que la cavidad que contiene las semillas es muy reducida. El fruto es bastante atractivo, adquiere forma redonda u oblonga de donde obtuvo el nombre de “Pera”. Puede alcanzar un peso de 1 kg, aunque en promedio su peso es de 0.5 kg. La pulpa es de color blanco, firme y de sabor agradable.

Con base a la información proporcionada por viveristas y pequeños productores del Centro del estado de Chiapas, y observaciones del autor, las características de este cultivar sugieren que se trata de una guayaba tipo Tailandesa introducida en 1995 a Guatemala por la Misión Técnica Agrícola de la Republica China (Calderón *et al.*,

2000). La guayaba pera es un arbusto siempre verde de la familia de las Myrtaceas, frondoso que alcanza de 5 a 6 metros de altura promedio, pero si se maneja adecuadamente con podas, no sobrepasa los 3 m. Se ha observado que aunque hay floraciones esporádicas en el mes de junio, la principal sucede en octubre y la cosecha en el mes de enero. Los suelos que requiere son de textura areno-arcillosa, profundos, bien drenados y buen contenido de materia orgánica.

2.6.6 Establecimiento y manejo de los experimentos

Los sistemas agrícolas: Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), Maíz con Barreras de Muro Vivo (MBMV) y Maíz en Labranza Cero con Pastoreo (MLCP), tuvieron en común en primer lugar la preparación del suelo, que consistió primeramente en la no roturación y la realización del corte y picado con machete de los matorrales que habían crecido en la época de estiaje. Estos residuos junto con los del maíz se dejaron como cobertura al suelo, siendo éste variable entre sistemas como ya se ha hecho mención en el Cuadro 1. Es importante mencionar que a diferencia de la región de los Tuxtlas en Veracruz o de la Mazateca en Oaxaca, en las laderas de la región de estudio no se rotura el suelo. El único movimiento del suelo se realiza cuando se controlan las malezas con coa. Esto a juicio de los productores obedece a lo abrupto de las laderas y por presentar la mayoría de los suelos cierta cantidad de gravas y piedras que limitan el laboreo o aradura.

A continuación se hace una descripción más detallada del establecimiento y manejo de los sistemas, haciendo énfasis en aspectos que resultan específicos para las componentes que estos incluyen.

2.6.6.1 Milpa intercalada con árboles frutales

Diseño del sistema. Los árboles de guayaba se establecieron en el año 2007 y el maíz y el frijol en el 2009 para conformar siete módulos MIAF. Un módulo consiste en una franja de 11 m de ancho establecida en contorno perpendicular a la pendiente, la que a la vez está dividida en tres sub-franjas: una central de 4.6 m de ancho en la que en el centro (2.3 m) se plantaron a cada metro los árboles de guayaba, y en las dos sub-franjas laterales de 3.2 m de ancho se sembraron dos hileras de maíz y dos de

frijol en franjas alternas de 2 hileras. De esta manera, el maíz y el frijol ocuparon cada uno aproximadamente 30% del terreno y los árboles frutales el 40% restante (Figura 2.7).



Figura 2.7. Diseño del módulo milpa intercalada con árboles frutales.

Siembra y manejo del maíz. La siembra se realizó el 26 de junio del año 2009, una vez que las lluvias se habían establecido con normalidad. Este cultivo ocupó 0.3 ha estableciéndose a razón de una densidad de 70,000 plantas por hectárea de acuerdo a las características antes definidas de la variedad V-424 (López *et al.*, 1999).

Para la fertilización se utilizó el tratamiento 95-50-00 para nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente, determinado para el agrosistema 23 de acuerdo al Manual de Diagnóstico Prescripción para el Cultivo de Maíz en Chiapas (López *et al.*, 1999). Por razones del estudio relacionados a la respuesta del rendimiento al fraccionamiento de ambos elementos que se explicaron a mayor detalle en la sección 2.6.4, a una mitad en sentido vertical de la ladera se fertilizó con el tratamiento completo y la otra con el 50% de éste. En ambos casos la primera fertilización se realizó a los 15 días de

emergencia de las plantas aplicando la mitad del nitrógeno y el total del fósforo. La segunda fertilización se realizó al aparecer la hoja bandera aplicando la otra mitad del nitrógeno.

Tomando en cuenta que el maíz y frijol estaban intercalados, se evitó el uso de herbicidas a base de Atrazina para el control pre-emergente de malezas ya que estos pueden causar toxicidad al frijol. En cambio se realizó el control de malezas con coa y mediante la aplicación de un herbicida desecante a base de Paraquat 20% a razón de 2 L ha⁻¹ o Diuron 27.6% + Paraquat 10% a razón de 1.5 L ha⁻¹, teniendo el cuidado de no dañar las plantas de frijol en las hileras aledañas a las de maíz.

El control de plagas como gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y gusano falso medidor (*Trichoplusia ni*), se realizó de manera preventiva en cuanto se detectaban en sus primeros instares larvales aplicando Lambdacihalotrina 5% a razón de 0.75 L ha⁻¹ y contra el gusano trozador (*Agrotis ipsilon*) que por su comportamiento nocturno se dificulta su control por medio de aspersiones, se realizaron aplicaciones de cebos envenenados, a base de Diazinón 2%, maíz cocido y esencia de vainilla.

Siembra y manejo del frijol. La siembra se realizó de manera simultánea con el maíz. Esta especie ocupó también 0.3 ha, con una densidad de 250,000 plantas por hectárea. Para la fertilización se utilizó el tratamiento 40-40-00 recomendado para el Agrosistema 23 y por las mismas razones especificadas para el maíz, a la mitad en sentido vertical de la ladera se fertilizó con el tratamiento completo y la otra con el 50% de éste. En ambos casos se aplicó el total del nitrógeno y fósforo en una sola fertilización la que se realizó a los 15 días de emergencia de las plantas.

El control de las malezas se realizó de manera similar a lo mencionado en el maíz. El control de plagas como diabroticas (*Diabrotica spp.*) y conchuela (*Epilachna varivestis*), se realizó de manera preventiva, aplicando Metamidofos 48.3% a razón de 1 L ha⁻¹, cuando era necesario. Aunque fue evidente que las aplicaciones realizadas al maíz al controlar gusano cogollero también resultaban efectivas en la disminución de insectos plagas del frijol.

Árboles frutales

Delimitación de las hileras. En primer lugar y con el apoyo de un nivel tipo A se determinó la pendiente media de la ladera sobre la cual se trazó una línea guía en contorno perpendicular a la pendiente. En segundo término tomando como referencia esta línea se trazaron a cada 11 m de ancho tres líneas aguas abajo y tres aguas arriba conformando en total siete hileras. Finalmente en cada hilera se delimitó la posición donde posteriormente se abrieron las cepas, colocando una estaca a cada metro. De esta manera se diseñó una densidad de plantación intensiva y compacta a razón de 909 árboles por hectárea.

Apertura de cepa. Esta actividad se realizó una vez que las lluvias se habían iniciado para que el suelo estuviera húmedo y se facilitara la labor. Las cepas se hicieron entre 35 a 40 cm por lado y 40 cm de profundidad, cuidando de separar la tierra extraída de 0 a 20 cm y la de 20 a 40 cm. Lo anterior es para que al momento del trasplante la tierra del primer estrato por ser más fértil fuera aplicada al fondo de la cepa.

Trasplante. Al momento de extraer las plantas de las bolsas se tuvo cuidado que no tuvieran raíces enrolladas y en caso que así fuera éstas se podaron. Posteriormente se colocó una capa de suelo de la extraída a 0-20 cm en el fondo de la cepa. Se aplicó la composta y fertilizantes en las cantidades que se mencionarán en la siguiente sección y se apisonó el suelo cuidando de colocar el tallo del árbol en el centro de la cepa.

Fertilización. Al momento del trasplante, los árboles se fertilizaron con el tratamiento 30-30-30 definido en gramos de N: P₂O₅: K₂O por árbol usando como fuentes la urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, respectivamente. Al segundo año se duplicó el tratamiento (60-60-60) y al tercer año se triplicó (90-90-90), utilizando este último para los años subsecuentes. Adicionalmente, al momento del trasplante se aplicó por única ocasión un kilogramo de composta por árbol. En la primera aplicación de cada año realizada en junio se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno y potasio. La otra mitad de estos dos últimos se aplicaron en la segunda fertilizada realizada en septiembre.

Poda de los árboles. En virtud de la proximidad entre árboles en la hilera, la conducción y poda del árbol fue bajo los principios del sistema Tatura modificado, dejando una rama de estructura que alternaba su orientación aguas arriba y aguas abajo de la hilera de árboles, con el cuidado que cuando estaba orientada aguas arriba de la hilera se ubicó en una posición más alta respecto a cuando estaba aguas abajo (Figura 2.8). En el primer caso la finalidad es evitar que la rama esté en contacto con el suelo ubicado en una cota más arriba.



Figura 2.8. Árboles de guayaba en formación con los principios del sistema de poda Tatura modificado.

Control de malezas, plagas y enfermedades. El control de malezas se realizó por medio de deshierbes con coa o azadón procurando remover la menor cantidad de suelo al realizar la labor. El control preventivo de plagas como chinches y conchuelas se realizó mediante aplicaciones de Clorpirifos 0.80 E.M. a razón de 1 L ha^{-1} y para las enfermedades foliares y de fruto Captan a razón de 1.2 kg ha^{-1} .

Filtro de escurrimientos. Para el control de la erosión hídrica del suelo, un componente de suma importancia en el sistema MIAF es el establecimiento de un filtro de escurrimientos aguas arriba de la hilera de frutales. Este consiste en un camellón de aproximadamente un metro de ancho, formado por rastrojo de maíz, frijol y residuos de

la poda colocado horizontalmente, entrelazado y recargado en los troncos de los árboles frutales (Figura 2.9). En el año 2007 en virtud que los árboles estaban aún pequeños y para no causarles daño por el acomodo del filtro de escurrimientos se les reforzó con una estaca sobre la que se apoyó los residuos de cosecha. A partir del año 2008 que los tallos estuvieron más fortalecidos el filtro se acomodó sobre el área inmediata aguas arriba de la base de los tallos. En mayo del 2009 el filtro de escurrimientos tenía un ancho de 80 cm y una altura de 35 cm y la cantidad aproximada de rastrojo y material producto de la poda fue 350 kg de materia seca en 100 m de longitud. La finalidad es que el árbol frutal funcione como muro vivo y que además de controlar la erosión hídrica del suelo, incremente la eficiencia en el uso del agua de lluvia, lo cual mejora la captura de carbono tanto en el suelo como en la parte aérea del árbol y permite la formación paulatina de terrazas con una pendiente menos pronunciada (Cortés *et al.*, 2007).



Figura 2.9. Filtro de escurrimientos aguas arriba de la hilera de árboles de guayaba.

2.6.6.2 Módulos de cultivo simple de maíz, frijol y guayaba en la microcuencia MIAF, para la determinación de la eficiencia relativa de la tierra

En cada una de las tres posiciones de la ladera (baja, media y alta) se estableció un módulo de maíz y frijol en cultivo simple compuesto de seis hileras de 8 metros de

largo y 0.8 m entre ellas, a razón de una densidad de 70,000 y 250,000 plantas por hectárea, respectivamente. El módulo de guayaba en cultivo simple únicamente se estableció en la posición media de la ladera y estuvo compuesta de cuatro hileras con seis árboles sembrados a dos metros entre ellos y con cuatro metros de distancia entre hileras para una densidad por hectárea de 1250 árboles (Figura 2.10).

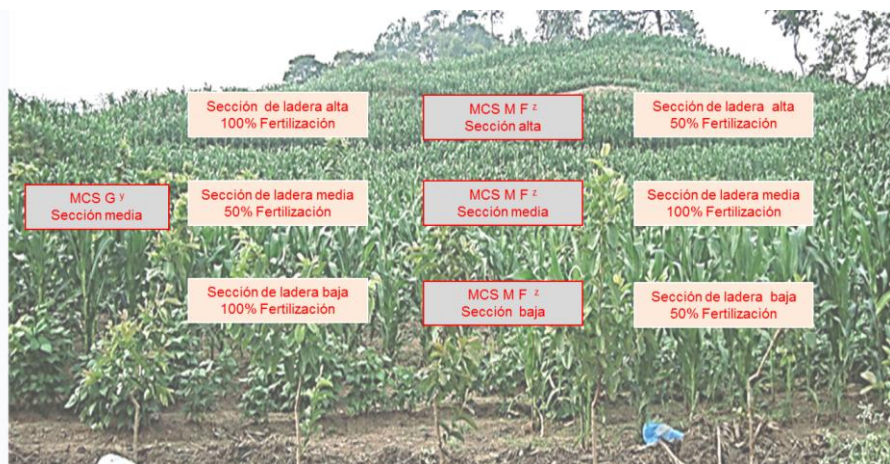


Figura 2.10. Ubicación de los módulos de cultivo simple de maíz, frijol y guayaba en la microcuenca MIAF, para la determinación de la eficiencia relativa de la tierra. ^zMódulo de cultivo simple de maíz y frijol ; ^yMódulo de cultivo simple de guayaba

2.6.6.3 Maíz con barreras de muro vivo

Delimitación de hileras en contorno para el establecimiento de los setos. Se realizó de manera similar a la descrita para la delimitación de las hileras de los árboles de guayaba en el sistema MIAF mencionado anteriormente. Este sistema se estableció en el año 2008 y consistió en el establecimiento de seis setos en contorno con *Gliricidia sepium*. La distancia horizontal entre setos se determinó a 12 m en función de la pendiente e intervalo vertical (López *et al.*, 2000), que se considera un distanciamiento que permite un número adecuado de hileras de maíz y sin que dificulte las prácticas de cultivo.

Establecimiento de los setos. La siembra se realizó abriendo un surco de 8 cm con azadón y depositando a chorrillo aproximadamente 50 semillas por metro lineal de manera que al nacer y crecer las plantas, sus tallos formaran un seto. Para el buen crecimiento de las plántulas de *Gliricidia* se realizaron deshierbes, a los 30, 60 y 90

días a partir de que las plantas tenían 15 días de emergidas; así también con el objetivo de estimular un crecimiento más vigoroso de los tallos, durante la primera limpia y por única ocasión, se fertilizaron con 44 g de superfosfato de calcio triple por metro lineal de seto.

Poda de los setos y establecimiento del filtro de escurrimientos. A partir del segundo año de establecidos, los setos presentaron un crecimiento vigoroso pudiendo competir por luz con los surcos aledaños de maíz. Para evitar esta competencia se realizaron dos podas a 1 m de altura; la primera previo o conjuntamente a la siembra del maíz y la segunda cuando el maíz estaba en la fase de inicio de floración. El follaje producto de ambas podas más el rastrojo de maíz, se colocaron aguas arriba de la base de los setos (Turrent *et al.*, 1995) para formar el filtro de escurrimientos (Figura 2.11 a, b).



Figura 2.11. Seto de *Gliricidia* (a) con filtro de escurrimientos aguas arriba de la base del seto y (b) podados.

El propósito del filtro de escurrimientos es disminuir la velocidad del escurrimiento a lo largo de la pendiente en la ladera y con ello incrementar la infiltración y sedimentación del suelo movilizado por el agua, y por ende disminuir el arrastre de sedimentos a las partes bajas de la cuenca. En mayo del año 2009, el filtro de escurrimientos tenía un ancho de 65 cm y una altura de 30 cm y la cantidad aproximada de rastrojo y material producto de la poda fue de 250 kg de materia seca en 100 m de longitud.

Siembra y manejo del maíz. A diferencia del sistema MIAF en el que se intercalan las hileras de maíz y frijol, en este caso únicamente se sembró maíz. Las hileras de maíz se establecieron siguiendo el contorno definido en cada seto de *Gliricidia* y para condicionar la competencia con los setos, la primera hilera de maíz se estableció a 1 m sea aguas arriba o abajo de los setos. La densidad establecida, la fertilización y control de plagas fue similar a lo indicado en el sistema MIAF, pero en este caso por ser un sistema de maíz unicultivo fue posible la aplicación de herbicida pre-emergente a base de atrazina para el control preventivo de la maleza.

2.6.6.4 Maíz en labranza cero con pastoreo

La variedad utilizada y las actividades de preparación del suelo, densidad de siembra, fertilización, control de malezas y plagas, fueron similares a lo indicado en el sistema MBMV. La única variante es que para la siembra del maíz, aunque existió una delimitación previa de una hilera en contorno que sirviera de guía, no es posible guardar permanentemente el sentido en contorno de la siembra. En cambio en los otros sistemas por incluir varias hileras de frutales o setos de *Gliricidia* que funcionan como líneas guía, fue posible establecer ordenadamente las hileras en contorno a través de la pendiente.

2.6.7 Caracterización de la fertilidad del suelo

Para caracterizar el suelo de las tres microcuencas, hubiese sido más preciso muestrear a las profundidades 0-15 y 15-30 cm; sin embargo, únicamente se muestreó a la primera profundidad en virtud del costo que implicaba los análisis de laboratorio, y por la misma razón varió el número de muestreos realizados en cada microcuenca.

2.6.7.1 Muestreo del suelo previo al establecimiento de los experimentos

El sistema MBMV se estableció en mayo del 2008 y fue a inicios de este año cuando se tomaron muestras de suelo así como en el de MLCP. El sistema MIAF se estableció en junio del año 2007, y para determinar la condición inicial de fertilidad del suelo, las muestras se tomaron medio metro aguas arriba del filtro de escurrimientos, bajo el supuesto que esto representaría las condiciones de cuando el filtro se

estableció en la fecha antes mencionada y por ende aún no tenía efectos sobre la fertilidad del suelo.

El muestreo del suelo se hizo de acuerdo a los tres niveles del factor sección de la ladera de cada sistema de manejo descrito en la sección 2.6.4. En cada sección se delimitaron dos secciones dentro de un módulo MIAF o MBMV, denominadas donante y receptora (Sd, Sr). La primera corresponde al área donde inicia el escurrimiento y arrastre de sedimentos (aguas abajo de las hileras de árboles o setos de *Gliricidia*), y la segunda donde se depositan (aguas arriba de las hileras de árboles o setos de *Gliricidia*). En el sistema MIAF, la sección donante se ubicó a 1 m aguas abajo de la hilera del árbol de guayaba, y la receptora a 30 cm aguas arriba del filtro de escurrimientos situado sobre la base de la hilera de guayaba. En el sistema MBMV de los dos setos que conforman un módulo, la sección donante se ubicó a 1 m aguas abajo del seto ubicado en la cota superior y la sección receptora a 30 cm aguas arriba del filtro de escurrimientos situado sobre la base del seto ubicado en la cota inferior

En el sentido horizontal de cada una de las secciones donantes y receptoras de las secciones de la ladera baja, media y alta de los sistemas MIAF y MBMV se obtuvo, con una barrena de 7 cm de diámetro, una muestra compuesta a 0-15 cm de profundidad, cada una conformada por 10 submuestras obtenidas a cada 8 metros en el sistema MIAF, y en los sistemas MBMV y MLCP a cada 3 metros por estar establecidos en microcuencas más angostas. En MLCP, por la misma naturaleza del sistema no se delimitaron la sección donante y receptora únicamente se obtuvo una muestra compuesta en cada una de las tres secciones de la ladera, en puntos de muestreo localizados aleatoriamente en cada sección de la ladera.

2.6.7.2 Muestreos del suelo a tres años del establecimiento del sistema MIAF y dos años para los sistemas MLCP y MBMV

El sistema MIAF es el más complejo de los tres sistemas debido a que interactúan agronómicamente tres especies, por lo que se consideró necesario estudiar a mayor detalle el efecto de este en la fertilidad del suelo, tomando para ello el total de las muestras correspondientes a los 12 tratamientos. A cada parcela dividida (sección de

la ladera x fertilización) se dividió en tres franjas de 12 m perpendiculares a la pendiente. En cada una de estas se tomó en la sección donante y receptora del módulo MIAF, una muestra compuesta de 5 sub-muestras obtenidas al azar a la profundidad de 0-15 cm. De esta manera cada muestra fue tomada por triplicado.

En el sistema MBMV, se tomaron 12 muestras correspondientes a los tratamientos compuestos por los mismos factores; sección de la ladera a tres niveles, fertilización mineral a dos niveles, y sección del módulo a dos niveles. En el sistema MLCP que no tenía especificada una sección donante y receptora, únicamente se tomaron 6 muestras correspondientes a los factores sección de la ladera y fertilización mineral. En ambos sistemas no se tomaron las muestras por triplicado por lo que no se delimitaron las tres franjas como se hizo en el sistema MIAF, y cada muestra estuvo compuesta de 10 submuestras tomadas al azar. La comparación entre el año uno y tres para el sistema MIAF y para el año uno y dos en el sistema MBMV y MLCP, se hizo en base a promedios generales de las propiedades de cada microcuenca y la interpretación de los resultados se hizo de acuerdo a la norma oficial 021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

2.6.7.3 Muestreo del suelo para determinar la fertilidad del suelo en la franja ocupada por la hilera de árboles y estatus nutricional del árbol de guayaba

Cada parcela dividida (sección de la ladera x fertilización) se dividió en tres franjas verticales de 12 m. En cada una de éstas se ubicaron 5 metros centrales, donde se obtuvo una muestra compuesta de 5 submuestras realizadas a cada metro a la profundidad de 30 cm, y a una distancia de 50 cm aguas arriba de la hilera del frutal en el área donde se ubica el filtro de escurrimientos y que de acuerdo a información no publicada de Camas (2010) coincide con la zona de máxima distribución radical del árbol de guayaba.

Para determinar el estatus nutricional del árbol de guayaba se seleccionaron tres árboles dentro de la zona donde se realizó el muestreo de suelo, y se muestreó el follaje después de realizar la primera cosecha de fruto tres años después del

trasplante. El muestreo consistió en tomar de cada árbol 10 hojas ubicadas en la cuarta posición de una espiral de hojas en crecimiento activo en la parte terminal, tomando como referencia la primera hoja expandida en la espiral (Universidad de Hawai, 2002).

2.6.8 Métodos de laboratorio

Las muestras de suelo de las tres microcuencas se secaron a la sombra, se molieron en molino de martillo, y se cribaron en un tamiz de 2 mm. Las determinaciones físicas efectuadas fueron: pedregosidad, calculada como porcentaje del peso de piedras en relación al peso total de la muestra de suelo; humedad volumétrica (TDR 300 Fieldscout), densidad aparente (método del cilindro); textura (Boyucos); pH (1:2 H₂O) y conductividad eléctrica en extracto de pasta de saturación. Las determinaciones químicas de materia orgánica (Walkley y Black), fósforo total extraíble (Olsen), potasio y capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio 1N, pH 7) se hicieron basadas en los métodos de la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2000). Además, en las muestras de suelo de la franja del árbol de guayaba, la determinación de nitrógeno total se realizó por el método micro Kjeldhal, el calcio y magnesio se determinaron complejométricamente con EDTA, y el potasio con fotometría de flama.

Las hojas de guayaba colectadas se transportaron en cámara húmeda al sitio de procesamiento. Se lavaron por primera vez con agua limpia y jabón neutro y se enjuagaron con agua corriente y un lavado final con agua destilada. Después se secaron en una estufa de ventilación forzada a 50 °C por 72 horas. Posteriormente fueron molidas a 20 mallas y colocadas en frascos plásticos para su análisis posterior. Las determinaciones de nitrógeno total, potasio, calcio y magnesio se realizaron por absorción atómica. El fósforo por colorimetría ultravioleta en solución de vanadato-molibdato y el nitrógeno por el método micro-Kjeldahl.

2.6.9 Estimación del rendimiento de grano de maíz y frijol, y fruto guayaba

La estimación de rendimiento de grano y biomasa total se realizó en 2 m de una hilera de maíz y/o frijol para cada uno de los tratamientos correspondientes en cada sistema

de manejo y se contó el número de plantas para cuantificar la densidad de población a la cosecha.

El rendimiento de grano se expresó al 14% de humedad. En el sistema MIAF el rendimiento de maíz y frijol se expresó en función de 3000 m² que es el área aproximada que cada uno de los cultivos ocupa en una hectárea bajo este sistema. En MBMV el rendimiento de maíz se expresó de acuerdo a 8680 m², que es el área ocupada por el maíz, ya que la barrera de muro vivo ocupa un área de 1320 m², que corresponde a 6.6 setos de *Gliricidia* de 100 m de longitud por 2 m de ancho. En MLCP que se estableció en cultivo simple sin setos de *Gliricidia*, el rendimiento se expresó en toneladas por hectárea.

En los módulos de maíz y frijol en cultivo simple para la evaluación de la eficiencia relativa de la tierra, de acuerdo a las secciones baja, media y alta de la ladera del sistema MIAF, el rendimiento se cuantificó 2 m de cuatro hileras centrales de la parcela y el rendimiento se expresó en toneladas por hectárea.

La primera cosecha del año 2009, inicio de la etapa productiva de los árboles de guayaba fue muy heterogénea, por lo tanto, para tener una referencia de cómo es la respuesta del rendimiento de fruto, se tomaron para cada tratamiento, de uno a tres árboles que fueran representativos en desarrollo y vigor, a los cuales cada cinco días se les cortaba y pesaba el número de frutos aptos para cosecha, extrapolando el rendimiento obtenido a 909 árboles que componen una hectárea de MIAF.

2.6.10 Índice de área foliar y radiación fotosintéticamente activa interceptada en el maíz y el frijol

Las determinaciones se realizaron a nivel del suelo dentro del cultivo de maíz de cada uno de los tratamientos correspondientes a los tres sistemas MBMV y MLCP cuando se encontraban en la etapa de antesis. En el caso específico del sistema MIAF se consideró al inicio hacer la evaluación a nivel del suelo en el frijol y maíz en dos fechas; la primera cuando el frijol estaba en floración y la segunda nuevamente en ambos cultivos cuando el maíz hubiese alcanzado esta etapa fenológica.

En el primer muestreo realizado en el sistema MIAF y en el cultivo simple se encontró en ambos un índice similar de área foliar y radiación fotosintéticamente activa interceptada en maíz, lo cual no coincidía con lo observado en campo porque en el sistema MIAF las plantas de maíz permitían mayor paso de luz, de hecho es posible que el ceptometro subestime el IAF por detectar mayor luz incidente. Por lo tanto, en el segundo muestreo realizado en el sistema MIAF, se efectuó la evaluación a la altura media de la planta y a nivel del suelo, para determinar cómo variaba la cantidad interceptada entre ambos niveles. Adicionalmente, también se efectuaron esas determinaciones en los módulos de cultivo simple de maíz y frijol establecidos en las secciones baja, media y alta de la ladera, de la microcuenca MIAF.

Para medir la RFA y el IAF se utilizó un Ceptometro AccuPar LP 80, el cual consiste en una sonda que contiene 80 sensores independientes espaciados a cada centímetro, que miden la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con una resolución de un $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las mediciones se realizaron en días despejados entre las 11:00 y 13:00 horas; para ello, se colocó el ceptometro de tal forma que su parte media se ubicara en el centro de la hilera de frijol o del maíz, además de ello se ubicó el estrato a determinar, cuidando no provocar sombreado de parte del operador del equipo.

Para el cálculo de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada se consideró la RFA incidente en el dosel (R1), en la parte media (R2) y a nivel del suelo (R3), lo cual permitió obtener el porcentaje mediante la siguiente relación: $\text{RFAI} = (\text{R2/R1 o R3/R1})$, en %. El dato de índice de área foliar fue obtenido directamente mediante lecturas de cálculos directos que realiza el ceptometro.

2.6.11 Contenido de clorofila

El contenido de clorofila se determinó con un medidor SPAD de clorofila (Opti-Sciences CCM-200, USA). Este equipo actúa por medio de absorbancia óptica en las longitudes de onda de 940 y 660 nm, y mide un área de 0.71 cm^2 de área foliar. Las determinaciones del contenido de clorofila son expresadas en unidades SPAD. El muestreo se realizó cuando el maíz estuvo en la fase de sexta hoja, tomando la lectura

en la quinta hoja de cuatro plantas (Piekielek y Fox, 1992). En el caso del frijol se realizó a los 28 días después de la emergencia (Pereira *et al.*, 2008).

2.6.12 Evaluación de la productividad de los sistemas

La evaluación de la productividad de los tres sistemas se realizó mediante: a) un análisis financiero que tomó en cuenta el rendimiento de grano del maíz y frijol, y fruto de guayaba como productos principales, b) la eficiencia relativa de la tierra, c) la conversión de la radiación en biomasa, grano de maíz y frijol, y fruto de guayaba, y d) la eficiencia en el uso del agua.

2.6.12.1 Análisis financiero

La evaluación financiera de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP, se realizó para un período de 10 años, tomando en cuenta la siguiente tasa de actualización e indicadores económicos.

Tasa de actualización (TA). Esta permite la homogenización de los parámetros de inversión al referirlos todos a una misma unidad de tiempo. Se utiliza para calcular los indicadores como valor actual neto (VAN), la relación beneficio costo (B/C) y establecer el valor mínimo de la tasa interna de retorno (TIR) para aceptar un proyecto (Rojas, 2003). En el presente estudio la tasa real de descuento utilizada para la actualización de los beneficios financieros del proyecto es del 9.5%, que corresponde a la tasa media real que han recibido los flujos de capital extranjero dirigidos a inversiones de portafolio o a la inversión extranjera directa en México (González, 1999).

Valor actual neto (VAN). Este indicador expresa la ganancia total en moneda actual, que generan las opciones de inversión durante la vida útil del proyecto, el cuál en este trabajo fue de 10 años. El VAN se calcula por la diferencia entre los beneficios y costos actualizados, de esta manera todos los ingresos y egresos se transforman a pesos actuales.

Tasa interna de retorno (TIR). Se refiere a la tasa máxima que el productor puede pagar sin perder dinero en caso de pedir prestado para invertir en el establecimiento del MIAF. Es decir que el capital más el interés acumulado se paga con los ingresos

que genera el MIAF durante un período de tiempo. El criterio de decisión para aceptar o rechazar la opción de inversión es comparando la TIR con la tasa de descuento aplicada.

Relación beneficio costo (B/C). Es el resultado de dividir el valor actualizado de los beneficios entre el valor actualizado de los costos. Este indicador muestra la ganancia del productor por cada peso invertido en un proyecto.

2.6.12.2 Eficiencia relativa de la tierra

En el sistema MIAF se estableció una parcela de 6 hileras de maíz y frijol en cultivo simple en las secciones baja, media y alta de la ladera correspondiente al tratamiento de parcela grande. Respecto a la guayaba se estableció en la sección media de la ladera una parcela en cultivo simple compuesto de tres hileras de seis árboles, con una distancia entre hileras de 4 m y entre árboles de 2 m para una densidad de 1250 árboles por hectárea. En ambos casos el tratamiento de fertilización correspondió al 100% de fertilización mineral. Con el rendimiento de las tres especies en cultivo simple e intercaladas se calculó la Eficiencia Relativa de la Tierra (ERT) mediante la ecuación propuesta por Francis *et al.* (1982), $ERT = R_{Mi}/R_{Mu} + R_{Fi}/R_{Fu} + R_{Gi}/R_{Gu}$, donde;

ERT= Eficiencia relativa de la tierra.

R_{Mi} , R_{Fi} , R_{Gi} = Rendimiento del maíz, frijol y guayaba intercalados.

R_{Mu} , R_{Fu} , R_{Gu} = Rendimiento del maíz, frijol y guayaba en unicultivo.

2.6.12.3 Eficiencia en la conversión de la radiación solar

Consistió en la determinación de los MJ de energía contenidos en la biomasa producida en un metro cuadrado, por cada MJ de radiación incidente en esa misma área, en base a la metodología que se mencionará en el capítulo 4. Para ello, se cuantificó a la cosecha el valor de la materia seca total, de grano de maíz y frijol, y fruto de guayaba expresado en $g\ m^{-2}$, así como sus respectivos valores calóricos expresados en $MJ\ g^{-1}$.

Por otra parte, se procesó la información diaria de radiación global tomada cada hora con la caseta consola Vantage Pro automatizada marca Davis. Esto consistió en

integrar los valores por medio del método del trapecio (Guevara, 2003) obteniendo de esta manera la radiación global diaria en Wm^{-2} , mismos que fueron transformados a $MJ m^{-2} d^{-1}$ y en función de los días a madurez fisiológica de cada especie se calculó la radiación acumulada para cada una. La eficiencia finalmente se calculó como el cociente de la energía contenida en la biomasa de un metro cuadrado, entre la radiación solar acumulada para cada especie en la misma área.

2.6.12.4 Eficiencia en el uso del agua

En primer lugar se determinó la evapotranspiración diaria de referencia mediante la suma de los valores determinados cada hora por la caseta meteorológica. Posteriormente se determinó la evapotranspiración para cada cultivo sumando el valor de ésta durante el período que comprendió la siembra y la madurez fisiológica.

El valor determinado se multiplicó por el coeficiente de cultivo (K_c) de cada especie obteniendo la evapotranspiración real en litros de agua por metro cuadrado. El valor de K_c encontrado en la literatura (Zamora *et al.*, 2007; FAO, 2008), se determinó bajo condiciones de riego, aunque lo ideal hubiera sido utilizar un valor determinado en condiciones de temporal; sin embargo, esta información no se encuentra disponible, razón por la que los resultados obtenidos deben tomarse como una primera aproximación. La eficiencia en el uso del agua finalmente se calculó como el cociente de la biomasa o grano producido en un metro cuadrado en función del rendimiento promedio por hectárea del nivel de fertilización 100%, entre los litros de agua acumulado en la misma área durante los días a madurez fisiológica de cada especie.

2.6.13 Análisis estadístico

El análisis estadístico para las variables dependientes: índice de área foliar, contenido de clorofila y radiación fotosintéticamente activa interceptada en el maíz y frijol, y únicamente para rendimiento del maíz y guayaba, así como los análisis de suelo en el sistema MIAF, se realizó mediante un modelo de parcelas subdivididas. En el sistema MIAF, los análisis del suelo del área donde estaban ubicadas las hileras de árboles de guayaba, y foliares, se analizó mediante un modelo en parcelas divididas. Para el análisis combinado (dos ciclos) del rendimiento de frijol se utilizó un modelo de

parcelas sub subdivididas. La descripción de los factores analizados así como los grados de libertad de los errores se menciona posteriormente.

Tomando en cuenta que no se tienen repeticiones del experimento, las variables evaluadas se muestrearon por triplicado, haciendo uso de las interacciones donde se incluye el factor muestreo como aproximaciones a los errores a, b y c para el análisis en parcelas subdivididas y errores a, b, c y d. en parcelas sub-subdivididas. En virtud de que el experimento se estableció en campo bajo un diseño sistemático, resulta importante mencionar que el análisis estadístico de las variables evaluadas incluido los muestreos del suelo, se realizó presuponiendo que se cumplían los supuestos requeridos para un análisis de varianza convencional como son; la distribución al azar de los tratamientos y la distribución normal del error. Por lo antes expuesto, los resultados del cotejo estadístico son sólo aproximaciones de la realidad, debido a sub-estimaciones de los errores contra los que se hacen las pruebas de hipótesis.

El análisis estadístico para el índice de área foliar, contenido de clorofila y RFA interceptada en maíz y frijol, y únicamente para rendimiento de maíz, comprendió las siguientes fuentes de variación: sección de la ladera en función de la pendiente (SL) en tres niveles, baja, media y alta; fertilización mineral (F) en dos niveles, 50% y 100%; posición de la hilera de maíz o frijol (Ph) en tres niveles, que consisten para el sub-experimento de maíz en el sistema MIAF, maíz-frijol receptora, maíz-frijol donante y maíz-guayaba donante, y para el sub-experimento de frijol, frijol-guayaba receptora, frijol-maíz receptora y frijol-maíz donante. Para el sistema MBMV y MLCP, maíz-receptora, maíz media y maíz donante, y para cada tratamiento tres muestreos (M), que en total sumaron 53 grados de libertad (gl). El efecto del factor SL se evaluó con el error a, integrado por la interacción SL x M, con 4 gl; el efecto del factor F y la interacción SL x F, se evaluaron con el error b, integrado por las interacciones M x F y SL x M x F, con 6 gl; el efecto del factor Ph y las interacciones SL x Ph, F x Ph y SL x F x Ph, se evaluaron con las interacciones M x Ph, SL x M x Ph, M x F x Ph y SL x M x Ph con 24 gl.

Para el análisis combinado del rendimiento del frijol, se adicionó a lo expuesto en el caso anterior el factor ciclo de cultivo (C) con dos niveles, ciclo PV y OI, que sumaron

en total 107 gl. El efecto del factor C se evaluó con el error a, integrado por la interacción C x M, con 2 gl; el efecto del factor SL y la interacción C x SL se evaluaron con el error b, integrado por las interacciones M x SL y C x M x SL, con 8 gl; el efecto del factor F y las interacciones C x F, SL x F, C x SL x F, se evaluaron con el error c, integrado por las interacciones M x F, C x M x F, M x SL x F y C x M x SL x F, con 12 gl; el efecto del factor Ph y las interacciones C x Ph, SL x Ph, C x SL x Ph, F x Ph, C x F x Ph, SL x F x Ph y C x SL x F x Ph, se evaluaron con el error d, integrado por las interacciones M x Ph, C x M x Ph, M x SL x Ph, C x M x SL x Ph, M x F x Ph, C x M x F x Ph, M x SL x F x Ph y C x M x SL x F x Ph, con 48 gl.

