



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE SUELOS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**DISEÑO DE TECNOLOGÍAS AGROFORESTALES
CON MAYOR POTENCIAL DE FIJACIÓN DE
CARBONO EN AJUCHITLÁN, MORELOS**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

PRESENTA:

RUIZ GARCÍA PATRICIA



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA/
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**

Mayo de 2015.

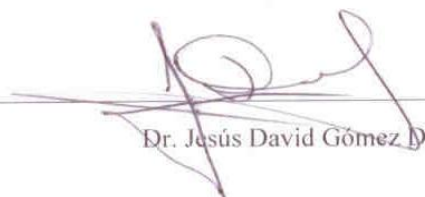
Chapingo, Estado de México

**DISEÑO DE TECNOLOGÍAS AGROFORESTALES CON MAYOR
POTENCIAL DE FIJACIÓN DE CARBONO EN AJUCHITLÁN,
MORELOS**

Tesis realizada por **PATRICIA RUIZ GARCÍA** bajo la supervisión del comité asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

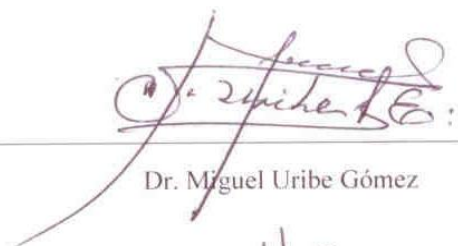
**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

Director:



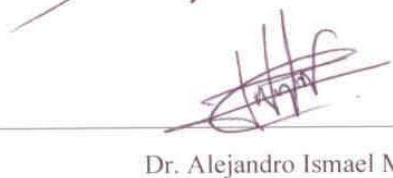
Dr. Jesús David Gómez Díaz

Co-director:



Dr. Miguel Uribe Gómez

Asesor:



Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

DEDICATORIA

A mi esposo Moisés Matías Ramos, mi hija Yamili Matías Ruiz y al bebé que viene en camino. Gracias por todo el amor que me han dado y por ser la luz de mi vida. Los AMO.

A mis padres José Ignacio Ruiz García y Martha García Villegas. Gracias por haberme dado la vida y los valores que me forjaron para seguir adelante ante todas las adversidades que se presente.

A mis hermanos Alejandra, Nacho y Victor por todo el apoyo moral brindado y todos esos buenos ratos que hemos pasado juntos.

A todas mis sobrinas, Keila, Melisa, Fernanda y Sofía por la alegría que me brindan cuando están con migo. Las adoro.

A mis tíos Belem García Villegas y Alejandro Cortéz Palacios por sus consejos valiosos que me han forjado como persona.

A todo el comité asesor en especial al Dr. David Gómez Díaz por su amistad y por el gran apoyo otorgado para la elaboración de esta tesis.

A todos los amigos de Agroforestería por su amistad y por asarme reír en esos ratos de estrés. Los quiero.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para seguir con los estudios de maestría y concluir el proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Departamento de Suelos por darme las herramientas necesarias para forjarme como profesionista.

A la Coordinación del posgrado de la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz, por su gran apoyo, su excelente orientación y por aportar parte de sus valiosos conocimientos y consejos para la realización de esta tesis. Gracias por confiar en mí.

Al Dr. Miguel Uribe Gómez por su paciencia, por compartirme parte de sus conocimientos, por su ayuda, apoyo y por el tiempo dedicado para la estructura, revisión y culminación de este documento.

Al Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas por el apoyo brindado, sus buenos consejos y por dedicarle tiempo a este trabajo.

A la comunidad de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos, especialmente a Don Arnulfo Morán y familia. Gracias por su hospitalidad, apoyo y amistad.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales



Nombre: Patricia Ruiz García

Fecha de nacimiento: 05 de Marzo de 1987

Lugar de nacimiento: Ecatepec, Estado de México

CURP: RUGP870305MMCZRT08

Profesión: Ingeniero en Restauración Forestal

Cédula Profesional: 09059500

Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. México.

Licenciatura: Ingeniería en Restauración Forestal. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. México.

Desarrollo Profesional

2014. Apoyo de campo en el proyecto “Mejora de la información para promover el manejo forestal para la protección del suelo y del agua” por parte de la FAO.

2012. Apoyo en el inventario de combustibles forestales en la empresa SIGA, Texcoco, Edo. México.

2011. Apoyo en el área de geomática en la empresa GAMAREN, Veracruz.

2009-2010. Encargada del Inventario Forestal de la empresa PROPLANSE, Tabasco.

DISEÑO DE TECNOLOGÍAS AGROFORESTALES CON MAYOR POTENCIAL DE FIJACIÓN DE CARBONO EN AJUCHITLÁN, MORELOS

DESIGN AGROFORESTRY TECHNOLOGIES WITH GREATER CARBON-FIXING POTENCIAL IN AJUCHITLAN, MORELOS

Patricia Ruiz García¹, Jesús D. Gómez Díaz², Miguel Uribe Gómez³, Alejandro I. Monterroso Rivas⁴

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue diseñar tecnologías agroforestales con especies nativas que presenten un mayor potencial de fijación de carbono que mejoren las condiciones del suelo y que generen incrementos económicos para los pobladores de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos. Se realizó una zonificación detallada de las diferentes unidades del paisaje definiendo sistemas bio-productivos a partir de una delimitación cartográfica detallada de las unidades geomorfológicas, el clima y el uso de la tierra y la vegetación. Éstas fueron la base para realizar un inventario detallado de los almacenes de carbono y las condiciones particulares de cada una de éstas en cuanto a la disminución de su potencial productivo derivado del uso y manejo de las mismas. Se cuantificó la línea base de fijación de carbono y se estimó la adicionalidad de C asociada a las tecnologías agroforestales propuestas en una proyección de 20 años. Finalmente se determinó el incremento económico que tendrán los productores a los 20 años por la venta de C a nivel nacional e internacional, y por la venta de leña. En total se obtuvieron 14 unidades de paisaje; para las unidades con menor contenido de C se propusieron las tecnologías de: cercas vivas en las zonas agrícolas y de pastizal; barreras vivas en la Selva Baja Caducifolia (SBC) con baja densidad en la cima de las laderas y afectada por erosión hídrica; y enriquecimiento de acahuales para SBC con baja densidad en el valle fluvial.

Palabras clave: Zonificación, unidades de paisaje, inventario de C, línea base, adicionalidad, incremento económico.

ABSTRACT

The objective of this work was to design agroforestry technologies using native species having a greater carbon-fixing potential, which can improve soil condition and generate income increases for inhabitants in Ajuchitlán, Tlaquiltenango, state of Morelos, Mexico. A detailed zonation of the landscape various units was carried out, defining bio-productive systems out of a detailed cartographic delimitation of geomorphological units, climate and land use, and vegetation. These constituted the base to carry out a detailed inventory of the carbon stock, and the particular conditions of each one of these regarding the decrease in their productive potential resulting from their use and management. The base line of carbon fixation was quantified and the Carbon additionality associated to the proposed agroforestry technologies was estimated in a 20-year projection. Finally, the income increase for the producers 20 years after the technologies establishment from the Carbon sales at international and national levels, and for fire wood sales, was estimated. 14 landscape units were obtained; for those units with lowest Carbon content, technologies proposed were: live fences for agricultural and grassland zones; live barriers for low-density dry tropical forest (SBC) on hillside tops, affected by hydric erosion; and secondary vegetation enrichment for low-density SBC on fluvial valleys

Key words: Zonation, landscape units, Carbon inventory, base line, additionality, income increase.

¹Tesista; ²Director; ³Codirector; ⁴Asesor

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. MARCO TEORICO.....	4
3.1. Ciclo del carbono.....	4
3.2 Cambio climático y gases de efecto invernadero.....	5
3.3. Medidas de mitigación.....	6
3.4. Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y Reducción de Emisiones de Deforestación y Degradación (REDD+).....	8
3.4.1. Característica de los proyec	.8
3.5. Inventario de carbono bajo los lineamientos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).....	10
3.5.1. Biomasa.....	11
3.5.2. Materia orgánica muerta.....	12
3.5.3. Materia orgánica del suelo.....	13
3.6. Potencialidad de los Sistemas Agroforestales para la fijación de carbono.....	13
3.6.1. Cercas vivas.....	14
3.6.2. Enriquecimiento de acahuales.....	14
3.6.3. Barreras vivas.....	15
3.7. Efecto del cambio de uso del suelo sobre el contenido de carbono en Morelos.....	15
4. METODOLOGÍA.....	16
4.1. Área de estudio.....	16

4.2. Caracterización de unidades de paisaje.....	18
4.2.1. Elaboración del Mapa fisiográfico.....	18
4.2.2. Elaboración del Mapa de Climático.....	18
4.2.2.1. Elaboración del mapa de temperatura.....	20
4.2.2.2. Elaboración del mapa de precipitación.....	20
4.2.2.3. Delimitación de las áreas de influencia climática.....	22
4.2.3. Elaboración del Mapa de Uso del suelo y Vegetación.....	22
4.3. Puntos de muestreo.....	23
4.4. Inventario de los reservorios de Carbono.....	23
4.3.1. Tamaño de la parcela de muestreo.....	23
4.3.2. Inventario de carbono en Biomasa viva.....	24
4.3.3. Inventario de carbono en Materia orgánica muerta.....	25
4.3.4. Inventario de carbono en Materia orgánica del suelo.....	27
4. 5. Estimación del contenido de carbono en biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo.....	28
4.6. Establecimiento de la línea base.....	30
4.7. Diseño de tecnologías agroforestales en cada uso de suelo.....	33
4.8. Adicionalidad de cada tecnología agroforestal.....	34
4.9. Evaluación de la viabilidad económica de las tecnologías agroforestales.....	36
4.9.1. Costos de establecimiento.....	36
4.9.2. Beneficios económicos.....	37
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
5.1. Caracterización de unidades de paisaje.....	39
5.1.2. Mapa fisiográfico.....	39
5.1.3. Mapa climático.....	41
5.1.4. Mapa de uso de suelo y vegetación.....	47
5.1.5. Unidades de Paisaje.....	49