Para la guayaba, el análisis de varianza combinado para el rendimiento, comprendió las siguientes fuentes de variación: año (A) en dos niveles, 2009 y 2010, sección de la ladera en función de la pendiente (SL) en tres niveles, baja, media y alta, y fertilización mineral (F) en dos niveles, 50% y 100%, y para cada tratamiento tres muestreos (M) que en total sumaron 53 gl. El efecto del factor A, se evaluó con la interacción A x M, con 2 gl; el efecto del factor SL y la interacción A x SL, se evaluaron con las interacciones SL x M y SL x A x M, con 8 gl; el efecto del factor F y las interacciones A x F, SL x F y SL x A x F, se evaluaron con las interacciones M x F, A x M x F, SL x M x F y SL x A x M x F, con 12 gl.

El análisis estadístico de las propiedades físicas y químicas del suelo en el sistema de manejo MIAF comprendió las siguientes fuentes de variación: sección de la ladera en función de la pendiente (SL) en tres niveles, bajo, media y alta; fertilización mineral (F) en dos niveles, 50% y 100%, y sección del módulo MIAF y MBMV (Sm) en dos niveles, donante y receptora, y para cada tratamiento tres muestreos (M) que en total sumaron 35 grados de libertad gl. El efecto del factor SL, se evaluó con el error a, integrado por la interacción SL x M, con 4 gl; el efecto del factor F y la interacción SL x F, se evaluaron con las interacciones M x F y SL x M x F, con 6 gl; el efecto del factor Sm y las interacciones SL x Sm, F x Sm y SL x F x Sm, se evaluaron con las interacciones M x Sm, SL x M x Sm, M x F x Sm y M x SL x F x Sm, con 12 gl.

En este mismo sistema pero en el sub-experimento correspondiente a la guayaba, el análisis del contenido de elementos en el suelo de la franja ocupada por los árboles de

guayaba, y el análisis del follaje de estos comprendió: tres secciones de la ladera en función de la pendiente (SL); dos niveles de fertilización (F), y para cada tratamiento tres muestreos (M) que en total sumaron 17 grados de libertad. El efecto del factor SL, se evaluó con el error a, integrado por la interacción SL x M, con 4 gl; el efecto del factor F y la interacción SL x F, se evaluaron con el error b, integrado por las interacciones M x F y SL x M x F, con 6 gl.

En el sistema MBMV el análisis estadístico de las propiedades físicas y químicas del suelo comprendió tres secciones de la ladera en función de la pendiente (SL), dos niveles de fertilización (F), y dos secciones del módulo de barreras vivas (Sm) sin sub muestreos dentro de los tratamientos, por lo que en total se tuvieron 11 gl y 5 gl del error conformados por las interacciones F x SL, F x Sm y F x SL x Sm. En el sistema MLCP no se realizó análisis estadístico de las propiedades físicas y químicas del suelo debido al menor número de muestreos realizados como se ha mencionado anteriormente.

2.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.7.1 Calidad física y química del suelo

En el Cuadro 2.2 se indican las propiedades determinadas para caracterizar la fertilidad del suelo de las microcuencas. Se puede observar que en el año cero el suelo de la microcuenca MIAF, era más ácido, menos fértil, y con una densidad aparente mayor que el suelo de las microcuencas MBMV y MLCP. Esto refleja el uso y manejo que había tenido cada suelo. En los dos últimos sistemas, el suelo se abrió al cultivo 5 años antes, mientras que en el primero fue hace 10 años, de los cuales en los primeros seis se practicó la quema de residuos y en los siguientes cuatro se cultivó maíz en LCP solamente con el 10% de los residuos de cosecha como cobertura del suelo. Esto se debe a la práctica de sobrepastoreo en los residuos de cosecha de maíz en época de estiaje (Nieuwkoop *et al.*, 1992), lo cual resulta en una protección insuficiente del suelo y mayor exposición a los agentes erosivos (FAO, 2000).

Cuadro 2.2. Reacción del suelo, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (Da), contenido de materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K) bajo tres sistemas de manejo.

Sistema de manejo	Añ	pH	MO (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	CIC (meq/100)	Da (g/cm ³)
MIAF ^z	0	5.	2.2	5.0	0.3	11	2.0
	3	6.	2.5	13.	0.5	15	2.0
MBMV ^y	0	6.	3.1	17.	0.2	16	1.8
	2	6.	4.4	17.	0.2	19	1.8
MLCP ^x	0	6.	4.4	17.	0.7	17	1.9
	2	5.	4.0	7.3	0.2	14	1.9

^zMilpa intercalada con árboles frutales.

^yMaíz con barreras de muro vivo.

^xMaíz en labranza cero con pastoreo.

El contenido de la materia orgánica y de otros elementos en el año tres y dos respecto al año cero, se incrementó en los sistemas MIAF y MBMV, respectivamente, y disminuyó junto con el de P y K en el sistema MLCP. En éste, la materia orgánica pasó de un valor muy alto a alto, y el P y el K de alto a medio; sin embargo, al igual que en los otros dos sistemas, se considera que estos contenidos aún eran suficientes para satisfacer la demanda de los cultivos anuales (Castellanos *et al.*, 2000). Lo anterior se explica porque en ese año el sistema MLCP, tenía 7 años con menos del 30% de cobertura con residuos de cosecha, a diferencia del sistema MIAF que durante los 3 años recientes se manejó con 40% de residuos de cosecha, las hileras de árboles de guayaba y el filtro de escurrimientos. Cabe precisar que el aumento de MO y CIC en los sistemas MBMV y MIAF, se refiere a la determinada en el área receptora aguas arriba del filtro de escurrimientos ubicado sobre la base del seto de *Gliricidia* o la hilera de árboles de guayaba, en donde durante dos años se han aplicado aproximadamente de 4 a 4.5 kg m² de materia seca compuesto de residuos de maíz y follaje producto de la podas del seto de *Gliricidia* en el sistema MBMV y de residuos de maíz, frijol y follaje y tallos de guayaba producto de las podas en el sistema MIAF, respectivamente.

Para mejorar la calidad del suelo en el sistema MLCP, la FAO (2000) recomienda dejar por lo menos el 30% de residuos de cosecha en la superficie del suelo, aunque la

respuesta se obtendría en un plazo mayor al de los sistemas MIAF y MBMV, ya que como lo menciona Sánchez (1981), en suelos con pendiente pronunciada y altas precipitaciones pluviales, incluso una cobertura más densa, por sí sola no basta para controlar eficientemente la erosión y pérdida de nutrientes. Por otra parte, para lograr el acondicionamiento del suelo en MLCP se necesita un mayor número de años. Esta recomendación, a pesar de ser apropiada tiene la desventaja que se contrapone con el manejo tradicional de los productores. Ellos usan los residuos de cosecha de maíz para la alimentación de ganado en libre pastoreo en la época estiaje cuando el forraje se vuelve escaso; por lo tanto conviene generar recomendaciones que suplan el uso de los residuos de cosecha como cubierta del suelo o que fomenten el uso racional de estos a manera de garantizar una cobertura mínima al suelo del 30%. Lo anterior debe ser prioritario incluso para el sistema MIAF, ya que el manejo de la mayor cantidad de los residuos de cosecha de maíz y frijol utilizados como cobertura y filtro de escurrimientos, y la restricción de la entrada de los animales a pastoreo para evitar el daño a los árboles, obliga al productor a que tenga que comprar los residuos de cosecha de algún vecino para cubrir la necesidad de forraje durante el estiaje.

En el sistema MIAF, algo inesperado fue detectar un incremento en el contenido de P y K en el suelo, no obstante que es una microcuenca con mayor número de años de actividad agrícola. Esto puede deberse a que este suelo ha recibido alrededor de 82 kg ha⁻¹ de P y K, a través de la fertilización aplicada a los árboles de guayaba durante tres años. Por otra parte en el sistema MBMV se incrementó el contenido de materia orgánica, lo cual puede atribuirse al efecto benéfico de los setos de *Gliricidia* en el control de la erosión, captación de sedimentos y aporte de nitrógeno vía fijación biológica y descomposición del follaje como producto de la poda (CATIE, 1991; Dulormne *et al.*, 2003; Uribe *et al.*, 2002). De los tres sistemas de manejo, MBMV presentó un contenido menor de K en ambos años de muestreo. En este caso tomando en cuenta que las barreras vegetativas son muy eficientes para el control de la erosión y aporte de nutrimentos por medio de los residuos de la poda de *Gliricidia*, pareciera que los bajos valores de K no son consecuencia de la pérdida por los escurrimientos, sino más bien a características innatas del suelo en esa microcuenca.

2.7.2 Calidad física y química del suelo tres años después bajo el sistema MIAF y dos años después bajo los sistemas MLCP y MBMV

2.7.2.1 Sistema MIAF

En el sistema MIAF la sección de la ladera (SL) afectó la pedregosidad, además, ésta junto con la sección del módulo (Sm) por si mismos causaron diferencias en el contenido de MO y la θ_v . A nivel de interacciones, la SL x Sm y F x Sm afectaron el contenido de P (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Análisis de varianza del efecto de la sección la ladera (SL), fertilización mineral (F) y sección del módulo (Sm) sobre el pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónica (CIC), pedregosidad (Ped), humedad volumétrica (θ_v), materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K) del suelo, tres años después de estar sujeto bajo el sistema MIAF.

Fuentes de variación	pH	CE	MO	P	K	CIC	θ_v	Ped
SL	NS	NS	*	NS	NS	NS	**	**
F	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SL x F	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Sm	NS	NS	**	*	NS	NS	**	NS
SL x Sm	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
F x Sm	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS
SL x F x Sm	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.

Contenido de materia orgánica. El mayor contenido de MO, se presentó en las secciones baja y media de la ladera, y en la sección receptora del módulo. En el primer caso se considera está asociado al grado de la pendiente de estas secciones la cual fue de 4 y 20% respectivamente, comparado con 42% de la sección alta, que permite la disminución de la velocidad de los escurrimientos y una mayor sedimentación del suelo. Para el caso de la sección del módulo este efecto sugiere que es debido en parte a la acumulación de sedimentos en el filtro de escurrimientos, aunado a la mejor condición de humedad que contribuye a una mayor actividad microbiana que favorece

a la descomposición de los residuos de cosecha de maíz, frijol y material producto de las podas a los árboles de guayaba incorporados al filtro de escurrimientos.

Contenido de fósforo.

En la sección alta de la ladera con 50% de fertilización el contenido de P es considerado medio y con 100% alto. En el resto de las secciones sea con 50 o 100% de fertilización el contenido de P es catalogado como alto. En la sección baja de la ladera, el contenido de P fue similar en las secciones donante y receptora del módulo; sin embargo, en la sección media el contenido de P disminuyó en la sección donante, mientras que en la sección receptora hubo un incremento con una diferencia significativa (29%) entre ambas partes, y en la sección alta de la ladera en ambas secciones donante y receptora el contenido de P disminuyó (Figura 2.12). La explicación de estos resultados pueden estar relacionados a la cantidad de sedimentos movilizados de la sección donante y retenidos en la sección receptora, y la cantidad de fósforo contenida en los sedimento. Al respecto, en el capítulo 3 se hace mención que de acuerdo a resultados de evaluaciones sobre el contenido de fósforo en los escurrimientos, el 93% de éste elemento corresponde al contenido en el sedimento.

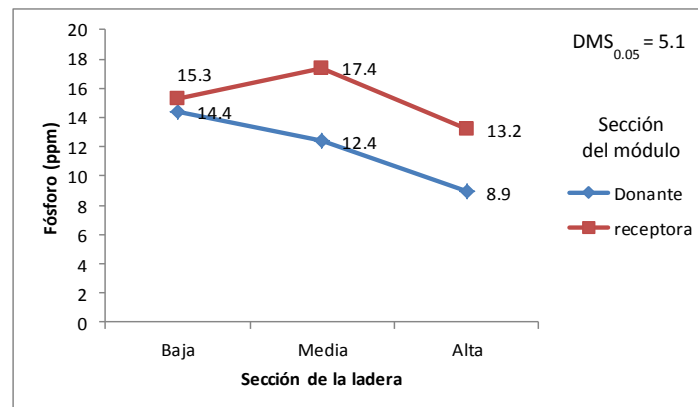


Figura 2.12. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la sección del módulo sobre el contenido de fósforo en el suelo, tres años después de estar sujeto al sistema MIAF.

Estos resultados pueden estar relacionados a que entre la sección alta y media de la ladera existió una diferencia de 22% de pendiente lo que permitió una mayor

movilización de sedimentos en el agua escurrida, mismos que fueron captados en el filtro de escurrimientos de la sección receptora. Por otra parte la sección baja de la ladera presenta una estabilización de la pendiente al disminuir este valor a 4%, existiendo por consiguiente una menor movilización a la sección receptora de sedimentos con fósforo ligados a estos no presentando diferencias significativas con respecto a la sección donante del módulo.

Dentro de una misma sección del módulo el incremento de la fertilización no representó aumentos en el contenido de fósforo. Sin embargo, entre secciones, la receptora presentó incrementos en el contenido del fósforo con ambos tratamientos de fertilización, siendo ligeramente mayor con 100% de fertilización mineral. Lo anterior sugiere que además de la mayor acumulación de sedimentos por efecto del filtro de escurrimientos, la fertilización puede estar contribuyendo a una mayor descomposición de los residuos adicionados al filtro y a una mayor mineralización de la materia orgánica con el respectivo incremento de fósforo (Figura 2.13).

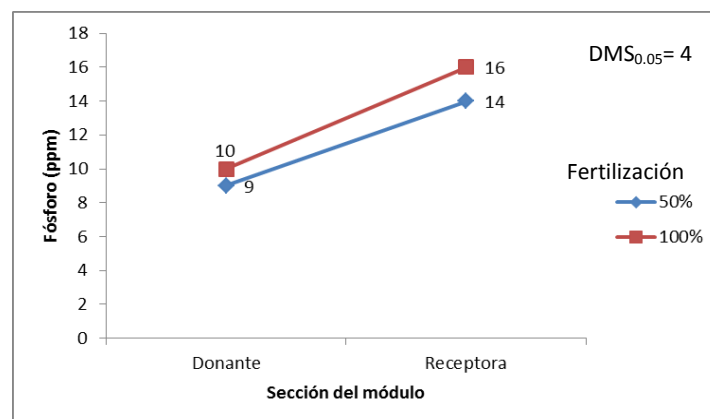


Figura 2.13. Efecto de la sección del módulo en interacción con la fertilización mineral sobre el contenido de fósforo en el suelo, tres años después de estar sujeto al sistema MIAF.

Pedregosidad y humedad volumétrica

El porcentaje de pedregosidad y humedad volumétrica del suelo estuvo relacionado a la sección de la ladera, de manera que la parte alta presentó 43% de pedregosidad y

46% de humedad con respecto a 35% de la parte baja. Esto se debe a que en la sección alta sucede el desprendimiento y remoción del suelo por lo que prácticamente el horizonte A, ha desaparecido y por el contrario en la parte baja se da la deposición del suelo existiendo mejores condiciones de textura y estructura que permiten una mayor infiltración y permanencia del agua. Algo similar sucedió en la sección receptora del módulo MIAF, donde la humedad fue de 49% comparado a la sección donante de 37%, lo cual se atribuye a que en la primera existe un filtro de escurrimientos con residuos de cosecha que contribuye en la retención de sedimentos y mayor infiltración del agua.

De manera general e independientemente de los efectos de los factores de estudio antes mencionados, los valores de las características físicas y químicas del suelo, catalogados en base a la NOM-021-RECNAT (SEMARNAT, 2002), que presentó en promedio la microcuena MIAF, son los siguientes: pH de 6.1 considerado moderadamente ácido lo que no limita el crecimiento y producción del maíz, frijol y guayaba; materia orgánica 2.5 % (media), fósforo 13.6 ppm (alto), potasio 0.5 meq/100 g (medio), capacidad de intercambio catiónico 15 meq/100 g (medio) y densidad aparente 2 g/cm³; lo cual debido a la combinación de estos valores y su respectiva clasificación permiten definir este suelo como de mediana fertilidad.

2.7.2.2 Sistemas MBMV y MLCP

En el sistema MBMV, la sección de la ladera causó diferencias significativas en el contenido de MO, la CIC, pedregosidad y contenido de humedad en base a volumen. La sección del módulo afectó los contenidos de MO, P y humedad en base a volumen y la fertilización mineral únicamente afectó la CIC del suelo (Cuadro 2.4). En la microcuena con el sistema MBMV el mayor contenido de MO, CIC y humedad volumétrica y el más bajo de pedregosidad se presentaron en las secciones de la ladera media y baja. En el sistema MLCP el valor menos ácido de pH y el contenido de MO, K y θ_v se encontraron en la sección baja. El efecto de la sección de la ladera sobre el valor de las propiedades físicas y químicas del suelo en los sistemas MBMV y MLCP, se considera está asociado a la disminución de la pendiente de las laderas, la

cual fue de 6% en la sección baja y 13% en la sección media, respecto a 30% de la sección alta en las microcuencas con ambos sistemas (Cuadro 2.5). Además para el sistema MLCP, también puede deberse a que no incluyó ningún filtro de escurrimientos que obstruyera el paso de los sedimentos, por tanto el proceso de remoción y sedimentación del suelo sucedió de manera directa de las secciones alta y media a la baja.

Cuadro 2.4. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y sección del módulo (Sm) sobre el pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), pedregosidad (Ped), humedad volumétrica (θ_v), materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K) del suelo, dos años después de estar sujeto bajo el sistema MBMV.

Fuentes de variación	pH	CE	MO	P	K	CIC	θ_v	Ped
SL	NS	NS	*	NS	NS	*	**	*
F	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
Sm	NS	NS	**	*	NS	NS	**	
SL x Sm	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.

Cuadro 2.5. Efecto de la sección de la ladera (SL), sobre el pH, materia orgánica (MO) fósforo (P), potasio (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC), humedad volumétrica (θ_v) y pedregosidad (Ped), dos años después de estar sujeto a los sistemas maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).

Sistema de manejo	Sección de la ladera	pH	MO (%)	P mg kg^{-1}	K (meq/100 g)	CIC	θ_v ---- (%) ----	Ped ----
MBMV	Alta	6.0	3.2 b ^z	11.1	0.22	16 b	16 b	45 a
	Media	6.0	5.1 a	14.5	0.21	20 a	21 a	36 ab
	Baja	5.9	5.2 a	24.3	0.41	22 a	22 a	31 b
DMS ^w _{0.05}		NS ^y	1.8	NS	NS	3.8	3.2	9
MLCP	Alta	5.7 ^x	2.7	7.0	0.14	15	8	48
	Media	5.9	3.8	7.0	0.20	15	17	37
	Baja	6.3	5.7	7.0	0.49	15	20	27

^zValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$)

^yNo significativo

^xValores promedios de muestras compuestas. No se realizó análisis estadístico debido al menor número de muestreos realizados.

^wDiferencia mínima significativa.

Resultados similares han sido reportados por varios investigadores. Uribe *et al.* (2002) y Francisco (2005) mencionan que la estabilización de la pendiente, junto con el filtro de escurrimientos propician las condiciones ideales para que disminuya la cantidad y velocidad del escurrimiento en cada evento de lluvia, y exista una mayor acumulación de suelo, nutrimentos e infiltración de agua. Por su parte Li *et al.* (2001) determinaron que las tasas de redistribución de suelo por erosión hídrica tienen una correlación significativa con el grado de la pendiente sobre una ladera cultivada, pero no es significativa cuando existe un uso mixto de la tierra o se aplican prácticas de conservación que modifican la pendiente. Además mencionan que los cambios en las propiedades del suelo en relación al gradiente de la pendiente pueden ser usados para desarrollar relaciones entre calidad del suelo y su topografía.

González *et al.* (2008), determinaron que en las secciones bajas de una ladera se almacenaba más carbono orgánico. Así también Salton y Mielniczuk (1995), determinaron una remoción selectiva de partículas finas por erosión hídrica que causó un decremento lineal en el contenido de arcilla y un incremento correspondiente en el de limo cuesta abajo de las laderas, encontrando un patrón distintivo en la calidad del suelo de disminución en los niveles de materia orgánica, nitrógeno, y un incremento en la densidad aparente en las secciones altas comparado con las bajas.

A la vez con este proceso existen pérdidas de bases, como Ca, Mg y baja CIC (Khan *et al.*, 2001; Medina *et al.*, 2008). Por lo anterior, se puede esperar que en el sistema MLCP a futuro la fertilidad del suelo tienda a ser menor en la sección alta y media de la ladera; no así en el caso de los sistemas MIAF y MBMV donde el efecto del filtro de escurrimientos se incrementará con los años y el contenido de materia orgánica y otros elementos se mantendría o incluso se incrementaría.

Al igual que para el caso del sistema MIAF, el sistema MBMV en la sección receptora del módulo presentó mayor contenido de MO, P y humedad en base a volumen, además de la CIC (Cuadro 2.6). Las diferencias de los valores de MO y P entre ambas secciones a pesar de no ser estadísticamente diferentes posiblemente por las limitaciones del análisis, sí se consideran importantes. Los resultados expuestos, se atribuyen a que el filtro de escurrimientos ubicado aguas arriba del seto de *Gliricidia* o

hileras de árboles de guayaba contribuyó a disminuir la velocidad de los escurrimientos durante el período de lluvias, así como la pérdida de sedimentos y MO, y favoreció la infiltración del agua (Uribe *et al.*, 2002; Francisco, 2005). Lo anterior obedece a que existe un efecto de las prácticas de conservación en la curvatura del ángulo de la pendiente que afectan los procesos de redistribución de la erosión hídrica (Li *et al.*, 2001).

Cuadro 2.6. Efecto de la sección del módulo sobre el contenido de la materia orgánica (MO) y fósforo (P), capacidad de intercambio de cationes (CIC) y humedad del suelo (θ_v) en base a volumen, dos años después de estar bajo el sistema maíz con barreras de muro vivo.

Sección del módulo	MO (%)	P (ppm)	CIC (meq/100 gr)	θ_v (%)
Donante	4.1	13	17 b ^z	15 b
Receptora	4.6	21	22 a	23 a
DMS ^x _{0.05}	NS ^y	NS	3.1	2.0

^zValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$)

^yNo significativo

^xDiferencia mínima significativa.

El efecto del filtro de escurrimientos en los sistemas MIAF y MBMV además de favorecer las condiciones de fertilidad y agua disponible en la sección receptora también contribuye a disminuir las pérdidas de nitrógeno y fósforo con respecto al sistema de labranza cero con pastoreo como se constata en el tercer capítulo de esta tesis. Adicional, en el caso específico del sistema MBMV se tuvo el efecto de la incorporación al filtro de escurrimientos de 3.6 kg de follaje de *Gliricidia* por metro lineal de barrera viva, producto de podas de dos años. El follaje de *Gliricidia* contiene en general, 4.5% de nitrógeno, 0.26% de fósforo y 2.8% de potasio (CATIE, 1991), y que mediante el proceso de descomposición aporta esos elementos al suelo (Uribe *et al.*, 2002). Además, debe tomarse en cuenta el aporte por la fijación biológica de nitrógeno. Al respecto Dulormne *et al.* (2003), cuantificaron una fijación biológica de nitrógeno en el suelo de 0.06%, a dos años de establecer hileras de *Gliricidia* a cada dos metros con una separación entre plantas de 40 cm.

Los valores de las características físicas y químicas que presentó en promedio el suelo en la microcuenca MBMV, catalogados en base a la NOM-021- RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) son los siguientes: pH de 6 que, por ser considerado moderadamente ácido, no limita el crecimiento y producción del maíz, materia orgánica 4.4 % (alto), fósforo 16.9 ppm (alto), potasio 0.3 meq/100 g (medio), capacidad de intercambio catiónico 19 meq/100 g (medio) y densidad aparente 1.8 g/cm³. Para la microcuenca MLC los valores fueron: pH de 6, (moderadamente ácido), materia orgánica 4.0 % (alto), fósforo 7.3 ppm (medio), potasio 0.3 meq/100 g (medio), capacidad de intercambió catiónico 14 meq/100 g (bajo) y densidad aparente 1.9 g/cm³. Estos valores y su respectiva clasificación permiten definir la fertilidad del suelo de las microcuencas MBMV y MLCP como moderadamente alto y moderado, respectivamente.

2.7.3 Calidad del suelo en la franja de árboles de guayaba

La sección de la ladera (SL) afectó el pH, la CIC y el contenido de MO y Mg; la fertilización mineral causó diferencias en los contenidos de P, K y Ca, y en la CIC, y la interacción entre ambos afectó el contenido de Ca (Cuadro 2.7).

Cuadro 2.7. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL) y fertilización mineral (F) sobre el pH, materia orgánica (MO), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo en la franja ocupada por los árboles de guayaba.

Fuente de variación	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CIC
SL	*	*	NS	NS	NS	*	*
F	NS	NS	*	*	*	NS	*
SL x F	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS

NS, * = No significativo y significativo a P≤0.05, respectivamente.

El efecto de SL sobre las propiedades del suelo fue similar al encontrado en el área ocupada por el maíz y frijol. El mayor contenido de MO se presentó en la sección baja, y el mayor valor de la CIC, contenido de Mg y valores de pH menos ácidos en las secciones baja y media, con respecto a la sección alta (Cuadro 2.8). Este resultado

está relacionado a que el proceso erosivo se inicia en las partes altas de una ladera y que los escurrimientos con sedimentos al ir fluyendo se van depositando en las partes más bajas con el respectivo incremento de MO, Mg, CIC, así como del K y Ca que presentaron el mismo comportamiento.

Cuadro 2.8. Efecto de la sección de la ladera (SL) sobre el pH, la materia orgánica (MO), magnesio (Mg) y capacidad de intercambio de cationes (CIC), en la franja ocupada por el árbol de guayaba.

SL	pH	MO %	CIC meq/100 gr	Mg meq L ⁻¹
Baja	6.0 b ^z	2.0 a	14 a	0.60 a
Medio	6.3 a	1.4 b	11 ab	0.46 a
Alta	5.9 c	1.1 b	9 b	0.23 b
DMS ^y _{0.05}	0.09	0.5	2.5	0.18

^zValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

^yDiferencia mínima significativa.

Respecto al efecto de la fertilización mineral, el valor de la CIC y el contenido de K y P se incrementaron cuando se aplicó al 100%; sin embargo, el valor de los dos primeros es considerado bajo y medio el del fósforo (Cuadro 2.9). Sí además se considera que los árboles eran pequeños y en primer año de producción con baja demanda de nutrimentos, resulta congruente que hubiera mayor cantidad residual de estos elementos en el suelo, mismos que pueden permanecer como fuentes de reserva factibles de ser utilizados cuando el mayor desarrollo del árbol y el incremento en la producción de frutos presenten una alta demanda de nutrimentos.

Cuadro 2.9. Efecto de la fertilización mineral (F) sobre el fósforo, la capacidad de intercambio de cationes (CIC), potasio (K) y calcio (Ca) en la franja de suelo ocupada por el árbol de guayaba.

F	P ppm	CIC meq/100 gr	K meq L ⁻¹
100%	6.3 a ^z	13 a	0.19 a
50%	4.8 b	10 b	0.11 b
DMS ^y _{0.05}	1.4	1.9	0.07

^zValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

^yDiferencia mínima significativa.

Para la interacción sección de la ladera y fertilización dentro de una misma sección el incremento de la fertilización no representó aumentos en el contenido de Ca. Sin embargo, entre secciones, la media y la baja presentaron incrementos significativos en el contenido de Ca únicamente con la fertilización al 100%. Lo anterior sugiere que además de la mayor acumulación de sedimentos por efecto del filtro de escurrimientos, la fertilización puede estar contribuyendo a una mayor descomposición de los residuos adicionados al filtro y a una mayor mineralización de la materia orgánica con el respectivo incremento de Ca (Figura 2.14).

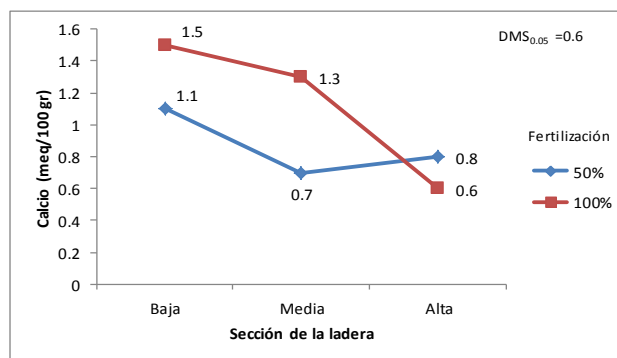


Figura 2.14. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre el contenido de calcio en el suelo, tres años después de estar sujeto al sistema MIAF.

2.7.4 Rendimiento, índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila en la hojas del maíz en el sistema MIAF

La sección de la ladera (SL) y la fertilización mineral (F) interaccionaron para afectar el rendimiento de grano (Cuadro 2.10), la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en las etapas de floración del frijol y maíz y el contenido de clorofila en la hoja del maíz (Cuadro 2.11). La fertilización mineral (F) y la posición de la hilera (Ph) afectaron el IAF del maíz en las etapas de floración del frijol y maíz, en estas últimas fechas la Ph también tuvo un efecto significativo sobre la RFA (Cuadro 2.11)

Cuadro 2.10. Análisis de varianza del rendimiento de grano de maíz en el sistema MIAF.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medio	Significancia
Sección de la ladera (SL)	2	1085280	542640	**
Muestreo (M)	2	239476	119738	NS
Fertilización (F)	1	6875821	6875821	**
SL x F	2	177464	88732	*
Posición de hilera (Ph)	2	371	185	NS
SL x Ph	4	18668	4667	NS
F x Ph	2	36962	18481	NS
SL x F x Ph	4	12922	3230	NS
Total	53	8706049		
CV			13%	

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.
CV=Coefficiente de variación

Cuadro 2.11. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y posición de la hilera (Ph) sobre el índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada del maíz, en la fase de floración del frijol y del maíz y contenido de clorofila (CC) en el sistema milpa intercalada con árboles frutales.

Fuente de variación	IAF		RFA interceptada		CC
	En floración del frijol	En floración del maíz	En floración del frijol	En floración del maíz	
SL	NS	*	**	*	*
F	**	**	**	**	**
SL x F	NS	NS	*	*	*
Ph	**	*	**	**	NS
SL x Ph	NS	NS	NS	NS	NS
F x Ph	NS	NS	NS	NS	NS
SL x F x Ph	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.

Rendimiento de grano. El rendimiento de grano fue mayor con la fertilización mineral al 100% que con 50% en las tres secciones de la ladera, con un abatimiento lineal de

la parte baja a la alta con ambos niveles de fertilización (Figura 2.15). Por lo tanto, a mayor pendiente menor rendimiento, con un efecto de casi el doble con el nivel bajo de fertilización respecto al nivel alto. Esta respuesta del rendimiento al grado de pendiente está relacionado con la fertilidad del suelo, la cual es mejor en la parte baja que en la alta, según se discutió antes.

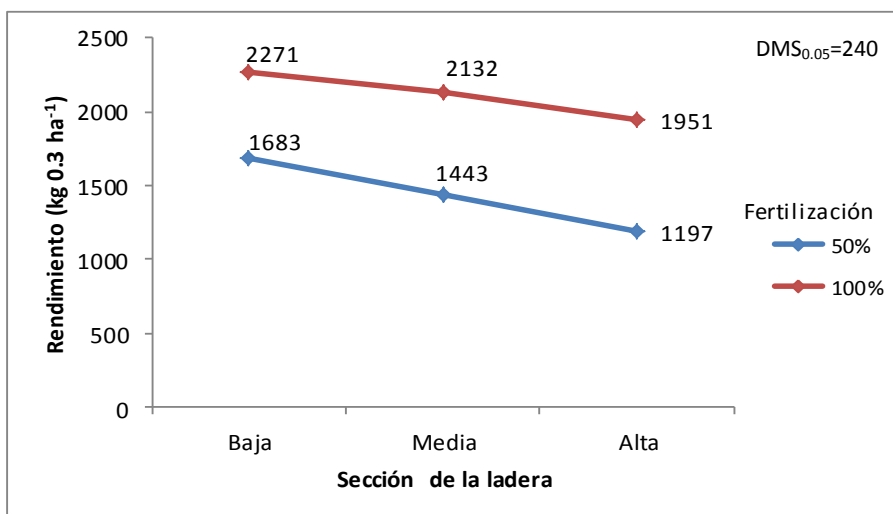
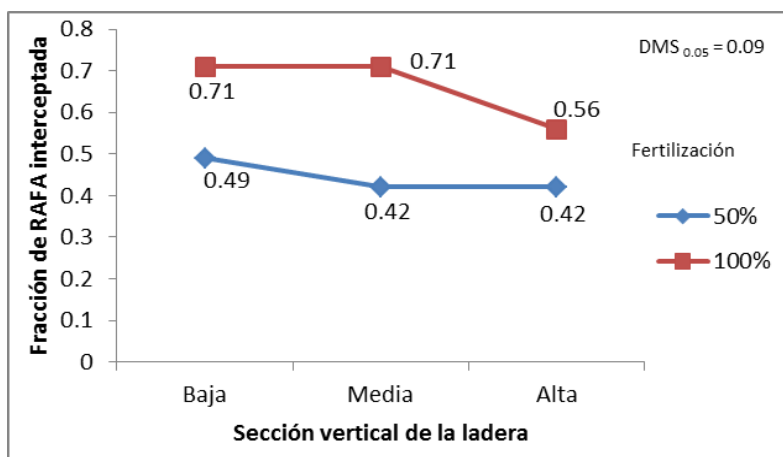
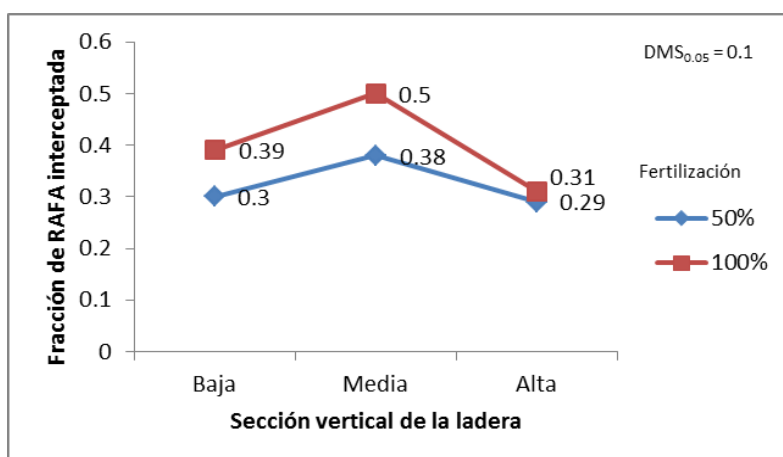


Figura 2.15. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre el rendimiento de maíz en el sistema MIAF.

Radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada. La RFA interceptada por el maíz en la fecha de floración del frijol fue mayor con la fertilización mineral de 100% que con el 50% en la sección media de la ladera (Figura 2.16 a). Con el nivel alto de fertilización la RFA se mantuvo constante en las secciones baja y media de la ladera, y disminuyó en la sección alta. Con la fertilización al 50%, las tres secciones presentaron respuesta similar aunque el menor valor lo presentó también la sección baja. En la fecha de floración masculina del maíz, la RFA fue mayor con la fertilización de 100% que con el 50% en las tres secciones de la ladera. Las secciones baja y media presentaron valores similares, existiendo una disminución de la RFA al pasar a la sección alta (Figura 2.16 b)



(b)



(a)

Figura 2.16. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización sobre la RFA interceptada por la planta de maíz en las fechas de (a) floración del frijol y (b) floración del maíz, en el sistema MIAF.

Índice de Área foliar (IAF). El IAF de la planta de maíz con el 50% de fertilización fue de 1.1 y 1.3, y con 100% de 1.5 y 2.4 en las fechas de floración del frijol y del maíz, respectivamente. Respecto al efecto de la posición de la hilera de maíz en el módulo, el mayor IAF se obtuvo en la posición maíz-guayaba receptora lo cual se debe a que las plantas de maíz al estar aledañas a los árboles de guayaba con tres años de edad,

cuentan por lo pronto con una mayor superficie que les permite un mejor aprovechamiento del agua y nutrimentos del suelo, y radiación solar para su desarrollo. Sin embargo, es posible que cuando los árboles alcancen su máximo desarrollo suceda lo contrario ya que sus raíces pueden competir por nutrimentos y la parte aérea causar competencia por luz.

Es importante recordar la relación que guarda el IAF y la RFA interceptada. En la etapa de floración del maíz, los tratamientos compuestos por la sección en la ladera con 100% de la fertilización presentaron un incremento aproximado del 100 % en el IAF y en la RFA interceptada con respecto a los valores determinados a los 30 días de emergencia de la planta que coincide con la floración del frijol. Esto se considera contribuye a una mayor eficiencia fotosintética de la planta que se traduce en mayor aporte de materia seca al grano.

En relación a lo anterior, Shibles (1976) menciona que el índice de área foliar, además de otros factores, influye en la intercepción de la RFA y que junto con el contenido de clorofila en las hojas define la eficiencia fotosintética de los cultivos. En este sentido Carmelino *et al.* (2010), determinaron que existe un incremento del índice de contenido de clorofila que contrasta con incrementos lineales de nitrógeno en la parte aérea de la planta. Así mismo Schroder *et al.* (2000), mencionan que en condiciones de elevada disponibilidad, parte del nitrógeno absorbido puede ser convertido en clorofila y otros compuestos orgánicos.

Contenido de clorofila. En el mismo sentido de lo antes mencionado, en la Figura 2.17, se observa como bajo condiciones de baja fertilidad que es característico de la sección alta de la microcuenca cuando se aplicó 50% de la fertilización, los valores del índice de contenido de clorofila resultaron ser los más bajos, encontrándose cerca del valor crítico definido por Novoa y Villagrán (2002). Estos investigadores mencionan que valores menores de 35.3% que equivale a un contenido de nitrógeno de 1.83% en hojas, indican que es necesario aplicar nitrógeno.