5.2. Puntos de muestreo.....	51
5.3. Contenido de carbono en la biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo.....	52
5.3.1. Biomasa viva.....	52
5.3.2. Materia Orgánica Muerta.....	56
5.3.3. Materia orgánica del suelo.....	59
5.4. Línea Base.....	62
5.4.1. Biomasa Viva.....	62
5.4.2. Materia orgánica del suelo.....	64
5.5. Diseño de tecnologías Agroforestales.....	66
5.5.1. Selección de especies.....	67
5.5.2. Características generales de las especies seleccionadas.....	70
5.5.3. Cercas vivas.....	76
5.5.4. Barreras vivas.....	77
5.5.5. Enriquecimiento de acahuales.....	79
5.5.6. Obtención y calidad de planta.....	80
5.5.7. Plantación en campo.....	81
5.5.8. Cuidados de la plantación.....	83
5.6. Adicionalidad de cada tecnología agroforestal.....	84
5.6.1. Biomasa viva.....	84
5.7. Evaluación de la viabilidad económica de las tecnologías agroforestales.....	89
5.7.1. Costos de establecimiento.....	89
5.7.2. Beneficios económicos.....	91
6. CONCLUSIÓN.....	96
7. RECOMENDACIONES.....	98
8. LITERATURA CITADA.....	99

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio.....	19
Cuadro 2. Ecuaciones alométricas utilizadas por especie con mayor valor de importancia y carbono total proporcional estimado.....	28
Cuadro 3. Factores de cambio de existencias y SOCREF	32
Cuadro 5. Factores de existencia utilizados para la adicionalidad de la materia orgánica del suelo.	36
Cuadro 6. Superficie por rango de pendientes en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	39
Cuadro 7. Geoformas delimitadas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	40
Cuadro 8. Ecuaciones de regresión lineal simple generados para realizar el mapa de temperatura de, Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	41
Cuadro 9. Temperatura media anual y mensual en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	42
Cuadro 10. Valor estimado de precipitación anual y mensual por rango de precipitación en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	45
Cuadro 11. Climas encontrados en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.....	46
Cuadro 12. Uso de suelo y vegetación encontrados en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	48
Cuadro 13. Unidades de paisaje relativamente homogéneas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	49
Cuadro 14. Especies más abundantes registradas en el inventario forestal. ...	53
Cuadro 15. Comparación de medias del contenido de carbono en Mg ha^{-1} en el estrato arbóreo y arbustivo.....	54
Cuadro 16. Comparación de medias del contenido de carbono en Mg ha^{-1} en el estrato herbáceo.	55

Cuadro 17. Comparación de medias del contenido de carbono en Mg ha^{-1} en la hojarasca.	57
Cuadro 18. Comparación de medias del contenido de carbono en Mg ha^{-1} de ramas muertas.	57
Cuadro 19. Carbono orgánico del suelo por profundidad en las diferentes unidades de paisaje.	59
Cuadro 20. Carbono (Mg ha^{-1}) del estrato arbóreo y arbustivo en una proyección de 20 años.	63
Cuadro 21. Contenido de carbono (Mg ha^{-1}) de la materia orgánica del suelo en una proyección de 20 años.	64
Cuadro 22. Especies seleccionadas con mayor contenido de carbono en Mg ha^{-1} por unidad de paisaje.	68
Cuadro 23. Adicionalidad de carbono aéreo (Mg ha^{-1}) según la especie a utilizar en los cercos vivos en la zona agrícola y de pastizal en una proyección de 20 años.	85
Cuadro 24. Contenido de carbono (Mg ha^{-1}) adicional en la materia orgánica del suelo en una proyección de 20 años.	88
Cuadro 25. Costo de establecimiento de las tecnologías propuestas.	89
Cuadro 26. Beneficio económico a los 20 años por la venta de carbono a nivel internacional en cercas vivas, según el tipo de especie.	91
Cuadro 27. Cálculo del volumen, número de carga y costo total de leña por árbol.	93
Cuadro 28. Beneficio económico por venta de leña según la especie a utilizar en cada tecnología agroforestal propuesta.	93
Cuadro 29. Costo de establecimiento y beneficio económico de las tecnologías propuestas.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento del contenido de c a lo largo del tiempo sin proyecto de manejo (línea base) y con proyecto de manejo (adicionalidad). Fuente: franco, 2009.	9
Figura 2. Ubicación del ejido Ajuchitlán municipio de Tlaquiltenango, Morelos (inegi, 2009).	16
Figura 3. Parcela de muestro y distribución de las mediciones de los reservorios de carbono.....	24
Figura 4. Compensación de la pendiente y orientación de la parcela de muestreo hacia el norte.	24
Figura 5. Medición del diámetro normal en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	25
Figura 6. Recolección de herbáceas en 1 m ²	25
Figura 7. Colecta de hojarasca y mantillo en 1m ²	26
Figura 8. División del cuadrante para colecta de ramas en 25 m ²	26
Figura 9. Procedimiento para la obtención de muestras de suelo con una barrena de muestras inalteradas.	27
Figura 10. Obtención del peso seco del estrato herbáceo y materia orgánica muerta.....	29
Figura 11. Curva de crecimiento de las principales familias de las especies seleccionadas: a) familia leguminosae, b) <i>guazuma ulmifolia</i> , c) familia burseraceae, d) género <i>acacia sp.</i> Fuente: cervantes y sotelo, (2002)..	35
Figura 12. Pasos a seguir para calcular el costo total de establecimiento y mantenimiento de las tecnologías agroforestales propuestas.	37
Figura 13. Rango de pendientes de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	39
Figura 14. Mapa de fisiografía de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	40

Figura 15. Mapa de temperatura anual de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	42
Figura 16. Mapas de isotermas mensuales de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	44
Figura 17. Mapa de precipitación media anual de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	45
Figura 18. Mapa de climas de acuerdo a la clasificación de köppen modificado por garcía; en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	47
Figura 19. Mapa de uso de suelo y vegetación de Ajuchitlán,Tlaquiltenango, Morelos.	48
Figura 20. Unidades de paisaje relativamente homogéneas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	51
Figura 21. Puntos de muestreo en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.	52
Figura 22. Distribución del contenido de carbono en las diferentes profundidades en cada unidad de paisaje	62
Figura 23. Línea base de la biomasa viva de las unidades de paisaje con menor contenido de carbono comparado con la de mayor contenido a los 20 años.	63
Figura 24. Distribución espacial de las tecnologías agroforestales propuestas.	67
Figura 25. Especies con mayor contenido de carbono por categoría diamétrica.	69
Figura 26. Arreglo espacial de los árboles en los cercos vivos propuestos.	77
Figura 27. Erosión observada en la unidad de paisaje P_SBC_PD_CL.....	78
Figura 28. Espaciamiento de las curvas de nivel y entre planta y planta en las barreras vivas propuestas.	79
Figura 29. Arreglo espacial del enriquecimiento de acahuals.	80
Figura 30. Trazo de las curvas de nivel con el aparato "A".	83

Figura 31. Fijación de carbono en la biomasa aérea según el tipo de especie propuesta en una proyección de 20 años.....	84
Figura 32. Contenido de carbono (Mg ha^{-1}) con la adicionalidad de <i>bursera bipinnata</i> y de la línea base en la unidad de paisaje P_SBC_PD_CL.....	86
Figura 33. Contenido de carbono (Mg ha^{-1}) en el estrato arbóreo en la adicionalidad y línea base en la unidad de paisaje SBC_PD_V.	87

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas que más contribuye al calentamiento global y de mayor responsabilidad provocada por el hombre. Por lo tanto este tema requiere atención desde diferentes esferas de actuación y ámbito, desde las comunidades rurales hasta los escenarios políticos y desde el sector productivo hasta el industrial. Se considera que cada sector y cada actor tiene una responsabilidad en el proceso de enfrentar el problema y a su vez una oportunidad para revertirlo. A partir del 2008, los bosques y las comunidades forestales tomaron un papel protagónico dentro del tema, ya que se identificaron a la deforestación y degradación como consecuencias directas de la pérdida de la cobertura forestal y como fuentes emisoras de Gases Efecto Invernadero (GEI) (Esquivel *et al.*, 2013).

Una de las alternativas para enfrentar dicho problema es mediante la implementación de tecnologías agroforestales con especies nativas que tengan la capacidad de fijar mayores cantidades de carbono a los actuales usos del suelo. Si bien las tecnologías agroforestales contienen mucho menos carbono que los bosques primarios o las áreas bajo manejo forestal, sus reservas de carbono son mucho mayores que los monocultivos o los pastos, de modo que representan un gran potencial como estrategia de fijación de carbono y la rehabilitación de tierras degradadas (Carrazón, 2008). Pueden desempeñar un importante rol en el ciclo global de carbono mediante su acumulación temporal en la biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo (Roncal *et al.*, 2008), generando un mayor aporte de materia orgánica al suelo, incrementando el contenido de carbono, mejorando la calidad y fertilidad del mismo (FAO, 2002).

Actualmente existen políticas internacionales que incentivan monetariamente por medio de la venta de carbono, las prácticas de manejo que conduzcan a la conservación e incremento de los bosques, entre las que se encuentran el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) y la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+). Para que estas instituciones apoyen

económicamente a los agricultores, los proyectos deben seguir los lineamientos establecidos por el IPCC en la Guía de Buenas Prácticas, estableciendo la línea base de carbono que se tiene en el actual uso de la tierra, así como la adicionalidad que se tendría si se hace un cambio de uso del suelo que favorezca el incremento del carbono a través del tiempo. Sin embargo en México existen muy pocos proyectos que aprovechan los créditos del MDL y REDD+, debido a que no siguen los lineamientos establecidos por el IPCC, así como por falta de información a la población en general.

Una de las regiones en México que puede aprovechar estos créditos son las comunidades inmersas en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla (REBIOSH), localizada al sur del estado de Morelos, debido a que una de las problemáticas más graves de la REBISOH es la casi nula creación de empleos, lo que genera una alta marginación que impacta directamente en la sustentabilidad de los recursos naturales. En la reserva se ha estado trabajando en la búsqueda de soluciones a los problemas de la población establecida en ella, así como en las áreas de influencia, por lo que han estado impulsando la creación de sistemas agroforestales, sin embargo la pobreza continúa (CONANP-SEMARNAT, 2005).

Por lo tanto el objetivo fundamental de este trabajo es diseñar tecnologías agroforestales con especies nativas que tengan mayor potencial de fijación de carbono que mejoren las condiciones del suelo y que incrementen los ingresos económicos de los productores de Ajuchitlán municipio de Tlaquiltenango, Morelos; siguiendo los lineamientos del IPCC, cuantificando la línea base y los cambios en las reservas de carbono, comprobando la adicionalidad del mismo mediante modelaje.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Diseñar tecnologías agroforestales con especies nativas que muestren mayor potencial de fijación de carbono que mejore las condiciones del suelo y que incremente los ingresos económicos del productor de Ajuchitlán municipio de Tlaquilenango, Morelos.

2.2. Objetivos específicos

- Delimitar las unidades de paisaje relativamente homogéneas mediante mapas de fisiografía, clima, uso de suelo y vegetación, definiendo sistemas bio-productivos que sean la base para estimar los almacenes de carbono.
- Cuantificar los reservorios de carbono en la biomasa aérea, subterránea y del suelo en las unidades de muestreo de la región de estudio para establecer la línea base de carbono bajo las condiciones actuales considerando las prácticas de manejo de los productores.
- Diseñar tecnologías agroforestales con especies nativas que muestren mayor adicionalidad en el potencial de fijación de carbono y de rehabilitación de las tierras.
- Determinar el incremento económico que los productores recibirán por el establecimiento de las tecnologías agroforestales propuestas.

3. MARCO TEORICO

3.1. Ciclo del carbono

Durante miles de años el carbono (C) tuvo un balance natural, con contenidos constantes en los reservorios naturales de C (Prentice, 2001). Sin embargo en las últimas décadas las actividades antropogénicas han perturbado el ciclo natural del carbono impulsando el efecto invernadero (Field *et al.*, 2004). Por lo tanto es de suma importancia entender el ciclo natural del C. Para poder entenderlo hay que especificar que el C experimenta intercambios entre la atmósfera, los océanos, los ecosistemas terrestres y de manera más lenta, con sedimentos y rocas sedimentarias (Richey, 2004). El C se encuentra en los océanos en tres distintas formas: CO_2 , CO_3^{2-} y HCO_3^- , la suma de estos elementos es equivalente al total de Carbono Inorgánico Disuelto (CID). El CID es transportado en los océanos por distintos procesos físicos y biológicos, en donde por medio de la fotosíntesis se genera la Producción Primaria Bruta (PPB), que es la cantidad total de C producido (Bender *et al.*, 1994). El C que permanece después de lo consumido por la respiración de organismos autótrofos se le llama Producción Primaria Neta (PPN) (Falkowski *et al.*, 1998). De esta manera la materia orgánica es consumida, transportada y respirada por los organismos heterótrofos y enviada a la superficie para ser devuelta a la atmósfera. En este punto, sólo una pequeña fracción de C es almacenada en los sedimentos del fondo oceánico. Este tipo de exportación de carbonatos de calcio (CaCO_3) a las profundidades marinas significa apenas un pequeño flujo del total exportado, ya que cerca de la mitad de este C es almacenado como CaCO_3 en los sedimentos marinos y la otra mitad se disuelve en el fondo y se une al almacén del CID (Milliman, 1993).

La mayor parte del ciclo del C en tierra ocurre dentro de los ecosistemas, donde la mitad de la PPB es respirada por las plantas y la PPN es balanceada por la asimilación y respiración de los organismos heterótrofos (Prentice, 2001).

A través de los tejidos de las plantas, la mayoría de la PPN se transforma en los almacenes de detritos, donde algunos de estos se descomponen rápidamente siendo respirados y devueltos a la atmósfera como dióxido de carbono (CO_2); mientras que otros se convierten y transforman en el C del suelo, que se descompone de manera más lenta.

Esta pequeña fracción de C en los suelos es convertida en compuestos resistentes a la descomposición, además de la pequeña cantidad de carbón producido en incendios que constituyen el almacén de C “inerte”. Los diversos procesos biológicos que se dan en los ecosistemas terrestres consumen mucho de este C (Field *et al.*, 2004). El flujo del C atmosférico, que por medio de las plantas llega al suelo, alcanza niveles de equilibrio en varios miles de años por medio de la “exportación” del Carbono Orgánico Disuelto (COD) en ríos (Schlesinger, 1990). Por su parte, el Carbono Inorgánico Disuelto (CID), que proviene de la intemperización de CaCO_3 , toma el C de la atmósfera. El COD y el CID son entonces transportados por los ríos hacia los océanos, ahí, el COD es “respirado” y liberado a la atmósfera nuevamente. La producción de CaCO_3 por organismos marinos toma una mitad del CID que llegó por los ríos y es regresado a la atmósfera, mientras que la otra mitad del CID es almacenada en los sedimentos del fondo de los océanos, siendo la base para la formación de las rocas carbonatadas (Prentice, 2001).

3.2 Cambio climático y gases de efecto invernadero

El estudio del clima desde una perspectiva histórica indica que éste ha sido y sigue cambiante por su propia naturaleza, a lo largo del tiempo pero en una forma moderada. Sin embargo, en la actualidad, existe un cambio climático acelerado de origen antropogénico, causado principalmente por un aumento de las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera; producto del uso creciente de combustibles fósiles, la deforestación y el mal uso de la tierra. Siendo el CO_2 el principal gas responsable de los cambios de temperatura en la superficie de la tierra (Yqwise *et al.*, 2008).

A partir del 2008, los bosques y las comunidades tomaron un papel protagónico dentro del tema, ya que se identificaron a la deforestación y degradación como consecuencias directas de la pérdida de la cobertura forestal y a su vez como fuentes emisoras de Gases Efecto Invernadero (GEI), pero así mismo como alternativas para contribuir y enfrentar el problema (Esquivel *et al.*, 2013).

Moutinho *et al.* (2005) manifiestan que la deforestación tropical, es responsable del 20 al 25% de las emisiones anuales mundiales de CO₂. Donde los casi 2 millones de hectáreas de bosques desmontados anualmente sólo en la región de la Amazonia se tradujeron en emisiones netas de unos 200 millones de toneladas de carbono, tal como lo mencionan Houghton *et al.* (2000). Mientras que la deforestación a nivel mundial emite a la atmósfera 2000 millones de Mg C año⁻¹ (FAO, 2005). Así mismo, las reservas de carbono contenidas en la biomasa forestal disminuyeron por lo menos 1.1 gigatoneladas al año entre el 2000 y 2005 (1 gigatonelada = 109 toneladas), a consecuencia de la deforestación ininterrumpida y la degradación de los bosques (FAO, 2005). A nivel nacional, México aporta 1.4% de las emisiones globales, lo cual lo coloca como el décimo segundo país emisor a nivel mundial. En el caso específico del sector uso de suelo, las emisiones son del 18.6% (12.3% agricultura y 6.3% de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura). De estos sectores el gas que más se emite es el CO₂ (9.6% por conversión de bosques y pastizales) (INECC, 2012).

3.3. Medidas de mitigación

Los compromisos internacionales han señalado la importancia de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como el tomar medidas de mitigación que disminuyan los escenarios que predicen un mayor deterioro ambiental. La firma del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), durante la Cumbre para el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en la ciudad de Río de Janeiro, Brasil, en junio de 1992, sirve como punto de partida para el desarrollo de una serie de acuerdos destinados a reducir y estabilizar la concentración de los GEI a niveles tales que

prevenga los efectos negativos de un incremento en la temperatura promedio de la tierra en la conservación de los ecosistemas y el desarrollo de las actividades humanas (Salgado, 2004). El Convenio reconoce que el Cambio Climático y sus efectos adversos son problemas que conciernen a toda la humanidad y que las actividades humanas basadas en la utilización de combustibles fósiles, así como las que promueven procesos de cambio de uso del suelo y deforestación, contribuyen considerablemente al desarrollo de este proceso no natural de cambio en la temperatura media del planeta (Rainforest Alliance *et al.*, 2009).