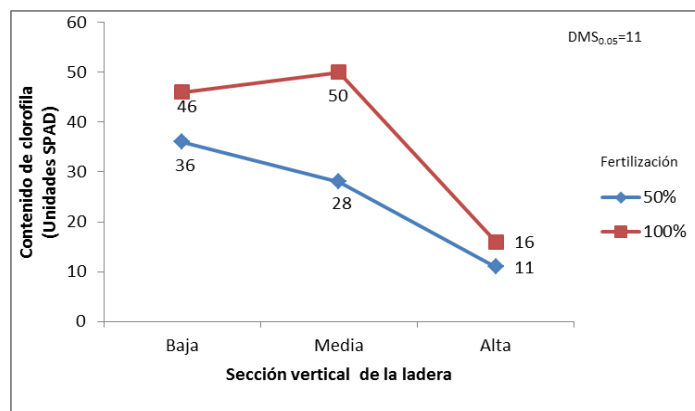


Figura 2.17. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización sobre el contenido de clorofila del maíz en el sistema MIAF.

La siembra intercalada de dos hileras de frijol como sotocultivo, con dos hileras de maíz como mesocultivo en el sistema MIAF, no interfiere negativamente en el índice de área foliar y captación de RFA por parte del maíz, incluso cuando el frijol está en plena floración en virtud que el maíz siempre presenta una mayor altura. Esto también permite una mejor distribución de la RFA hasta las hojas inferiores de la planta, existiendo complementariedad en el uso de la radiación solar y contribuyendo a una mayor ganancia de biomasa del maíz (Loomis y Williams, 1969 citado por Camacho, *et al.*, 1995).

Para comparar el sistema MIAF con el cultivo simple, respecto a la eficiencia en el uso de la radiación solar, se midió la RFA interceptada en los sistemas de cultivo simple y MIAF en dos alturas en el perfil de la planta de maíz (Cuadro 2.12). Se observa que aunque a nivel del suelo ésta fue muy similar en ambos sistemas, hubo una mejor distribución en el sistema MIAF. Las plantas de maíz en éste, al encontrarse flanqueadas por el frijol de porte bajo interceptaron 63% de la RFA, permitiendo mayor paso de ésta a las hojas inferiores y contribuyendo al proceso fotosintético, y por ende a una mayor generación de biomasa. Por el contrario, en el cultivo simple debido a que presentaba un dosel más denso, se interceptó el 91% de la RFA de la altura media de la planta hacia arriba.

Cuadro 2.12. Transmisión de radiación fotosintéticamente activa (RFA, %) en dos alturas del perfil de la planta de maíz en la fase de floración, en el sistema MIAF y en cultivo simple.

Estrato vertical de la planta	Sistema	
	MIAF ^z	Cultivo simple ^z
RFA transmitida a la mitad de la altura de la planta de maíz (%)	49 b ^y	61 b
RFA transmitida al nivel del suelo (%)	64 a	66 a
Diferencia de RFA transmitida al nivel del suelo con respecto al de la mitad de la altura de la planta (%)	15	5
Prueba de T para RFA transmitida entre las diferentes alturas dentro de un mismo sistema.	0.01	0.05

^z54 observaciones hechas en cada sistema;

^yValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

Si bien el área foliar del maíz es importante para una buena interceptación de la RFA y eficiencia fotosintética, lo es más la manera en cómo se distribuye la RFA en la estructura vertical de la planta. Por lo que la inclinación, distribución, orientación de las hojas y todo manejo que se pueda brindar para facilitar una mayor interceptación de radiación hasta las hojas inferiores son de primordial importancia (Livera, 1991; Pendleton y Hammond (1969) citado por Trejo (2006); Camacho *et al.*, 1995)

La respuesta del rendimiento, índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila con las diferentes condiciones de fertilidad del suelo determinadas por la fertilización y la sección de la ladera, indica que bajo condiciones de pendientes abruptas la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo está asociado a la disminución de la pendiente del terreno que permite una mayor acumulación de sedimento que contiene MO y minerales. Al respecto, en las secciones 2.7.1 y 2.7.2 de este capítulo se mencionó que las propiedades físicas y químicas del suelo en la sección baja de la ladera indicaron una mejor condición para el crecimiento y

desarrollo de las plantas. En este sentido, Salton y Mielniczuk(1995), y Agbenin y Tiessen (2000) mencionan que existe una remoción de partículas finas por erosión hídrica, con un decremento de materia orgánica y nitrógeno en las partes altas e incremento en las partes bajas. Por lo tanto es posible evaluar el impacto de la erosión sobre el contenido de MO, N y P, usando el cambio en el gradiente de la pendiente a través de modelos de regresión generados en cada región de estudio.

Lo anterior sugiere que es necesario incrementar las cantidades de nitrógeno y fósforo en las secciones menos fértiles a manera de homogeneizar los rendimientos en toda la microcuenca. Para ello sería pertinente llevar a cabo investigación sobre estudios de fertilidad que permitan determinar los niveles más adecuados de fertilización por gradiente de fertilidad en función de la pendiente de las laderas con el fin de hacer recomendaciones más precisas, lo que queda enmarcado dentro de los conceptos de agricultura de precisión.

En relación a lo antes mencionado, es importante advertir que en este estudio al manejar únicamente los tratamientos de fertilización 50% y 100% a base de nitrógeno y fósforo de la recomendada para ese agrosistema, no existe evidencia que confirme si el 100% es suficiente para obtener el máximo económico o aún se encuentra en la sección lineal de la curva de respuesta, y por otra parte se desconoce si la respuesta se debe a nitrógeno o fósforo. A pesar de estas restricciones del estudio, la respuesta determinada en el IAF, RFA interceptada, contenido de clorofila y rendimiento, indican la importancia de aplicar las cantidades recomendadas de fertilizantes. Sin embargo la mayoría de los campesinos de la región de estudio debido al alto costo de los fertilizantes y al poco capital para su adquisición, aplican únicamente 70 kg de nitrógeno por hectárea, que resulta en 26 kg menor al utilizado en el tratamiento de nivel de fertilización de 100% (96 kg), con el cual obtienen un rendimiento promedio de 1.8 ton ha⁻¹ que es insuficiente para cubrir sus mínimas necesidades.

Otro factor que se presupone pudo influir en el mayor rendimiento de maíz, frijol y guayaba en el sistema MIAF es la diferencia en su profundidad de enraizado, ya que como lo menciona Lehmann, (2003) los frutales normalmente presentan una raíz profunda, la cual se acentúa por la competencia que se presenta cuando se plantan a

altas densidades como es el caso de la guayaba en el sistema MIAF; por su parte el frijol presenta una raíz somera y la del maíz es intermedia. Lo anterior permite que las tres especies exploren diferentes estratos del perfil del suelo existiendo complementariedad en el aprovechamiento de la humedad y los nutrientes disponibles. Kang *et al.* (1985) en un estudio de asociación de maíz con *Leucaena* en un Entisol degradado, encontraron que el maíz aprovechó la humedad presente de 0 a 30 cm de profundidad, mientras que la *Leucaena* de 60-90 cm.

Por otra parte, el maíz y el frijol en el sistema MIAF contribuyeron a una menor presencia de malezas que en el cultivo simple, sobre todo cuando ambos cultivos se encontraban cerca de la fase de floración ya que limitaron el paso de luz hacia las malezas. Esto aunque no fue evaluado si resultó evidente y por consiguiente el control de malezas se realizó de manera dirigida a áreas específicas con menor dosis de herbicidas.

Al respecto, Abraham y Singh (1984) mencionan que los cultivos intercalados son más eficaces en la supresión de las malezas ya que capturan más recursos compartidos disponibles como luz, agua y nutrientes que en monocultivo. Estos mismos investigadores determinaron que un sistema intercalado de sorgo con garbanzo interceptó más luz, aprovecharon mayor cantidad de macronutrientes y mantuvieron densidades y peso seco de malezas más bajas respecto al sorgo en monocultivo. Por su parte Bibalis *et al.* (2010) en un cultivo intercalado maíz-leguminosas determinaron que la mayor cobertura aportada por el dosel ocasionó una mayor interceptación de la RFA y por lo mismo una menor disponibilidad de luz para las malezas que indujo una reducción de su densidad y materia seca comparada con la siembra de las especies como cultivos simples.

Es importante mencionar que en este estudio se esperaba encontrar respuesta en el rendimiento por efecto del factor posición de la hilera de maíz sobre el área receptora, ya que ésta presentó mayores condiciones de fertilidad y humedad; sin embargo no fue así, entendiéndose a que en el diseño del sistema MIAF la primer hilera de maíz aguas arriba de la hilera de árboles (maíz-frijol-receptora) se encontraba a 3.3 m aguas arriba de la base del filtro de escurrimientos, razón por la cual no se benefició de los

nutrientes acumulados por efecto de éste; sin embargo debe recordarse que el diseño del módulo MIAF incluye la microrrotación alternada de las hileras de maíz y frijol y por consiguiente puede ser favorecido en el siguiente ciclo cuando ocupe el espacio del frijol que se encuentra en una posición más cercana al área receptora.

2.7.5 Rendimiento, índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila en la planta de frijol en el sistema MIAF

El análisis de varianza combinado del rendimiento de frijol en los ciclos P-V y O-I, indicó que fue afectado por los factores principales: ciclo de cultivo, sección de la ladera, fertilización y posición de la hilera de frijol en el módulo.

A nivel de interacciones se detectó el efecto de ciclo x fertilización y sección de la ladera x posición de la hilera de frijol sobre el rendimiento (Cuadro 2.13). Cabe mencionar que las interacciones que se analizarán enseguida presentan DMS bajas, lo cual puede deberse a una sub-estimación del error experimental por las razones expuestas en materiales y métodos respecto al análisis estadístico. Por lo que se sugiere que los resultados expuestos son preliminares y deben tomarse con reservas en virtud que emanan de un análisis aproximado de los datos.

La interacción ciclo de cultivo x fertilización mineral, indicó que el rendimiento de grano fue menor en el ciclo O-I con respecto al ciclo P-V con ambos niveles de fertilización. En el ciclo P-V el rendimiento tendió a incrementarse con el nivel de fertilización, mientras que en el ciclo O-I se mantuvo constante (Figura 2.18). La diferencia en rendimiento entre los dos ciclos se debe a la disponibilidad de agua que influyó en la eficiencia en el uso del N y P aplicados. Durante el período de desarrollo y llenado de grano del frijol en el ciclo P-V (24 de junio a 7 de septiembre) se registraron 553 mm de lluvia que correspondieron al 65% de la precipitación anual. En el ciclo O-I (10 de septiembre al 30 de noviembre), el cultivo se desarrolló únicamente con 301 mm de lluvia que correspondieron al 28% de la precipitación anual (Figura 2.19). La última lluvia se presentó en la primera semana de octubre por lo que a partir de entonces y hasta la cosecha el cultivo únicamente dispuso de la humedad residual del suelo.

Cuadro 2.13. Análisis de varianza combinado del rendimiento de frijol de los ciclos de cultivo primavera – verano y otoño invierno.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Significancia
Ciclo (C)	1	589486	589486	**
Muestreo (M)	2	478389	239194	NS
Sección de la ladera (SL)	2	235244	117622	**
C x SL	2	6434	3217	NS
Fertilización (F)	1	5533	5533	**
C x F	1	8658	8658	**
SL x F	2	675	338	NS
C x SL x F	2	495	247	NS
Posición hilera (Ph)	2	140724	70362	**
C x Ph	2	14649	7325	NS
SL x Ph	4	9427	2357	*
F x Ph	2	94	47	NS
SL x F x Ph	4	629	157	NS
C x SL x Ph	4	3418	854	NS
C x F x Ph	2	1135	567	NS
C x S x F x Ph	4	509	127	NS
Total	107	1554533		
CV			10 %	

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.
CV=coeficiente de variación

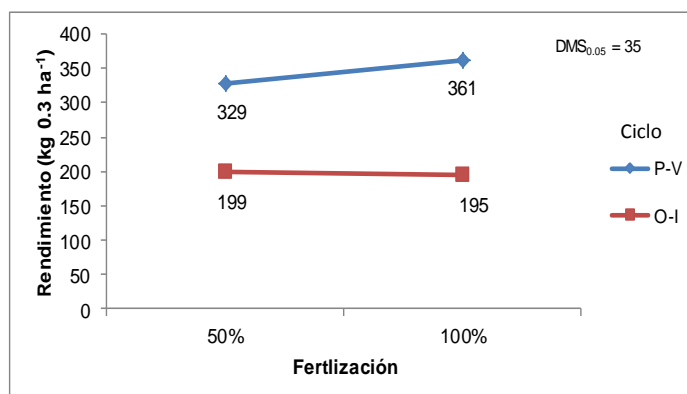


Figura 2.18. Efecto del ciclo de cultivo en interacción con la fertilización mineral sobre el rendimiento de grano de frijol en el sistema MIAF, en el análisis combinado de los ciclos de cultivo primavera-verano y otoño-invierno.

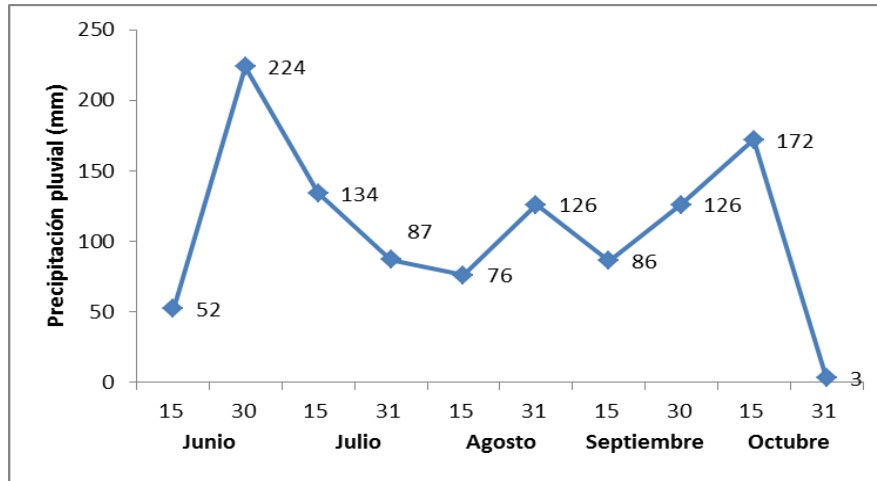


Figura 2.19. Distribución quincenal de la precipitación pluvial en el año 2009 en el sitio experimental Unión Agrarista Mpio. de Jiquipilas, Chiapas.

De acuerdo a la interacción SL x Ph, el rendimiento de frijol en la hilera de frijol que se encontraba sobre el área receptora alemana al maíz fue menor, lo cual se pudo deber a que se encontraba más alemana de la zona de acumulación de sedimentos (3.5 m), y por una mayor competencia de nutrientes y agua que en la hilera alemana a la guayaba (Cuadro 2.14). Resultados similares fueron determinados por Andrade (2002) quien encontró que a medida que las hileras de maíz se alejaban de la sección receptora de sedimentos en un sistema con barreras de pasto vetiver, el rendimiento tendió a disminuir.

Cuadro 2.14. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la posición de la hilera sobre el rendimiento de grano de frijol ($t\ 0.3\ ha^{-1}$) en el sistema MIAF, en el análisis combinado de dos ciclos de cultivo. Primavera – verano y otoño invierno.

Sección de la ladera	Posición de la hilera de frijol		
	Receptora alemana al árbol de guayaba	Receptora alemana a la hilera de maíz	Donante alemana a la hilera de maíz
Baja	326 (35) ^z	293	228
Media	373	326	265
Alta	240	206	181

^z Entre paréntesis la DMS al 5% de probabilidad

Se espera que a mayor número de ciclos de manejo de la microcuenca con este sistema, el proceso paulatino de formación de la terraza aumentará el área de acumulación de sedimentos ubicada aguas arriba del filtro y llegará a beneficiar las hileras de frijol o de maíz por efecto de la micro rotación de especies; sin embargo, también es posible que el árbol a través de los años llegue a competir con las hileras de frijol o maíz aledañas a éste. El frijol de la hilera en posición donante rindió menos debido a las menores condiciones de fertilidad por ser el área de remoción de suelo y nutrimentos. Al igual que en el maíz los resultados obtenidos estuvieron relacionados con las características de fertilidad para cada una de las secciones de la ladera, por lo que se consideran válidos los mismos argumentos expuestos en secciones anteriores.

En el ciclo P-V, además del rendimiento, se evaluó el índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila. La fertilización mineral afectó estas variables en las etapas de floración del frijol y del maíz, excepto la RFA interceptada. Así mismo, la sección de la ladera (SL) y posición de la hilera de frijol (Ph) tuvieron efecto en todas las variables. A nivel de interacciones únicamente la SL x Ph afectó el rendimiento de grano, y el IAF y RFA interceptada, en la etapa de floración del maíz (Cuadros 2.15)

Cuadro 2.15. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y posición de la hilera de frijol (Ph) sobre el rendimiento (Rend), índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada del frijol en las etapas de floración del frijol y del maíz, y contenido de clorofila (CC) en el sistema MIAF en el ciclo primavera-verano.

Fuentes de variación	Rend	IAF		RFA interceptada		CC
		En floración del frijol	En floración del maíz	En floración del Frijol	En floración del maíz	
SL	**	**	**	**	**	**
F	**	*	**	NS	NS	**
SL x F	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ph	**	**	**	**	**	**
SL x Ph	**	NS	**	NS	*	NS
F x Ph	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SL x F x Ph	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.

El IAF de la planta de frijol en las fechas de floración del frijol y del maíz, así como el contenido de clorofila y el rendimiento de grano fue mayor con el 100% de fertilización mineral (Cuadro 2.16). Lo anterior demuestra la importancia que tiene una adecuada nutrición de las plantas en inducir un mayor IAF que a la vez influye sobre la interceptación de la RFA y que junto con el contenido de clorofila en las hojas define la eficiencia fotosintética de los cultivos (Shibles, 1976).

Cuadro 2.16. Efecto de la fertilización mineral sobre el rendimiento de grano de frijol, índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada en las etapas de floración del frijol y maíz, y el contenido de clorofila del frijol bajo el sistema MIAF en el ciclo primavera-verano.

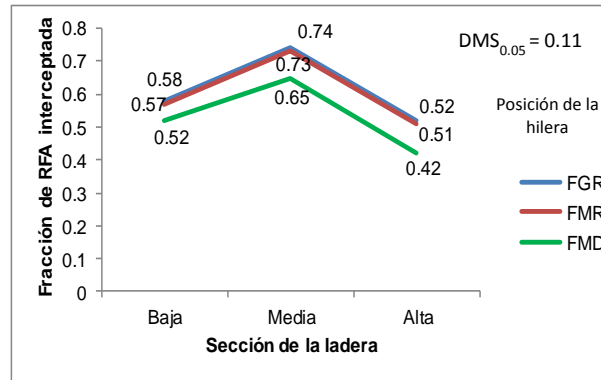
Fertilización	Rendimiento (kg 0.3 ha ⁻¹)	IAF		Clorofila (U ^z SPAD)
		En floración del frijol	En floración del maíz	
100%	361 a	1.6 a ^y	2.8 a	30 a
50%	329 b	1.4 b	2.2 b	24 b
DMS ^x _{0.05}	30	0.16	0.12	2.8

^zUnidades

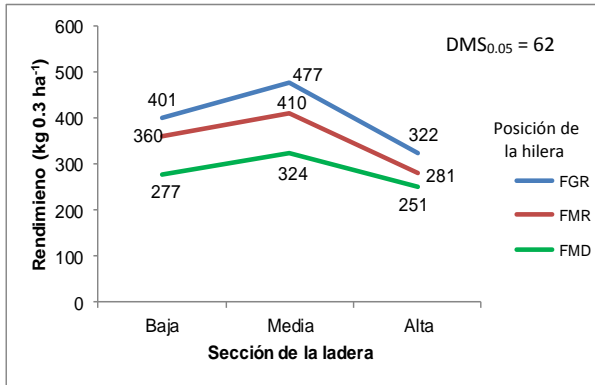
^yValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

^xDiferencia mínima significativa.

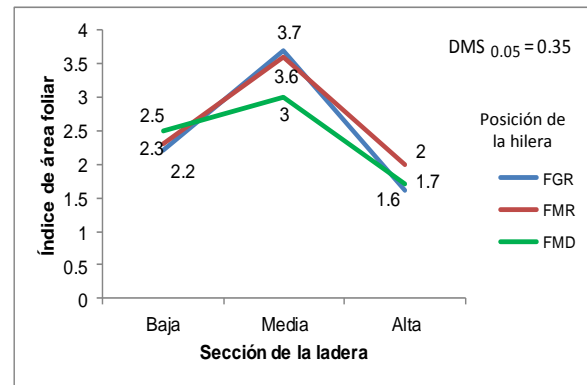
El efecto de la interacción sección de la ladera x posición de la hilera sobre el rendimiento de grano, IAF y RFA interceptada en la fecha de floración de maíz indicó que el frijol en la hilera en la posición receptora, ya sea aledaña al árbol de guayaba o planta de maíz, tuvo un incremento en el rendimiento de grano, índice de área foliar y RFA interceptada en las secciones media y baja de la ladera, respectivamente (Figura 2.20 a, b y c). En la hilera en posición frijol-guayaba receptora (FGR) con respecto a la hilera en posición frijol-maíz donante (FMD), hubo un incremento en el rendimiento de 153 y 124 kg; el índice de área foliar en 0.7 y 0.3, y fracción de RFA interceptada en 0.06, y 0.09 en las secciones media y baja, respectivamente (Figura 2.20 a, b, c).



c)



a)



b)

Figura 2.20. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la posición de la hilera de frijol sobre (a) el rendimiento de grano de frijol, (b) índice de área foliar (b) y (c) RFA interceptada en la fecha de floración del maíz en el sistema MIAF. FGR=frijol-guayaba receptora, FMR=frijol-maíz receptora, FMD=frijol-maíz donante.

Este resultado sugiere que existe una relación con la condición de fertilidad en cada sección de la ladera, y dentro de ella, con la sección receptora de sedimentos ubicada aguas arriba del filtro de escurrimientos, como ya se ha discutido en secciones anteriores. La similitud de la respuesta del índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila a la fertilización, sección de la ladera y posición de la hilera de frijol, sugiere la relación que guardan estas variables y su contribución sobre la expresión del rendimiento. El índice de área foliar de la planta de frijol obtenido en el sistema MIAF y cultivo simple, resultó superior al determinado por Acosta *et al.* (2005)

en variedades criollas en unicultivo de 1.1 y 1.2 en la fase de floración y llenado de grano, respectivamente. La diferencia podría deberse a que el frijol Negro Grijalva utilizado en el presente estudio es una nueva variedad mejorada de alto rendimiento de grano (Villar *et al.*, 2009).

El índice de área foliar promedio de la planta de frijol determinado en su etapa de floración resultó similar en el sistema MIAF y en cultivo simple; sin embargo, en la fase de floración masculina del maíz que coincide con la de llenado de grano del frijol, el IAF en el sistema MIAF resultó ser superior en 0.8 al obtenido bajo cultivo simple (Figura 2.21). Este resultado demuestra que bajo el sistema MIAF el frijol optimiza la función del área foliar para proveer fotosintatos en el llenado del grano. Al respecto, Acosta *et al.* (2007) y Padilla *et al.* (2005), mencionan que el IAF representa la capacidad fotosintética de las plantas y el estudio de su expresión puede ayudar a entender la relación entre la acumulación de biomasa y rendimiento bajo diferentes condiciones ambientales y manejo. Así mismo, que el rendimiento de variedades de frijol puede estimarse con base a este índice en las etapas fenológicas de inicio de formación de vainas e inicio de llenado de grano calculando un coeficiente de correlación de 0.8 con el rendimiento.

No obstante, hay que considerar que en este estudio el índice en mención se calculó con un ceptometro que determinó el valor en función de la radiación interceptada por el dosel de los cultivos cuando el frijol se encontraba en la fase de llenado de grano y el maíz estaba en floración masculina provocando menor paso de radiación solar sobre el frijol, por lo que el índice de área foliar fue sobreestimado por el equipo. Por esto, la diferencia de 0.8 debe tomarse con reserva, aunque también es de esperarse que el frijol sombreado por el maíz tenga una mayor área foliar específica y, por tanto un IAF en relación al cultivo simple debido a que la siembra intercalada de dos hileras de maíz por dos de frijol permiten un mejor uso del agua, nutrientes y luz.

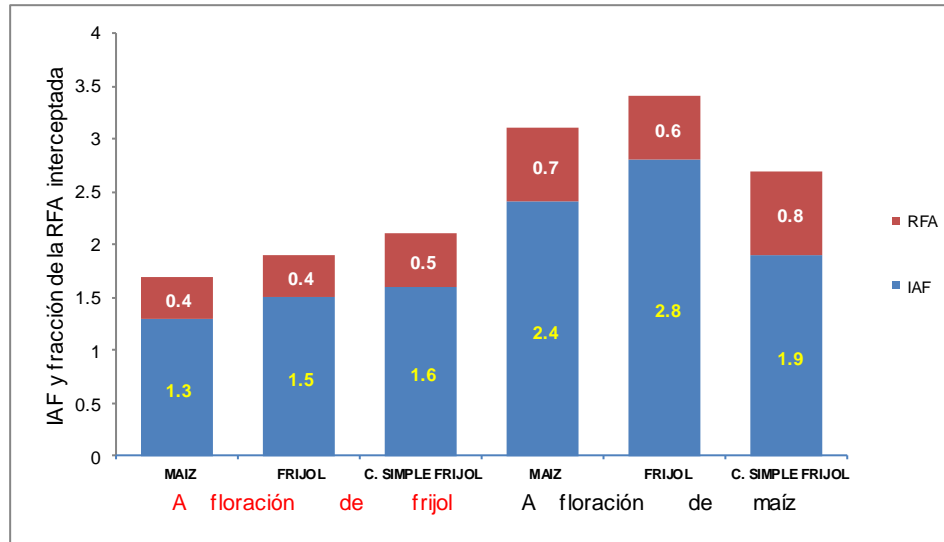


Figura 2.21. Índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada en el maíz y el frijol en el sistema MIAF y cultivo simple del frijol.

En relación a la RFA interceptada, es importante tomar en cuenta la dinámica de crecimiento del maíz y del frijol sembrado en hileras alternas, su efecto sobre el aprovechamiento de la RFA interceptada por el sotocultivo (frijol) y su impacto en el rendimiento. En la etapa de floración del frijol, la RFA interceptada en el maíz y frijol resultó similar, debiéndose probablemente a la precocidad de la variedad de frijol Negro Grijalva que permitió alcanzar esa etapa fenológica cuando el maíz aún no presentaba su mayor área foliar y no provocaba sombreado de importancia. No obstante, cuando el maíz estaba en la fase de floración y había aumentado su índice de área foliar provocó mayor sombreado sobre el frijol disminuyendo la RFA interceptada en 10% y 20% con respecto a la interceptada por el maíz y el frijol en cultivo simple (Figura 2.21).

Aunque la cantidad de RFA incidente y la interceptada en el frijol bajo el sistema MIAF fue menor que en cultivo simple, su efecto no es drástico ya que se trata de una planta C_3 que alcanza la fotosíntesis máxima con un tercio de la irradiancia solar máxima (Anundo *et al.*, 1982 y Azcon *et al.*, 2004, citado por Morales *et al.*, 2005); aunque sí la reducción de la radiación es muy severa puede afectar el rendimiento. Tsubo y Walker (2004) en un cultivo asociado de maíz y frijol dentro de la misma hilera determinaron una reducción de la radiación para el frijol de 90%, que repercutió en una disminución

de la materia seca del 67% y un incremento del 50% de la materia seca de tallo y hojas, por lo que consideran de vital importancia ordenar en espacio y tiempo el cultivo asociado de maíz y frijol.

2.7.6 Rendimiento de guayaba, índice de área foliar y RFA interceptada por el árbol de guayaba

El análisis de varianza combinado del rendimiento de fruto de guayaba en los años 2009 y 2010, detectó que la interacción año x sección de la ladera x fertilización causó diferencias significativas (Cuadro 2.17).

Cuadro 2.17. Análisis de varianza combinado, de dos años de producción de fruto de guayaba.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Significancia
Año (A)	1	13344409	13344409	**
Muestreo	2	2522838	1261419	NS
Sección de la ladera (SL)	2	7050566	3525283	**
A x SL	2	107016	53508	NS
Fertilización (F)	1	707281	707281	**
A x F	1	488135	488135	**
SL x F	2	82773	41386	**
A x SL x F	2	44787	22393	*
Total	35	24916204		
CV		13 %		

NS, *, **=No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.
CV=Coefficiente de variación

El efecto de esta interacción indicó que en el primer año de fructificación (2009) no hubo efecto del nivel de fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio (50% y 100%), pero sí de la sección de la ladera (Cuadro 2.18). Por ejemplo, la aplicación de 50% y 100% de la fertilización en la sección baja aumentó el rendimiento en 890 y 947 kg respecto a la sección alta. La no diferencia entre la aplicación de 50 y 100% de fertilización se atribuye a que fue el primer año de fructificación a tres años del trasplante, por lo que presentó heterogeneidad en la floración y amarre de fruto, ocasionando bajo rendimiento y mínimos requerimientos de nutrientes que pudieron

ser satisfechos con los nutrientes del suelo y con los aportados con el 50% de la fertilización mineral.

El mayor rendimiento de fruto de guayaba se obtuvo en el año 2010, con diferencias significativas debidas al efecto de la sección de la ladera y la fertilización mineral. El rendimiento más alto se obtuvo con la aplicación del 100% de la fertilización representando un aumento en rendimiento de fruto de 746, 427 y 366 kg para las secciones baja, media y alta con 50% de fertilización, respectivamente. Entre secciones de la ladera, el mayor rendimiento se obtuvo en las secciones baja y media con 100% de fertilización superando en 1333 y 955 kg a la sección baja, respectivamente (Cuadro 2.18).

Cuadro 2.18. Efecto del año de producción en interacción con la sección de la ladera y la fertilización mineral sobre el rendimiento (kg 0.4 ha⁻¹) de fruto de guayaba.

Año	Sección de la ladera	Nivel de fertilización (%)	
		50	100
2009	Baja	1910 (208) ^z	1994
	Media	1704	1736
	Alta	1020	1047
2010	Baja	2867	3613
	Media	2808	3235
	Alta	1914	2280

^zEntre paréntesis la DMS al 5% de probabilidad

Esta respuesta al nivel de fertilización en el segundo año de fructificación se atribuye a diferencia del primero, que en éste, la mayoría de los árboles presentaron una excelente floración y buen amarre del fruto incrementándose el rendimiento y por ende los requerimientos nutricionales del árbol. Sin embargo, hay que tener presente que estos resultados son preliminares en virtud de que al manejar únicamente los tratamientos de fertilización 50 y 100% a base de nitrógeno, fósforo y potasio, no existe evidencia que confirme si el 100% es suficiente para obtener el máximo rendimiento económico o aún se encuentra en la sección lineal de la curva de respuesta, o a cuál de los tres elementos se debe la respuesta.

En el año 2009, además del rendimiento, se evaluó el índice de área foliar y RFA interceptada, detectándose efecto de la sección de la ladera sobre estas variables, con una mayor respuesta en la sección baja y media (Figura 2.22).

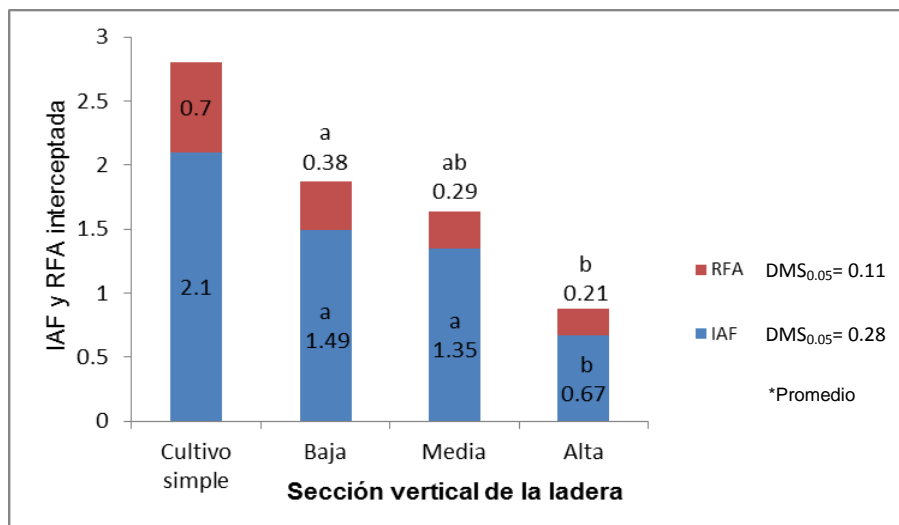


Figura 2.22. Efecto de la sección de la ladera en el índice de área foliar (IAF) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por el árbol de guayaba.

Este resultado probablemente estuvo asociado a las mejores condiciones de fertilidad y humedad expuestas en la sección 2.7.3 que permitieron a la planta disponer de suficientes nutrimentos para desarrollar una mayor área foliar que a la vez contribuyó a una mejor interceptación de la RFA para la formación de fotosintatos y materia seca. Por lo anterior, es importante determinar las secciones más degradadas de la microcuenca y evaluar su condición nutrimental a manera de proporcionarles un tratamiento adecuado de fertilización que cubran las necesidades nutrimentales del frutal para obtener los máximos rendimientos.

El IAF y la RFA interceptada en el cultivo simple de guayaba superaron en 1.1 y 0.4, respectivamente al del sistema MIAF, debido posiblemente al mayor desarrollo de área foliar en el primer sistema. Sin embargo, fue evidente que en el sistema MIAF no obstante que los árboles estaban establecidos a cada metro, existió una mejor distribución de la radiación debido al sistema de poda tipo Tatura modificado que incluye una sola rama principal como líder y ramas laterales distribuidas en todo su eje,

a diferencia del cultivo simple establecido a 2x4 m, donde se manejó la poda bajo el sistema de copa. Para corroborar esto sería necesario realizar la evaluación de RFA interceptada por el dosel, a la altura media del árbol y a nivel del suelo.

Al respecto Singh y Dhaliwal (2007), y Singh y Singh (2007), determinaron que en cultivo simple, la guayaba interceptó mayor radiación solar en espaciamientos de 6x6 m respecto a 5x5 y 6x4 m y que el dosel superior interceptó mayor radiación que el medio y bajo. Como efecto del mayor distanciamiento e intercepción de radiación, el tamaño y peso del fruto fue más grande. En este sentido la aplicación de la poda acorde al sistema manejado influyó sobre la penetración y distribución de la luz. Por lo tanto ellos determinaron que la poda de la guayaba a una altura de 1.5 a 2 m permitió una mayor eficiencia fotosintética y menor humedad relativa que contribuyó a la menor incidencia de enfermedades.

El nivel de fertilización mineral y la sección de la ladera afectaron la condición nutrimental del árbol. En el primer caso la fertilización mineral afectó el contenido de fósforo y la sección de la ladera afectó el contenido de calcio y magnesio (Cuadro 2.19). Los resultados del análisis foliar del árbol de guayaba se compararon de manera directa por el método convencional (Mills y Jones, 1996) con los valores reportados por diferentes autores (Dupleis *et al.*, 1973 citado por Guerra, 2002; Khanduja y Garg, 1980; Nakazone, 1998).

Cuadro 2.19. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera y fertilización mineral en la concentración de elementos mayores en hojas de árboles de guayaba de tres años de edad.

Fuentes de variación	N	P	K	Ca	Mg
Sección de la ladera	NS	NS	NS	*	*
Fertilización	NS	*	NS	NS	NS
SL x F	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *=No significativo o significativo a $P \leq 0.05$, respectivamente.

El mayor contenido de P en las hojas se obtuvo con la fertilización al 100% y para la sección de la ladera el mayor contenido de Ca y Mg se presentó en la sección baja y

media. Esto último está relacionado como ya se hizo mención anteriormente, a que estas secciones de la ladera presentan un contenido medio de materia orgánica con respecto a un contenido bajo en la sección alta. Es importante mencionar que excepto por el K que estuvo por abajo del intervalo de suficiencia, el resto de los elementos estuvieron dentro del intervalo definido para cada uno e incluso por arriba de éste como es el caso del contenido de nitrógeno. Así también resulta interesante mencionar que a pesar que el contenido de los elementos, se mantuvo dentro del intervalo de suficiencia, en todos los casos éste tendió a disminuir en función de la condición de menor fertilidad del suelo, como en el caso cuando se aplicó el 50% de la fertilización, en la sección alta de la ladera (Cuadro 2.20).

Cuadro 2.20. Efecto de la fertilización mineral y sección de la ladera en la concentración de los principales elementos en hojas de árboles de guayaba de tres años de edad y sus intervalos de suficiencia.

Fuentes de variación	N	P	K	Ca	Mg
	----- % -----				
Fertilización					
100%	2.29	0.21 a ^z	0.99	1.27	0.27
50%	2.20	0.15 b	0.97	1.11	0.23
DMS _{0.05}	NS	0.046	NS	NS	NS
Sección de la ladera					
Baja	2.37	0.19	1.05	1.48 a	0.29 a
Media	2.18	0.17	0.95	1.29 ab	0.26 ab
Alta	2.18	0.17	0.93	0.79 b	0.19 b
DMS ^x _{0.05}	NS ^y	NS	NS	0.6702	0.099
Intervalo de suficiencia (% MS^w)					
Khanduja y Garg (1980)	1.63-1.96	0.18-0.24	1.31-1.62	0.67-0.83	0.52-0.65
Dupleis <i>et al.</i> (1973) citado por Guerra (2002).	1.31-1.64	0.14-0.16	1.30-1.62	0.89-1.50	0.25-0.42
Nakazone (1998)	1.7	0.25	1.5	1.25	0.25

^zValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

^yNo significativo

^xDMS diferencia mínima significativa.