Es durante la Séptima Conferencia de las Partes, en 1997, que se firma el Protocolo de Kyoto (PK). Este documento reconoce la necesidad de reducir las emisiones de GEI a nivel global y define compromisos cuantitativos de reducción de GEI para los países desarrollados respecto a los niveles de emisión (Salgado, 2004). El Protocolo reconoce el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas, para lo cual establece una división entre países denominados Partes Anexo I, que corresponden a países industrializados, y los que no son Anexo I y que se denominan como Partes no Anexo I. Los primeros se comprometen, entre los años 2008 y 2012, a limitar sus emisiones de GEI hasta cierto nivel que representa una reducción respecto a un año de línea de base (normalmente entre el 5 y el 8% de los niveles de 1990), de modo que la reducción global sea del 5.2%. Aunque las Partes no Anexo I no tienen obligaciones de reducir sus emisiones y se espera de ellos que las reduzcan conforme se desarrollan (Rainforest Alliance *et al.*, 2009).

3.4. Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y Reducción de Emisiones de Deforestación y Degradación (REDD+)

Una manera de reducir los GEI, es mediante la venta de certificados de reducción de emisiones de carbono que impulse a los agricultores a reducir las tasas de deforestación mediante el pago por conservación de sus bosques y selvas (Salgado, 2004). Es por ello que surgieron políticas internacionales que incentivan monetariamente las prácticas de manejo que conduzcan a la conservación e incremento de los bosques. El mecanismo de desarrollo limpio (MDL), comprendido en el Protocolo de Kyoto, considera la forestación y reforestación como prácticas generadoras de créditos de carbono. Sin embargo este mecanismo aún no ha sido exitoso en este campo (Rainforest Alliance *et al.*, 2009). En la actualidad se presentan políticas como REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación) con lineamientos más sencillos de seguir, que prometen compensar monetariamente a los países en desarrollo que eviten la deforestación y degradación de los bosques y que promuevan la regeneración forestal (EM y VN, 2014).

Sin embargo los proyectos que financian MDL y REDD+ deben seguir los lineamientos establecidos en la Guía de Buenas Prácticas elaborado por el IPCC (Panel Intergubernamental en Cambio Climático), de no ser así no pagaran hasta que no vean niveles de referencia confiables que les indiquen que tanto carbono es capturado en los bosques, zonas agrícolas y de pastizal. Para ganar la confianza de los inversionistas y ambientalistas, estos niveles de referencia deben de haber sido desarrollados de acuerdo con la Guía de Buenas Prácticas (EM y VN, 2014).

3.4.1. Característica de los proyectos

Algunas de las características que deben tener los proyectos financiados por MDL y REDD+ son: a) Los proyectos deberán contribuir al desarrollo sustentable del país anfitrión, a la conservación de la biodiversidad y al uso sustentable de los recursos naturales. b) Los proyectos deberán generar reducción de emisiones reales, medibles y de largo plazo, adicionales a las que

hubieran ocurrido en ausencia del proyecto. Para ello, se deberán comparar los flujos y stocks de carbono de las actividades del proyecto con las que hubieran ocurrido en ausencia del mismo (en la llamada línea de base) (Rainforest Alliance *et al.*, 2009).

Línea Base y Adicionalidad

La Línea de Base y la Adicionalidad son elementos creados con la finalidad de asegurar que los proyectos tengan integridad ambiental y que efectivamente contribuyan al desarrollo sostenible del país anfitrión (Chidiak *et al.*, 2003). En primer lugar, la línea base comprende al escenario que representa razonablemente las emisiones de GEI de las fuentes y/o la absorción de carbono por sumideros que ocurrirían en ausencia de las actividades propuestas por el proyecto (Figura 1). Suele incluir la definición de una línea de base histórica o punto de referencia y una línea de base proyectada para la situación sin proyecto y debería definirse de manera tal que no puedan ganarse certificados de reducción de emisiones (CER) por causas de fuerza mayor o por actividades ajenas a las incluidas en el Proyecto. Establecer el balance de carbono de la línea de base resulta de vital importancia, pues permite determinar la cantidad de carbono secuestrado que se puede atribuir a las actividades adicionales propuestas en el proyecto en cuestión (Franco, 2009).

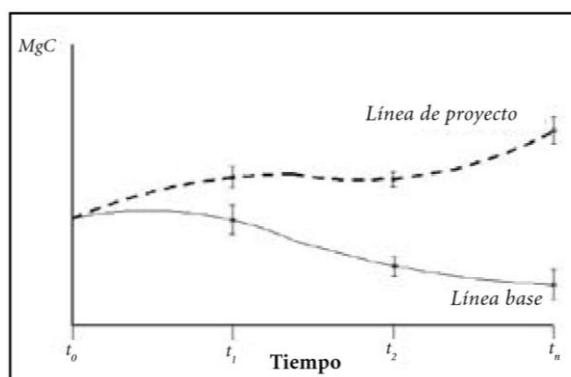


Figura 1. Comportamiento del contenido de C a lo largo del tiempo sin proyecto de manejo (línea base) y con proyecto de manejo (Adicionalidad).
Fuente: Franco, 2009.

En segundo lugar, la adicionalidad requerida para un proyecto implica que éste debe provocar reducciones en las emisiones de GEI que no hubieran tenido lugar en ausencia del mismo, por lo que se debe demostrar de qué forma las actividades del proyecto (por ejemplo, los cambios en el uso de la tierra, las prácticas de manejo forestal sostenible, la reducción de impactos de la cosecha, etc.) lograrían beneficios directos sobre la cantidad de carbono secuestrado en comparación con la línea de base. El análisis, de esta forma, debe incluir a todas las fuentes y sumideros de carbono y a todos los impactos indirectos, tanto positivos como negativos, que puedan ocurrir (Chidiak *et al.*, 2003).

Cabe destacar que el concepto de adicionalidad adoptado corresponde a una noción de adicionalidad ambiental y no económica, es decir se requiere que el proyecto involucre reducciones de emisiones/captura de carbono que no ocurrirían en ausencia del proyecto, independientemente de si el proyecto hubiera sido rentable o no (Chidiak *et al.*, 2003). Los conceptos de adicionalidad y de línea base se encuentran inexorablemente relacionados, debido a que tanto la estimación de la primera como la construcción de la segunda parten de la misma pregunta: ¿qué es lo que hubiera ocurrido en el futuro si no se hubiera llevado a cabo el proyecto?.

Precisamente, uno de los métodos sugeridos para demostrar la adicionalidad de un proyecto determinado consiste en desarrollar una línea de base creíble que muestre la reducción de emisiones que hubiera tenido lugar si el proyecto en cuestión no se hubiera llevado a cabo (Busch *et al.*, 2000).

3.5. Inventario de carbono bajo los lineamientos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)

En 1988 se crea por parte de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) con la finalidad de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica pertinente para la comprensión del riesgo de cambio climático

inducido por los seres humanos (Carrazón, 2008). El IPCC en 1996 creó un documento donde se generaron las directrices para los inventarios anuales de gases de efecto invernadero en el Sector de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, del inglés). Con este método, se intenta mejorar la coherencia y la exhaustividad en la estimación y la declaración de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero.

Los principales depósitos de carbono definidos por el IPCC para AFOLU son: Biomasa aérea, biomasa subterránea; materia orgánica muerta (madera muerta y hojarasca); y materia orgánica del suelo (IPCC, 2006). El inventario de biomasa es un requisito básico para desarrollar proyectos que tengan como objetivo la obtención de certificados de crédito de carbono. El inventario cuantifica el almacenamiento de carbono en diferentes depósitos presentes en distintos usos de ecosistemas de la tierra, permitiendo también medir el impacto de un determinado proyecto en la remoción (secuestro) del dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera, por medio de su fijación en la biomasa existente (Carrazón, 2008).

3.5.1. Biomasa

La biomasa vegetal, incluyendo sus partes aéreas y subterráneas, constituye el principal medio de absorción de CO_2 de la atmósfera. Hay grandes cantidades de CO_2 que se transfieren entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres, fundamentalmente a través de la fotosíntesis y de la respiración. A la captación de CO_2 a través de la fotosíntesis se la llama producción primaria bruta (GPP, del inglés). Alrededor de la mitad es lo que respiran las plantas y que vuelve a la atmósfera, mientras que el resto constituye la producción primaria neta (NPP, del inglés), que es el total de producción de biomasa y de materia orgánica muerta en un año. La NPP menos las pérdidas por respiración heterotrófica (descomposición de materia orgánica en desperdicios, en ramas secas y en la tierra) equivale al cambio en las existencias netas de carbono de un ecosistema y, en ausencia de pérdidas por perturbación, se conoce como producción neta del ecosistema (NEP, del inglés) (IPCC, 2006). El IPCC (2006) define a la

biomasa aérea como toda la biomasa de la vegetación viva, tanto maderera como herbácea, que se halla por encima del suelo, incluidos tallos, cepas, ramas, corteza, semillas y follaje. En cuanto a la biomasa subterránea el IPCC (2006) la define como toda la biomasa de las raíces vivas. A menudo, las raíces finas, de menos de 2 mm de diámetro (sugerido), se excluyen porque, empíricamente, no se las puede distinguir de la materia orgánica del suelo o de la hojarasca.

3.5.2. Materia orgánica muerta

En algún momento, la mayor parte de la biomasa (NPP) contenida en el material vegetal vivo se transfiere a depósitos de materia orgánica muerta (DOM, del inglés) (p. ej. madera muerta y hojarasca). Parte de la DOM se descompone rápidamente y devuelve el carbono a la atmósfera, pero hay una parte retenida durante meses hasta años o décadas. El uso y el manejo de las tierras repercuten sobre las existencias de carbono en la materia orgánica muerta al tener su efecto sobre la velocidad de descomposición y sobre el ingreso de detrito fresco (IPCC, 2006).