^wMateria seca

Lo anterior sugiere que por ser el primer año de producción, la cantidad de nutrimentos que demanda el frutal no es alta y es cubierta satisfactoriamente por la fertilidad nativa

del suelo. Este resultado, es similar al obtenido por Damián *et al.* (2006) en árboles de 3.5 años de edad en Iguala Guerrero, donde obtuvieron valores de nitrógeno, fósforo y potasio de 2.3%, 0.25% y 1.2%, respectivamente y menor similitud con el valor de calcio de 1.27% y de 0.27% de magnesio.

Los resultados del análisis foliar también presentan una tendencia a disminuir el contenido de potasio y a incrementarse los de calcio y magnesio. Esto es similar a lo encontrado por Guerra y Bautista (2002) en clones de guayaba al evaluar las interacciones entre éstos, que dan lugar a un posible antagonismo. Por otra parte, el hecho que el contenido de potasio haya resultado por abajo del intervalo de suficiencia puede obedecer a dos razones; la primera, como ha sido mencionado antes, porque el contenido de este elemento en el suelo es bajo, y la segunda probablemente se deba a su movilización hacia los puntos de fructificación donde es requerido para la producción de fruto (Guerra y Bautista, 2002). Cualquiera que sea la causa, se considera apropiado aumentar la nutrición de la planta con este elemento a manera de no tener bajas en el rendimiento en años posteriores.

Además, en el caso específico de la sección de la ladera se considera que también existió influencia de la mayor humedad y profundidad del suelo. Esto como consecuencia de que la microcuenca donde estuvo establecido el sistema MIAF se manejó inicialmente durante 10 años con el sistema maíz como unicultivo, de los cuales, en 6 años se practicó la quema de residuos de cosecha y en 4 el suelo se manejó con menos del 30% de cobertura con residuos de cosecha, lo cual favoreció el proceso de sedimentación del suelo transportado de las secciones ubicadas en cotas más altas.

2.7.7 Rendimiento, índice de área foliar y RFA interceptada en antesis, y contenido de clorofila del maíz en los sistemas de barrera de muro vivo y labranza cero con pastoreo

En el sistema MBMV, la sección de la ladera (SL), fertilización (F) y posición de la hilera de maíz (Ph) interaccionaron para afectar el rendimiento de grano. La Ph afectó el IAF y contenido de clorofila, y la SL interaccionó con la F para afectar el IAF, RFA

interceptada y contenido de clorofila. En el sistema de labranza cero con pastoreo, la interacción SL x F mineral afectó el rendimiento de grano, IAF, RFA interceptada y contenido de clorofila. Esta última también fue afectada por la posición de la hilera de maíz (Cuadro 2.21).

Cuadro 2.21. Análisis de varianza del efecto de la sección de la ladera (SL), fertilización mineral (F) y posición de la hilera de maíz (Ph) sobre el rendimiento de grano de maíz, índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada, y contenido de clorofila (CC) en los sistemas MBMV y MLCP.

Fuentes de variación	Maíz con barreras de muro vivo				Maíz en labranza cero con pastoreo			
	Rend	IAF	RFA interceptada	CC	Rend	IAF	RFA interceptada	CC
SL	**	NS	*	**	*	*	*	**
F	**	**	**	**	**	**	**	**
SL x F	**	*	*	**	**	**	*	*
Ph	**	**	NS	**	NS	NS	NS	**
SL x Ph	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
F x Ph	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SL x F x Ph	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *, ** = No significativo o, significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.

En el sistema MBMV el efecto de la interacción sección de la ladera x fertilización x posición de la hilera de maíz sobre el rendimiento de grano, indicó que el maíz rindió más en la posición receptora con 100% de fertilización en las tres secciones de la ladera, con el rendimiento más alto en la sección media (Cuadro 2.22). Además, se puede observar que la fertilización al 50% produjo una disminución del rendimiento en las posiciones media y donante de las hileras ubicadas en las secciones baja y alta de la ladera.

Cuadro 2.22. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral y posición de la hilera sobre el rendimiento de grano de maíz (t 0.868 ha⁻¹) en el sistema maíz con barreras de muro vivo.

Sección de la ladera	Fertilización	Posición de la hilera de maíz		
		Receptora	Media	Donante
Bajo	50 %	3816 (266) ^z	3617	3610
	100%	4855	4195	4216
Media	50 %	3752	3409	3290
	100%	4227	4017	3986
Alta	50 %	3255	2749	2691
	100%	4007	3829	3847
Promedio		3985	3636	3606

^z Entre paréntesis la DMS al 5% de probabilidad

En el sistema MLCP el efecto de la interacción sección de la ladera x fertilización fue disminuir el rendimiento de grano al aplicar 50% de la fertilización mineral, con un efecto mayor en las secciones de la ladera con un mayor grado de pendiente como es el caso de las partes media y alta (Figura 2.23).

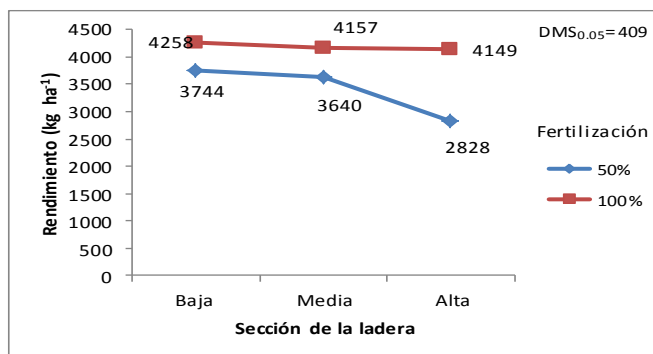
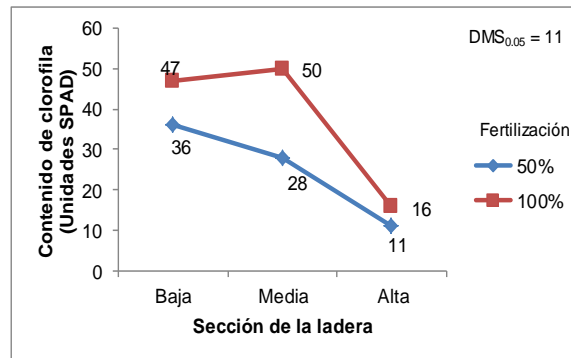


Figura 2.23. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre el rendimiento de grano de maíz en el sistema MLCP

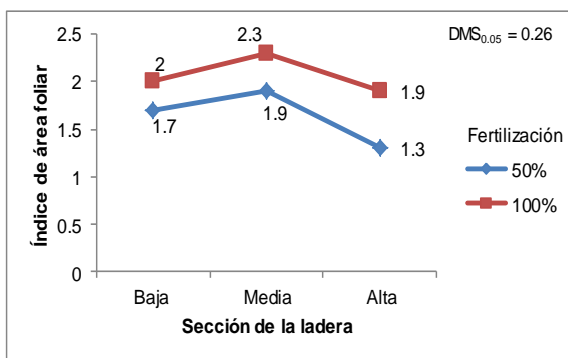
El rendimiento de grano resultó similar en el sistema MBMV y MLCP, no obstante que el primero contribuyó más eficientemente en el control de la erosión y en la pérdida de nutrientes, y permitió una mayor conservación de la humedad como ya se mencionó en secciones anteriores. Lo anterior se debe a que en este sistema se reduce a 8680

m² el área dedicada al cultivo del maíz debido a que los setos de *Gliricidia* ocupan un área de 1320 m², en cambio en el sistema MLCP el maíz es cultivado en una hectárea.

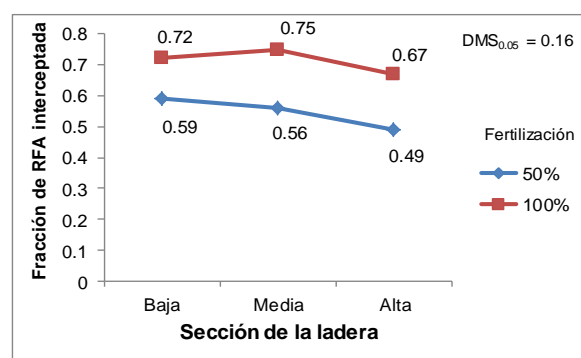
En el sistema MBMV la interacción entre la sección de la ladera y fertilización mineral afectó el contenido de clorofila, el IAF y la RFA. El mayor efecto se presentó cuando se aplicó 100% de la fertilización mineral en la sección media y baja de la ladera, y para (Figura 2.24 a, b, c). Estos resultados se atribuyen a que en estas secciones se minimizó la velocidad de la escorrentía por cambio en la pendiente y por el efecto del filtro de escurrimientos, lo que permitió una mayor acumulación de suelo con una mejora de la fertilidad y nutrición de las plantas y su expresión en los componentes del rendimiento para una mayor producción de materia seca en esta sección.



c)



(a)



(b)

Figura 2.24. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre (a) el índice de área foliar, (b) RFA interceptada y (c) contenido de clorofila en la planta de maíz en el sistema MBMV.

En el sistema MBMV hubo efecto de la posición de la hilera de maíz sobre la respuesta del índice de área foliar y contenido de clorofila (Cuadro 2.23). Ambas variables presentaron valores más altos en la hilera de maíz en la posición receptora ubicada a 1.4 m aguas arriba del seto de *Gliricidia* y a 0.8 m del filtro de escurrimientos. Esto se atribuye a que esta parte fue beneficiada con el aporte de nutrientes vía acumulación de suelo y del follaje producto de la poda, así como la mayor humedad disponible..

Cuadro 2.23. Efecto de la posición de la hilera de maíz sobre el índice de área foliar y contenido de clorofila en el maíz, en el sistema maíz con barreras de muro vivo.

Posición de la hilera de maíz	Índice de área foliar	Contenido de clorofila (Unidades SPAD)
Maíz receptora	1.9 a ^z	37 a
Maíz media	1.8 b	30 b
Maíz donante	1.6 c	29 b
DMS ^y 0.05	0.06	3

^zValores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

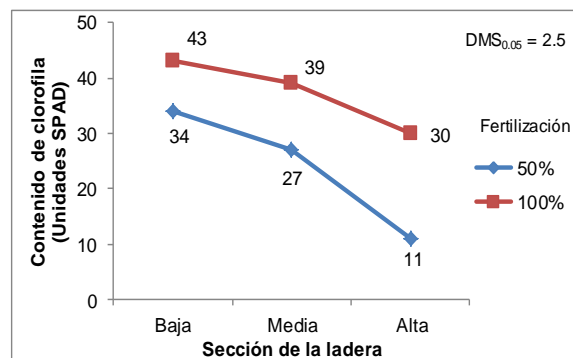
^yDiferencia mínima significativa.

Resultados similares se obtuvieron en las hileras de maíz adyacentes al seto de *Gliricidia* en el sistema MBMV donde había mayor probabilidad de sombreado sobre el maíz que redujera el rendimiento; pero esto se evitó con la aplicación correcta y oportuna de las podas. Kang *et al.* (2008) en un estudio de maíz con mimosa (*Albizia julibrissin* Durazz) en cultivo en callejones, determinaron que la poda del seto a 50 cm de altura, a los 30 y 90 días después de la siembra del maíz, redujo la competencia por luz e incrementó la eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa y rendimiento de grano. Así también, se redujo la conductividad estomática y transpiración en la planta de maíz indicando que también existió una reducción en la competencia por agua entre el maíz y el seto.

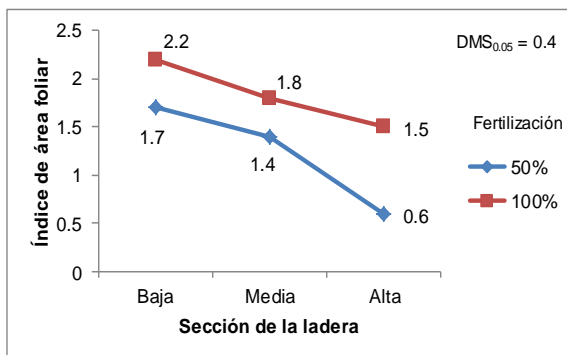
Resultados similares fueron obtenidos por Andrade (2002) y Uribe (1997) quienes encontraron que el rendimiento de maíz fue mayor en la primera hilera ubicada aguas arriba del seto y de manera contigua al mismo, atribuyéndolo a su ubicación en la zona de acumulación de sedimentos. Francisco (2005) por su parte cuantificó un rendimiento mayor en la segunda hilera aledaña al seto de *Gliricidia*, ya que la primera

estuvo afectada por competencia con el seto por luz, agua y nutrientes, y para minimizar esta competencia recomienda controlar el crecimiento del seto por medio de podas frecuentes.

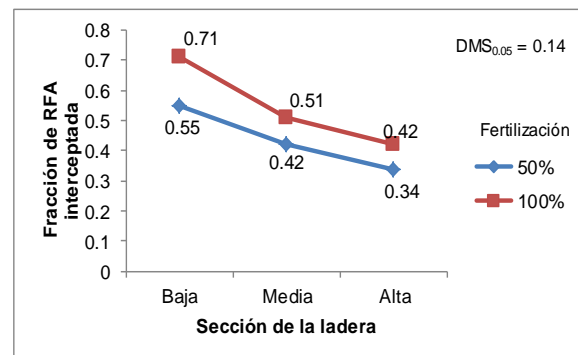
En el sistema MLCP el índice de área foliar, RFA interceptada y contenido de clorofila también se vieron afectadas por la interacción sección de la ladera x fertilización mineral (Figura 2.25 a, b, c). La fertilización mineral al 50%, disminuyó los valores de estas variables en las secciones baja, media y alta, con el efecto más grande entre los dos niveles de fertilización a medida que las secciones se ubicaron a mayor pendiente del terreno. Esto se atribuye a que al no existir prácticas de conservación que obstruyeran el libre escurrimiento, los sedimentos se han depositado en la sección baja, con un incremento en su fertilidad con respecto a las secciones media y alta.



(c)



(a)



(b)

Figura 2.25. Efecto de la sección de la ladera en interacción con la fertilización mineral sobre (a) el índice de área foliar, (b) RFA interceptada y (c) contenido de clorofila en la planta de maíz en los sistemas MLCP.

La importancia de esta respuesta radica en que el área foliar influye en la intercepción y utilización de la radiación solar por el dosel del cultivo de maíz y consecuentemente en la acumulación de materia seca y rendimiento de grano (Núñez y Kamprath (1969) citados por Camacho (1995), mismas que se incrementan con altas dosis de nitrógeno (Boote *et al.*, 1996). Al respecto, Amanullah *et al.* (2009), al evaluar dos densidades de siembra y tres niveles de nitrógeno en maíz, determinaron que el área foliar y biomasa por planta se incrementaron con la dosis de nitrógeno y que el máximo rendimiento en biomasa y grano se obtuvo con aplicaciones de nitrógeno 50% más altas que las recomendadas de 120 kg ha⁻¹.

En el sistema MLCP no se detectaron diferencias en el efecto de la posición de la hilera sobre el IAF, RAF interceptada y el contenido de clorofila. Esta respuesta, hace suponer que en todas las hileras de maíz existió una competencia intraespecífica similar por luz, agua y nutrimentos en virtud que al establecerse en unicultivo no permitió la diferenciación de estratos aéreos ni radicales que permitieran el uso complementario de los recursos, como fue el caso del sistema MIAF.

2.7.8 Productividad de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

Es importante comentar que la evaluación de la productividad del sistema MIAF se hizo tomando en cuenta el cultivo del frijol en el ciclo otoño-invierno (O-I), dado que puede ser una alternativa para mejorar aún más el ingreso del productor al aprovechar la humedad residual del suelo que de otra manera se perdería por evaporación. Esto fue posible ya que el arreglo topológico de la siembra de frijol de primavera-verano (P-V) en hileras alternas al maíz bajo el sistema MIAF permitió que una vez alcanzado su madurez y cosechado, inmediatamente fuera posible establecer una segunda siembra sin necesidad de esperar que el maíz alcanzara su madurez fisiológica para doblarlo y evitar el sombreado de éste sobre el frijol, ya que existía para eso una área predeterminada. Lo contrario sucede en los sistemas MBMV y MLCP dado que al estar establecidos en unicultivo, primero se debe esperar a que el maíz de P-V alcance la madurez fisiológica para doblar la planta y entonces sembrar el frijol entre sus hileras, lo cual disminuye los días que el cultivo puede hacer uso de la humedad residual para completar su ciclo.

Lo anterior y el uso de la variedad de frijol precoz Negro Grijalva en el primer ciclo (P-V) que florea y madura 15 y 20 días antes que las variedades convencionales (Villar *et al.*, 2009), permite adelantar la fecha de siembra y lograr que el cultivo aproveche mejor las últimas lluvias de septiembre y octubre, y la humedad residual del suelo para la obtención de rendimientos aceptables de frijol en un ciclo donde normalmente los suelos permanecen ociosos.

2.7.8.1 Rendimiento de los cultivos en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

Previo a la comparación del rendimiento del maíz, frijol y guayaba sembrados bajo los sistemas MIAF y cultivo simple, es conveniente recordar que en una hectárea de sistema MIAF, las dos primeras especies ocupan una superficie de 0.3 ha y la tercera 0.4 ha. La comparación de las tres especies con su respectivo cultivo simple se realizó con base en el rendimiento de los módulos para eficiencia relativa de la tierra establecidos en el sistema MIAF, y específicamente para el rendimiento de maíz también se comparó con el obtenido en una hectárea de maíz unicultivo en los sistemas MBMV y MLCP.

Esta comparación se realizó de dos maneras para expresar el rendimiento: la primera extrapolando el rendimiento de cada especie en toneladas por hectárea y la segunda expresando que proporción de lo obtenido en una hectárea de cultivo simple representa el rendimiento de maíz y frijol en 0.3 ha y en la guayaba en 0.4 ha en el sistema MIAF.

El rendimiento de maíz, frijol de primavera-verano (P-V), frijol de otoño-invierno (O-I) y guayaba por hectárea resultó ser superior en 36%, 24%, 29% y 33% respectivamente, cuando éstos fueron sembrados en tiras alternas de dos hileras de frijol y maíz, y una hilera de guayaba intercaladas, respecto a los módulos de cultivo simple en la misma microcuenca MIAF.

Por otra parte en el caso específico del maíz, el rendimiento en MIAF fue incluso superior en 29% y 36% al obtenido en los sistemas MBMV y MLCP que presentaban mejores condiciones de fertilidad, lo cual demuestra el mayor potencial del primer

sistema en el aprovechamiento de los recursos para la obtención de mayor rendimiento del cultivo (Cuadro 2.24).

Cuadro 2.24. Rendimiento del maíz, frijol y guayaba bajo el sistema MIAF, en módulos de cultivo simple en la microcuenca MIAF, y rendimiento de maíz en cultivo simple en los sistemas MBMV y MLCP en el año 2009.

Sistema	Cultivo	t ha ⁻¹
MIAF ^z	Maíz	6.6
	Frijol P-V	1.1
	Frijol O-I	0.7
	Guayaba	4.0
Módulos de cultivo simple ^y en la microcuenca MIAF	Maíz	4.2
	Frijol P-V	0.84
	Frijol O-I	0.50
	Guayaba	2.7
MBMV ^x	Maíz	4.7
MLCP ^w	Maíz	4.2

^zMilpa intercalada con árboles frutales

^yMódulos o lotes de cultivo simple de maíz, frijol y guayaba establecidos en la misma microcuenca del sistema MIAF, para poder calcular la eficiencia relativa de la tierra.

^xMaíz con barreras de muro vivo.

^wMaíz en labranza cero con pastoreo.

La segunda forma de comparación, indicó que el maíz en el sistema MIAF rindió en un tercio de hectárea el equivalente a 0.52, 0.62 y 0.52 del rendimiento de maíz por hectárea obtenido en el módulo de cultivo simple para eficiencia relativa de la tierra establecido en el sistema MIAF y en las microcuencas con MBMV y MLCP respectivamente. El frijol de P-V y O-I y la guayaba rindieron por su parte el equivalente a 0.43, 0.44 y 0.59 hectáreas del cultivo simple, respectivamente (Cuadro 2.25).

Cuadro 2.25. Rendimiento del maíz ($t\ 0.3\ ha^{-1}$), frijol ($t\ 0.3\ ha^{-1}$) y guayaba ($t\ 0.4\ ha^{-1}$) en el sistema MIAF y su equivalencia del rendimiento en área con respecto al rendimiento ($t\ ha^{-1}$) en los módulos de cultivo simple en la microcuenca MIAF y MLCP, y en $t\ 0.868\ ha^{-1}$ en la microcuenca con MBMV.

Sistema	Cultivo	Rend (t)	Equivalencia
MIAF ^t	Maíz	2.2	0.52 ^z , 0.62 ^y , 0.52 ^x
	Frijol P-V	0.362	0.43 ^w
	Frijol O-I	0.223	0.44 ^v
	Guayaba	1.6	0.59 ^u
Módulos de cultivo simple en la microcuenca MIAF	Maíz	4.2	
	Frijol P-V	0.84	
	Frijol O-I	0.502	
	Guayaba	2.7	
MBMV ^s	Maíz	4.1	
MLCP ^f	Maíz	4.2	

^{z, y, x} Equivalencia en área del rendimiento de maíz obtenido en $0.3\ ha$ bajo el sistema MIAF, con respecto al rendimiento por hectárea en el módulo de cultivo simple en la microcuenca MIAF, en $0.868\ ha$ del sistema MBMV y por hectárea de MLCP.

^{w, v, u} Equivalencia en área del rendimiento de frijol de P-V y O-I en $0.3\ ha$, y guayaba en $0.4\ ha$ bajo el sistema MIAF, respecto al rendimiento por hectárea de cada uno en módulos de cultivo simple en la microcuenca MIAF.

^t Milpa intercalada con árboles frutales;

^s Maíz con barreras de muro vivo;

^f Maíz en labranza cero con pastoreo.

Las evaluaciones antes expuestas y la expresión del rendimiento en el ciclo primavera-verano del maíz y frijol de $6.6\ t\ ha^{-1}$ y $1.1\ t\ ha^{-1}$, respectivamente en $1\ ha$ dispersa bajo el sistema MIAF, resultó ser superior en 3.3 y $0.4\ t\ ha^{-1}$ al rendimiento máximo promedio del maíz en cultivo simple en laderas y frijol en suelos planos de 3.0 y $0.7\ t\ ha^{-1}$, respectivamente, en el año de estudio e indican que estos cultivos así como la guayaba se vuelven más competitivos y más eficientes en términos de productividad bajo el sistema MIAF. Esta superioridad del sistema MIAF respecto al cultivo simple adquiere mayor importancia en un año con menor precipitación pluvial como fue el del presente estudio, donde se observaron períodos frecuentes de marchitamiento cuando el maíz estaba en la fase de floración femenina y llenado de grano, lo cual también se observó en la mayor parte de los cultivos de la zona que acusaron pérdidas de hasta $1.8\ t\ ha^{-1}$.

La razón de por qué el maíz en el sistema MIAF se vio menos afectado por la sequía que en cultivo simple, pudo deberse a que este tiene un sistema radical más profundo que el del frijol, y al estar contiguo a una hilera de frijol, le permite explorar los estratos más profundos del subsuelo que el frijol no alcanzaría, por lo tanto, obtuvo más agua y nutrimentos que una hilera de maíz en el cultivo simple donde las raíces están a una misma profundidad del suelo.

El rendimiento promedio de fruto de guayaba por árbol en dos años de producción, fue de 3 kg en cultivo simple y de 2.5 kg en el sistema MIAF; sin embargo debe tomarse en cuenta que en el primer caso a cada árbol se le destina un área de 8 m² y en el segundo 4.6 m², siendo éste más productivo por unidad de área. Por otra parte, se esperaba que el rendimiento por árbol fuera mayor en cultivo simple; sin embargo, se tuvo un pequeño margen de diferencia. Esto podría explicarse a que durante la estación de crecimiento, los árboles de guayaba intercalados tienen una menor competencia por agua y nutrimentos con el maíz y el frijol, ya que sus raíces exploran diferentes profundidades del perfil del suelo. En cambio en el cultivo simple la competencia es entre los mismos árboles en la hilera, y entre hileras de árboles por el traslape de raíces. En árboles maduros esto se debe como lo menciona Midmore (1993), a que en un sistema de cultivos intercalados en tiempo y espacio, los recursos del crecimiento como luz, agua y nutrientes son mejor aprovechados y convertidos en biomasa. Esto permite que las diferencias en la habilidad competitiva por los recursos entre ellos, aprovechen la variación en características tales como desarrollo, dimensión y adaptación fotosintética del dosel, a las condiciones de irradiancia y profundidad radical (Morris y Garrity, 1993 y Tsubo *et al.*, 2001).

2.7.8.2 Eficiencia relativa de la tierra del sistema MIAF

Una de las características importantes que deben considerarse en las tecnologías recomendadas para las pequeñas unidades de producción, es que deben incrementar la eficiencia relativa de la tierra, que es igual a la relación del rendimiento de una especie en cultivo intercalado entre su rendimiento en cultivo simple. Esto es posible conseguirlo por medio del uso de sistemas intensivos como los cultivos asociados, ya sean mixtos o intercalados como el sistema MIAF. En este caso la eficiencia relativa de

la tierra total es la suma de las eficiencias relativas parciales del maíz, frijol y guayaba. Gliessman (2002) la define como la superficie que habría de sembrarse con las especies en monocultivo para obtener el rendimiento observado en una hectárea de la asociación. Si la eficiencia alcanza un valor de 1 no existe diferencia entre el sistema intercalado y las diferentes especies en monocultivo. Si es mayor que 1 indica una ventaja para el sistema intercalado y es denominado sobre-rendimiento.

En el presente estudio, los rendimientos de maíz, frijol de P-V, O-I y guayaba en una hectárea de MIAF (Cuadro 2.26) presentaron una eficiencia relativa de la tierra parcial de 0.52, 0.42, 0.44 y 0.58, respectivamente para una eficiencia relativa total de 1.96. Ahora bien, sabiendo que en el sistema MIAF las dos primeras especies ocuparon 30% de la superficie y la guayaba 40%, entonces los valores de eficiencia parcial determinados indican la superioridad sobre el cultivo simple. Resultados similares han sido reportados por Cortés *et al.* (2007), quienes determinaron una eficiencia relativa de 0.5 en un sistema MIAF de durazno donde éste rindió en 0.3 ha el equivalente al 50% del rendimiento en 1 ha en cultivo simple

Cuadro 2.26. Eficiencia relativa de la tierra (ERT) parcial del maíz, frijol de primavera-verano (P-V), de otoño-invierno (O-I) y de guayaba en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y ERT total de este sistema.

Sistema	Rendimiento (t)	ERT parcial	ERT total
Maíz MIAF ^z	2.2	0.52	1.96
Maíz unicultivo ^x	4.2		
Frijol P-V MIAF ^z	0.361	0.42	
Frijol P-V unicultivo ^x	0.840		
Frijol O-I MIAF ^z	0.223	0.44	
Frijol O-I unicultivo ^x	0.502		
Guayaba MIAF ^y	1.6	0.58	
Guayaba unicultivo ^x	2.7		

^{z,y,x} Rendimiento en t 0.3 ha⁻¹, t 0.4 ha⁻¹ y t ha⁻¹, respectivamente.

El resultado anterior indica que habría que sembrar como cultivo simple 0.52 ha de maíz, 0.42 ha de frijol de P-V, 0.44 ha de frijol de O-I y 0.58 ha de guayaba o sea 1.96 ha para obtener la producción de 2.2 ton de maíz, 0.361 ton de frijol de P-V, 0.223 ton de frijol de O-I y 1.6 ton de guayaba, mismos que se obtienen en una hectárea bajo el sistema MIAF. Dicho de otra manera, se necesitaría que el área sembrada en monocultivo fuera 96% mayor que el área sembrada como sistema MIAF para producir la misma cosecha combinada.

Por otra parte, retomando los datos de rendimiento del maíz, frijol de P-V y de O-I en 0.3 ha, y guayaba en 0.4 ha expresado en área en base al rendimiento en cultivo simple de 0.52, 0.43, 0.44 y 0.59 ha, respectivamente, mencionados anteriormente (Cuadro 2.25) se observa que el uso de la tierra con estos cultivos es más eficiente con el sistema MIAF, en virtud que rinden como si estuvieran establecidos en una superficie adicional de 0.22, 0.13, 0.14 y 0.19 ha respectivamente. Los resultados antes expuestos indican que el sistema MIAF propicia una mayor eficiencia relativa de la tierra, lo que redundaría en beneficios para los productores con limitada extensión de terreno, además que es factible incrementarla a través de los años en la medida que el sistema se establezca y sea mayor su contribución en la conservación del suelo y agua, así como en el aporte de nutrientes para los árboles al área del filtro de escurrimientos.

2.7.8.3 Análisis financiero

La evaluación financiera considera la productividad y costos de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP. Para esta evaluación se consideraron:

2.7.8.3.1 Costos

Costos de inversión. Se consideraron los costos realizados para el establecimiento del sistema MIAF. Estos incluyen el precio de mercado de los árboles, equipo y herramientas como bomba aspersora, barretas, cava hoyos, serrucho, tijerones y tijeras entre otros, así como la mano de obra para el trazo de curvas a nivel, realización de cepas y plantación de árboles frutales.

Costos de operación. Se refiere al precio de mercado de los insumos utilizados para el establecimiento del maíz y frijol, así como el mantenimiento y cosecha de estos cultivos y los árboles frutales, los cuales fueron constantes para el período de evaluación. Estos incluyen el costo de semilla de maíz y frijol, fertilizantes, fungicidas e insecticidas, así como los jornales utilizados en la preparación del terreno, siembra del maíz y frijol, aplicación de fertilizantes y pesticidas para el control de plagas, enfermedades y malezas, poda de los árboles de guayaba, cosecha y transporte de la producción. Para el caso del sistema MIAF también incluye el precio de \$ 1000.00 por hectárea de los residuos de cosecha adquiridos por el productor para alimento del ganado en la época de estiaje, en virtud que los animales no pueden hacer uso de estos residuos en el sistema MIAF por el daño que le causarían a los árboles frutales.

2.7.8.3.2 Beneficios

Se refiere a los precios de mercado del kilogramo de grano de maíz, frijol de PV y OI, y fruto de guayaba que fueron de \$ 3.39, \$ 16.00, \$13.00 y \$ 6.00, respectivamente y que fueron constantes para el período de evaluación. Para el caso de los sistemas MBMV y MLCP también incluye el precio de \$ 1000.00 por hectárea de los residuos de cosecha utilizados como alimento para el ganado en época de estiaje.

2.7.8.3.3 Cálculo del rendimiento de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

La información para realizar el análisis financiero de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP fue limitada. Esta consistió en el sistema MIAF, en datos de rendimiento del maíz y frijol del año 2009, y de la guayaba para el año 2009 y 2010 que corresponde al tercer y cuarto año de establecimiento de los árboles de guayaba. Para los sistemas MBMV y MLCP únicamente se contó con datos de rendimiento de maíz del año 2009. Para tener una estimación aproximada del potencial económico del sistema MIAF respecto al de MBMV y MLCP, se realizó un análisis económico ex-ante para un período de 10 años, a partir del año 2010. Para ello fue necesario estimar los rendimientos de maíz en los sistemas MBMV y MLCP, y maíz, frijol y guayaba en el sistema MIAF, lo cual se realizó de la siguiente manera:

1. Para el maíz y frijol. Se encuestó a 10 productores de la región de estudio que aplican un paquete tecnológico similar al utilizado en el sitio experimental, sobre el rendimiento obtenido del año 2007 al 2010. Es importante recordar que la región está caracterizada como de alto riesgo por sequía intraestival, lo que coincide con lo manifestado por los productores en que la variabilidad en el rendimiento está relacionada a la condición de humedad que prevalece en cada año. El mayor rendimiento promedio de maíz y frijol de los cuatro años representó el 100%, y en función de éste se calculó la proporción que representaba el rendimiento de los tres años restantes. Finalmente al rendimiento de maíz y frijol obtenido en el sistema MIAF, como del maíz en cultivo simple de los sistemas MBMV y MLCP, se les aplicó aleatoriamente las proporciones calculadas para los cuatro años (2007 – 2010), para estimar el rendimiento de los 10 años de análisis económico.

2. Para la guayaba. En el sitio experimental se determinó el rendimiento de fruto de guayaba para los años 3 y 4 en el sistema MIAF. La estimación del rendimiento del año 5 al 10 se realizó tomando como base el rendimiento del quinto al octavo año de una parcela MIAF establecida en un suelo vertisol, de topografía plana del Campo Experimental Centro de Chiapas ubicado a 90 km de sitio experimental. El mayor rendimiento de los cuatro años representó el 100%, y en función de éste se calculó la proporción que representaba el rendimiento de los tres años restantes. Tomando en cuenta que el suelo del sitio experimental es de menor fertilidad y con riesgo de sequía intraestival en comparación con el del Campo Experimental, se estableció el supuesto que el máximo rendimiento obtenido en ese sitio sería el obtenido en el quinto año del Campo Experimental que fue de $5.1 \text{ t } 0.4 \text{ ha}^{-1}$. Finalmente el rendimiento de guayaba del año 5 al 10 se estimó aplicando al rendimiento de $5.1 \text{ t } 0.4 \text{ ha}^{-1}$ las mismas proporciones calculadas para los años 2007 al 2010 de manera aleatoria.

2.7.8.3.4 Costos y beneficios de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

De los tres cultivos que componen el sistema MIAF se observa que la guayaba presenta mayor inversión el primer año debido al costo de los árboles y su establecimiento (Cuadro 2.27). Así también para los años siguientes en relación al

maíz y frijol, debido principalmente por el incremento en el número de jornales utilizados en la poda y en la cosecha a través de los años. Con respecto al sistema MBMV el mayor costo se presenta en el primer año (Cuadro 2.28) debido al trazo de las curvas a nivel, costo de la semilla de *Gliricidia*, establecimiento y aplicación de podas de los setos.

Cuadro 2.27. Costos y beneficios del sistema milpa intercalada con árboles frutales para un período de 10 años.

Año	Costo (\$)					Beneficio (\$)				
	Guayaba	Maíz	Frijol	Frijol	Costo	Guayaba	Maíz	Frijol	Frijol	Beneficio
2010	24840	3288	2633	2199	32960	0	6973	5602	2804	15379
2011	8752	3267	2562	2240	16821	0	5579	4582	2294	12455
2012	9665	3295	2646	2292	17898	10206	7458	5792	2899	26355
2013	10249	3288	2633	2284	18454	18258	6973	5602	2574	33407
2014	11119	3247	2633	2284	19283	28688	4184	5144	2804	40819
2015	9331	3267	2646	2292	17536	19508	5579	5792	2899	33777
2016	10162	3295	2562	2240	18259	30600	6973	4582	2294	44449
2017	11049	3295	2601	2264	19209	30026	7458	5144	2574	45202
2018	11469	3288	2646	2292	19695	28688	6973	5792	2899	44352
2019	11666	3267	2562	2240	19735	30600	5579	4582	2294	43055

Cuadro 2.28. Costos y beneficios de los sistemas maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP) para un período de 10 años.

Año	MBMV		MLCP	
	Costo (\$)	Beneficio (\$)	Costo (\$)	Beneficio (\$)
2010	10522	15896	9453	14313
2011	9462	11651	9414	11651
2012	9514	16933	9467	15238
2013	9500	14313	9453	14313
2014	9423	8987	9375	8987
2015	9462	11651	9414	11651
2016	9513	15238	9467	15238
2017	9513	15238	9467	15238
2018	9500	14313	9453	14313
2019	9462	11651	9414	11651

2.7.8.3.5 Rentabilidad económica de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

En el cuadro 2.29, se observa que a los 5 años el sistema MIAF empieza a ser rentable, aunque es superado tanto en el VAN como en la relación B/C por los sistemas MBMV y MLCP. Lo anterior se debe a que en ese período el frutal ha presentado a los tres años una producción heterogénea y a los cuatro su primera producción comercial permite se obtengan ingresos para cubrir en parte los costos erogados. Se considera que es posible aumentar la rentabilidad del sistema supliendo el uso de árboles producidos por semilla por árboles injertados que pueden llegar a dar una producción más homogénea a los tres años. Por otra parte, tomando en cuenta que los árboles significan el mayor costo del componente frutal, es posible disminuirlo diseñando esquemas comunitarios de propagación de plantas.

Cuadro 2.29. Valor actual neto (VAN), relación beneficio costo (B/C) y tasa interna de retorno (TIR) en los sistemas MIAF^z, MBMV^y y MLCP^x para un período de cuatro y diez años.

Sistema	5 años			10 años		
	VAN (miles)	B/C	TIR (%)	VAN (miles)	B/C	TIR (%)
MIAF ^z	10347	1.1	24	71784	1.5	47
MBMV ^y	14896	1.4		23,537	1.4	
MLCP ^x	15147	1.4		25,782	1.4	

^zMilpa intercalada con árboles frutales

^yMaíz con barreras de muro vivo

^xMaíz en labranza cero con pastoreo

La mayor rentabilidad del sistema MIAF se obtiene a partir de los seis años, cuando los costos de los primeros años se han cubierto y el rendimiento de los frutales se ha estabilizado. En el análisis para el período de 10 años, este sistema resultó ser el más rentable con un VAN superior en 67 y 64% al presentado por el sistema MBMV y MLCP, respectivamente. De igual manera la relación beneficio costo fue superior en 0.1, es decir, que por cada peso invertido en el sistema MIAF se recuperaron 0.1 pesos más con respecto al cultivo simple en MBMV y MLCP. Por otra parte la TIR del sistema MIAF es muy superior a la tasa de descuento utilizada.

La mayor eficiencia económica del sistema MIAF se debe sin duda a los altos ingresos que presenta el componente frutal y al mayor rendimiento del maíz y frijol por área debido a la siembra de ambas especies en franjas alternas de dos hileras, ya que como se mencionó anteriormente, el maíz rindió en 0.3 ha el equivalente a 0.62 y 0.52 ha del cultivo simple en MBMV y MLCP a pesar que estos estuvieron establecidos en microcuencas con mejor fertilidad del suelo.

Respecto a los sistemas MBMV y MLCP ambos presentan similar B/C, y el VAN presenta poca diferencia. Lo anterior se debe en primer lugar a que si bien existe una contribución en la conservación del suelo y agua, y aumentos en el rendimiento, éstos son a largo plazo; en segundo lugar a que el aumento en rendimiento por área en el sistema MBMV, se compensa con la pérdida en rendimiento por el área ocupada por los setos de *Gliricidia* que disminuyen el área dedicada al cultivo del maíz. Así también el sistema MBMV incurre en costos adicionales como son el establecimiento y mantenimiento de los setos de *Gliricidia*.

De acuerdo al análisis financiero, el VAN obtenido en el sistema MIAF fue de \$ 71,784.00 lo que significa un ingreso neto a lo largo del año del orden de 3.3 salarios mínimos (salario mínimo=\$ 59.80 diarios), lo anterior resulta superior a lo obtenido por Cortés *et al.* (2007) quienes en un sistema MIAF con árboles de durazno estimaron un ingreso neto de 3 salarios mínimos por hectárea.

En contraste con el nivel de ingreso asociado con el sistema MIAF, el manejo de una hectárea de maíz como cultivo simple en los sistemas MBMV y MLCP, redujo significativamente su ingreso neto a 1.1 y 1.2 salarios mínimos, respectivamente. En este contexto es importante mencionar que estos resultados se obtuvieron con la tecnología apropiada recomendada por el INIFAP, por lo que de tomar en cuenta el rendimiento promedio de 1.8 t ha^{-1} con el manejo tradicional que implica quema de residuos de cosecha, baja tecnología y riesgos de sequía los productores apenas alcanzarían una fracción de salario mínimo.

Otro de los aportes del sistema MIAF evaluado en este estudio, es la generación de empleo rural, ya que demanda alrededor de 150 y 105 jornales/ha en el año de

establecimiento y años siguientes, respectivamente, debido a las prácticas culturales requeridas en el manejo de los árboles, lo que contrasta con la demanda de 67 jornales/ha/año del maíz en cultivo simple en MLCP, y 84 y 71 jornales en el año de establecimiento y años siguientes del sistema MBMV, respectivamente, los que fácilmente son cubiertos con mano de obra familiar, que se sub-utiliza dando lugar a la migración en busca de trabajo

2.7.9 Eficiencia en la conversión de radiación solar en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

Aunque la producción es expresada generalmente en términos del peso de la materia seca, ésta también puede ser expresada en términos de energía (Roberts *et al.*, 1985). En el Cuadro 2.30, se muestran los valores de materia seca a la cosecha del maíz, frijol y guayaba, y la radiación global acumulada hasta los días de la cosecha de cada uno de ellos, así como sus respectivos valores calóricos para biomasa total, del grano y fruto de guayaba. Con esta información se calculó la eficiencia en la conversión de radiación, entendiéndose como los MJ de energía producida por la biomasa en un metro cuadrado por cada MJ de radiación en esa misma área.

El valor calórico de biomasa total del maíz de 16.9 kJ g^{-1} resulta muy similar a los reportados por Acosta (1985) y Fuksa *et al.* (2006) de 15.9 kJ g^{-1} y 16.6 kJ g^{-1} , respectivamente. En frijol el valor de 16.2 kJ g^{-1} en biomasa total y 17.1 kJ g^{-1} en grano están ligeramente por arriba de los valores reportados por Acosta (1985) de 15.6 kJ g^{-1} y 16 kJ g^{-1} , respectivamente, y en guayaba el valor de biomasa total fue 17.3 kJ g^{-1} .

El maíz, frijol y la guayaba establecidos bajo el sistema MIAF presentaron mayor valor de materia seca total, de grano y energía por metro cuadrado, lo que indica una mayor eficiencia en la conversión de radiación con respecto a su establecimiento bajo cultivo simple.

En los Cuadros 2.30 y 2.31, se observa que el maíz bajo el sistema MIAF comparado con el cultivo simple en los módulos de la microcuenca MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP, presentó una eficiencia relativa en la conversión de la radiación en biomasa total superior en 100, 50 y 110%, y en grano 70,30 y 70%, respectivamente. Por su

parte el frijol de PV, OI y el cultivo de guayaba bajo el sistema MIAF, presentaron una eficiencia relativa en el uso de la radiación superior al cultivo simple de 30, 20 y 50% para biomasa total y de 40% para grano de frijol y 30% para fruto de guayaba, respectivamente. Lo anterior es acorde con lo expresado en la sección de productividad, en el sentido que bajo el sistema MIAF, los cultivos alcanzan un mayor rendimiento por unidad de área debido al arreglo topológico que les permite hacer un uso complementario de los recursos luz, agua y nutrientes (Kruk y Satorre, 2003).

Cuadro 2.30. Eficiencia en la conversión de radiación solar en la materia seca del maíz, frijol y guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).

Sistema	Especie	Valor calórico	MS Total ^z	Energía MS total	RG diaria acumulada ^y	ECR ^x	ECRR ^w
		(kJ g ⁻¹)	(g m ⁻²)	(MJ m ⁻²)	(MJ m ⁻²)	(%)	
MIAF	Maíz	16.9	2419	41	2231	1.84	2.0 ^v 1.5 ^u 2.1 ^t
	Frijol P-V	16.2	492	8	1495	0.5	1.3 ^s
	Frijol O-I	16.2	330	5	1311	0.38	1.2 ^r
	Guayaba		300	9 ^p	3242	0.280	1.5 ^q
	Cultivo simple en microcuencia MIAF	Maíz	16.9	1245	21	2231	0.94
	Frijol P-V	16.2	351	6	1495	0.40	
	Frijol O-I	16.2	258	4	1311	0.31	
	Guayaba		199	6	3242	0.19	
MBMV	Maíz	16.9	1510	26	2231	1.20	
MLCP		16.9	1210	20	2231	0.89	

^zMateria seca de raíces, tallo, hojas y fruto, acumulada desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de cada especie. Para maíz de 118, frijol P-V 78, frijol O-I 82 y guayaba 192 días, a partir del 24 de junio del 2009.

^yRadiación global acumulada en el período comprendido desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de cada especie, definido anteriormente.

^xEficiencia de conversión de radiación en materia seca. Es igual al cociente de la energía en la MS y la RG diaria acumulada x 100.

^wEs la ECR relativa, el cociente de la ECR de cada especie en el sistema MIAF y la ECR en cultivo simple.

^{v, u, t}ECRR del maíz en el sistema MIAF con respecto al maíz en cultivo simple en la microcuencia MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP..

^{s, r, q}ECRR del frijol de P-V, O-I y guayaba en el sistema MIAF con respecto a su cultivo simple en la microcuencia MIAF.

^pSumatoria de multiplicar el valor calórico de biomasa radical y fruto (16.6 kJ g), ramas y tallo (18.7 kJ g) y hojas (17.4 kJ g) por la biomasa de cada uno.

Cuadro 2.31. Eficiencia en la conversión de radiación solar en grano de maíz y frijol, y fruto de guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).

Sistema	Especie	Valor	MS ^z	Energía	RG diaria	ECR ^x	ECRR ^w
		calórico	grano	MS	acumulada ^y	(%)	
		(kJ g ⁻¹)	(g m ⁻²)	(MJ m ⁻²)	(MJ m ⁻²)	(%)	
MIAF	Maíz	17.4	718	12.5	2231	0.56	1.7 ^v 1.3 ^u 1.7 ^t
	Frijol P-V	17.1	120	2.1	1495	0.14	1.4 ^s
	Frijol O-I	17.1	74	1.3	1311	0.10	1.4 ^r
	Guayaba	16.6	85	1.4	3242	0.04	1.3 ^q
	Cultivo simple en microcuenca MIAF	Maíz	17.4	418	7.3	2231	0.33
Cultivo simple en microcuenca MIAF	Frijol P-V	17.1	84	1.4	1495	0.10	
	Frijol O-I	17.1	50	0.9	1311	0.07	
	Guayaba	16.6	60	1.0	3242	0.03	
	MBMV	Maíz	17.4	541	9.4	2231	0.42
MLCP		17.4	420	7.3	2231	0.33	

^zMateria seca de grano de maíz, frijol y fruto de guayaba.

^yRadiación global acumulada en el período comprendido desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de cada especie. Para maíz de 118, frijol P-V 78, frijol O-I 82 y guayaba 192 días, a partir del 24 de junio del 2009.

^xEficiencia de conversión de radiación en materia seca. Es igual al cociente de la energía en la MS y la RG diaria acumulada x 100.

^wEs la ECR relativa, el cociente de la ECR de cada especie en el sistema MIAF y la ECR en cultivo simple.

^{v, u, t}ECRR del maíz en el sistema MIAF con respecto al maíz en cultivo simple en la microcuenca MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP.

^{s, r, q}ECRR del frijol de P-V, O-I y guayaba en el sistema MIAF con respecto a sus cultivo simple en la microcuenca MIAF.

Rosenberg *et al.* (1983), han señalado como apropiada una eficiencia en la conversión de radiación a biomasa total en maíz de 1% a 1.5%. El maíz bajo el sistema MIAF superó el valor superior de ese intervalo en 0.34% (Cuadro 2.30), lo que demuestra su mayor eficiencia en el aprovechamiento de la radiación con respecto al cultivo simple de maíz en el sistema MBMV que presentó una eficiencia que se encuentra dentro de esos valores, y al sistema MLCP con una eficiencia ligeramente menor al valor inferior de ese intervalo. Estos resultados se atribuyen a que el maíz al estar flanqueado por el frijol, desarrolló un mayor índice de área foliar, mayor interceptación y una mejor

distribución de la radiación fotosintéticamente activa que le permitió llegar en mayor proporción a las hojas inferiores.

El aprovechamiento de los recursos luz, agua y nutrientes para el maíz resultó aún más eficiente en la etapa R3 (granos en estado lechoso) en virtud que el frijol se encontraba en madurez fisiológica, etapa en la cual disminuye sus requerimientos de agua y nutrimentos, y también a que la abscisión de las hojas provocó que la radiación interceptada disminuyera y permitiera mayor penetración de luz a las hojas inferiores del maíz. Estos resultados difieren de los reportados por Loaiza (1986) en maíz unicultivo y en maíz-frijol asociados dentro de una misma hilera. En el primero porque la mayor parte de la radiación se interceptó de la parte media hacia arriba; y en el segundo por una reducción del área foliar que condujo a una menor eficiencia de conversión de la radiación fotosintéticamente activa y del rendimiento del maíz, aunque en términos de proporción de superficie equivalente fuera superior al frijol o maíz unicultivo (Loaiza, 1986).

La eficiencia en la conversión de radiación a biomasa total y grano del maíz y frijol en el sistema MIAF, se debió al arreglo ordenado de las hileras intercaladas de esas especies y a la diferencia en su sistema radical que les permitió explorar diferentes estratos del suelo, procurando mayor aprovechamiento del agua y nutrientes del frijol en MIAF con respecto al unicultivo. En secciones anteriores se mencionó que en el ciclo de primavera-verano en el sistema MIAF, la radiación fotosintéticamente activa interceptada en el frijol fue de 38 y 60% en la fecha de floración del frijol y en llenado de grano, respectivamente, y fue menor en 15% al cultivo simple; lo cual pareció no afectarlo debido a la mayor eficiencia que presentó en la conversión de energía.

Con el objetivo de demostrar lo anterior, con los datos de radiación global durante el ciclo del frijol de primavera-verano de 85 días se hizo el siguiente ejercicio. En este período, se tuvo una radiación global acumulada de 1495 MJ m^{-2} que equivalen a $1872 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Bajo el supuesto que la RFA es aproximadamente el 50% de la radiación global (Connor y Loomis, 2002), entonces la RFA promedio que le llegó al cultivo del frijol por día fue de $936 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Este ejercicio demuestra que la siembra del frijol bajo el sistema MIAF y para las condiciones tropicales propias de la zona de estudio no

constituye problema alguno en la competencia por energía solar, ya que la fotosíntesis del frijol alcanza su punto de fotosaturación a $743 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Anundo *et al.*, 1982 y Azcon *et al.*, 2004, citado por Morales *et al.*, 2005), por lo que este sistema es más eficiente, ya que aún con menor cantidad de radiación produce mayor cantidad de biomasa y grano por metro cuadrado.

Acosta (1985) y Loaiza (1986) mencionan que lo anterior resulta diferente cuando la asociación con maíz es dentro de una misma hilera, debido a que la eficiencia de conversión de la radiación del frijol es menor que en monocultivo. Esto se atribuye a la competencia interespecífica en una misma área y a que no se tiene una cobertura de follaje propia del frijol por área que permita una mayor interceptación por metro cuadrado.

La eficiencia en la conversión de radiación en biomasa total y grano, resultó menor en el frijol de O-I en el sistema MIAF. Esto se atribuye a que en este ciclo, la precipitación pluvial de 301 mm proporcionó menor condición de humedad en el suelo, respecto al ciclo de P-V que presentó 553 mm. Al respecto, Núñez *et al.* (1998) determinaron que el déficit hídrico principalmente en la etapa de inicio de floración del frijol, disminuyó rápidamente el índice de área foliar causando una disminución significativa de la interceptación de la luz y también una reducción de la conductancia estomática, fotosíntesis y producción de materia seca. Acosta *et al.* (2007) determinaron que el déficit hídrico en frijol ocasionó una reducción de la biomasa del vástago y de la raíz del 41%. Esto a la vez repercutió en una disminución del rendimiento con respecto al testigo de 41 y 46% con sequía moderada y severa respectivamente.

2.7.10 Eficiencia en el uso del agua de los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

En los Cuadros 2.32 y 2.33, se observa que el maíz bajo el sistema MIAF comparado con el cultivo simple en los módulos de la microcuenca MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP, presentó una eficiencia relativa en el uso del agua en la formación de biomasa total superior en 100, 60 y 100% y en grano de 70, 50 y 70%, respectivamente. Así también la eficiencia del maíz en el sistema MIAF de $6.9 \text{ g biomasa kg}^{-1} \text{ agua}$ resultó ser superior en 4.1 al de $2.76 \text{ g biomasa kg}^{-1} \text{ agua}$ bajo

cultivo simple, reportado por Shantz y Piemeisel (1987) citado por Medrano *et al.*, (2007). En el caso del frijol de PV, O-I y guayaba bajo el sistema MIAF, presentaron una eficiencia relativa en el uso del agua superior al cultivo simple de 50, 30 y 50% para biomasa total y de 30 y 70% para grano de frijol y 50% para fruto de guayaba respectivamente.

Cuadro 2.32. Eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa total de maíz, frijol y guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).

Sistema	Especie	ETRef ^z (mm)	Kc ^y	ET ^x real (L m ⁻²)	MS total ^w (g m ⁻²)	EUA ^v (gMS/kg agua)	EUAR ^u
MIAF	Maíz	443	0.8	354	2419	6.9	2.0 ^t 1.6 ^s 2.0 ^r
	Frijol P-V	329	0.7	230	530	2.3	1.5 ^q
	Frijol O-I	214	0.7	150	330	2.2	1.3 ^p
	Guayaba	460	0.7	322	300	0.9	1.5 ^o
Cultivo simple en microcuencia MIAF	Maíz	443	0.8	354	1245	3.5	
	Frijol P-V	329	0.7	230	351	1.5	
	Frijol O-I	214	0.7	150	258	1.7	
MBMV	Guayaba	460	0.7	322	199	0.6	
MLCP	Maíz	443	0.8	354	1510	4.3	
		443	0.8	354	1210	3.4	

^zEvapotranspiración de referencia.

^yCoefficiente de cultivo del frijol=0.7 Doorembos y Pruit, 1986; del maíz=0.8 Vela, 2001; de guayaba= 0.7 Bernardo, 1995.

^xEvapotranspiración real. Litros de agua evapotranspirada en el período comprendido desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de cada especie. Para maíz de 118, frijol P-V 78, frijol O-I 82 y guayaba 192 días, a partir del 24 de junio del 2009.

^wMateria seca de raíces, tallo, hojas y fruto, acumulada en el período comprendido desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de cada especie.

^vEficiencia en el uso del agua en materia seca. Es igual al cociente de la MS y la ET real.

^uEUA relativa. Cociente de la EUA de cada especie en el sistema MIAF y en cultivo simple.

^{t, s, r}EUAR del maíz en el sistema MIAF con respecto al maíz en cultivo simple en la microcuencia MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP

^{q, p, o}EUAR del frijol de P-V, O-I y guayaba en el sistema MIAF con respecto a sus cultivo simple en la microcuencia MIAF.

En el frijol bajo el sistema MIAF su valor de eficiencia en la formación de biomasa en los ciclos de P-V y O-I fue superior en 0.9 y 0.8 a lo reportado por Morales *et al.* (2005) de 1.4 gMS/kg agua en cultivo simple, respectivamente. En el caso de la eficiencia en la formación de grano, su valor superó por 0.1 a la eficiencia de 0.4 reportada por el

mismo investigador. En otros estudios se reportan tendencias similares en la producción de biomasa al evaluar maíz y frijol asociados, en relación a monocultivos en diferentes ambientes (Rezzende y Ramalho, 1994; Francis *et al.*, 1982).

Cuadro 2.33. Eficiencia en el uso del agua en la producción de grano de maíz, frijol y fruto de guayaba en los sistemas milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).

Sistema	Especie	ETRef ^z mm	Kc ^y	ET real ^x L m ⁻²	MS ^w grano g m ⁻²	EUA ^v g MS kg agua	EUAR ^u
MIAF	Maíz	443	0.8	354	718	2.0	1.7 ^t 1.5 ^s
	Frijol P-V	329	0.7	230	120	0.5	1.7 ^r 1.3 ^q
	Frijol O-I	214	0.7	150	74	0.5	1.7 ^p
	Guayaba	460	0.7	322	85	0.3	1.5 ^o
	Cultivo simple en microcuenca MIAF	Maíz	443	0.8	354	418	1.2
	Frijol P-V	329	0.7	230	84	0.4	
	Frijol O-I	214	0.7	150	50	0.3	
	Guayaba	460	0.7	322	60	0.2	
MBMV	Maíz	443	0.8	354	541	1.5	
MLCP		443	0.8	354	420	1.2	

^zEvapotranspiración de referencia.

^yCoefficiente de cultivo del frijol=0.7 Doorembos y Pruit, 1986; del maíz=0.8 Vela, 2001; de guayaba=0.7 Bernardo, 1995.

^xEvapotranspiración real. Litros de agua evapotranspirada en el período comprendido desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de cada especie. Para maíz de 118, frijol P-V 78, frijol O-I 82 y guayaba 192 días, a partir del 24 de junio del 2009.

^wMateria seca del grano de maíz y frijol, y fruto de guayaba.

^vEficiencia en el uso del agua en materia seca. Es igual al cociente de la MS y la ET real.

^uEUA relativa. Cociente de la EUA de cada especie en el sistema MIAF y en cultivo simple.

^{t, s, r}EUAR del maíz en el sistema MIAF con respecto al maíz en cultivo simple en la microcuenca MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP

^{q, p, o}EUAR del frijol de P-V, O-I y guayaba en el sistema MIAF con respecto a sus cultivo simple en la microcuenca MIAF.

Por otra parte, en el frijol del ciclo O-I en el sistema MIAF se observó una mayor diferencia en la eficiencia de uso del agua en la producción de grano respecto al ciclo P-V. Esto pudo deberse a que en este ciclo las últimas lluvias se presentaron en la primera semana de octubre y el cultivo tuvo que completar su ciclo con la humedad residual del suelo.

La mayor eficiencia en el uso del agua en el maíz bajo el sistema MIAF, se debió al arreglo ordenado de las hileras intercaladas de las tres especies y la diferencia en la profundidad de su sistema radical que les permitió explorar diferentes estratos del suelo, lo que permitió un mejor aprovechamiento del agua y nutrientes. En este sentido, durante la estación de crecimiento, los árboles de guayaba intercalados tienen una menor competencia con el maíz y el frijol por agua y nutrientes, mientras que en el cultivo simple la competencia es entre los mismos árboles en la hilera y entre hileras de árboles por el traslape de raíces. Al respecto, Medrano *et al.*, (2007) menciona que entre otros factores, la densidad y profundidad del sistema radical de la planta es un factor determinante en la disponibilidad real de agua para las plantas, ya que esto determina el volumen de suelo explorado.

2.8 CONCLUSIONES

Generales

1. El sistema milpa intercalada con árboles frutales es una alternativa tecnológica multiobjetivo pro-sustentable para las pequeñas unidades de producción ya que presenta una mayor productividad e ingresos económicos con respecto a los sistemas maíz con barreras muro vivo y maíz en labranza cero con pastoreo. Al mismo tiempo contribuye a la seguridad alimentaria, ya que incluye el cultivo de maíz y frijol necesarios para la alimentación de las familias rurales.
2. El sistema milpa intercalada con árboles frutales debido al arreglo topológico de los árboles frutales, maíz y frijol, es más eficiente en el uso de la radiación solar y agua del suelo, con respecto al maíz en cultivo simple con barreras de muro vivo y en labranza cero con pastoreo, lo que conduce a una mayor productividad e ingresos económicos sin perder capacidad de conservación del suelo y agua.

Específicas

1. Los sistemas MIAF y MBMV debido a sus características de manejo contribuyeron a mejorar la fertilidad del suelo a través de la pendiente de la ladera de cada microcuena, mismas que influyeron sobre la productividad de los cultivos. El efecto

más inmediato fue determinado sobre las áreas receptoras establecidas aguas arriba del filtro de sedimentos de cada sistema. Así también, la caracterización de la fertilidad de cada microcuenca es factible de ser tomado como base para monitorear a futuro el efecto de los sistemas estudiados sobre la sustentabilidad del uso y manejo de los recursos suelo y agua.

2. Existe una relación entre la posición del suelo en la ladera en función de la pendiente (baja, media y alta) con las condiciones de fertilidad del mismo y por consiguiente una respuesta al nivel de fertilización aplicado. Esto establece la premisa de realizar estudios de factibilidad técnica y económica de tratamientos de fertilización acordes a los gradientes de fertilidad en el sentido de la pendiente (agricultura de precisión).
3. La sección receptora localizada aguas arriba del filtro de escurrimientos de los sistemas MIAF y MBMV, donde ocurre la acumulación de sedimentos, nutrimentos y la infiltración del agua se incrementa, contribuye al incremento del rendimiento del frijol y maíz sembrados en esa área. Por ello es importante fortalecer cada vez más el filtro con el fin de promover la estabilización del suelo y la formación de la terraza y con ello extender el efecto benéfico a hileras del cultivo con una posición más alejada de esta área.
4. El sistema milpa intercalada con árboles frutales por medio de la interacción agronómica positiva entre los árboles frutales, maíz y frijol permite una mayor eficiencia en el uso de los recursos suelo, agua y luz, lo que da lugar a una mayor productividad de las pequeñas unidades de producción, y contribuye con servicios ambientales al disminuir la contaminación del agua e incrementar la captura de carbono.

2.9 LITERATURA CITADA

Abraham, C.T. and Singh, S.P. 1984. Weed management in sorghum-legume intercropping systems. J. Agr. Sci. 103:103-115.

Acosta, D.E. 1985. Crecimiento, rendimiento y aprovechamiento de la energía solar en maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en unicultivo y asociados.

- Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 136 p.
- Acosta, D.E.; Acosta, G.J.A.; Amador, R.M.D. y Padilla, R.J.S. 2005. Relación entre el índice de área foliar y rendimiento en frijol bajo condiciones de secano. *Agric. Tec. Méx.* 34.
- Acosta, D.E.; Amador, R.D.M.; Padilla, R.J.S.; Gómez, D.P. y Valadez, M.H. 2007. Biomasa y rendimiento de frijol tipo Flor de Junio bajo riego y sequía. *Agric. Téc. Méx.* 33(2):153-162.
- Agbenin J.O. and Tiessen, H. 2000. Soil properties and their variations on two contiguous hillslopes in Northeast Brazil. *CATENA* 24(2):147-161.
- Altieri, S.M.A. 1994. Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agric. Téc. (Chile)*. 54(4):371-386.
- Amanullah.; Bahadar, M.K.; Shah, P.; Maula. N. and Arifullah, S. 2009. Nitrogen levels and its time of application influence leaf aerea, height and biomass of maize planted at low and high density. *Pak. J. Bot.* 41(2):761-768.
- Andrade, B.O. y Rodríguez P.O.S. 2002. Evaluación de la eficiencia de barreras vivas como sistemas de conservación de suelos en ladera. *Bioagro* 14(3):123-133.
- Anundo, P.; Pérez, G. y Camacho, S. 1982. Respuesta fotosintética de algunas variedades de maíz y café. *Revista Colombiana de Química* 11(2):63-82.
- Barile E.R. and Sangalang J.B. 1990. Variation in sunlight reduction under the canopy of different coconut cultivars and hybrids. *The Philippine Agriculturist (Philippines)* 73 (3):287-295.
- Bayalaa, J.; Kheng, H.L.; Van Noordwijkc, M.V. and Jean, O.S. 2008. Hydraulic redistribution study in two native tree species of Agroforestry parklands of West African dry savanna. *Acta Oecologica*.30:1–9 uptake. *Advances in Agronomy* 22:159-201.
- Below, G.J. 2004. Fruit-tree-based agroforestry in the Wester highlands of Guatemala: An evaluation of tree-crop interactions and socioeconomic characteristics. Tesis of Doctor of philosophy. University of Florida. 217 p.
- Ben Salah, H.; Beiji, A. and Salah H. 1989. Effects of windbreak protection on fava bean production. *Annales de l' Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie. Special*: 125-137.

- Berendse, F. (1979) Competition between plant populations with different rooting depths. I. Theoretical considerations. *Oecologia* 43:19-26.
- Bernardo, S. 1995. Manual de irrigação. 6a. edição. Viosa. UFV. 657 p.
- Bibalis, D.; Papastylianou, P.; Konstantas, A.; Patsiali, S.; Karkanis, A. and Efthimiadou, A. 2010. Weed-suppressive effects of maize-legume intercropping in organic farming. *International Journal of pest management*. 56(2):173-181.
- Boote, K.B.; Jones, J.W. and Pickering N.B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88:704-716.
- Bowen, D.G. 1985. Roots as a component of tree productivity. In Cannell M.G. and Jackson J.E. (1985). *Tree as crop plants*. British library. England.
- Buol, S.W.; Hole, F.D. and McCracken, R.J. 2008. Génesis y clasificación de suelos. Editorial Trillas. México. 270 p.
- Burgess, S.S.O.; Adams, M.A.; Turner, N.C and Ong, C.K. 1998. Redistribution of water within plant root systems. *Oecologia* 115:306-311.
- Cadena, I.P. 2004. Actores, estrategias y dinámicas de organización en el agro de la frailesca, Chiapas. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México. 145 p.
- Calderón, B.F.; Dardon, D.; Yin, M.L. y Hwang, L.L. 2000. Cultivo de guayaba Tailandesa (*Psidium guajava* L.). Instituto de y Tecnología Agrícola. Guatemala, Centro América. 24 p.
- Caldwell, M.M.; Dawson, T.E. and Richards, J.H. 1998. Hydraulic lift: Consequences of water efflux for roots of plants. *Oecologia* 11:151–161.
- Camacho, R.G.; Garrido, O.; Lima, M.G.; 1995. Caracterización de nueve genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en relación a área foliar y coeficientes de extinción de luz. *Sci. Agric.* 52(2):294-298.
- Carmelino, H.S.; Silva, C.A.; Vilela, R.A. Corazza, J.E. Shozo, S.L. y Satoshi, H. 2010. Sensibilidade do clorofilómetro para diagnostico nutricional de nitrogenio no milho. *Cienc. Agrotec. Lauras*. 34(3):688-697.
- Castellanos, Z.J.; Uvalle, B.X. y Aguilar, S.A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2da. Edición. Colección INCAPA. Instituto de

- Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, Guanajuato, México. 226 p.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).1991. Madreado *Gliricidia sepium* (Jacquin) Kunth: especie de árbol de uso múltiple en América Central. Colección de guías silviculturales No. 4. Informe Técnico No. 180. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 79 p.
- Casanova, F.; Ramírez, L. y Solorio, F. 2007. Interacciones radiculares en sistemas agroforestales: mecanismos y opciones de manejo. Avances de Investigación Agropecuaria 11(3):41-52.
- Caviglia, O.P.; Sadras, V.O. y Andrade, F.H. 2004. Intensification of agricultura in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water y radiation in double-cropped wheat-soybean. Field Crops. Res. 87:117-129.
- Connor, D.J. y Loomis, R.S. 2002. Ecología de cultivos. Productividad y manejo en sistemas agrarios. Ed. Mundi prensa. Madrid, España. 155 p.
- Correa, E.A.A. 2007. Ordenes de experimentación en diseños factoriales. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad de Catalunya. España. 225 p.
- Cortés, F.J.I.; Turrent, F.A.; Díaz, V. P.; Claro, C.P.; Hernández, R.E.; Aceves, R. E. y Mendoza, R.R. 2007. La milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) una tecnología multiobjetivo para las pequeñas unidades de producción. En *Desarrollo agropecuario forestal y pesquero. Agenda para el desarrollo*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Coordinador José Luis Calva. p.105.
- Cox, D.R. 1952. Some recent work on systematic experimental design. Journal of Royal Statistical Society.14:2.
- Damián, N.A.; González, H.V.; García, S.P.; Peña, V.C.B. y Livera. M.M. 2006. Dinámica y diagnóstico nutrimental del Guayabo en Iguala, Guerrero, México. *Terra Latinoamericana* 24(1):125-132.
- Doorembos, J. y Pruit, W.O. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. Manual 24. Riego y Drenaje. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia.
- Dulormne, M.; Sierra, J. y Solvar, F. 2003. Capacidad de secuestro de carbono y nitrógeno en un sistema agroforestal de *Gliricidia sepium* en clima tropical sub-húmedo. In *Agroforestería para la producción animal en América Latina-II*. Estudio FAO producción y sanidad animal 155. Sánchez, M.D. y M. Rosales M.M. (eds.) Roma, Italia. 93-98 pp.

- Eastham, J. And Rose, C. W. 1988. Pasture evapotranspiration under varying tree planting density in an Agroforestry experiment. *Agric. Water manage.*15: 87-105.
- Evensen, C.L.J. y Yost.1984. Seasonal yield variation, green leaf manuring and eradication of *Leucaena leucocephala*. MSc thesis, University of Hawaii, USA. 155 p.
- Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO). 2008. Land and Water Development Division. Crop Water Management (Maize-Bean). AGLW, Water Management Group. Rome, Italy. 210 p.
- Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO). 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelo. Boletín de tierras y agua de la FAO No. 8. Roma, Italia. 220 p.
- Fernández, E.C.M.; Davey, C.B. and Sanchez, N.C. 1990. Alley cropping on an Ultisol: Mulch, fertilizer and hedgerow root pruning effects. *Agronomy Abstracts*. 56 p.
- Francis, C.A.; Flor, C.A. y Prage, M. 1977. Effects of bean association on yield and yield components of maize. *Crop. Sci.* 18:245-247.
- Francis, C.A., Prager, M. y Tejada, G. 1982. Density interactions in tropical intercropping. I. Maize and climbing bean. *Field Crop Res.* 5:163-176.
- Francisco, N.N. 2005. Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo simple doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México. tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.121 p.
- Friday, J.B. and Fownes, J.H. 2002. Competition for light between hedgerows and maize in alley cropping system in Hawaii, USA. *Agroforestry systems* 55(2):125-137.
- Fuksa, P.; Kocourkova, D.; Haki, J. y Kalista, J. 2006. Influence of weevil infestation on the calorific value and chemical composition of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Diseases and Protection* 20:823-830.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª ed. México D.F. 217 p.
- Gliessman, S.R. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. Editorial AGRUCO-CATIE. Turrialba, Costa Rica. 244 p.

- González, E. Adrián. 1999. Macroeconomic Dynamics under NAFTA: A Dynamic General Equilibrium Model of Mexico. Department of Applied Economics. University of Minnesota. Minneapolis-Saint Paul, M. N.
- González, M.L.; Etchevers, B.J.D. y Hidalgo, M.C. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* 42:741-751.
- Guerra, E. y Bautista, D. 2002. Contenido foliar de elementos nutricionales en tres clones de guayaba (*Psidium guajava* L.) en época de alta actividad de crecimiento. *Bioagro* 14(2):99-104.
- Guevara, V.S. 2003. Estimación de la radiación solar. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. UNATSABAR-CEPIS/OPS. 7-8 pp.
- Hay, R.K.M. & Walker, A.J. 1989. An introduction to the physiology of crop yield. Essex, UK, Longman Scientific and Technical.
- Jackson, N.; Wallace, J. and Ong, C. 2000. Tree pruning as a means of controlling water uses in an agroforestry system in Kenia. *For. Ecol. Manag.* 126:133-148.
- Kang, B.T.; Grime, H. y Lawaon, T.1985. Alley cropping sequentially cropped maize and cowpea with leucaena on a sandy soil in southern Nigeria. *Plant and Soil* 85:267-277.
- Kang, H.; Shannon, D.A.; Prior, S.A. y Arriaga, F.J. 2008. Hedgerow pruning effects on light interception, water relations and yield in alley-cropped maize. *Journal of Sustainable Agriculture.* 3(4):115-137.
- Kempthorne, O. 1975. The design and analysis of experiments. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington, N.Y. 153 p.
- Khan, F.; Bhatti, A.U. y Khattak, R.A. 2001. Soil and nutrient losses through sediment and surface runoff under maize mono-cropping and maize-legume, intercropping from up-land sloping field. *In Pakistan journal of Soil Science.* 19(2): 32-40.
- Khanduja., S, and V. Garg. 1980. Nutritional status of guava *Psidium guajava* L. trees in North Indian J. Hort. Sci. 55 (4):433-435.
- Kruk, B. y Satorre, E.H. 2003. Densidad y arreglo espacial del cultivo. pp. 279-318. *In: Producción de cultivos de granos. Bases funcionales para su manejo.* Satorre, E.H.; Benech-Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E. y Savin, R. (eds). Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires Argentina. 59-65 pp.

- Lafitte, H.R. 2001. Fisiología del maíz tropical. *In* El maíz en los trópicos. Paliwal R.L. (ed.). Organización para la Agricultura y Alimentación. 45-47 pp.
- Lehmann, J. 2003. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant and Soil* 255:319-331.
- Li, Y.; Lindstrom, M.J.; Frielinghaus, M. and Bork, H.R. 2001. Quantifying the spatial patterns of soil redistribution and soil quality on two constrasting hillslopes. *In* D.E. Stoot, Mohtar, R.H. and Steinhardt G.C. (eds.). *Sustaining the global Farm*. Purdue University. USA. 556-563 pp.
- Li, F.; Cohen, S.; Naor, A.; Shaozong, K. and Erez, A. 2002. Studies of canopy structure and water use of apple trees on three rootstocks. *Agric. Water Mang.* 55:1-14.
- Liyanage D.V.; Mankey T.; Luntungan H.; Djisbar A. and Sufiani S. 1986. Coconut Breeding in Indonesia. *Cocos (Indonesia)* 4:1-10.
- Livera, M.M. 1991. Retos y perspectivas del fotomejoramiento: Algunos aspectos del ambiente físico en relación a la producción y productividad de los cultivos. *Rev. Fitotec. Mex.* 14:23-29.
- Loaiza, V.J.M. 1986. Crecimiento y aprovechamiento de la energía solar del maíz (*Zea mays* L.) en asociación con frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 150 p.
- López L., A.; Villar S., B.; López B., W.; Zamarripa M., A.; Turrent F., A.; Garrido R., E.; López M., J.; Betanzos M., E. y Camas G., R. 1999. Manual de diagnóstico prescripción para el cultivo de maíz en el estado de Chiapas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Sur, Campo Experimental Centro de Chiapas. Ocozocoautla, Chis. 292 p. (Publicación especial No. 5). 230 p.
- López, B.W.; Camas, G.R. y López, M.J. 2000. Sistemas agroforestales con *Gliricidia sepium* para controlar erosión de los en el trópico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Sur, Campo Experimental Centro de Chiapas. Ocozocoautla, Chis. 64 p. (Folleto técnico No. 10). 32 p.
- Medina, O.L.J.; Bravo, E.M.; Prat, C.; Martínez, M.M.; Ojeda, T.E. y Serrato, B.B.E. 2008. Pérdida de suelo, agua y nutrientes en un Acrisol bajo diferentes sistemas agrícolas en Michoacán, México. *Agric. Tec. Mex.* 34(2):201-211.