Para el IPCC (2006) la madera muerta incluye toda la biomasa leñosa no viva (madera, raíces y cepas de 10 cm de diámetro o más) que no está contenida en la hojarasca, ya sea en pie, tendida en el suelo o enterrada. La hojarasca incluye toda la biomasa no viva con un tamaño mayor que el límite establecido para la materia orgánica del suelo (sugerido 2 mm) y menor que el diámetro mínimo elegido para la madera muerta (p. ej. 10 cm), que yace muerta, en diversos estados de descomposición por encima o dentro del suelo mineral u orgánico. Incluye la capa de hojarasca como se la define habitualmente en las tipologías de suelos. Las raíces vivas finas por encima del suelo mineral u orgánico (por debajo del diámetro mínimo límite elegido para la biomasa subterránea) se incluyen con la hojarasca cuando no se las puede distinguir de esta última empíricamente (IPCC, 2006).

3.5.3. Materia orgánica del suelo

A medida que se fragmenta y se descompone, la materia orgánica muerta se transforma en materia orgánica del suelo. Ésta incluye carbono orgánico contenido en suelos minerales hasta una profundidad dada (p. ej. 30 cm); raíces finas vivas y muertas y la DOM que se encuentran dentro del suelo y que miden menos que el límite de diámetro mínimo (2 mm); y una gran variedad de materiales que difieren significativamente en cuanto a su tiempo de permanencia en el suelo. Parte de este material está integrado por compuestos inestables que los organismos microbianos descomponen fácilmente, y devuelven el carbono a la atmósfera. Sin embargo, parte del carbono orgánico del suelo se convierte en compuestos recalcitrantes que se descomponen muy lentamente y que, por ende, pueden permanecer en el suelo durante décadas, siglos o más tiempo. Las existencias de carbono orgánico se ven influenciadas por las actividades de gestión y manejo de la tierra que afectan la velocidad de formación de hojarasca y de pérdida de materia orgánica del suelo (IPCC, 2006).

3.6. Potencialidad de los Sistemas Agroforestales para la fijación de carbono

Los Sistemas Agroforestales (SAF), aun no siendo los más eficientes en la fijación de carbono, proporcionan una oportunidad única para incrementar las reservas de carbono en la biosfera terrestre dada el área potencial existente para los mismos. Se estima que unos 630 millones de hectáreas en todo el mundo son aptas para la agroforestería (Kandji *et al.*, 2006). Si bien los SAF contienen mucho menos carbono que los bosques primarios o las áreas bajo manejo forestal, sus reservas de carbono son mucho mayores que los monocultivos o los pastos, de modo que representan un gran potencial como estrategia de rehabilitación de tierras degradadas (Carrazón, 2008).

Mediante la implementación de los SAF se genera un incremento en la materia orgánica del suelo generando un aumento en el contenido de carbono, lo que ocasiona un impacto directo sobre la calidad y la fertilidad de los suelos, así

como sobre el ambiente y la resiliencia y sostenibilidad de la agricultura (FAO, 2002). Por lo tanto la agroforestería podría ser, por varias razones, una de las propuestas interesantes de cambios en el uso de la tierra relacionados con la fijación de carbono. En primer lugar, porque la superficie involucrada es considerable y la tasa de ganancia de carbono es relativamente alta (0.2 a 3.1 Mg ha⁻¹ año⁻¹) durante el tiempo de residencia de los árboles (IPCC, 2006).

En segundo lugar, puede mitigar la importante emisión de CO₂ proveniente de la deforestación. Finalmente, podría proporcionar un sistema sostenible desde el punto de vista técnico, ecológico y económico. Sin embargo, por razones sociales y culturales, tal tipo de manejo de la tierra es difícil de promover, además de no contar con un pago justo del servicio ambiental, debido entre otras razones, a la ausencia de información cuantificada sobre su potencial de almacenamiento y fijación de C (Albrecht y Kandji, 2003).

3.6.1. Cercas vivas

Las cercas vivas son hileras de árboles que pueden delimitar o servir de protección para otros componentes u otros sistemas. Esta tecnología agroforestal es considerada por muchos científicos como complementaria a otros sistemas integrados de producción. El propósito primario de las cercas vivas es controlar el movimiento de los animales y de la gente. Sin embargo, han demostrado ser sistemas muy diversos, y de bajo riesgo, que proveen numerosos beneficios a los productores agropecuarios (Reyes y Martínez, 2011). Según Torres y Guevara (2002) las cercas vivas pueden adicionar alrededor de 92 Mg C ha⁻¹ en una proyección de 150 años.

3.6.2. Enriquecimiento de acahuales

El enriquecimiento de acahuales es definido como un sistema rotacional que combina especies maderables de alto valor con las especies colonizadoras naturales de la sucesión secundaria. Este tipo de sistemas sólo aplica donde hay seguridad en la tenencia de la tierra, poca presión por el uso del suelo, legislación agraria bien clara, uso actual del suelo rotacional y disponibilidad de

tierra para cultivar maíz (Soto *et al.*, 2011). Este sistema puede contribuir a mejorar los medios de vida de los productores ofreciendo beneficios económicos, ambientales y sociales; además de que puede fijar aproximadamente 124 Mg C ha⁻¹ en 20 años de establecida la plantación (Canadell y Raupach, 2008).

3.6.3. Barreras vivas

Las barreras vivas son hileras de plantas sembradas a poca distancia, en curvas de nivel, con el objetivo de conservar el suelo y protegerlo de la erosión. La distancia entre curvas depende de la pendiente y del tipo de suelo. Las barreras vivas reducen la velocidad del agua y del viento porque divide la ladera en pendientes más cortas (SICTA, 2012).

Sirven también como filtro, captando sedimentos que van en el agua de escurrimiento; así mismo pueden fijar cantidades considerables de carbono, ya que una disminución en la erosión generará un aumento del contenido de carbono en el suelo (SICTA, 2012).

3.7. Efecto del cambio de uso del suelo sobre el contenido de carbono en Morelos

Navar *et al.* (2010) realizó un estudio sobre los efectos del cambio de uso del suelo en los stocks y flujos de carbono en la Selva Baja Caducifolia del estado de Morelos. En donde encontró que la tasa de deforestación anual para el período 1976-1993 fue de 0.81%, lo que indica que aproximadamente 1, 200 ha de Selva Baja Caducifolia se perdieron cada año. Por otra parte, la agricultura intensiva, incluyendo pastizales inducidos aumentó 0.88% anual en el área de estudio (1300 ha⁻¹ año). Desde 1950 hasta 2000, los cambios de uso del suelo en la Selva Baja Caducifolia a la agricultura han contribuido a las emisiones de carbono de 7.03 (± 4.8) Tg C, de los cuales la biomasa en pie promedió el 66% y el carbono orgánico del suelo promedió 34%. Cambios de uso del suelo proyectados probablemente contribuirán a un flujo de carbono adicional de 3.89 (± 0.73) Tg en el año 2050 (Navar *et al.*, 2010).

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El ejido de Ajuchitlán perteneciente al municipio de Tlaquiltenango, se ubica al sur del estado de Morelos, a una altitud de 1060 msnm (Figura 2). Cuenta con una superficie total de 2,665 ha de las cuales 42 ha corresponde a los asentamientos humanos de Xantiopan y Ajuchitlán; 1,447.5 ha corresponden a la zona agrícola-ganadera y 1,118 ha son de uso forestal (Burgos, 2014).

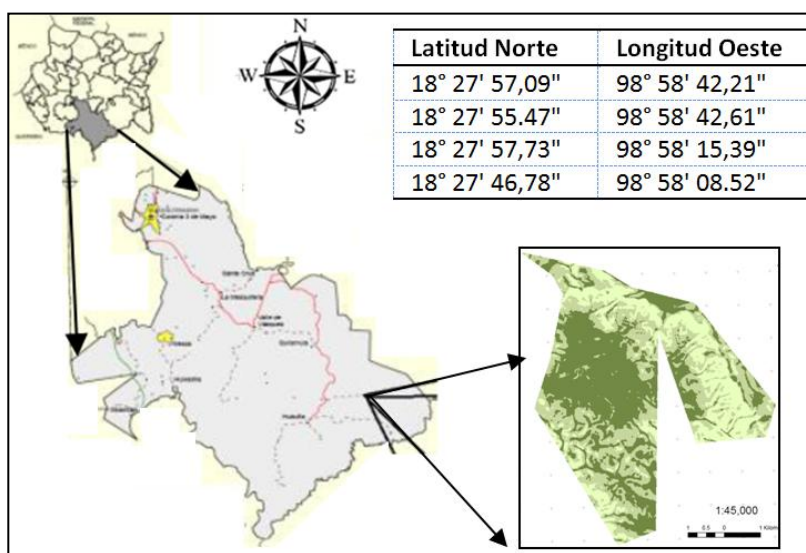


Figura 2. Ubicación del ejido Ajuchitlán municipio de Tlaquiltenango, Morelos (INEGI, 2009).

Fisiográficamente, el ejido de Ajuchitlán se localiza en la provincia del Eje neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, así como en las subprovincias de las sierras del sur de Puebla y sierras y valles guerrerenses, con pendientes que oscilan de 6 hasta 55% en la parte más escarpada. Presenta altitudes mínimas de 1,060 msnm en donde se encuentra el asentamiento humano y alturas máximas de hasta 1,800 msnm representada por el Cerro Prieto (Cruz, 2005). El ejido se encuentra asentado sobre un substrato geológico que consiste de una plataforma de roca caliza marina del mesozoico, predominando las rocas ígneas extrusivas y rocas sedimentarias, siendo frecuentes los afloramientos rocosos y presentando una pedregosidad media (INEGI, 2009).