- Medrano, H.; Bota, J.; Cifre, J.; Flexas, J.; Ribas, C. M. y Gulias, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43:63-84.
- Midmore, D.J. 1993. Agronomic modification of resource use and intercrop productivity. *Field Crops Res.* 34:357-380.
- Mills, H.A. y Jones, B.J. 1996. *Plant analysis Handbook II*. Micro-macro Publishing. Athens, Georgia, U.S.A.
- Morales, R.E.J.; Escalante, E.J.A.; Tijerina, C.; Volke, H.V. y Sosa, M.E. 2005. Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y de la radiación solar del agrosistema girasol-frijol. *Terra Latinoamericana* 24:55-64.
- Morris, R.A. and Garrity, D.P. 1993. Resource capture and utilization in intercropping-water. *Field Crops Res.* 34:303-317.
- Moss J.R.J. 1992. Measuring light interception and the efficiency of light utilization by the coconut palm (*Cocos nucifera*). *Experimental Agriculture (UK)* 28:273-285.
- Monteith, J. 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. London B.* 281:277-294.
- Mutchler, C.K., Murphree, C.E. y McGregor, K.C. 1988. Laboratory and field plots for soil erosion studies. *In Soil erosion research methods*. Lal (ed.). SWCS Publ., Ankeny. 9-38 pp.
- Nair, P.K.R. 1979. Intensive multiple cropping with coconut in India: principles programmes, prospects. *Advancing Agronomy and Crop Science*. Verlag Paul Parey, Berlin (Germany) 6.145 p.
- Nakasone H.Y., and R.E. Paul. 1998. Tropical fruits. Ed. Biddles. United King. 164-165 pp.
- Nieuwkoop, V.M.; López, B.W.; Zamarripa, M.A.; Cadena, I.P.; Villar, S.B. y de la Piedra, C.R. 1992. Uso y Conservación de los Recursos Naturales en La Frailesca, Chiapas. Un Diagnóstico. México. D.F. CIMMYT. 47 p.
- Novoa, S.A.R. y Villagran, A.N. 2002. Evaluación de un instrumento medidor de clorofila en la determinación de niveles de nitrógeno foliar en maíz. *Agric. Téc. Méx.* 62(1):166-171.

- Núñez, B.A.; Ritchie J. y Smucker, J.M.A. 1998. El efecto de sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común. *Agronomía Mesoamericana* 9(1):1-8.
- Odhiambo, H.; Ong, C.; Deans, J.; Wilson, J.; Khan, A. and Sprent, J. 2001. Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya. *Plant Soil* 235:221-233.
- Padilla, R.J.S.; Acosta, D.E.; Gaytan, B.R. y Rodríguez M.V.M. 2005. Índice de área foliar en frijol de temporal y su relación con biomasa y rendimiento. *Agric. Téc. Méx.* 31(2):213-219.
- Pereira, B.F.M.; Cobucci, T.; Kumar, F.N. y Neves, M.P. 2008. Determinacao da necessidade de adubacao nitrogenada de cobertura no feijoeiro irrigado com auxilio do clorofilometro portátil. *Ciencia Rural* 38(7):1843-1848.
- Piekielek, W.P. and Fox, R.H.1992. use of chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agron. Journal.* 84:59-65.
- Rezzende, G.D. y Ramalho, M.A. 1994. Competitive ability of maize and common bean cultivars intercropped in different environments. *J. Agric. Sci.* 123:185-190.
- Roberts, M.J.; Long, S.P.; Tieszen, L.L. and Beadle, C.L. 1985. Measurement of plant biomass and net primary production. In: *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Edit. por Coombs y Hall. Pergamon Press. 1-9 pp.
- Rojas, G. 2003. Evaluación financiera de la construcción de dos biodigestores para el tratamiento de las aguas residuales en los beneficios de café de la unión regional de pequeños productores de café S.S.S. de Huatusco, Veracruz. Colegio de Postgraduados. Tesis de Maestría. Montecillo, México. 135 p.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.L. y Verna, S.B. 1983. *Microclimate. The biological environment*, Jhon Wiley and Sons, Inc. Nueva York. E.U.A. 495 p.
- Salton, J.C. y Mielniczuk, J. 1995. Relacoes entre sistemas de preparo, temperatura e unidade de um podzólico vermelho-escuro de El dorado do Sur. *Revista Brasileira de Ciencia do solo Campinas* 19(2):313-319.
- Sánchez, P. 1981. *Suelos del trópico, características y manejo*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, C.R. 172 p.
- Schroder, J.J.; Neeteson, J.J.; Oenema, O. and Struik, P.C. 2000. Does de crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? *Field Crops Research* 66:151-164.

- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre 2002. 85 p.
- Shibles, R. 1976. Committee Report: Terminology pertaining to photosynthesis. *Crop Sc.* 16:437-439.
- Singh, A. and Dhaliwal, G.S. 2007. Solar radiation interception and its effect on physical characteristics of fruits of Guava cv. Sardar. *Acta Hort.* 735:297-302.
- Singh, V.K. and Singh, G. 2007. Photosynthetic efficiency canopy microclimate and yield of rejuvenated Guava trees. *Acta Hort.* 735:249-257.
- Soil, Survey Staff. 2006. Claves para la taxonomía de suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Traducción al español de C.A. Ortiz S. y Ma. C. Gutiérrez C. Programa de Edafología. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 325 p.
- Trejo, M.J.A.; Z.G. Alejandro.; R.O. Jesús.; A.N.R.; F.H. Manuel.; S.S.E.; R.R, José. y V.V. Cirilo. 2006. Efecto de la densidad y estructura del dosel de maíz en la penetración de la radiación solar. *ΦYTON* 75:47-53.
- Tsubo, M.; Walker, S. and Mukhala, E. 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Res.* 71:17-29.
- Tsubo, M. y Walker, S. 2004. Shade effects on *Phaseolus vulgaris* L. intercropped with *Zea mays* L. under well-watered conditions. *Crop Science* 190(3):168-176.
- Turrent, F.A.; Uribe, G.S.; Francisco, N.N. y Camacho, C.R. 1995. La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México. I. Análisis del desarrollo de las terrazas durante 6 años. *Terra Latinoamericana* 3(3):276-298.
- University of Hawaii. 2002. Farmer's bookshelf. An information system of tropical crops in Hawaii. Department of Tropical Plant & Soil Sciences. Guava- w.w.w. Farmer's Bookshelf.mht.
- Uribe, G.S.1997. Manejo pro-sustentable de laderas con terrazas de muro vivo en el trópico subhúmedo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

- Uribe, G.S.; Francisco, N.N. y Turrent F.A. 2002. Perdida de suelo y nutrimentos en un Entisol con prácticas de conservación en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36:161-168.
- Vela, M.A. 2001. Desarrollo de un modelo de balance de agua en los suelos de Castilla-La Mancha, sobre un sistema de información geográfica: condiciones de aplicación y limitaciones. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 300 p.
- Villar, S.B.; López, S.E. y Tosquy, V.O.H. 2009. Negro Grijalva, nuevo cultivar de frijol para el trópico húmedo de México. *Agric. Tec. Mex.* 35(3):355-358.
- Zamora, S.S.; Fenech, L.L.; Ruíz, E.F.H.; Pérez, D.W. y López, G.A. 2007. Eficiencia en el uso del agua en maíz (*Zea mays* L.) con riego por goteo, en el Valle de la Paz, Baja California Sur, México, *Rev. Cienc. Tec. Agropec.* 16(3):33-36.

CAPÍTULO III. IMPACTO DE TRES SISTEMAS DE USO Y MANEJO DEL SUELO EN EL CONTROL DE LA EROSION HIDRICA Y PÉRDIDA DE NITROGENO Y FOSFORO EN TERRENOS DE LADERA EN CHIAPAS

3.1 INTRODUCCIÓN

En la región tropical de México, las actividades productivas mal planeadas y sin prácticas de conservación son un riesgo por su efecto en la degradación de los recursos naturales. Particularmente, en la agricultura de ladera se origina el problema de la degradación del suelo por erosión hídrica como producto de las actividades antrópicas que disminuyen la cubierta vegetal y aumentan el efecto de los agentes naturales de la erosión. Históricamente, la erosión hídrica ha sido el factor central de la no sustentabilidad de las laderas desprotegidas de México; tasas de erosión que sobrepasan los límites permisibles son lugar común (Martínez, 1983; Martínez y Lasso, 1991 y Arias y Figueroa, 1992). La pérdida de la capa arable por este proceso disminuye la productividad del suelo y aumenta el riesgo de cultivo asociado a la sequía hasta el grado de hacer improductivos los cultivos en ladera.

La erosión o pérdida de suelo es el principal problema edáfico de México. SEMARNAP (1996), estimó una pérdida anual de 535 millones de toneladas de sedimentos; de éstos, 69% descarga al mar y 31% se deposita en embalses de obras hidráulicas abatiendo significativamente su vida útil. Más recientemente se considera que existen 20.7 millones de hectáreas con grados de erosión hídrica potencial, de severa a muy severa (SEMARNAP, 2002). Cortés *et al.*, (2007) menciona que aproximadamente el 80% de la superficie total del país está afectada por diferentes grados de erosión con una tasa de erosión hídrica promedio a nivel nacional de 2.8 toneladas de suelo por hectárea anualmente medida en la desembocadura de los ríos. Por otra parte, desde 1983 se estimaba que 43% de los suelos de México habían perdido 25 a 75% de su capa arable y su productividad había disminuido en 33% (García, 1987 y Vázquez, 1986).

Cadena (2004) menciona que en Chiapas, se dedican al cultivo de maíz 860,000 hectáreas, de las cuales aproximadamente el 60% se encuentran en laderas en las

cuales la actividad agrícola se ha realizado con un mínimo control del efecto sobre los recursos naturales. Las unidades de producción son menores de 5 hectáreas y se ubican en tierras marginales donde la degradación del suelo tiene un alto costo agroecológico que afecta su productividad, por lo que la producción obtenida es insuficiente para satisfacer las necesidades de alimentos e ingreso de las familias campesinas. En éstas se han cuantificado pérdidas de $22.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de suelo bajo el manejo tradicional de los productores, con una disminución del rendimiento de maíz de $0.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Arellano y López, 2004).

El efecto negativo de la erosión del suelo puede minimizarse por medio de diferentes sistemas de uso y manejo de la tierra que reducen la erosividad de la lluvia y el escurrimiento superficial. Una opción es la labranza de conservación que disminuye la pérdida de suelo hasta en un 80%, la lixiviación de nutrimentos en un 73% y de los escurrimientos superficiales en un 76% en relación con la labranza tradicional (Tiscareño *et al.*, 1997). De acuerdo con Nair *et al.* (1994), los sistemas agroforestales pueden reducir la erosividad de la lluvia y escurrimiento debido a la presencia de capas múltiples de dosel vegetal que disminuyen considerablemente la velocidad de la caída de las gotas de lluvia y la severidad de su impacto en el suelo.

Se ha documentado que el establecimiento de terrazas de muro vivo en contorno y labranza de conservación son prácticas efectivas en la conservación del suelo y agua que disminuyen el escurrimiento, y retienen los sedimentos y nutrimentos. Ramírez y Oropeza (2001) en terrenos de ladera cultivados con maíz en La Frailesca, Chiapas con 1434 mm de precipitación, determinaron que la pérdida de suelo en el sistema de labranza tradicional fue de 7.9 t ha^{-1} , con barrera viva de *Gliricidia sepium* con surcado al contorno 2.9 t ha^{-1} y 2.4 t ha^{-1} en labranza de conservación con manejo de residuos.

En un Entisol con 15% de pendiente cultivado con maíz en Los Tuxtlas, Veracruz, los coeficientes de escurrimiento promedio anual fueron 31% en labranza tradicional, 16% en terrazas de muro vivo con setos y tracción mecánica, 15% en terrazas de muro vivo y tracción animal, y 17% en labranza de conservación; las pérdidas anuales de suelo fueron 199, 13, 3 y 1 t ha^{-1} , las pérdidas promedio de nitratos en el escurrimiento

superficial fueron 17, 23, 24 y 9 kg ha⁻¹ año⁻¹ y las de potasio 19, 16, 16 y 13 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Uribe *et al.*, 2002).

Estudios sobre la pérdida de productividad del cultivo de maíz asociada a la erosión indican que el rendimiento de grano de maíz decrece en función de los años. Para las condiciones tropicales de México, López (1993) evaluó el impacto de la erosión sobre la productividad del maíz en laderas durante seis años. Durante este período, la pérdida acumulada de suelo fue de 250 ton, y el rendimiento de maíz se redujo en un 70% al pasar de 5.55 a 1.85 t ha⁻¹, lo que representa una pérdida anual de 0.6 t ha⁻¹. Este abatimiento se atribuyó a la disminución de potasio, materia orgánica, conductividad hidráulica y a un aumento de la densidad aparente. Pérez *et al.* (1998) encontraron que la tasa anual de pérdida de rendimiento de grano de maíz fue de 3.4 y 7.0 kg ha⁻¹ año⁻¹, para Faeozem y Leptosol, respectivamente. Así mismo, el rendimiento de maíz disminuye con la pérdida de suelo acumulado.

De lo anterior, puede constatarse que el efecto negativo que causa la erosión del suelo puede minimizarse por medio de diferentes sistemas de manejo de la tierra para reducir la erosividad de la lluvia y el escurrimiento superficial y mantener y/o mejorar la productividad del suelo. Sin embargo, presentan el inconveniente de requerir recursos económicos para su implementación y a la vez no presentar a corto plazo incrementos importantes en el rendimiento que cubran la inversión y satisfacer las necesidades económicas de la familia de los pequeños productores. Por lo tanto, esta es la razón principal por la cual su adopción ha sido limitada por los pequeños productores que cuentan con recursos económicos limitados. Un caso diferente es el de los grandes productores que cuentan con capacidad económica para invertir y no verse afectados por el tiempo que la tecnología empezaría a dar beneficios. Un caso que ejemplifica lo anterior es el sistema de labranza cero, el cual debe pasar por un período de acondicionamiento para que sus beneficios empiecen a ser evidentes. Mientras esto sucede, la labor de siembra se dificulta por la mayor cobertura, así como podría darse un proceso de inmovilización temporal del nitrógeno. Por otra parte, en los primeros años es necesario hacer mayor uso de pesticidas para el control de malezas y plagas rizófagas. Todo lo anterior puede ser solventado por los grandes productores que

cuentan con maquinaria y capital para cubrir las necesidades que implica el uso de este sistema, pero no así para el pequeño productor.

Por lo anterior, se ha propuesto el sistema agrícola de cultivo denominado Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF). Este sistema es una tecnología alternativa que a diferencia de las terrazas de muro vivo y la labranza cero considera, además de la sostenibilidad ecológica, mayor diversidad de opciones alimentarias, aumentar el ingreso neto a través del año, mayor oportunidad de empleo mejor remunerado, reducción de riesgos por clima y mercado y captura de carbono. Por todos estos beneficios, este sistema resulta más atractivo para los productores, de manera que actualmente se encuentra en la fase de adopción en los estados de Oaxaca, Veracruz, México y Chiapas (Cortés *et al.*, 2007).

Dentro del aspecto de sostenibilidad ecológica, se le atribuye al sistema MIAF la minimización del proceso erosivo de los suelos de ladera; sin embargo, hay pocos estudios que comprueben fehacientemente lo antes dicho, excepto por uno realizado por Martínez (2004) en Oaxaca a nivel de lotes de escurrimiento. En éste, los resultados no son del todo concluyentes en relación al impacto de este sistema sobre el control de la erosión hídrica, debido a que las lluvias presentes en la zona de estudio fueron de larga duración y baja intensidad, lo cual no contribuyó a una manifestación importante de la remoción y transporte de sedimentos por el agua.

Por otra parte, la mayoría de las evaluaciones en los sistemas con barreras vivas, terrazas de muro vivo en contorno, labranza de conservación y sistema MIAF, se han realizado en lotes de escurrimientos que por estar circunscritas a áreas pequeñas delimitadas físicamente, no permiten un análisis eficiente e integral de la erosión sobre todo en laderas abruptas. Lo anterior también se explica a que no se toma en cuenta que en realidad el proceso erosivo en una parcela presenta zonas de remoción y de entrega del suelo debido a variantes en su topografía, y por consiguiente los datos de escorrentía y pérdida de sedimentos generalmente son sobreestimados (Mutchler *et al.*, 1988). Al respecto Lal (1976), menciona que hay prácticas de conservación que sólo deben ser evaluadas a nivel de cuencas.

Con base en lo antes expuesto, se considera pertinente estudiar el impacto de las prácticas de conservación del suelo sobre el proceso erosivo a nivel de microcuencas, bajo el supuesto que es la manera más adecuada para desarrollar la investigación hidro-sedimentológica que permita un análisis integral del proceso erosivo y una extrapolación de los resultados más segura y acorde a las condiciones reales.

3.2 OBJETIVO

Evaluar la eficiencia de los sistemas milpa intercalada con árboles frutales, maíz con barreras de muro vivo y maíz en labranza cero con pastoreo en el escurrimiento superficial, y pérdida de suelo y nutrimentos en condiciones de ladera a nivel de microcuenca.

3.3 HIPÓTESIS

No existe diferencia en la eficiencia en la reducción de la pérdida de suelo, el escurrimiento y la cantidad de nutrimentos, por efecto de los componentes y manejo de los sistemas milpa intercalada con árboles frutales, maíz con barreras de muro vivo y maíz en labranza cero con pastoreo.

3.4 MATERIALES Y METODOS

Este estudio se realizó en tres microcuencas manejadas con los sistemas milpa intercalada con árboles frutales, maíz con barreras de muro vivo y maíz en labranza cero con pastoreo durante los meses de junio a noviembre del año 2009 correspondiente al ciclo primavera-verano, bajo condiciones de temporal. La metodología para el establecimiento de cada sistema ya ha sido descrita en el capítulo dos de esta tesis. Las características de cada microcuenca se mencionan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Características generales de las microcuencas estudiadas.

Características	Microcuencas		
	MIAF ^z	MBMV ^y	MLCP ^x
Área (m ²)	3339	1886	1515
Forma	Cóncava-convexa	Convexa	Convexa
Longitud de la pendiente (m)	60	48	50
Pendiente (%)	42	30	30
Años de cultivo al inicio del sistema MIAF	10	5	5
Años con quema residuos	6	0	0
Años con < 30% cobertura	4	5	5
Años con sistemas de manejo.	3 ^u	2 ^v	2 ^w
No. hileras de árboles o setos de	7	6	0

^zMilpa intercalada con árboles frutales.

^yMaíz con barreras de muro vivo.

^xMaíz en labranza cero con pastoreo

^wDurante estos tres años la cobertura siguió siendo <30%, por el uso de los residuos como alimento de los animales.

^vDurante los dos años la cobertura siguió siendo < 30% pero debido en menor parte al uso como alimento para los animales, ya que se adicionó parte de los residuos al filtro de sedimentos.

^uDurante los tres años con MIAF, no se hizo uso de los residuos para alimento de los animales. La cobertura fue del 40% ya que parte de los residuos se adicionó al filtro de sedimentos.

3.4.1 Variables evaluadas y análisis estadístico

3.4.1.1 Precipitación pluvial

La precipitación se midió de forma continua de junio a octubre del año 2009 por ser el período principal de lluvias, mediante una caseta consola vantage pro automatizada marca Davis, que tiene como característica el registro sucesivo de una lámina acumulada de 0.5 mm de precipitación cada 5 minutos. La caseta se ubicó de manera que la precipitación medida fuera válida para las tres microcuencas que se encontraban aledañas. Para cada evento se elaboraron pluviogramas y se obtuvo la cantidad e intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (Foster *et al.*, 1981). Con estos datos se calculó la energía cinética y el índice de erosividad por evento y para todo el periodo de evaluación como la suma de estos (Wischmeier y Smith, 1978).

3.4.1.2 Escurrimientos y pérdida de suelo

Para evaluar el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo, se instalaron en la salida de cada microcuenca un vertedor tipo H con descarga máxima de 56.6 L s^{-1} , al que se le instaló una malla aguas arriba para retener gravas y piedras grandes, levelloggers Solinst previamente calibrados con un limnígrafo Rossbach tipo Stevens F-95 de resolución múltiple, que medía la lámina de agua del vertedor cada 5 minutos, y una rueda muestreadora tipo Coshocton, con capacidad para seleccionar un centésimo del escurrimiento. La colecta del escurrimiento y sedimento se realizó en recolectores con capacidad de almacenamiento de 400 L. Con el volumen de agua captado se calculó el escurrimiento superficial por evento, y mediante la suma de todos los eventos, se cuantificó el escurrimiento anual en cada microcuenca. El coeficiente de escurrimiento se obtuvo por medio del cociente entre la lámina escurrida y la precipitada y el índice de degradación específica por medio del cociente entre la producción de sedimentos y el área de cada microcuenca (Moreno, 2005). La entrega de sedimentos en cada evento de lluvia, se determinó tomando una muestra de agua con sedimentos totales en suspensión, que se secó a $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en una estufa de aire forzado. En la Figura 3.1, se ilustra a manera de ejemplo la instrumentación en la microcuenca MIAF.



Figura 3.1. Instrumentación de la microcuenca con el sistema milpa intercalada con árboles frutales.

3.4.1.3 Contenido de nutrientes en el sedimento y agua escurrida

La determinación de nitritos, nitratos y fósforo total del suelo y del agua de escurrida, se realizó en seis eventos de mayor precipitación pluvial, debido a restricciones económicas. Para ello se tomó una muestra de 1 L de agua con suelo en suspensión, la cual se almacenó a 4 °C. El análisis consistió en determinar las formas solubles de N-NO_3^- , N-NO_2^- y fósforo total. Los nitratos se evaluaron por colorimetría con ácido nitrofenoldisulfónico y los nitritos por colorimetría con Diazoticias (Cataldo *et al.*, 1975). El fósforo total en el suelo se evaluó por el método de Olsen, y en el agua por colorimetría con cloruro estanoso (Allan, 1971).

3.4.1.4 Análisis estadístico

Por medio de la técnica de regresión en Microsoft® Excel se realizaron determinaciones de las relaciones entre la lluvia, escurrimiento superficial, índices de erosividad de la lluvia y pérdida de sedimentos, así como la prueba estadística de T para las variables lámina escurrida y producción de sedimentos en cada sistema establecido en cada una de las tres microcuencas.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Precipitación pluvial

En la Figura 3.2 se presenta la precipitación registrada del 9 de junio al 14 de octubre del 2009. La precipitación total fue de 1055 mm distribuida en 59 eventos de lluvia concentrándose el 49% (497 mm) en los meses de junio y julio. También, se puede observar que a partir de la segunda quincena de julio a la primera de agosto, se presentó la sequía intraestival obteniéndose únicamente 163 mm de lluvia, la cual coincidió con la etapa de floración femenina del maíz en los tres sistemas y llenado de grano del frijol en el sistema MIAF. Por otra parte algo inusual fue la presencia de lluvias importantes en la segunda quincena de octubre (172 mm) causadas por la presencia de una tormenta tropical, la cual benefició al cultivo de frijol de otoño-invierno que se sembró a mediados de septiembre.

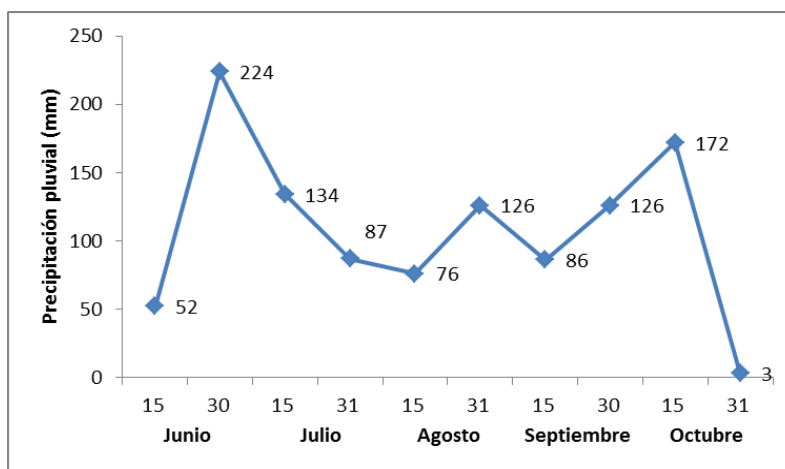


Figura 3.2. Distribución quincenal de la precipitación pluvial en el año 2009, en el sitio experimental Unión Agrarista Mpio. de Jiquipilas, Chiapas.

Del total de eventos de lluvia, 54% presentaron erosividad, y 15% con precipitación mayor a 40 mm e intensidades de 11 a 22 MJ/ha representaron el 62% de la erosividad anual de la lluvia. Veintisiete eventos (46%) no presentaron potencial erosivo con precipitaciones menores a 12 mm y de baja intensidad $< 25 \text{ mm h}^{-1}$ (Cuadro 3.2), de acuerdo con la clasificación de lluvias erosivas (Hudson, 1981). Esto último resulta similar a lo observado en condiciones tropicales por López y Anaya (1994) en laderas de la Frailesca, Chiapas y Pérez *et al.* (2005) en Veracruz, México.

Cuadro 3.2. Clasificación de los eventos de lluvia en base a los milímetros de precipitación, intensidad y erosividad durante los meses de junio a noviembre del 2009.

Clase (mm)	Eventos (número)	% del total	Precipitación (mm)	Intensidad (mm h)	Erosividad total (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	% del total
0.2 – 12	27	46	107	< 25	-	-
13 – 26	17	29	250	32	2571	15
27 – 40	6	10	209	55	4089	23
40	9	15	499	140	10989	62
TOTAL	59	100	1055		17649	100

El índice de erosividad de la lluvia EI30 presentó alta relación de dependencia lineal $R^2 = 0.87$ con la precipitación, descrita por la ecuación $Y = -275.3 + 26.0 X$, lo cual coincide con Pérez *et al.*, (2005), quienes determinaron esta relación con una $R^2 = 0.75$ para una precipitación anual de 2228 mm. Estos resultados confirman que el índice de erosividad se explica por la cantidad de lluvia por evento (Flores *et al.*, 2009).

3.5.2 Escurrimiento superficial y pérdida de suelo

De los 59 eventos de lluvia, 32 presentaron escurrimiento superficial y producción de sedimentos (Cuadro 3.2). Los valores más bajos de escurrimiento anual, coeficiente de escurrimiento y producción de sedimentos de los sistemas MIAF y MBMV, respectivamente demuestran la bondad de ambos sistemas agroforestales en la conservación del suelo y agua (Cuadro 3.3). Resultados similares han sido obtenidos en el sistema MIAF con árboles de durazno de tres años de edad (Martínez, 2004), maíz con terrazas de muro vivo en los Tuxtlas, Veracruz por (Francisco *et al.*, 2005 y Uribe *et al.*, 2002) y maíz con barreras vivas en La Frailesca, Chiapas (Ramírez y Oropeza, 2001). El escurrimiento superficial con una relación lineal positiva con la precipitación anual $R^2=0.83$ y el índice de erosividad $R^2=0.74$, coincide con los resultados de Francisco (2005) y Pérez *et al.* (2005) en el sentido que para condiciones de manejo con sistemas agroforestales, el escurrimiento superficial depende más de la cantidad, y en segundo lugar de la intensidad de la lluvia.

Se considera que la producción de sedimentos en cada microcuenca no es el estimador más recomendable en virtud que las tres microcuencas presentan diferente área y esto influye sobre la magnitud de los sedimentos evaluados. Por ello se utilizó la degradación específica, la cual conjuntamente con el escurrimiento superficial fueron estadísticamente diferentes entre los sistemas de manejo. El sistema MLCP presentó un valor superior en 68 mm y 11 t ha^{-1} , de escurrimiento y degradación específica, respectivamente en comparación al sistema MIAF (Cuadro 3.3).

El valor de 16.8 t ha^{-1} de suelo erosionado en MLCP es superior aunque por poco margen al límite permisible de 12 t ha^{-1} (El-Swaify, 1993), y presenta una amplia diferencia con lo reportado por Ramírez y Oropeza (2001) en la Fraylesca, Chiapas, y

Uribe et al. (2002) y Francisco (2005) en Los Tuxtlas, Veracruz, de 0.2, 1 y 2.4 t ha⁻¹, respectivamente en condiciones tropicales incluso con 350 mm de lluvia, superior a la presentada en este estudio.

Cuadro 3.3. Escurrimiento superficial y pérdida de suelo acumulados por sistema de manejo del suelo durante los meses de junio a octubre del 2009.

Sistema de manejo	Área (m ²)	Escurrimiento superficial ^z (mm)	Coefficiente de escurrimiento (%)	Producción sedimento (t año ⁻¹) ^z	Degradación específica (t ha ⁻¹)
MIAF ^x	3339	137.5 a ^y	12.4	1.9	5.7 a
MBMV ^w	1880	142.7 a	13.1	1.2	6.3 a
MLCP ^v	1515	205.0 b	18.6	2.5	16.8 b

^z El agua escurrida y entrega de sedimento fue evaluada en la época de lluvias correspondiente a los meses de junio a octubre del año 2009.

^y Valores en una misma columna seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes (P≤0.05)

^x Milpa intercalada con árboles frutales.

^w Maíz con barreras de muro vivo.

^v Maíz en labranza cero con pastoreo.

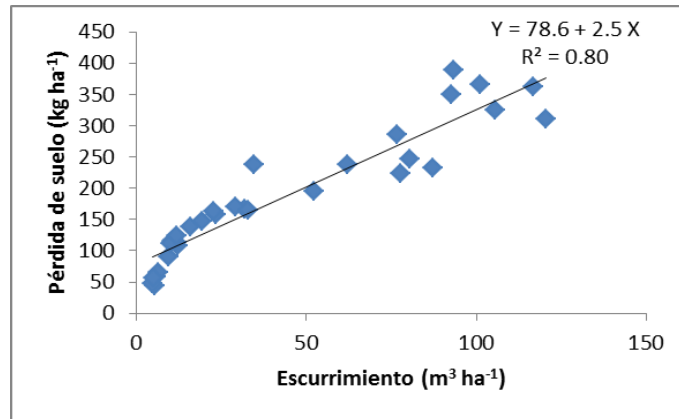
Lo anterior puede deberse a que el suelo en el sistema MLCP estuvo manejado con menos del 30% de cobertura por residuos de rastrojo de maíz, ocasionado por la práctica de sobrepastoreo en la época de estiaje (Nieuwkoop *et al.*, 1992), lo cual resulta insuficiente para proteger el suelo del desprendimiento y remoción (FAO, 1992) exponiéndose mayor tiempo a los agentes erosivos. Lo anterior plantea la necesidad de modificar esta práctica, a manera que constituya una alternativa de manejo de suelo pro-sostenible en condiciones de alta precipitación e intensidad de lluvias en terrenos de ladera.

Aunque puede objetarse la comparación de los resultados obtenidos en microcuencas de diferentes características, el mayor escurrimiento y pérdida de suelo en el sistema MLCP confirma el alto riesgo de degradación de los suelos en las regiones tropicales, por efecto del clima característico, la baja estabilidad de sus suelos y el manejo inadecuado de los recursos naturales (Lal y Stewart, 1990). Entre los sistemas MIAF y MBMV no se observó diferencia significativa; no obstante, es importante destacar la

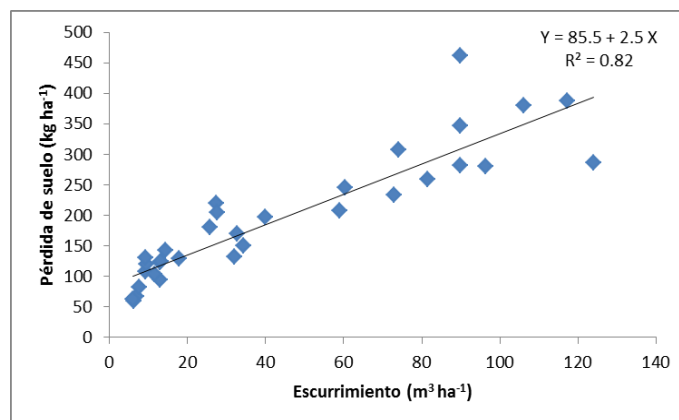
eficiencia del sistema MIAF, al estar establecido en una microcuenca con mayor grado y longitud de la pendiente. Lo anterior se atribuye por una parte, a la siembra alterna de hileras de frijol. La cuál debido a su rápido crecimiento vegetativo, procura una excelente cobertura protegiendo al suelo de su remoción por el impacto de las gotas de lluvia, así como el fortalecimiento del filtro de escurrimientos con material producto de la poda de los árboles de guayaba y rastrojo de maíz y frijol. En terrazas de muro vivo con ocho años de manejo también se han determinado menores cantidades de suelo erosionado, lo cual difiere de los sistemas MIAF, MBMV y MLC con tres y dos años de establecidos, respectivamente. Por lo tanto, se espera que es posible minimizar el escurrimiento y pérdida de suelo conforme los sistemas se estabilicen más, se fortalezca el filtro de escurrimiento y se incremente la cantidad de residuos de cosecha como cobertera a través de los años.

En la Figura 3.3 a, b, c, se muestra la relación del suelo perdido en función del escurrimiento. Se puede observar que en los tres sistemas, la relación entre ambas variables fue lineal. En consecuencia, al aumentar el escurrimiento en cada evento, se incrementó la producción de suelo perdido. Este incremento sucedió en diferente escala por las distintas eficiencias asociadas a los sistemas de manejo del suelo. Las ecuaciones que relacionan el suelo perdido y escurrimiento en MIAF y MBMV presentaron la R^2 más baja, mientras que la mayor R^2 fue para MLCP.

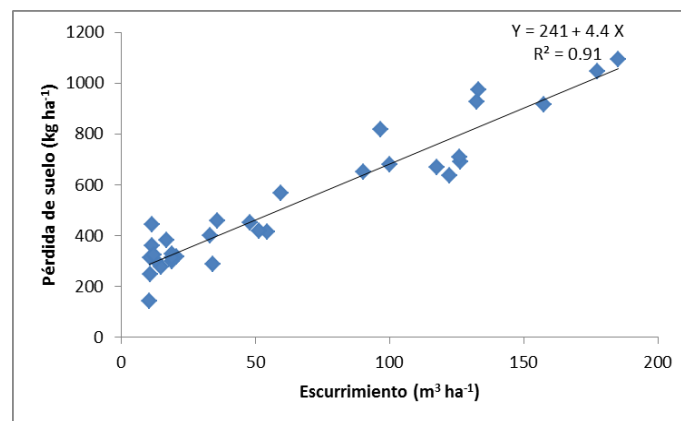
También la mayor pendiente se asoció a la ecuación del sistema MLCP, lo que implica mayor potencial de producción de suelo perdido, por la ausencia de prácticas para disminuirlo.



(c)



(b)



(a)

Figura 3.3. Relación de la pérdida de suelo (Y, kg ha⁻¹) con el escurrimiento (X, m³ ha⁻¹) para los sistemas a) maíz en labranza cero con pastoreo, b) maíz con barreras de muro vivo, y milpa intercalada con árboles frutales.

Con el fin de determinar el efecto de los sistemas de uso y manejo del suelo sobre el comportamiento del escurrimiento, se analizó el hidrograma correspondiente a una lluvia de 22.8 mm del 3 de agosto (Figura 3.4 y Cuadro 3.4), 40 días después de la siembra cuando el maíz se encontraba próximo a floración masculina y el frijol en plena floración, por lo que su cobertura fue máxima. La lluvia acumulada en los 5 días previos al evento fue de 45.6 mm, que originó una condición cercana a la saturación en el suelo.

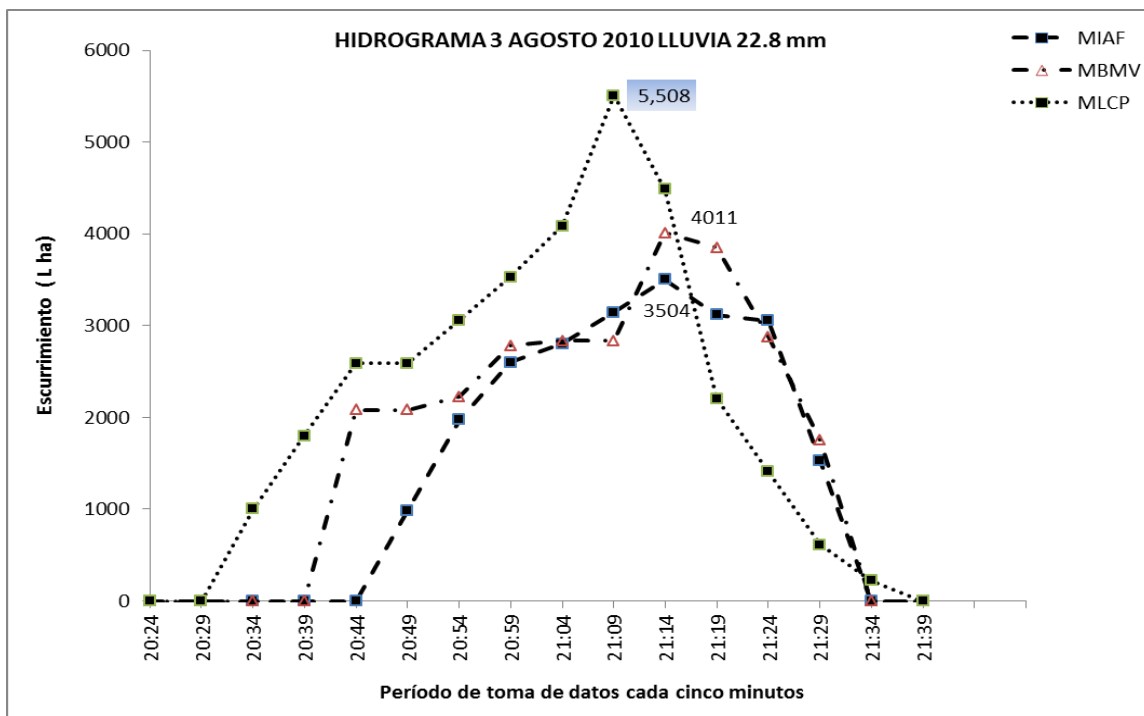


Figura 3.4. Hidrograma del evento del 3 de agosto del 2009 en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP.

Las características del hidrograma indican que en el sistema MLCP el escurrimiento ocurrió rápidamente, a los 10 minutos después del inicio de la lluvia, alcanzando también en menor tiempo el pico máximo de escurrimiento, y a la vez el de mayor tiempo de duración de escurrimiento, y cantidad que en MBMV y MIAF (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Características de la lluvia y escurrimiento superficial del 3 de agosto del 2009

Parámetro	Sistema		
	MIAF	MBMV	MLCP
Lluvia (mm)	22.8		
Intensidad máxima (mm hr ⁻¹)	41.6		
Inicio y final de la lluvia (h:min)	20:24 – 21:34		
Inicio de escurrimiento (min)	20:49	20:44	20:34
Duración del escurrimiento (min)	45	50	65
Lamina escurrida (mm)	2.27	2.73	3.31
Coefficiente de escurrimiento	0.1	0.12	0.15
Tiempo al pico (min)	50	50	45

En los sistemas, MBMV y MIAF el escurrimiento ocurrió después de 20 y 25 minutos de iniciada la lluvia. En el sistema MIAF se tuvieron los menores valores de lámina de escurrimiento, por lo que se sugiere que es la mejor alternativa de manejo para disminuir la pérdida de suelo y escurrimiento. Los resultados también indican que el mayor uso de residuos de cosecha, así como el rápido crecimiento del frijol que prácticamente presenta una cobertura del 100%, juegan un papel importante en el flujo de agua superficial.

3.5.3 Pérdida de nutrimentos

En los tres sistemas de manejo el contenido de nitrógeno en forma de nitratos y nitritos fue mayor en el agua de escurrimiento, y para fósforo total en el sedimento. El contenido total de ambos nutrientes (agua+sedimento) excepto por el nitrato en el caso de MBMV, son similares en los tres sistemas; sin embargo, si se considera la cantidad total de agua escurrida entre ellos expuesto anteriormente, los nutrimentos perdidos resultan mayores en el sistema MLCP (Cuadro 3.5). Esto puede tener implicaciones negativas en el rendimiento y en la contaminación del manto freático ya que indica que aun cuando un sistema de conservación disminuye la pérdida de suelo, existe cierta cantidad de nutrimentos en el agua escurrida que se transportan a las cuencas bajas.

Los contenidos de nutrimentos en el escurrimiento (agua + sedimento) tienden a ser menores para los sistemas MIAF y MBMV, excepto por la concentración de nitratos que es mayor en el sistema MBMV y fósforo total en MIAF (Cuadro 3.5). Respecto a los nitratos, los resultados son similares a lo reportado por Uribe *et al.* (2002), quien lo atribuye a los aportes de nitrógeno por la descomposición del follaje de *Gliricidia* producto de la poda. En este estudio se incorporaron al filtro de sedimentos, durante dos años 3.6 kg de follaje de *Gliricidia* por metro lineal de barrera el cual contiene 4% de nitrógeno (Gómez *et al.*, 1996). En cuanto a la cantidad de fósforo en MIAF, se explica porque el suelo ha recibido una cantidad mayor de este elemento del orden de 82 kg ha⁻¹ año a través de la fertilización que se realiza a los árboles de guayaba, durante tres años. La pérdida de nitratos y fósforo en la microcuenca con el sistema MBMV es mayor a lo reportado por Uribe *et al.* (2002) en terrazas de muro vivo con tracción animal TMVTA en un Entisol de Veracruz, México. Esta diferencia está asociada a un mayor escurrimiento y una pérdida de suelo de 6.3 t ha⁻¹ año para MBMV, respecto a 2.8 t ha⁻¹ año para TMVTA.

Cuadro 3.5. Pérdida de nutrimentos en el suelo bajo tres sistemas de conservación.

Nutrimento	MIAF ^z			MBMV ^y			MLCP ^x		
	Promedio		Total (ppm)	Promedio		Total (ppm)	Promedio		Total (ppm)
	6 eventos ^w			6 eventos			6 eventos		
	Agua	Suelo		Agua	Suelo		Agua	Suelo	
NO ₃ ⁻ (ppm)	9.2	3.8	13.0 ^v	26.3	5.6	31.9	12.3	5.0	17.3
NO ₂ ⁻ (ppm)	5.3	1.1	6.4 ^u	4.6	0.8	5.4	3.8	2.1	5.9
P total (ppm)	0.4	15.0	15.4 ^t	0.4	10.3	10.7	0.7	21.1	21.8

^zMilpa intercalada con árboles frutales.

^yMaíz con barreras de muro vivo.

^xMaíz en labranza cero con pastoreo.

^wEventos de máxima precipitación de junio a noviembre del año 2009. 16, 24 y 28 de junio; 10 de julio; 19 de septiembre y 5 de octubre, con precipitaciones de 40 a 76 mm.

^{t, u, v}Se refiere a la pérdida de fósforo, nitrito y nitrato en el promedio de los seis eventos, respectivamente.

Tiscareño *et al.* (1997), mencionan que la labranza de conservación es una opción para disminuir la pérdida de suelo hasta en 80%, reducir la fuga de nutrimentos en 73% y disminuir los escurrimientos superficiales en 76% en relación con la labranza tradicional. En este sentido y de acuerdo a los trabajos de Uribe *et al.* (2002), se esperaba que el sistema MLCP presentará un escurrimiento, pérdida de suelo y

nutrimentos similares a los sistemas MIAF y MBMV, sin embargo esto no fue así, y se debe a que estos procesos están asociados a factores hidrológicos, edáficos y de manejo en los sistemas de producción (Haygarth y Jarvis, 1999). En este caso se considera obedece a que las microcuencas están localizadas en condiciones de laderas abruptas de fuerte pendiente, en donde la cobertura del suelo con rastrojo de maíz menor del 30% no representó una buena protección al impacto de las lluvias, remoción y transporte de las partículas del suelo. De hecho en estas condiciones, incluso una mayor cobertura no es suficiente para controlar el proceso erosivo, siendo necesario incluir otras prácticas de conservación como serían las barreras de muro vivo y la milpa intercalada con árboles frutales.

3.6 CONCLUSIONES

1. El sistema milpa intercalada con árboles frutales y maíz con barreras de muro vivo presentaron la menor producción de sedimentos a nivel de microcuencas.
2. El sistema milpa intercalada con árboles frutales presentó mayor pérdida de fósforo total, respecto a maíz con barreras de muro vivo, y este a la vez la mayor pérdida de nitratos con respecto a los otros dos manejos, lo que se atribuye a características inherentes al manejo de cada sistema. En el primer caso se debe al aporte adicional de fósforo que se aplicó a los árboles frutales durante tres años. En el caso del nitrógeno por el aporte de follaje rico en nitrógeno, producto de la poda de los setos de *Gliricidia sepium*.
3. El sistema maíz en labranza cero con pastoreo presentó los valores más altos de pérdida de suelo, estando por arriba de los límites permisibles de 12 t ha^{-1} . De igual manera fue para el escurrimiento y pérdida de nutrimentos, lo que se encuentra asociado a la poca cantidad de rastrojo dejada por el pastoreo intensivo. Siendo necesario evitar la práctica de sobrepastoreo a manera que constituya una alternativa de manejo de suelo pro-sostenible en condiciones de alta precipitación e intensidad de lluvias en terrenos de ladera.

4. Los sistemas milpa intercalada con árboles frutales y maíz con barreras de muro vivo, son opciones técnicamente eficientes para el control de la erosión en condiciones de suelos de ladera y altas precipitaciones.

3.7 LITERATURA CITADA

- Allan, J. E. 1971. The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian Techtron, Walnut Creek, California. 15 p.
- Arellano, M. J.L. y López, M.J. 2004. Memorias. Tercer seminario sobre manejo y conservación el suelo y agua en Chiapas. Manejo Integral de Cuencas. p. 50.
- Arias, H.M., y Figueroa B.1992. La ecuación universal de pérdidas de suelos en la cuenca del río Texcoco. *Terra Latinoamericana* 10(2):257-261.
- Cadena, I.P. 2004. Actores, estrategias y dinámicas de organización en el agro de La Frailesca, Chiapas, Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.145 p.
- Cataldo, D.A.; Haroo, M.L.E. and Youngs,V.L.1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communication Soil Sci. Plant Analysis*. 6: 71-80.
- Cortés, T.H. 2004. Memorias. Tercer seminario sobre manejo y conservación el suelo y agua en Chiapas. Manejo Integral de Cuencas. p.145.
- Cortés, F.J.I.; Turrent, F.A.; Díaz, V. P.; Claro, C.P.; Hernández, R.E.; Aceves, R. E. y Mendoza, R.R. 2007. La milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) una tecnología multiobjetivo para las pequeñas unidades de producción. *In* Desarrollo agropecuario forestal y pesquero. Agenda para el desarrollo. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Coordinador José Luis Calva. p.105.
- El-Swaify, S.A. 1993. Soil erosion and conservation in the humid tropics. *In* World soil erosion and conservation. Pimentel, D. (ed.). University Press. Cambridge, U.K.. 233-235 pp.
- Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO). 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelo. Boletín de tierras y agua de la FAO No. 8. Roma, Italia. 220 p.

- Francisco, N.N.; Turrent, F.A.; Oropeza, M.J.L.; Martínez M.M. y Cortés, F.J.I. 2005. Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra latinoamericana* 24: 253-260.
- Francisco, N.N. 2005. Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 121 p.
- Flores, L.H.E.; Ireta, M.J.; Pérez, D.J.F.; Ruíz, C.J.U. y Díaz, M.P. 2009. Identificación de buenas prácticas agrícolas para reducir la degradación del suelo e incrementar la calidad del agua. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-CECAJ. 155 p.
- Foster, G.R.; McCool, D.K.; Renard, K.G. and Moldenhauer, W.C. 1981. Conversion of the universal Soil Loss Equation (USLE) to SI metric units. *J. Soil and Water Cons.* 36:355-359.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen (paraadaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4^a ed. México D.F. 217 p.
- Gómez, M.E.; Molina, C.H.; Molina, E.J. y Murgueito, E. 1996. Producción de biomasa en 6 ecotipos de matarratón (*Gliricidia sepium*). CIPAV. Livestock Research for Rural Development. Online edition. <http://www.lrrd.org/lrrd2/3/cont23.htm>.
- Haygarth, P.M. and Jarvis, S.C. 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Adv. In Agronomy.* 66:195-249.
- Hudson, N. 1981. Soil Conservation. Second Ed. Cornell University Press. Ithaca, NY., USA. 324 p.
- Lal, R. 1976. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria. III. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma* 16 (15): 389-401.
- Lal, R. and Stewart, B.A. 1990. Soil erosion and land degradation: the global risks. *Advances Soil Sci.* 11:129-172.
- López, M.J. 1993. Conservación y productividad de suelos en ladera de la Frailesca, Chiapas. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 177 p.
- López, M.J. y Anaya, G.M. 1994. Efecto de tres prácticas agronómicas sobre la conservación y productividad de suelos de ladera de la Frailesca, Chiapas. *Agric. Téc. Mex.* 20 (2): 113-132.

- Martínez, M.M. 1983. Perspectivas técnicas sobre la conservación y productividad de los suelos en México. *Terra Latinoamericana* 1:24-30.
- Martínez, M. y Lasso L.M. 1991. Efecto de la labranza tradicional y la labranza de conservación para el control de la erosión en el cultivo del maíz (*Zea mays*) bajo condiciones de temporal. *Terra latinoamericana* 9(1):97-103.
- Martínez, M.M. 2004. Proyecto Manejo Sustentable de Laderas. Caracterización geográfica y medición de escurrimientos. Informe 2004. Colegio de Postgraduados. [Http://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/Subproyecto A.htm](http://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/Subproyecto_A.htm).
- Moreno, B.A. 2005. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México. 376 p.
- Mutchler, C.K., Murphree, C.E. and McGregor, K.C. 1988. Laboratory and field plots for soil erosion studies, *In* Soil erosion research methods. Lal, R. (ed.). SWCS Publ., Ankeny. 9-38 pp.
- Nair, P.K.R.; Rao, M.R. and Fernández, E.C.M. 1994. Tree crop interactions in sustainable agroforestry systems. 15 th World Congress of Soil Science. Volume 7a. Commission, VI Simposia. 110-137 pp.
- Nieuwkoop, V.M.; López, B.W.; Zamarripa, M.A.; Cadena, I.P.; Villar, S.B. y de la Piedra, C.R. 1992. Uso y Conservación de los Recursos Naturales en La Frailesca, Chiapas. Un Diagnóstico. México. D.F. CIMMYT. 47 p.
- Pérez, N.J.; Volke, H.V.; Martínez, M.M. y Estrella, C.N. 1998. Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del estado de Oaxaca. *Agrociencia* 32:113-111.
- Pérez, N.J.; Valdez, V.E.; Hernández, M.S.R.; Ordaz, C.V. 2005. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en tres sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia* 39:4:409-418.
- Ramírez, C.M.E. y Oropeza M.J.L. 2001. Eficiencia de dos prácticas productivo-conservacionistas para controlar erosión en laderas en el trópico. *Agrociencia* 35:489-495.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 1996. Programa Forestal y de Suelos 1995-2000. México. D.F. 30-40 pp.
- Tiscareño, L.M.; Gallardo, V.M. y Velásquez, V.M.A. 1997. Impacto de los sistemas de labranza en la agricultura de laderas. *In*: Avances de investigación en Labranza de Conservación I. Libro técnico No. 1. Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible. INIFAP. Michoacán, México. 107-122 pp.

- Uribe, G.S.; Francisco, N.N. y Turrent F.A. 2002. Perdida de suelo y nutrimentos en un Entisol con prácticas de conservación en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36:161-168.
- Vázquez, A.V. 1986. La erosión y conservación del suelo en México. Realidades y Perspectivas. *Terra latinoamericana* 4:158-172.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion-a guide to conservation planning. USDA Agri. Handb. No. 537. US. Government Printing Office, Washington D.C. 58 p.

CAPÍTULO IV. CAPTURA DE CARBONO y CO₂ EN TRES SISTEMAS DE USO Y MANEJO DEL SUELO Y AGUA PARA LA AGRICULTURA SUSTENTABLE DE LADERAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Las actividades agropecuarias tienen en conjunto profundos efectos en el medio ambiente. Son la principal fuente de contaminación del agua por nitratos, fosfatos y plaguicidas, y también son la mayor fuente antropogénica de gases responsables del efecto invernadero, metano y óxido nitroso, los cuales contribuyen en gran medida a otros tipos de contaminación del aire y del agua.

La combustión de biomasa vegetal es otra fuente importante de contaminantes del aire que incluyen dióxido de carbono, óxido nitroso y partículas de humo. Se estima que los seres humanos son responsables del alrededor del 90% de la combustión de biomasa, principalmente a través de la quema deliberada de vegetación forestal, residuos de pastos y cultivos para favorecer el crecimiento de nuevos cultivos y destrucción del hábitat de insectos dañinos (FAO, 2002b). Datos de los últimos 1000 años, demuestran, que la concentración del CO₂ ha aumentado de 280 a más de 360 mg kg⁻¹ en 200 años, y que más del 50% de este incremento se ha producido después de 1950, con una tasa de alrededor de 0.8 mg kg⁻¹ por año (Amthor, 1998).

Los gases naturales son menos de una décima de un 1% del total de gases de la atmósfera, pero son vitales para formar una capa que conserva la temperatura de la Tierra a temperaturas adecuadas, sin esta capa la temperatura mundial sería 30°C más baja, sin embargo un exceso de estos gases también contribuyen al efecto invernadero. Se estima que entre el año 2000 al 2060 existirá un aumento en la temperatura de 1.5 °C (IPCC, 2007). Por su parte la FAO, (2002b) menciona que los 10 años más calientes han ocurrido desde 1983 y que en el año 2030 el incremento será de entre 0,5 y 1°C. Además, se prevé que las temperaturas globales medias aumenten entre 1.4°C y 5.8°C para 2100.

Las repercusiones del cambio climático en la agricultura en el mundo van a ser diferentes. En latitudes templadas, el calentamiento global puede significar beneficios para la agricultura. La superficie adecuada para los cultivos aumentarían, así como la duración del ciclo de cultivo; los rendimientos de los cultivos mejorarían y los bosques pueden crecer con mayor rapidez. Por otra parte, en las llanuras costeras puede verse reducida la superficie de tierra fértil por inundación e infiltración de agua de mar, donde se espera que el nivel medio del mar aumente de 15 a 20 cm para 2030, y 50 cm para 2100.

En regiones limitadas de agua, especialmente en los trópicos, el incremento de las temperaturas aumentará las pérdidas por evapotranspiración y reducirá los niveles de humedad del suelo. Algunas regiones de cultivo se harían inadecuadas y otras propicias para pastos tropicales pueden hacerse cada vez más áridas. El aumento de la temperatura también aumentará la gama de insectos dañinos para la agricultura e incrementará la capacidad de supervivencia de las plagas durante el invierno, que atacarán los cultivos de primavera. Las temperaturas globales más altas también harán que aumente la pluviosidad. Sin embargo, las precipitaciones no se distribuirán de la misma manera entre las distintas regiones de modo que algunas zonas tropicales tendrán menos precipitaciones que antes (IPCC, 2008).

También se espera que el clima se haga más variable que en la actualidad, con aumentos de la frecuencia e intensidad de perturbaciones extremas tales como ciclones, inundaciones, tormentas de granizo y sequías. Esto provocaría mayores fluctuaciones en los rendimientos de los cultivos y en la oferta local de alimentos, así como mayores peligros de desprendimientos de suelo y daños por erosión.

Por lo antes expuesto, la captura de carbono es una propuesta viable para disminuir las actuales tasas de liberación de CO₂ a la atmósfera. Para esto, es necesario desarrollar tecnologías para el uso y manejo del suelo en la producción de alimentos. Entre las más importantes están el mejoramiento de variedades, y las prácticas culturales, para aumentar los rendimientos (FAO, 2002b), y mejorar la eficiencia en la oferta y distribución de la energía, cambio en el uso de combustibles fósiles y energía

renovable, como por ejemplo: la energía solar, eólica, geotérmica y la bioenergía (IPCC, 2008).

En la actualidad, encontrar métodos de bajo costo para secuestrar carbono es una prioridad de política internacional en el contexto del interés creciente respecto al cambio climático global. El reconocimiento de la acumulación de CO₂ y otros gases efecto invernadero en la atmósfera superior, es la razón para mitigarla a través del mejoramiento del manejo de las tierras de labor para incrementar el almacenamiento de carbono en los suelos, restaurar los suelos degradados, y fomentar la reforestación y manejo forestal adecuado.

La cantidad de carbono que un suelo puede secuestrar y su distribución son funciones de las características del uso y manejo del suelo por medio de los sistemas de producción aplicados. Prácticas que aumentan la producción de biomasa total vegetal o que reducen la erosión y la oxidación microbiana de la materia orgánica, son efectivas para incrementar la captura del carbono atmosférico y mitigar los efectos ambientales negativos que causa el aumento del CO₂ atmosférico, además de que incrementan y preservan la calidad del suelo y mejoran la productividad agrícola (Carter *et al.*, 1997).

El Protocolo de Kyoto (ONU, 1998) reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas, ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases efecto invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros de carbono como los océanos, los bosques o el suelo a través de procesos físicos o biológicos como la fotosíntesis. Las tierras agrícolas y forestales presentan ciertas características que hacen posible la captura de carbono para mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases invernadero (FAO, 2002a).

El desarrollo de la agricultura tradicional ha implicado una gran pérdida de materia orgánica del suelo. Sin embargo, hay diferentes prácticas de manejo de tierras que pueden ser usadas para aumentar el contenido de la materia orgánica del suelo, tales como: el incremento de la productividad y de la biomasa, variedades, fertilización y

riego. Las principales formas de obtener un incremento de la materia orgánica en el suelo están asociadas a la agricultura de conservación, que incluye prácticas tales como la labranza mínima o cero y el uso de una cobertura vegetal continua y protectora formada por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo, entre otras. Las fuentes de materia orgánica también incluyen residuos orgánicos, composteo y cultivos de cobertura (FAO, 2002a).

El carbono del suelo tiende a incrementarse con las prácticas de labranza de conservación, porque menos materia orgánica del suelo es oxidada, y la temperatura tiende a bajar por efecto de la menor descomposición (Tate, 1987). La labranza de conservación puede incrementar la cantidad de carbono orgánico del suelo mediante la promoción de un ambiente que favorezca la descomposición fungosa sobre la bacteriana.

En los últimos años se ha reportado que el potencial de captura de carbono bajo no labranza y labranza con acolchado es de 300 a 500 kg C ha⁻¹ año⁻¹ y de 600 kg C ha⁻¹ año⁻¹ para labranza de conservación en camellón dentro de los primeros 20 cm de profundidad (Lal *et al.*, 1999). Tristan y Wilfred (2002) analizaron la tasa de carbono capturado usando una base de datos de 67 experimentos en campo de largo plazo y encontraron, que con el cambio de labranza tradicional a no labranza se puede secuestrar en promedio de 14 a 57 g C m⁻² año⁻¹ adicionales; estos valores resultan mayores que los reportados por Lal *et al.* (1999) de 10 a 50 g C m⁻² año⁻¹. Las rotaciones de cultivos producen más materia seca y de mejor calidad que los monocultivos. Algunos análisis de experimentos de largo plazo en Canadá indican que el carbono orgánico del suelo puede ser capturado durante 25 a 30 años a una tasa de 50 a 75 g C m⁻² año⁻¹ dependiendo del tipo de suelo (Dumanski *et al.*, 1998).

La agroforestería se encuentra dentro de las prácticas agrícolas de mayor importancia por su contribución en el secuestro de carbono, debido al potencial de almacén de carbono en sus especies vegetales múltiples y suelo, así como su aplicabilidad en tierras agrícolas y en reforestación.

Son varias las investigaciones que fundamentan la notable contribución de los sistemas intercalados en fomentar una mayor captura de carbono. Makumba *et al.* (2007) en un cultivo en callejones de maíz intercalado con *Gliricidia sepium* determinaron que la cantidad de carbono orgánico reciclado en este sistema vía incorporación de residuos de cultivo varió de 0.8 a 4.8 t C ha⁻¹ respecto a 0.4 a 1.0 t C ha⁻¹ por año en maíz unicultivo. Así también en *Gliricidia* con maíz se capturó hasta 5 t C ha⁻¹ a una profundidad de 0-20 cm después de 10 años de aplicaciones continuas del follaje de las podas, siendo 1.6 veces más que en maíz unicultivo, y el flujo de dióxido de carbono hacia la biomasa varió de 10 kg ha⁻¹ día⁻¹ a 28 kg C ha⁻¹ en maíz unicultivo y de 23 a 83 kg ha⁻¹ día⁻¹ en *Gliricidia* más maíz.

Dulorme *et al.* (2003) evaluaron el contenido de carbono y nitrógeno en un transecto entre dos hileras de *Gliricidia*, diez años después de su establecimiento. Ellos observaron que el contenido de ambos elementos tendió a aumentar a través de los años, permaneciendo una relación de C/N similar. Dentro de las parcelas con árboles se presentó un aumento promedio de 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en los primeros 20 cm de suelo, siendo significativamente mayor al observado en la parcela sin árboles de 200 kg N ha⁻¹. A la vez se detectaron menores valores entre hileras que los obtenidos sobre las hileras de *Gliricidia*.

En un sistema de álamo en unicultivo, la cantidad de C capturado por debajo del suelo fue de 15.1 t C ha⁻¹ a una densidad de 111 árboles por hectárea, mientras que intercalado con cebada fue de 78.5 t C ha⁻¹ respecto a cebada unicultivo de 65 t C ha⁻¹. El flujo neto de C estimado para álamo intercalado y cebada unicultivo fue de 13.2 y 2.9 t C ha⁻¹, respectivamente. Estos resultados demuestran que los sistemas intercalados tienen potencial para disminuir la concentración de CO₂ atmosférico comparado con los sistemas en unicultivo (Peichl *et al.*, 2006).

El sistema MIAF es un sistema de cultivo que al incluir prácticas agroforestales, que contribuyen en la obtención de mayores ganancias económicas, mejor conservación y mayor agrobiodiversidad. El uso de árboles frutales en altas densidades, plantados en contorno como muro vivo junto con la siembra de maíz y frijol, conserva el suelo y

restaura la tierra degradada de las laderas. Además tiene implícito la premisa básica de su potencial en la captura de carbono a través de los procesos bioecológicos de fotosíntesis, respiración y descomposición; sin embargo, hay pocos trabajos que hagan la evaluación en este sentido, por lo que se considera de suma importancia cuantificar el impacto de este sistema sobre la captura del dióxido de carbono a través de la conservación del carbono en el suelo y en la biomasa.

En el proyecto Manejo Sustentable de Laderas de las regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe, en el estado de Oaxaca de 1999 al 2005, se reportó que: 1) los incrementos de carbono en el suelo, fueron mayores en los sistemas de labranza de conservación y MIAF que en el uso de la tierra con labranza tradicional (3.7 vs $2.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$); 2) en el sistema MIAF, en general los árboles de durazno capturaron más carbono que los árboles de café. En parcelas de agricultores, la cantidad de carbono capturado varió de 0.7 a $1.21 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que fue aproximadamente 25% inferior al cuantificado en las parcelas experimentales. Por su parte Etchevers *et al.* (2005) reportaron en un trabajo de investigación sobre la medición de captura de carbono, que el sistema MIAF captura alrededor de 2 t/ha/año de carbono. Este estudio plantea la evaluación de la captura de carbono y CO_2 en tres sistemas contrastantes en el uso y manejo del suelo y agua a nivel de microcuencas, con énfasis en la evaluación de la contribución del sistema milpa intercalada con árboles de guayaba como especie frutal.

4.2 OBJETIVO

Analizar el impacto ambiental de los sistemas milpa intercalada con árboles frutales, maíz con barreras de muro vivo y maíz en labranza cero con pastoreo a través de su correspondiente captura de carbono y CO_2 .

4.3 HIPOTESIS

El sistema milpa intercalada con árboles frutales, contribuye a una mayor captura de carbono con respecto a los sistemas maíz en labranza cero con pastoreo y maíz con barreras de muro vivo.

4.4 MATERIALES Y METODOS

Este trabajo se realizó en tres microcuencas contiguas que forman parte de la cuenca del Río Catarina, en la localidad Unión Agrarista, Municipio de Jiquipilas, Chiapas, durante el ciclo primavera-verano y otoño-invierno 2009 en condiciones de temporal. La localización, características edafo-climáticas del sitio experimental y características generales de las microcuencas han sido detalladas en la sección 2.6.2 del Capítulo 2.

4.4.1 Experimentación

Se establecieron tres experimentos que consistieron en tres sistemas de uso y manejo del suelo sin repeticiones: Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), Maíz con Barreras de Muro Vivo (MBMV) y Maíz en Labranza Cero con Pastoreo (MLCP). Una descripción detallada de las características y establecimiento de cada sistema ha sido expuesta en la sección 2.6.6 del Capítulo 2.

En la sección 2.6.4 del Capítulo 2 se hace mención del diseño experimental, factores de estudio y tratamientos establecidos en los tres experimentos. En virtud de que el cálculo del carbono capturado se basa en el valor calórico de la producción de la biomasa total de cada especie por tratamiento en cada experimento (variable dependiente), se esperarían resultados similares al obtenido en el análisis estadístico para rendimiento, donde de manera general se obtuvieron diferencias estadísticas a favor del tratamiento con 100% de fertilización. Por lo anterior, la evaluación de la captura de carbono se realizó en los tres sistemas únicamente a nivel del promedio de biomasa total y rendimiento de grano de maíz y frijol en el sistema MIAF, para los tratamientos sección de la ladera a través de la pendiente, fertilización al 100% y posición de las hileras en el módulo MIAF (Figuras 4.1 y 4.2).

Para maíz en el sistema MBMV y MLCP este promedio incluyó los tratamientos sección de la ladera, fertilización al 100% y posición de las hileras en la sección donante, media y receptora de un módulo de barreras vivas (Figura 4.3), para el sistema MLCP que no incluye setos se tomó como referencia la posición de las hileras del sistema MBMV. En el caso de la guayaba en el sistema MIAF y *Gliricidia* en el

sistema MBMV, el promedio incluyó los tratamientos: sección de la ladera y fertilización al 100%. En todos los casos se tomaron tres muestras de rendimiento.

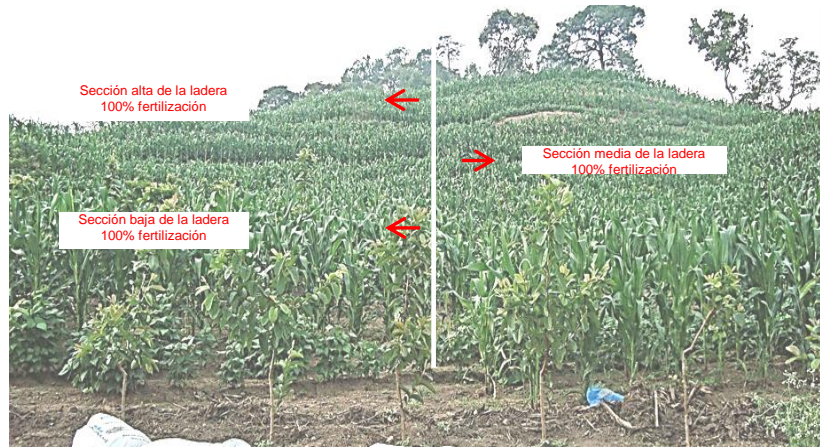


Figura 4.1. Esquema de la distribución de los tratamientos sección de la ladera y fertilización inorgánica en maíz, frijol y guayaba en el sistema MIAF y maíz en MBMV y MLCP.

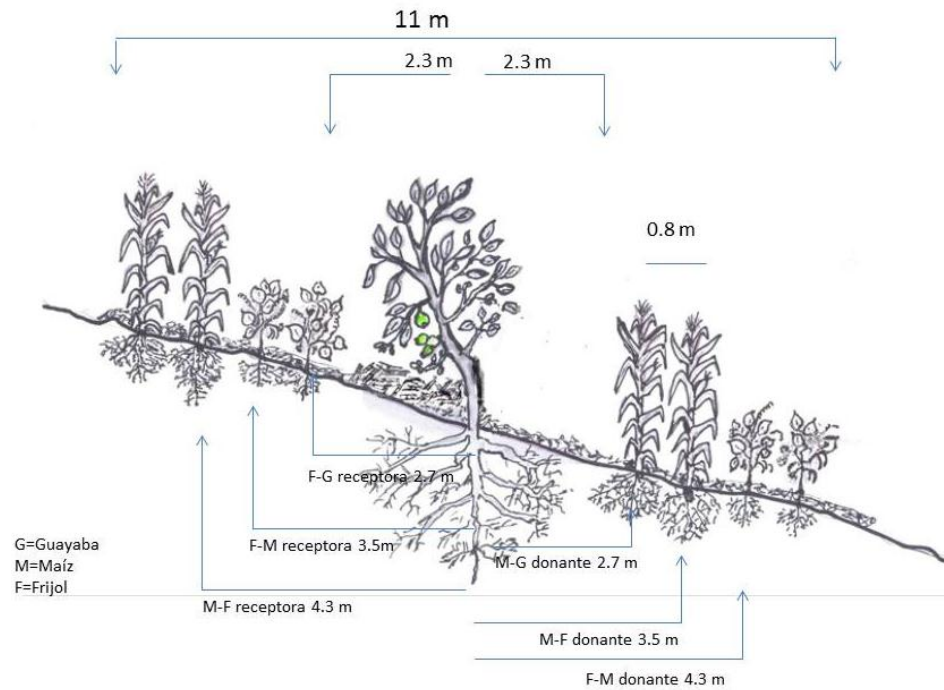


Figura 4.2. Esquema del tratamiento posición de la hilera de maíz y frijol en el sistema MIAF.

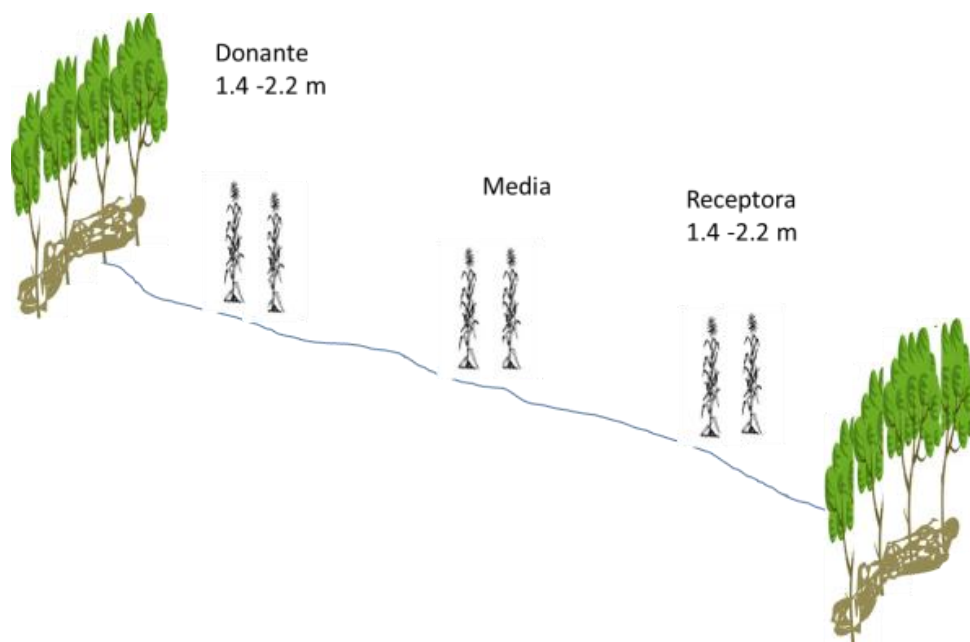


Figura 4.3. Esquema del tratamiento posición de la hilera de maíz en el sistema MBMV.

4.4.2 Muestreos de campo.

4.4.2.1 Muestreo para la estimación de la producción de biomasa en maíz y frijol en los sistemas MIAF, MBMV y MLCP

La estimación de rendimiento de grano, biomasa aérea y de la raíz se realizó por triplicado en cada uno de los tratamientos correspondientes a cada sistema de manejo. Las dos primeras estimaciones se realizaron en 2 m de una hilera de maíz y/o frijol, evaluando el rendimiento de grano y el de biomasa aérea compuesta por el tallo, hojas y cubiertas de la mazorca. Para biomasa radical se extrajo una planta representativa por muestreo, trazando un cuadro de 0.4 x 0.4 m donde el tallo de la planta ocupó el centro y se profundizó hasta 0.4 m lo que corresponde a un volumen de suelo de 0.06 m³. El suelo adherido a la masa de raíz se separó introduciendo la raíz completa a un recipiente con agua (Figura 4.4), y las raíces que se separaban se colectaron vertiendo el agua sobre una malla. En el caso específico del frijol se tuvo especial cuidado de

recoger las hojas que la planta tiró durante su desarrollo, principalmente después de la etapa de antesis.

Aunque en el sistema MIAF el maíz y frijol ocupó cada uno un área de 0.3 ha y la guayaba 0.4 ha, y en MBMV el maíz un área de 0.869 ha, con el objetivo de realizar las comparaciones sobre una misma base, la producción de biomasa se expresó en los tres sistemas en función de una hectárea.



(a)



(b)

Figura 4.4. Extracción (a) y lavado del sistema radical del maíz (b).

4.4.2.2 Evaluación de la biomasa de maíz y frijol en los módulos de cultivo simple en la microcuenca con el sistema MIAF

Con el objetivo de comparar la producción de biomasa del maíz, frijol y guayaba en los módulos MIAF entre los mismos pero bajo cultivo simple en la misma microcuenca, se establecieron en la posición baja, media y alta de la ladera, módulos de frijol, maíz y guayaba en unicultivo. La producción de biomasa del maíz y frijol se cuantificó muestreando 2 m de cuatro hileras centrales del módulo, expresándolo en toneladas por hectárea. En lo que respecta a la guayaba se menciona en la siguiente sección.

4.4.2.3 Evaluación de la biomasa de guayaba en la microcuenca bajo el sistema MIAF y módulo en cultivo simple dentro de la misma microcuenca.

En el mes de junio del 2009, al inicio del ciclo de lluvias y período de siembra de los cultivos anuales y en enero del 2010 en la cosecha del fruto de guayaba, se eligieron en la sección vertical de la ladera; baja, media y alta con 100% de fertilización, tres árboles de guayaba representativos por su vigor y desarrollo (Figura 4.5).