En el ejido de se puede observar un escurrimiento principal denominado río Ajuchitlán, el cual está comprendido dentro de la subregión oriente de Huautla que desemboca a la subcuenca del río Quilamula. La mayoría de las corrientes de agua ubicadas en la región y dentro del ejido solo presentan caudal en la temporada de lluvias (Dorado *et al.*, 2005). En cuanto al clima, de acuerdo con la fórmula climática de Köppen y las modificaciones de García (1973) el clima corresponde a un $Aw_0''(w)(i')g$, que corresponde al clima más seco de los subhúmedos al tener un cociente P/T menor a 43.2, la precipitación media anual es de 900 mm, presentándose en verano una temperatura media anual de 25°C con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales entre 5 y 7°C. El tipo de suelo presente es el Leptosol en el 100% de la superficie del ejido (INEGI, 2009).

El tipo de vegetación en el área de estudio corresponde al de Selva Baja Caducifolia que se caracteriza por tener especies arbustivas y arbóreas con alturas entre los 4-10 m. Así mismo se presentan dos épocas estacionales claramente marcadas durante el año: una que comprende a la época lluvias que va de Julio a Octubre, y otra que corresponde a la época seca, que comprende los ocho meses restantes del año (Rzedowski, 2006).

Se pueden distinguir zonas de vegetación con alta perturbación, mediana y baja. Dentro de la zona de alta perturbación se puede encontrar una mayor dominancia de especies herbáceas principalmente pastos y vegetación secundaria de árboles representada por cubatas (*Acacia cochlicantha*); esta zona está localizada en las partes cercanas al núcleo poblacional. La zona de media perturbación de la vegetación original está presente en los potreros donde se distingue la introducción de pastos, así mismo como la presencia de vegetación secundaria caracterizada por las cubatas (*Acacia cochlicantha*), palo brasil (*Hamatoxyulun brasiletto*), palo dulce (*Esysenhardtia polystachya*), tecolohuiztle (*Mimosa benthamii*), tepemezquite (*Lysiloma divaricata*), cuauhulote (*Guazuma ulmifolia*) mientras que las zonas con poca perturbación se ubican en las zonas de mayor elevación y de difícil acceso, donde se

desarrollan los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo, propios de la vegetación original (Cruz, 2005).

4.2. Caracterización de unidades de paisaje

Para la caracterización de las Unidades de paisaje relativamente homogéneas se utilizó la metodología propuesta por Gómez (2008) en donde se generaron mapas de fisiografía, clima, uso de suelo y vegetación con ayuda del Sistema de Información Geográfico ArcMap 10.1. Posteriormente los tres mapas se unieron para dar lugar a las unidades de paisaje primarias relativamente homogéneas. A cada una de ellas se le asignó un nombre, comenzando por el uso de suelo y vegetación seguido del tipo de clima y finalizando con la geoforma del terreno de cada unidad. A continuación se describe con detalle cómo se elaboró cada mapa.

4.2.1. Elaboración del Mapa fisiográfico

Para realizar el mapa fisiográfico, el primer paso a seguir fue descargar el modelo de elevación digital del estado de Morelos de la página de INEGI en formato bil. El cual se utilizó para obtener las curvas de nivel cada 50 m, así como las pendientes y el triangulated irregular network (TIN) que sirvió para conocer las alturas del área de estudio.

Los rangos de pendiente se delimitaron siguiendo el criterio establecido en un estudio realizado en la Cuenca del río Platanar por la Comisión Nacional del Agua y el Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo (CONAGUA-UACH, 2009).

4.2.2. Elaboración del Mapa de Climático

Debido a que Ajuchitlán Tlaquiltenango, Morelos, es caracterizado por tener un relieve complejo, además de no contar con estaciones meteorológicas que puedan servir para aportar información detallada sobre los tipos de clima existentes.

Fue necesario elaborar el mapa climático de la región, con base en la metodología de Gómez *et al.* (2008) que consiste en determinar datos de temperatura y precipitación anual y mensual utilizando métodos de interpolación lineal simple complementada con análisis estadístico.

La primera etapa para elaborar el mapa climático, consistió en obtener las temperaturas máximas y mínimas, así como la precipitación media anual de 23 estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio, con datos completos de los últimos 20 años (Cuadro 1). Los datos se obtuvieron del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) versión 3 (IMTA, 2006).

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio.

Clave	Nombre	Estado	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
12030	Chaucingo, Huitzuco	Gro.	18.283	-99.117	830
12115	Huitzuco, Huitzuco	Gro.	18.3	-99.333	940
12081	Taxco, Taxco	Gro.	18.367	-99.617	1800
12126	Tlacotepec	Gro.	17.783	-99.967	1802
12117	Ixcateopan, Cuahutemoc	Gro.	17.517	-99.75	1820
17007	Huajintlan, Amacuzac	Mor.	18.633	-98.967	1049
17008	Huautla, Tlalquitenango	Mor.	18.433	-99.033	971
17015	Tepalcingo, Tepalcingo	Mor.	18.6	-98.85	1200
17016	Tequesquitengo, Jojutla	Mor.	18.6	-99.25	970
17019	Tilzapotla, Puente De I.	Mor.	18.5	-99.267	950
17042	Zacatepec, Zacatepec	Mor.	18.65	-99.183	1226
17031	Jojutla De Juarez (Smn)	Mor.	18.6	-99.183	891
17032	San Gabriel, Amacuzac	Mor.	18.617	-99.35	1008
17033	Xicatlacotla, (Cfe)	Mor.	18.583	-99.2	1000
17036	Lagunillas De Rayon, Dge	Mor.	18.483	-98.717	1100
17038	Nexpa, Tlaquitenango	Mor.	18.517	-99.133	1200
17056	San Pablo Hidalgo,	Mor.	18.583	-99.033	955
17057	El Limon, Tepalcingo	Mor.	18.517	-98.933	1650
17076	Puente De Ixtla	Mor.	18.617	-99.317	899
21050	Jolalpan, Jolalpan (Smn)	Pue.	18.317	-98.817	820
21116	Chiautla De Tapia, (Smn)	Pue.	18.283	-98.6	1025
21177	Tepexco, Tepexco (Dge)	Pue.	18.567	-98.717	1150
17021	Tlacualera, Tlacualera	Mor.	18.617	-98.95	1560

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1. Elaboración del mapa de temperatura

Para elaborar el mapa de temperatura, se utilizaron los datos de máximas y mínimas de las 23 estaciones meteorológicas extraídas del ERIC, para obtener la temperatura promedio anual y mensual de cada estación. Esto con la finalidad de elaborar ecuaciones de regresión lineal simple para calcular los rangos de variación de la temperatura con la altura para cada mes y el promedio anual.

Las ecuaciones de regresión lineal simple de cada mes y el anual se usaron para realizar los mapas de isotermas. En total se generaron 12 mapas mensuales y uno anual, utilizando el Sistema de Información Geográfico ArcMap 10.1. Para ello fue necesario utilizar el mapa topográfico de la región. Posteriormente, con los modelos de regresión lineal simple, se calculó la altura sobre el nivel del mar de cada mes aumentando la temperatura a un grado centígrado, identificando la cota menor y mayor de temperatura para generar rangos de temperatura. De esta manera se crearon polígonos en base al rango de temperatura y la altura sobre el nivel del mar calculado con el modelo de regresión lineal simple. De esta manera se generaron los mapas de isotermas mensuales y anual.

4.1.2.2. Elaboración del mapa de precipitación

Para generar el mapa de precipitación, fue necesario conocer la cantidad de lluvia anual de las 23 estaciones meteorológicas y georeferenciarlas de acuerdo a sus coordenadas en el Sistema de Información Geográfico ArcMap 10.1. Con ayuda del Modelo Digital de Elevación y los datos de precipitación anual de las estaciones, se analizó la cantidad de precipitación que podría existir en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos, de la siguiente manera:

1. Se identificaron dos estaciones que están más cerca del área de estudio las cuales fueron Huautla, Tlaquiltenango localizada a 7 km en dirección Oeste y El Limón, Tepalcingo que se encuentra a 8 km en dirección Este.

2. Se observó que en la estación meteorológica de Huautla, Tlaquiltenango llueve aproximadamente 955 mm anuales y en el Limón, Tepalcingo cae una precipitación anual de 803 mm.

3. La dirección de los vientos que generan los sistemas nubosos con los que se asocian las precipitaciones, fue un elemento muy importante para analizar cuanta precipitación anual podría caer en la comunidad de Ajuchitlán. Como los vientos dominantes para esa región provienen principalmente del Pacífico, llevan nubes con mayor humedad que descargan principalmente en las regiones más occidentales y que tienen orientación al poniente. Por lo tanto llueve más en las comunidades que se encuentran localizadas más al poniente que aquellas que están al oriente, asimismo en sistemas orográficos con dirección Oeste que las que se ubican en dirección Este. Bajo este principio, Ajuchitlán se ubica al Oeste del Limón y al Este de Huautla por lo que su precipitación anual debe ser mayor que la del Limón pero menor que la de Huautla.

4. Una vez conocido el dato descrito en el párrafo anterior, se procedió a delimitar las isoyetas anuales en el ArcMap 10.1. Con ayuda del Modelo digital de elevación y el mapa topográfico se generaron los rangos de precipitación identificando la isoyeta mayor y la menor para crear polígonos.

5. Los datos de precipitación anual y mensual de cada polígono se generaron mediante una tabla donde se calcularon datos del valor promedio de precipitación para cada mes, intervalos de precipitación mensual y la precipitación mensual estimada para cada rango. Los intervalos de precipitación media mensual para cada rango de precipitación media anual se asignaron de acuerdo a la tendencia y valores de la precipitación promedio de cada grupo de estaciones meteorológicas, estableciendo rangos en los que queden incluidos los valores promedios de los diferentes grupos de estaciones (Gómez *et al.*, 2008).

4.2.2.3. Delimitación de las áreas de influencia climática

Una vez generados los mapas de temperatura y precipitación media anual, se procedió a unirlos en el ArcMap 10.1. Para crear áreas de influencia climática. A cada área se le estimó los valores mensuales y anual de temperatura y precipitación para determinar el tipo de clima utilizando el Sistema de Clasificación de Köppen modificado por García.

4.1.3. Elaboración del Mapa de Uso del suelo y Vegetación

En cuanto al mapa de uso de suelo y vegetación, se utilizó la Serie V de INEGI, así como imágenes de satélite del Google Earth (2013). En la Serie V de INEGI los usos de suelo y vegetación que se tienen registrados en el área de estudio son: Agricultura de temporal anual, Vegetación arbustiva de Selva Baja Caducifolia, Pastizal inducido, y Vegetación secundaria arbustiva de Bosque de Encino (BE). Comparando los usos de suelo y vegetación de la Serie V con lo representado en las imágenes de Google Earth se observó que los linderos de los polígonos de INEGI no coinciden con los conglomerados de vegetación, por lo que se procedió a redefinir y detallar con mayor precisión los linderos así como agregar otras categorías de uso del suelo y vegetación, esto a una escala grande de aproximadamente 1:10 000.

La vegetación de Selva Baja Caducifolia se dividió de acuerdo a la densidad arbórea y arbustiva que se observó en las imágenes de satélite en: densidad alta, media y baja. De acuerdo a la experiencia y conocimiento de trabajos anteriores en la zona de estudio se generaron nuevos polígonos de agricultura de roza-tumba-quema y agricultura mecanizada.

4.3. Puntos de muestreo

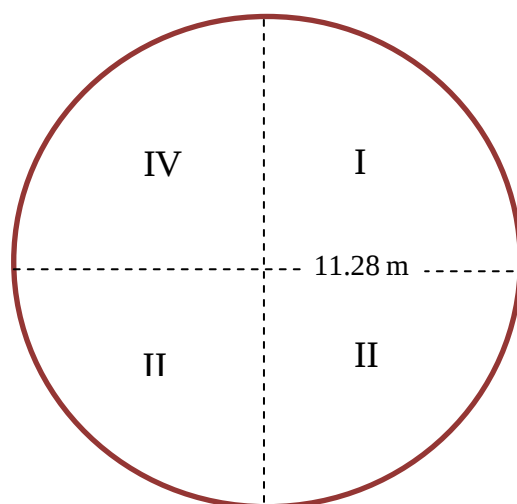
En cada unidad de paisaje relativamente homogénea, se establecieron los puntos de muestreo con tres repeticiones cada uno, mediante un muestreo dirigido que consistió en colocar los puntos cerca de caminos o veredas que tuvieran accesibilidad a la zona, ya que el área de estudio cuenta con un relieve complejo. Cada punto fue georeferenciado en gabinete para su posterior búsqueda en campo utilizando un Geoposicionador Global (GPS) modelo Garmin.

4.4. Inventario de los reservorios de Carbono

En cada punto de Muestreo se realizó un inventario de los reservorios de carbono definidos por el IPCC (2006) que se agrupan en tres componentes: a) biomasa viva que incluye árboles, arbustos y herbáceas; b) materia orgánica muerta constituida por ramas caídas y hojarasca; y c) Materia orgánica del suelo contenida a profundidades de 0-15, 15-30, 30-45 cm o hasta donde llegara la capa de suelo.

4.3.1. Tamaño de la parcela de muestreo

Para realizar las mediciones en campo dentro de los puntos de muestreo se establecieron parcelas con una superficie de 400 m² de forma circular con un radio de 11.28 m; la parcela se dividió en cuatro cuadrantes que se numeraron conforme a las manecillas del reloj (Figura 3). Las parcelas se orientaron hacia el norte, y se compensó la pendiente (Figura 4).



Todos los cuadrantes:
Medición de árboles y arbustos con DN mayor a 2.5 cm.
Cuadrante I. Toma de muestras de suelo.
Cuadrante II. Recolección de ramas mayores a 2.5 cm de diámetro.
Cuadrante III. Toma de muestras de herbáceas en 1m².
Cuadrante IV. Toma de muestras de hojarasca y mantillo en 1m²

Figura 3. Parcela de muestreo y distribución de las mediciones de los reservorios de carbono.



Figura 4. Compensación de la pendiente y orientación de la parcela de muestreo hacia el norte.

4.3.2. Inventario de carbono en Biomasa viva

Estrato arbóreo y arbustivo: En toda la superficie de muestreo se registraron los nombres comunes de cada uno de los árboles y arbustos que alcanzaran un diámetro mayor a 2.5 cm. Para el caso de los árboles se midió el diámetro normal a 1.30 m. En cuanto a los arbustos el diámetro se midió a 15 cm de altura sobre el suelo (Figura 5). Tanto para el estrato arbóreo como para el arbustivo, se estimó el porcentaje de cobertura de la copa que estuviera en la superficie de muestreo. Para la medición del diámetro se utilizó una cinta diamétrica.



Figura 5. Medición del diámetro normal en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Estrato herbáceo: La muestra del estrato herbáceo se tomó en el cuadrante III. En una superficie de 1 m² elegida al azar, en donde se cortó todo el material vegetal a ras del suelo a una misma altura, sin considerar raíces, utilizando tijeras de podar o navaja (Figura 6). El material se colocó en bolsas de papel adecuadamente etiquetadas para su posterior análisis en laboratorio.



Figura 6. Recolección de herbáceas en 1 m².

4.3.3. Inventario de carbono en Materia orgánica muerta

Hojarasca y mantillo: Las muestras de hojarasca y mantillo se colectaron en el cuadrante IV en 1 m² seleccionado al azar. Primero se colectó toda la hojarasca y ramas de diámetros menores a 2.5 cm (Figura 7).

Posteriormente se colectó el mantillo en los lugares donde todavía se podía reconocer. En la mayoría de los casos no fue posible coleccionar el mantillo debido a que ya estaba muy integrado y mezclado con partículas de suelo. Las muestras se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas para su posterior análisis.



Figura 7. Colecta de hojarasca y mantillo en 1m².

Ramas muertas: Como ya se había mencionado con anterioridad, la muestra de ramas muertas se tomó en el cuadrante II. En donde se colectaron todas la ramas caídas con diámetros mayores a 2.5 cm. En caso de existir demasiadas ramas el cuadrante se dividió en cuatro partes para recoger la muestra solo en 25 m² (Figura 8). A los árboles caídos y muertos en pie, se les midió el diámetro para estimar el volumen en gabinete.



Figura 8. División del cuadrante para colecta de ramas en 25 m².

4.3.4. Inventario de carbono en Materia orgánica del suelo

Las muestras de suelo se tomaron en el cuadrante I en las profundidades de 0-15, 15-30, 30-45 cm o hasta donde la profundidad del suelo lo permitiera; en muchos casos sólo se pudieron obtener muestras de hasta 30 cm de profundidad. Para la toma de muestras se utilizó una barrena de muestras inalteradas con dos cilindros. El procedimiento para obtener las muestras de suelo fue el siguiente: La barrena se colocaba en el suelo y lentamente con un marro se comenzaba a enterrar, cuando entraba toda la barrena al suelo con una pala pequeña se quitaba el suelo que la rodeaba. La barrena se sacaba con extremo cuidado para evitar pérdida de suelo. Lentamente se sacaban los cilindros de la barrena y con una navaja se quitaba el exceso de suelo. El suelo colectado se depositó en bolsas de plástico debidamente etiquetadas, anotando el número de cilindros que se pudieron sacar sin tener alguna alteración (Figura 9).



Figura 9. Procedimiento para la obtención de muestras de suelo con una barrena de muestras inalteradas.

4. 5. Estimación del contenido de carbono en biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo

Estrato arbóreo y arbustivo: Se identificó el nombre científico de las especies encontradas en el inventario. Posteriormente se utilizaron seis ecuaciones alométricas y una general de las especies con mayor valor de importancia en la comunidad de El Limón, Morelos que se ubica a 8 km del área de estudio (Gómez, 2008). Así mismo se buscó en literatura la densidad básica de cada especie para asignar la ecuación alométrica a cada especie en particular. De las especies que no se encontró la densidad básica se aplicó la ecuación general. El modelo de las ecuaciones alométricas utilizadas fue de la siguiente forma:

$$Y=bX^k$$

donde Y es la biomasa aérea (kg), X es el diámetro a la altura del pecho (DAP) en centímetros y b y k son los parámetros estimados por el método de mínimos cuadrados. Una vez obtenida la biomasa el resultado se multiplicó por el contenido de carbono estimado para cada especie en el estudio realizado por Gómez (2008) de esta manera se obtuvo el contenido total de carbono en kg de cada individuo. En el cuadro 2 se muestran los modelos alométricos usados por especie, así como el modelo general y la estimación de carbono total proporcional.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas utilizadas por especie con mayor valor de importancia y carbono total proporcional estimado.