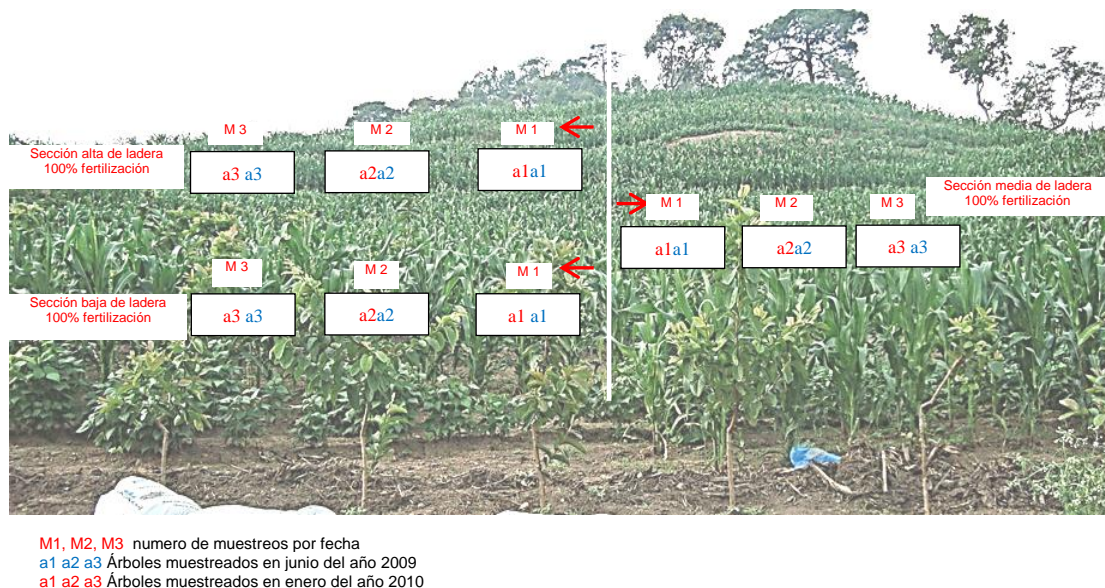


Figura 4.5. Muestreo para la estimación de la producción de biomasa aérea, de fruto y radical de guayaba en el sistema MIAF

Los árboles conjuntamente con las raíces se extrajeron trazando un cuadro de 0.4 x 0.4 m, donde el tronco del árbol ocupó el centro y se profundizó hasta 50 cm correspondiendo a un volumen de suelo de 0.08 m³. Con el objetivo de extraer la totalidad de masa de la raíz adherida a la raíz principal, fue necesario eliminar el suelo adherido sometiendo primeramente toda la raíz a un lavado a presión (Kolesnikov, 1973) (Figura 4.6 a, b). Posteriormente se extrajo toda la raíz y se introdujo en un recipiente de 20 litros de agua para separar el resto del suelo adherido. Además, en el caso específico de los árboles que se encontraban en la fase de producción (segundo muestreo) se evaluó el rendimiento de fruto. La biomasa total ganada por los árboles de guayaba correspondió a la diferencia del peso de la biomasa al final del ciclo

(enero) y la inicial (junio), y se expresó para 909 árboles que ocupan 0.4 ha en una hectárea MIAF. En el cultivo simple únicamente se seleccionó un árbol en cada fecha de muestreo.

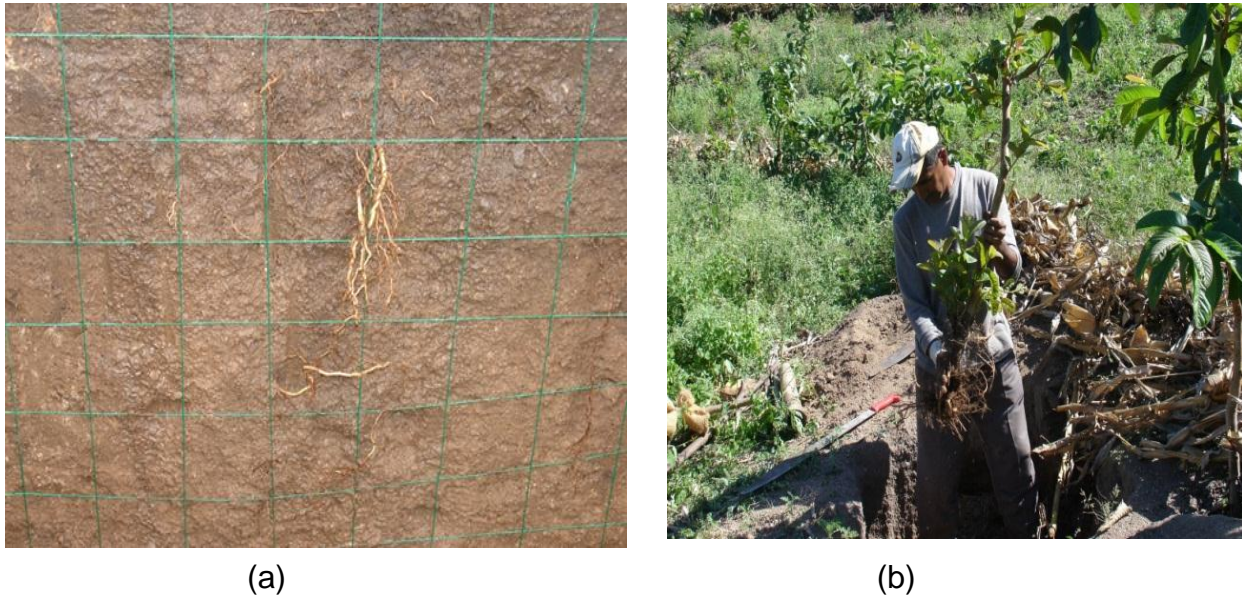


Figura 4.6. Lavado (a) y extracción del sistema radical del árbol de guayaba (b).

4.4.2.4. Estimación de la producción de biomasa de *Gliricidia sepium* en el sistema MBMV

De manera similar a lo descrito para el caso de los árboles de guayaba en el sistema MIAF, en el mes de junio del 2009 y enero del 2010, se eligió para cada tratamiento a evaluar un área representativa en vigor y desarrollo del seto de *Gliricidia*. En cada área seleccionada se cortó a nivel de la superficie del suelo las plantas correspondientes a 0.5 m lineales de seto. En 0.25 m del seto se extrajeron las raíces confinadas a 0.4 m a ambos lados del seto y a 50 cm de profundidad, lo que correspondió a un volumen de suelo de 0.1 m^3 (Figura 4.7 a, b). La biomasa total ganada por el seto correspondió a la diferencia del peso de la biomasa al final del ciclo (enero) y la inicial (junio). Las raíces se extrajeron de manera similar a la descrita para el árbol de guayaba.



Figura 4.7. Muestreo de (a) biomasa aérea y (b) extracción del sistema radical de *Gliricidia sepium*.

4.4.3 Métodos de laboratorio

4.4.3.1 Separación de las diferentes partes de la planta, secado y determinación del peso

Las plantas de guayaba se separaron en hojas, ramillas, tallo, raíces y frutos, para la *Gliricidia* sólo en las tres primeras partes, y las plantas de frijol y maíz en tallo + hojas, raíces y grano. En todos los casos, las plantas fueron divididas en segmentos más pequeños, y si la muestra tenía mucha humedad como era el caso de las plantas de maíz, guayaba y *Gliricidia*, primeramente se secaron al sol por cuatro días, después en una estufa de aire forzado a 70 °C durante 72 horas, para posteriormente pesarlas en una balanza analítica.

4.4.3.2 Porcentaje de materia seca

Las muestras se trituraron en un molino y se tamizaron con una malla de 0.1 mm. En cápsulas de aluminio previamente pesadas se colocó 1 g de muestra tamizada y homogeneizada. Después se colocaron en un horno al vacío a 70 °C con presión de 15 atmósferas por un lapso de 14 horas para extraer el agua ligada que se encuentra

dentro de la pared celular. Posteriormente se pasaron a un desecador hasta que estuvieran a temperatura ambiente para ser pesadas nuevamente y determinar el porcentaje de materia seca, mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ MS} = (\text{PCMs} - \text{PC}) / \text{Pm} \times 100$$

Dónde:

% MS= Porcentaje de materia seca

PCMs= Peso de cápsula más muestra seca

PC= Peso de cápsula

Pm= Peso de muestra

4.4.3.3 Determinación de la fracción de carbono por calorimetría

4.4.3.3.1 Estimación del valor calórico de la biomasa aérea, raíz, fruto, y grano

Se realizó en el laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. De manera general consistió en obtener, de cada muestra, la cantidad de energía total en kcal/kg y transformarla a moles de carbono potencial fijado, utilizando la relación de moles (g/peso molecular) y con el peso de la muestra inicial determinar la fracción de carbono fijado. Las muestras de cada especie, así como de las partes en que fue separada se analizaron por duplicado. Para ello se utilizó un Calorímetro Isoperibólico Parr modelo 1266.

4.4.3.3.2 Estimación de la fracción de carbono fijado

Este método de estimación se basa en la cantidad de energía que requiere una planta para fijar un mol de carbono aproximadamente. A continuación se describe el cálculo realizado para la biomasa del tronco de guayaba.

a) Las calorías producidas en el tronco de guayaba se transforman a unidades de Joules (J). Un J es igual a 0.239 cal.

$$\text{Tronco de guayaba} = 4153.354603 \text{ cal/g} * 1 \text{ J}/0.239 \text{ cal} = 17378 \text{ J g}^{-1}$$

b) Los Joules por gramo se transforman en moles de carbono por gramo. Un mol de carbono es igual a 480769 J

$$\text{Moles de C g}^{-1} = 17378 \text{ J/g} * 1 \text{ mol C} / 480769 \text{ J mol}^{-1} = 0.036 \text{ mol C g}^{-1}$$

c) Calcular los gramos de carbono utilizando la fórmula de moles

$$\text{Mol de C} = \text{gramos de C} (1 \text{ mol} / \text{masa atómica del C})$$

$$\text{Gramos de C} = \text{Mol de C} / (1 \text{ mol}/12.01 \text{ g/mol})$$

$$\text{Gramos de C} = 0.036 / 0.08326 = 0.43 \text{ gr C}$$

d) Calcular los gramos de CO₂ capturados por gramo de carbono

Para presentar los resultados en términos de masa de CO₂, se multiplica la masa de carbono por el cociente de 44/12, bajo el supuesto que cualquier carbono que se emite a la atmósfera en forma de CO será rápidamente oxidado a CO₂ (Blasing *et al.*, 2004). De esta manera 0.43 gramos de carbono en un gramo de tronco de guayaba multiplicado por 3.67 será igual a 1.58 gramos de CO₂.

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Valor calórico de las especies evaluadas

En el Cuadro 4.1 se presentan los valores calóricos determinados en las diferentes partes de la planta en que fue dividida cada especie, así como los valores de referencia establecidos por diferentes autores. En todas las especies no se encontraron valores calóricos de referencia para la raíz, y en *Gliricidia* y guayaba para hojas. En el primer caso se debe a que generalmente la mayor parte de los estudios se realizan principalmente sobre la biomasa aérea, no obstante que la raíz de los arbustos puede llegar a representar del 10 al 40% de la biomasa total (Peichl *et al.*, 2006). Específicamente en la guayaba los valores reportados se refieren al determinado en pulpa por ser la parte de interés en la industria de elaboración de jugos, no así para todo el fruto como fue en este caso.

En el caso del maíz el valor calórico para el tallo + hojas resultó muy similar al promedio de los reportados por diferentes autores, pero el del grano fue ligeramente

superior. En frijol, los valores en tallo + hojas y grano estuvieron ligeramente por arriba de los valores reportados por Acosta (1985). En guayaba y *Gliricidia*, el valor calórico del tronco fue inferior a los reportados, principalmente en la segunda especie. Las plantas de guayaba tenían tres años de edad y las de *Gliricidia* dos años; además, esta última estuvo sujeta a podas continuas, lo cual no permitió la lignificación de los troncos. Esto resulta diferente a los estudios que se han realizado en troncos maduros y con fines de determinar su uso como combustible (Somarriba y Beer, 1985; NAS, 1980).

Cuadro 4.1. Valor calórico de la biomasa de maíz, frijol, guayaba y *Gliricidia*, y valores de referencia reportados en la literatura.

Especie	Biomasa	Valor calórico (kJ g ⁻¹)		Fuente	
		Determinado	Referencia		
	Raíz	16.7			
Maíz	Tallo + hojas		16.1	Acosta, (1985) Fuksa <i>et al.</i> (2006)	
		16.4	15.9		
			16.6		
	Grano	17.4	15.3	FAO, (1993)	
Frijol	Raíz	16.3			
	Tallo + hojas	15.3	15.6	Acosta, (1985)	
	Grano	17.1	16.0		
Guayaba	Raíz	16.6			
	Hojas	17.4			
	Tronco		18.7	19.5	Somarriba y Beer (1985) NAS, (1980)
				20.1	
	Fruto	16.6			
<i>Gliricidia</i>	Raíz	16.9			
	Hojas	17.6			
	Tronco	17.9	20.6	NAS, (1980)	

4.5.2 Biomasa y carbono capturado en las diferentes partes de las plantas

La cantidad de biomasa y carbono capturado por el maíz y frijol bajo el sistema MIAF y en maíz como cultivo simple en los sistemas MBMV y MLCP, difiere entre las partes de la planta (Cuadro 4.2), en ambas especies el mayor valor se presentó en la biomasa aérea (tallos + hojas). En el caso del frijol, se observa que en el ciclo de otoño-invierno la cantidad de biomasa y carbono capturado resultó menor al del ciclo de temporal, lo cual se debe a la menor cantidad de agua disponible en el suelo, debido a que el período de lluvia terminó a inicios del mes de octubre.

En relación al cultivo de guayaba, la biomasa proveniente del fruto resultó muy similar al del tronco y raíz, lo cual es debido a que el fruto contiene aproximadamente 20% de materia seca. Esto a la vez ocasiona que sea menos eficiente en la captura de carbono en comparación al grano de maíz y frijol. En *Gliricidia*, la producción de biomasa y captura de carbono resultó menor en el tronco y mayor en el follaje y ramillas. Este resultado se debe a que durante dos años se realizaron dos podas por año al seto, lo que evitó el engrosamiento y lignificación de los troncos. Al mismo tiempo, las podas incrementaron la capacidad de rebrote de la *Gliricidia* y ello significó mayor cantidad de fotosintatos a las ramillas y hojas. Casanova *et al.* (2009) reportaron resultados similares en un sistema asociado de *Leucaena leucocephala*.

Con respecto a la evaluación de la raíz (Andrade y Ibrahim, 2004), mencionan que resultan de suma importancia ya que son la parte menos estudiada de los agroecosistemas, no obstante que pueden representar del 10 al 40% de la biomasa total, y significar importantes reservorios de carbono (Peichl *et al.*, 2006). En el cuadro 4.2 se observa cómo el maíz presenta una mayor biomasa radical y carbono capturado respecto al frijol. A la vez, presentó una mayor biomasa radical cuando se estableció bajo el diseño del sistema MIAF con un incremento del 60%, en comparación a cuando se estableció en cultivo simple. Lo anterior está relacionado a que la siembra en tiras alternas de ambos cultivos, permite una mayor complementariedad en el uso del espacio, del agua y nutrimentos por parte de las raíces (Lehmann, 2003).

Cuadro 4.2. Carbono capturado en la biomasa del maíz, frijol y guayaba en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y módulos de cultivo simple, maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP).

Sistema	Especie	Parte de la planta	Biomasa t ha ⁻¹	Carbono	
MIAF ^x	Maíz	Follaje	10.7	4.3	
		Grano	7.3	3.0	
		Raíz	6.3	2.7	
		Total	24.3	10.0	
	Frijol P-V ^z	Follaje	3.0	1.0	
		Grano	1.3	0.7	
		Raíz	1.0	0.3	
		Total	5.3	2.0	
	Frijol O-I ^y	Follaje	2.0	0.7	
		Grano	0.7	0.3	
		Raíz	0.7	0.2	
		Total	3.3	1.2	
	Guayaba	Follaje	0.3	0.2	
		Fruto	0.9	0.5	
		Tallo	1.0	0.5	
Raíz		0.8	0.4		
Total	3.0	1.4			
Módulos de cultivo simple de maíz, frijol y guayaba en la microcuenca con el sistema MIAF	Maíz	Follaje	5.8	2.4	
		Grano	4.2	1.8	
		Raíz	2.5	1.0	
		Total	12.5	5.2	
	Frijol P-V ^z	Follaje	2.3	0.9	
		Grano	0.8	0.4	
		Raíz	0.4	0.2	
		Total	3.5	1.5	
	Frijol O-I ^y	Follaje	1.8	0.7	
		Grano	0.5	0.2	
		Raíz	0.3	0.1	
		Total	2.6	1.0	
	Guayaba	Follaje	0.2	0.08	
		Fruto	0.6	0.25	
		Tallo	0.7	0.3	
Raíz		0.5	0.2		
Total	2.0	0.83			
Cultivo simple MBMV	Maíz	Follaje	7.1	3.0	
		Grano	4.7	2.3	
		Raíz	2.5	1.0	
		Total	15.1	6.3	
	<i>Gliricidia</i>	Follaje	6.1	3.0	
		Tallo	1.5	0.5	
		Raíz	2.3	0.8	
		Total	9.8	4.3	
	Cultivo simple MLCP	Maíz	Follaje	5.4	2.2
			Grano	4.2	1.8
Raíz			2.5	1.1	
Total			12.1	5.1	

^{z,y}Ciclo primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente.

En el sistema MIAF y en cultivo simple, el sistema radical del árbol de guayaba representó el 27 y 25% de la biomasa total del árbol, y 29 y 24% de la cantidad total de carbono capturada, respectivamente, y en el sistema MVMV las raíces del seto de *Gliricidia* 23% de la biomasa total y 18% de la cantidad total de carbono capturada. Al respecto, no se tienen referencias de otros autores en esta especie; sin embargo, Casanova *et al.* (2009), determinaron que *Leucaena leucocephala*, destinó el 45% de fotosintatos a la biomasa subterránea. La cantidad de biomasa radical de *Gliricidia* puede deberse a que adicionalmente de las podas, las plantas son afectadas en su crecimiento vegetativo por el ramoneo ejercido por los animales en pastoreo en la época de estiaje, lo cual disminuye la translocación de nutrimentos a las raíces que funcionan como órganos de reserva.

4.5.3 Rendimiento de biomasa total, carbono y CO₂ capturado en el maíz, frijol y guayaba en tres sistemas de uso y manejo del suelo y agua

En el Cuadro 4.3, se observa que el maíz ya sea bajo el sistema MIAF o en cultivo simple presentó una mayor captura de carbono y CO₂ por unidad de área que la del frijol y la guayaba. El maíz bajo el sistema MIAF comparado con el cultivo simple en los módulos de la microcuenca MIAF y en los sistemas MBMV y MLCP, presentó una captura relativa de CO₂ de 100, 60 y 100%. En el caso del frijol de PV, O-I (promedio) y guayaba bajo el sistema MIAF, presentaron una captura relativa de CO₂ de 60% superior al cultivo simple.

Con respecto a los árboles de guayaba, cabe mencionar que estos tenían tres años de edad y se encuentran en su primer año de producción, por lo que puede esperarse que a través de los años cuando ellos alcancen su etapa madura, incrementen su rendimiento de biomasa, llegando a disminuir la diferencia con respecto al maíz o incluso superarlo. De acuerdo a resultados no publicados por Camas (2008) en un sistema MIAF en terrenos planos con guayaba de seis años de edad, se espera que la producción de fruto y de biomasa total se triplique en la fase madura del frutal y por ende, la captura de carbono.

Cuadro 4.3. Carbono (C) y dióxido de carbono (CO₂) (t ha⁻¹) capturado en la biomasa del maíz, frijol, guayaba y *Gliricidia* en tres sistemas de uso y manejo del suelo y agua.

Sistema	Elemento o molécula	Maíz	Frijol P-V ^z	Frijol O-I ^y	Guayaba	<i>Gliricidia</i>	Captura Relativa ^x de CO ₂
Milpa intercalada con árboles frutales (MIAF)	C	10	2	1.2	1.4		2 ^u , 1.6 ^v , 2 ^w 1.6 ^t
	CO ₂	37	7.3	4.7	5.1		
Módulos de cultivo simple ^s de maíz, frijol y guayaba en la microcuenca MIAF	C	5.2	1.5	1.0	0.8		
	CO ₂	18.8	5.0	2.6	3.1		
Cultivo simple de maíz con barreras de muro vivo	C	6.3				4.3	
	CO ₂	22.8				16	
Cultivo simple de maíz en labranza cero con pastoreo	C	5.1					
	CO ₂	18.4					

^{z, y}Ciclo primavera-verano y Ciclo otoño-invierno, respectivamente.

^xCociente del CO₂ capturado en cada especie en el sistema MIAF y en cultivo simple.

^{u, v, w}Captura relativa del CO₂ del maíz en el sistema MIAF con respecto al maíz en el módulo de cultivo simple en la microcuenca MIAF, y en los sistemas MBMV y MLCP, respectivamente.

^tCaptura relativa del CO₂ en el frijol (promedio de los dos ciclos) y la guayaba en el sistema MIAF con respecto al módulo de cultivo simple en la microcuenca MIAF.

^sMódulos o lotes de cultivo simple de maíz, frijol y árboles de guayaba establecidos en la misma microcuenca MIAF, para calcular la eficiencia relativa de la tierra.

En la captura de carbono, es importante tomar en cuenta que esta evaluación se realiza únicamente sobre la producción de biomasa de cada sistema durante el ciclo de cultivo de cada especie y que adicionalmente cada sistema contribuirá con el reciclaje de nutrientes y captura de carbono en el suelo cuando se incorporen los residuos de cosecha. En este sentido, Makumba *et al.* (2007) determinaron que después de 10 años de la asociación de maíz + *Gliricidia* y de las incorporaciones continuas al suelo del follaje producto de las podas, la captura de carbono resultó ser 1.6 veces mayor que el maíz en unicultivo. Así también, la captura de CO₂ fue mayor en maíz + *Gliricidia* con valores de 23 a 83 kg ha⁻¹ día⁻¹ respecto al maíz unicultivo con 10 a 28 kg ha⁻¹ día⁻¹. Estos resultados ratifican la pertinencia de incorporar este tipo de evaluación en los sistemas propuestos.

4.5.4 Carbono y dióxido de carbono capturado en la biomasa total del maíz, frijol y guayaba en el sistema MIAF y su equivalente en área al obtenido en cultivo simple

Otra manera de demostrar la mayor eficiencia del sistema MIAF sobre la captura de carbono y CO₂ es mediante la extrapolación de la cantidad capturada en el área ocupada por las tres especies, a su equivalencia a lo capturado bajo cultivos simples en una hectárea. En el Cuadro 4.4 se observa como el maíz, frijol y guayaba establecidos bajo el arreglo propuesto por el sistema MIAF, capturan en 0.3 ha para los dos primeros cultivos y en 0.4 ha para la guayaba, una cantidad de carbono y CO₂ equivalente al obtenido entre 0.5 y 0.6 ha de cultivo simple de maíz, 0.4 de frijol y 0.6 de guayaba, respectivamente. Es decir, que bajo el sistema MIAF se necesita de una menor superficie de labor para capturar una cantidad similar de carbono y CO₂ capturado en una hectárea bajo cultivo simple.

Cuadro 4.4. Carbono y dióxido de carbono capturado en la biomasa total del maíz, frijol y guayaba en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y su equivalente en área al obtenido en cultivo simple en los módulos de la misma microcuenca MIAF, y en los sistemas maíz con barreras de muro vivo (MBMV) y labranza cero con pastoreo (MLCP).

Carbono y CO ₂ capturado	MIAF			Módulos en la microcuenca MIAF			MBMV	MLCP
	Maíz	Frijol	Guayaba	Maíz	Frijol	Guayaba	Maíz	
C	3 ^y	1.0 ^y	0.53 ^z	5.2 ^w	2.5 ^w	0.8 ^w	6.3 ^x	5.1 ^w
CO ₂	11 ^y	3.6 ^y	1.9 ^z	19 ^w	8.0 ^w	3.1 ^w	22.8 ^x	18.4 ^w
Equivalente en área ^u								
Respecto a módulos en la microcuenca MIAF	0.6	0.4	0.6					
Respecto a MBMV	0.5							
Respecto a MLCP	0.6							

^z Toneladas de carbono y CO₂ de la guayaba en 0.4 ha

^y Toneladas de carbono y CO₂ del maíz y frijol de PV y OI en 0.3 ha

^x Toneladas de carbono y CO₂ del maíz en 8680 m²

^w Toneladas de carbono y CO₂ del maíz por hectárea

^u Cociente de las toneladas de C obtenidas en maíz y frijol(0.3 ha), y guayaba (0.4 ha), y toneladas de C en cultivo simple

Los resultados obtenidos están de acuerdo con lo expresado en secciones anteriores, en el sentido que bajo el sistema MIAF los cultivos alcanzaron un mayor rendimiento por unidad de área. Esto se debe a la combinación de diferentes especies con características fenológicas, morfológicas y fisiológicas en un arreglo ordenado de dos tiras de maíz y dos de frijol sembradas alternadamente, así como a diferencias en porte, arquitectura y desarrollo radical que permitieron un mayor uso complementario de los recursos luz, agua y nutrientes con respecto al monocultivo.

Otra de las ventajas del sistema que le confieren mayor eficiencia en términos de productividad, es que permite la inclusión de maíz, frijol y guayaba en un año, con doble ciclo de siembra del frijol, a diferencia del cultivo simple de maíz

4.6 CONCLUSIONES

1. El sistema MIAF combinando diferentes especies con características fenológicas, morfológicas y fisiológicas en un arreglo ordenado en espacio y tiempo, mejora de manera significativa la respuesta agronómica de las especies utilizadas, dando como resultado una mayor eficiencia en la producción de biomasa del maíz, frijol y guayaba por unidad de área, y consecuentemente mayor captura de C y CO₂.
2. De los tres sistemas de uso y manejo del agua y suelo, el sistema MIAF tiene un mayor impacto benéfico sobre el ambiente al contribuir sustantivamente a la captura de carbono, además de permitir la conservación del recurso suelo y agua

4.7 LITERATURA CITADA

- Acosta, D.E. 1985. Crecimiento, rendimiento y aprovechamiento de la energía solar en maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en monocultivo y asociados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 136 p.
- Andrade, H.J. y Ibrahim, M.A. 2004. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? Agroforestería en las Américas 10:109-116.
- Amthor, J.S. 1998. Perspective on the relative insignificance of increasing atmospheric CO₂ concentration to crop yield. Field Crop Research 58:109-127.

- Blasing, T.J.; Broniak, C.T. and G. Marland. 2004. Estimates of monthly carbon dioxide emissions and associated ^{13}C values from fossil-fuel consumption in the USA. In Trends: A Compendium of Data on Global Change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, USA Doi: 10.3334/CDIAC/ffe.001.
- Carter, M.R.; Gregorich, E.G.; Anderson, D.W.; Doran, J.W.; Jansen, H.H. 1997. Concepts of soil quality and their significance. In Soil quality for crop production and ecosystem health. Gregorich E.G. y Carter M. (eds). Elsevier Science Publishers. Amsterdam, Netherlands. 1-19 pp.
- Casanova, L.F., Caamal, J.A.; Solorio, F.J. y Castillo, J.B. 2009. Comportamiento agronómico de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. 1er Congreso Internacional de Agronomía Tropical. 26 al 28 de agosto del 2009. Villahermosa, Tabasco, México.
- Dulormne, M.; Sierra, J. y Solvar, F. 2003. Capacidad de secuestro de carbono y nitrógeno en un sistema agroforestal de *Gliricidia sepium* en clima tropical sub-húmedo. In Agroforestería para la producción animal en América Latina-II. Estudio FAO producción y sanidad animal 155. Sánchez, M.D. y Rosales, M.M. Roma, Italia. 93-98 pp.
- Dumanski, J.; Desjardins, R.L.; Tarnocai, C.; Monreal, D.; Gregorich, E.G.; Kirkwood, V. and Campbell, C.A. 1998. Possibilities for future carbon sequestration in Canadian agriculture in relation to land use changes. *Clim. Change*. 40:81-103.
- Etchevers, B. 2005. "Subproyecto II. Metodología de la medición de la captura de carbono", en el Proyecto Manejo Sostenible de Laderas, regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe, Oaxaca, México. Informe de actividades 1999-2005. Colegio de Postgraduados, Texcoco, estado de México.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1993. Energy and Environment Basics. Bangkok, Regional Wood Energy Development Program (RWEDP): 85 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2002a. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia. 61 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2002 b. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Departamento Económico y Social. 106 p.

- Fuksa, P.; Kocourkova, D.; Haki, J. y Kalista, J. 2006. Influence of weed infestation on the calorific value and chemical composition of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Diseases and Protection* 20:823-830.
- Intergovernmental Panel for Climatic Change (IPCC). 2007. *Climate change 2007. Contribution of working group I to the second assessment report of The intergovernmental Panel for Climate Change*. Houghton, J.T. (Ed). Cambridge, United Kingdom. Cambridge.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2008. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Pachauri R.K. y Reisinger, A. (eds). Ginebra, Suiza. 104 p.
- Kruk, B. y Satorre, E.H. 2003. Densidad y arreglo espacial del cultivo. *In Producción de cultivos de granos. Bases funcionales para su manejo*. Satorre, E.H.; Benech-Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E. y Savin, R. (eds). Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 279-318 pp.
- Kolesnikov, V.A. 1973. The root system of fruit plants. MIR Publishers. Moscow. 268 p.
- Lal, R.; Follett, R.F.; Kimble, J.M. and Cole, C.V. 1999. Management of US cropland to sequester carbon in soil. *J. Soil Water Cons.* 54:374-381.
- Lehmann, J. 2003. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant and Soil* 255: 319-331.
- Makumba, W.; Akinnifeso, F.K.; Janssen, B. and Oenema, O. 2007. Long term impact of *Gliricidia*-maize intercropping system on Carbon sequestration in southern Malawi. *Agriculture Ecosystems and Environment* 118:237-243.
- National Academy of Sciences (NAS). 1980. *Firewood Crops*. Washington DC.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 1998. *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Peichl, M.; Thevathasan, N.V.; Gordon, A.M.; Huss, J. and Abohassan, R.A. 2006. Carbon sequestration potentials in temperate three-based intercropping systems, Southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* 66:3:243-257.

- Somarriba, E. y Beer, J. 1985. Árboles de guayaba (*Psidium guajava* L.) en pastizales III. Producción de leña. Revista Interamericana de Ciencias Agrícolas 35:4:330-333.
- Tate, R.L. 1987. Soil organic matter: Biological and ecological effects. John Wiley & Sons, New York.
- Tristram, O.W. and Wilfred, M.P. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1930-1946.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES

Los sistemas milpa intercalada con árboles frutales y maíz con barreras de muro vivo son más eficientes que la labranza cero con pastoreo en la conservación del suelo en laderas abruptas. El manejo de estos sistemas con el filtro de escurrimientos y más aún el del MIAF por manejar una cobertura al suelo mayor del 30%, reduce el flujo de escurrimientos de las partes altas a las bajas de la microcuenca y por consiguiente protegen la fertilidad del suelo a través de la pendiente de la ladera, lo cual redundará en la productividad de los cultivos. Este efecto es más significativo sobre las áreas receptoras localizadas aguas arriba de las hileras de árboles o del seto donde sucede la deposición de suelo y mayor infiltración de agua, mismos que contienen elementos ligados al suelo o en solución. Por ello es de vital importancia el establecimiento eficiente del filtro de escurrimientos desde el primer año de implementar estos sistemas y manejar una cobertura al suelo mayor del 30%, además que ello promoverá también la estabilización del suelo y la formación paulatina de la terraza.

Dada la importancia del uso de residuos de cosecha para alimento del ganado en pastoreo en la época de estiaje y que esto se contrapone con el manejo del sistema MIAF el cual excluye el pastoreo, puede ser una limitante para la adopción de este sistema. Por lo tanto, es conveniente elaborar otras formas de aprovechamiento del rastrojo fuera de la parcela MIAF tal y como lo hacen pequeños productores del altiplano de México como la recolección, molido y embolsado de los residuos para su posterior uso como alimento para el ganado y posibilitar el manejo de una cobertura al suelo mayor del 30% y contar con residuos para el filtro de sedimentos. También puede darse el caso que al mejorar los ingresos del productor con el sistema MIAF esto no sea problema ya que puede comprar forraje con otros productores que cuentan con excedentes. Por otra parte, conforme los árboles crecen aportan mayor cantidad de material vegetal producto de las podas, que puede utilizarse para fortalecer el filtro de escurrimientos y por consiguiente se tendría una mayor cantidad de residuos de cosecha para ser usados como cobertura al suelo y alimento del ganado.

El proceso erosivo a nivel de microcuenca, presenta un comportamiento recurrente de zonas de remoción y deposición de sedimentos causado por los cambios en la

topografía a través de la pendiente de laderas abruptas. Esto conduce a que aún sin prácticas de conservación exista una relación entre la posición del suelo en la ladera en función de la pendiente (baja, media y alta) con las condiciones de fertilidad del mismo y por consiguiente una respuesta al nivel de fertilización aplicado. Con los sistemas MIAF y MBMV se espera que a mediano y largo plazo exista además un cambio en la topografía por efecto del filtro de escurrimientos, lo cual conlleva a la necesidad de establecer el tratamiento de fertilización más adecuado en relación a los gradientes de fertilidad en el sentido de la pendiente, lo que queda enmarcado dentro de los conceptos de agricultura de precisión o por sitio específico.

El sistema milpa intercalada con árboles frutales, al intercalar de manera ordenada hileras de maíz y frijol con árboles frutales, aprovecha más eficientemente las interacciones agronómicas entre estos cultivos y por consiguiente permite una mayor eficiencia en el uso del suelo, radiación solar y agua, para una mayor productividad de las pequeñas unidades de producción. Resultados de este estudio en relación al aprovechamiento de la radiación solar y el agua, plantean la necesidad de desarrollar líneas de investigación que determinen el espaciamiento más idóneo entre las hileras de maíz y frijol que conduzcan a una mayor productividad de ambas especies. Una alternativa es estudiar la utilidad de establecer una hilera alternada de maíz y frijol de manera sucesiva, en vez de dos. Otra, reducir el ancho de las hileras de frijol a menos de 0.8 m dado que es una planta C_3 y no necesitaría de altas intensidades de radiación solar para alcanzar la fotosaturación y por consiguiente el relativo sombreado que le causarían las plantas de maíz podrían no afectar su productividad.

Los sistemas milpa intercalada con árboles frutales y maíz con barreras de muro vivo presentaron similar mejor control de la erosión hídrica con respecto al sistema labranza cero con pastoreo. El primer sistema presentó la menor pérdida de nitratos y fosfatos, y el segundo sólo de fosfatos, en cambio el sistema labranza cero con pastoreo presentó las mayores pérdidas de estos elementos y de suelo por arriba de los límites permisibles de 12 t ha^{-1} . Este efecto es inherente al manejo de cada sistema descrito anteriormente, haciendo hincapié sobre la necesidad de evitar la práctica de sobrepastoreo sobre todo en el sistema labranza cero con pastoreo a manera que

constituya una alternativa de manejo de suelo pro-sostenible en condiciones de alta precipitación e intensidad de lluvias en terrenos de laderas abruptas truncadas.

El sistema MIAF además de disminuir la contaminación del agua, también fue más eficiente en la producción de biomasa por unidad de área, y consecuentemente mayor captura de C y CO₂, por lo que de los tres sistemas de uso y manejo del agua y suelo, tiene un mayor impacto benéfico en la generación de servicios ambientales, contribuyendo así a un manejo sostenible de los recursos.

CAPITULO VI. RECOMENDACIONES

Este estudio aplicado como una primera aproximación, sugiere que en 516 mil hectáreas de laderas abruptas, manejadas con maíz en labranza cero con pastoreo (MLCP) (Cadena, 2004), se tendría una pérdida de suelo de 8.8 millones de toneladas, mientras que con el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) esto se reduciría a 2.9 millones de toneladas, lo que significa que con este sistema podrían retenerse 5.9 millones de toneladas de suelo.

Transformando los kilogramos de frijol y fruto de árboles frutales de cinco años obtenidos en el sistema MIAF a kilogramos de maíz, significa que en el sistema MLCP se pierden 4 kg de suelo por kg de maíz producido y en el sistema MIAF únicamente 544 gramos, además del significativo mayor ingreso económico que representa el obtener grano de frijol, maíz y frutos.

Con respecto al escurrimiento, en las 516,000 hectáreas este sería de 1057 y 712 millones de metros cúbicos con los sistemas MLCP y MIAF, respectivamente. Es decir que de aplicar el sistema MIAF en toda esa superficie podría retenerse 345 millones de metros cúbicos. Lo anterior tendría beneficios sustanciales evitando daños directos e indirectos en las partes bajas de las cuencas.

Es importante mencionar que el efecto benéfico de este sistema sería más notable de tomar en cuenta que en buena parte de las laderas se sigue practicando aún la roza tumba y quema sin descanso, que deja al suelo totalmente desprotegido y por ende las tasas de escurrimiento y suelo perdido serían mayores.

Con base a los resultados expuestos y por todos los beneficios que aporta, se deriva la recomendación de reconvertir las 516,000 hectáreas al sistema MIAF, siendo el más apropiado para la sostenibilidad de la agricultura de ladera y de sus usuarios; sin embargo, implementar este sistema es un propuesta de largo plazo, que resulta difícil de adoptar sin el apoyo del estado, por lo que debería ocupar un lugar primordial en los catálogos de tecnologías recomendadas en los programas de desarrollo de las instituciones del sector, e incluso se le debería destinar recursos económicos para generar conocimiento que conlleve al perfeccionamiento de ese sistema.

La principal limitante para la adopción del sistema MIAF radica en la fuerte inversión económica en su establecimiento por la adquisición de los árboles frutales lo cual se vuelve más crítico si tomamos en cuenta que los pequeños productores de las regiones de ladera cuentan con recursos económicos limitados. Para solventar este problema se recomienda la organización de los productores para establecer viveros comunitarios en los cuales previa capacitación puedan producir ellos mismos los árboles frutales de su interés. Otra manera, sería que inicialmente un productor establezca el sistema MIAF en un cuarto de hectárea (uno o dos módulos MIAF) y una vez que los árboles empiecen a producir, se capitalice para poder establecer este sistema en una mayor área de su parcela.