Especie	Ecuación alométrica	Carbono total proporcional
<i>Quercus sp.</i>	$Y = 0.034424 \cdot DN^{2.934}$	0.4658
<i>Lysiloma divaricata</i>	$Y = 0.156923 \cdot DN^{2.38}$	0.4526
<i>Acacia cochiacantha</i>	$Y = 0.274995 \cdot DN^{2.178}$	0.4428
<i>Ipomoea arborescens</i>	$Y = 0.018224 \cdot DN^{2.653}$	0.4228
<i>Conzattia multiflora</i>	$Y = 0.023777 \cdot DN^{2.819}$	0.4444
<i>Euphorbia schlechten</i>	$Y = 0.045004 \cdot DN^{2.333}$	0.4728
General	$Y = 0.217186 \cdot DN^{2.056}$	0.4502

Fuente: Gómez, 2008.

Estrato herbáceo y materia orgánica muerta: Para la estimación del contenido de carbono las muestras se secaron al ambiente para posteriormente secarlas a 72°C en una estufa de aire forzado, con la finalidad de obtener el peso seco. Para el caso de las ramas estas se metieron 20 días en un invernadero (Figura 10). Para obtener el carbono total en Mg ha^{-1} el peso seco se multiplico por una constate de 0.40 para vegetación de Selva Baja Caducifolia y de 0.45 para vegetación de Bosque de Encino.



Figura 10. Obtención del peso seco del estrato herbáceo y materia orgánica muerta.

Materia orgánica del suelo: Para determinar el contenido de carbono en las muestras colectadas en campo, fue fundamental determinar la Densidad aparente del suelo. Para calcular la densidad aparente lo primero que se realizó fue secar las muestras de suelo al aire; una vez secas se pesaron y se retiraron todas las raíces y piedras que se podían ver a simple vista, las cuales fueron pesadas por separado. Al peso de la muestra del suelo total se le restó el peso de las raíces y piedras, así mismo se calculó el volumen total muestreado y el volumen de las piedras y raíces.

El volumen total muestreado se estimó en base a los cilindros que fueron colectados en campo. Para calcular el volumen de piedras y raíces se utilizaron los valores de Densidad Aparente de $2.5 \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$ y $0.3 \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$ respectivamente.

La densidad aparente del suelo se calculó con la siguiente fórmula:

$$DAP = \frac{P_{ss}}{VT_s}$$

donde;

DAP= Densidad aparente del suelo ($\text{g}^{-1} \text{cm}^3$)

Pss = Peso del suelo seco (g)

VTs = Volumen total del suelo

El procedimiento para determinar el contenido de carbono en las muestras de suelo se realizó a través del método de Walkley y Black. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de combustión húmeda, siguiendo el procedimiento establecido en la NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

Análisis estadístico: Se realizó el ANOVA de los datos obtenidos en el inventario de la biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo, mediante la utilización del software estadístico InfoStat versión estudiantil 2014e.

4.6. Establecimiento de la línea base

Para establecer la línea base de las existencias anuales de carbono, se siguieron las Directrices del IPCC (2006) bajo el supuesto de que las unidades de paisaje permanecerán como tales durante los próximos 20 años.

Biomasa viva

Para establecer la línea base de la biomasa aérea (estrato arbóreo y arbustivo) se utilizaron los datos del Inventario Nacional de carbono 1990-2010 (SEMARNAT, 2011) del incremento medio anual en biomasa de la Vegetación secundaria de Selva Baja Caducifolia y Bosque de Encino. En donde obtuvieron un incremento medio anual de $1.7 \text{ Biomasa Mg ha}^{-1}$ y $2.2 \text{ Biomasa Mg ha}^{-1}$

respectivamente. Con estos datos se calculó el incremento anual de carbono (Mg ha^{-1}) en el estrato arbóreo y arbustivo que se sumó al carbono total obtenido en campo por unidad de Paisaje.

Como hipótesis por defecto coherente con las Directrices del IPCC (2006), los cambios en las existencias del estrato herbáceo pueden ser inexistentes por lo que no se calculó el incremento anual de carbono.

Materia orgánica muerta

Según el IPCC (2006) se supone que las existencias de carbono en la madera muerta y la hojarasca están en equilibrio, por lo que se asume que los cambios de las existencias de carbono en los depósitos de materia orgánica muerta son nulos.

Materia orgánica del suelo

De acuerdo al IPCC (2006) la materia orgánica del suelo tiende a concentrarse en los horizontes superiores del mismo, por lo que las existencias anuales de carbono se determinaron solo hasta 30 cm de profundidad utilizando la fórmula establecida por el IPCC (2006) que se describe a continuación:

$$\Delta C_{\text{mineral}} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I * A)$$

donde

$\Delta C_{\text{mineral}}$ = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos minerales, Mg C año^{-1} .

SOC_0 = existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, Mg C .

$SOC_{(0-T)}$ = existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, Mg C .

$D = 20$ años.

c = representa las zonas climáticas, s = los tipos de suelo, e i = el conjunto de sistemas de gestión.

SOC_{REF} = las existencias de carbono de referencia, $Mg\ C\ ha^{-1}$.

F_{LU} = factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra.

F_{MG} = factor de cambio de existencias para el régimen de gestión.

F_I = factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica.

A = superficie de tierra del estrato que se estima.

El SOC de referencia que se utilizó fue el que se obtuvo en el inventario realizado por Gómez (2008) en la comunidad de El Limón que presenta características similares de vegetación al área de estudio. El SOC_0 fue el que se determinó en el inventario realizado en este estudio. En el Cuadro 3 se muestran los factores de cambio de existencias y el SOC de referencia que se utilizaron para aplicar la fórmula.

Cuadro 3. Factores de cambio de existencias y SOC_{REF} .

Factores de cambio	Cultivo (maíz, sorgo)	Bosque natural	Pastizal
F_{LU}	0.8	1	1
F_{MG}	1	1	0.97
F_I	1	1	1
SOC_{REF}	70	65	52

Fuente: IPCC, 2006.

Debido a que en la zona agrícola no existen entradas de materia orgánica fue necesario calcular la degradación biológica, obteniendo la disminución de la materia orgánica del suelo mediante la mineralización anual del humus, multiplicando los tres índices siguientes (Ortiz *et al.*, 1994):

$$a) \text{Clima: } K_2 = \frac{1}{12} \sum_{12} e^{0.1065 \cdot t} \left(\frac{P}{ETP} \right)$$

donde:

K_2 = Índice climático de degradación biológica.

P = Precipitación media anual mm.

ETP= Evaporación potencial = (EV) (0.8).

T= Temperatura media anual en °C.

b) *Suelo*: Se determinó la textura del suelo mediante el método de tacto dando una textura media utilizando el valor de 1.

c) Porcentaje de $CaCO_3$: Se utilizó el valor de 1 debido a que no se encontró $CaCO_3$ en los suelos agrícolas.

Los resultados se compararon con los obtenidos mediante la fórmula propuesta por el IPCC (2006) en la cual también da por hecho que no existen entradas de materia orgánica en la zona agrícola.

4.7. Diseño de tecnologías agroforestales en cada uso de suelo

Para el diseño de las tecnologías agroforestales con mayor potencial de fijación de carbono, primero se identificaron las unidades de paisaje que tuvieran valores de carbono de la línea base muy baja en comparación con las demás. Posteriormente se seleccionaron aquellas especies arbóreas y arbustivas que tuvieron los valores más altos de kg de carbono por árbol y que además fueran representativas en el paisaje mediante el valor de importancia (VI) de cada especie por medio de la siguiente fórmula:

$$VI = \{[Dominancia + Frecuencia + Abundancia]/3\} * 100$$

donde:

VI= Valor de importancia de la especie *i*.

Dominancia = Área basal de la especie *i* / $\sum$ área basal de todas las especies.

Frecuencia = Número de parcelas en las que se encuentra la especie *i* / número total de parcelas.

Abundancia = Número de individuos de la especie *i* / número total de individuos de toda el área muestreada.

En base a lo observado en campo y en estudios anteriores en el área, se identificaron los principales problemas en las unidades con bajo contenido de carbono para dar una posible solución que incrementará la cantidad de carbono y que al mismo tiempo se solucionara el problema identificado que genera la baja productividad del sistema para que fuera adoptado por la comunidad. Todas las especies seleccionadas fueron de usos múltiples, así mismo se buscó en literatura la morfología de cada especie seleccionada; se determinó la densidad de árboles por hectárea; el arreglo espacial de los árboles en cada tecnología; la calidad de la planta seleccionada en vivero; así como los requerimientos y cuidados para el establecimiento y sobrevivencia en campo.

4.8. Adicionalidad de cada tecnología agroforestal

Una vez propuestas las tecnologías agroforestales se determinó la adicionalidad que se obtendrá en las unidades de paisaje con bajo contenido de carbono en la línea base, siguiendo nuevamente las Directrices del IPCC (2006). Esta vez bajo la hipótesis de que las unidades de paisaje seleccionadas tendrán un cambio en el uso del suelo y se tendrá establecido el sistema durante 20 años. La adicionalidad solo se determinó para la biomasa viva (estrato arbóreo y arbustivo) y la materia orgánica del suelo. Para el estrato herbáceo y materia orgánica muerta se establecieron los supuestos de que los cambios de las existencias de carbono son nulos.

Biomasa viva

Para calcular la adicionalidad en el estrato arbóreo y arbustivo, se buscó en literatura la curva de crecimiento por familia o género de las especies propuestas (Figura 11) las cuales se determinaron en un trabajo realizado en la Selva Baja Caducifolia del estado de Morelos para 10 especies latifoliadas (Cervantes y Sotelo, 2002). Posteriormente se determinó el contenido de carbono utilizando las ecuaciones alométricas por especie y multiplicando el valor obtenido por la densidad de árboles propuesta.

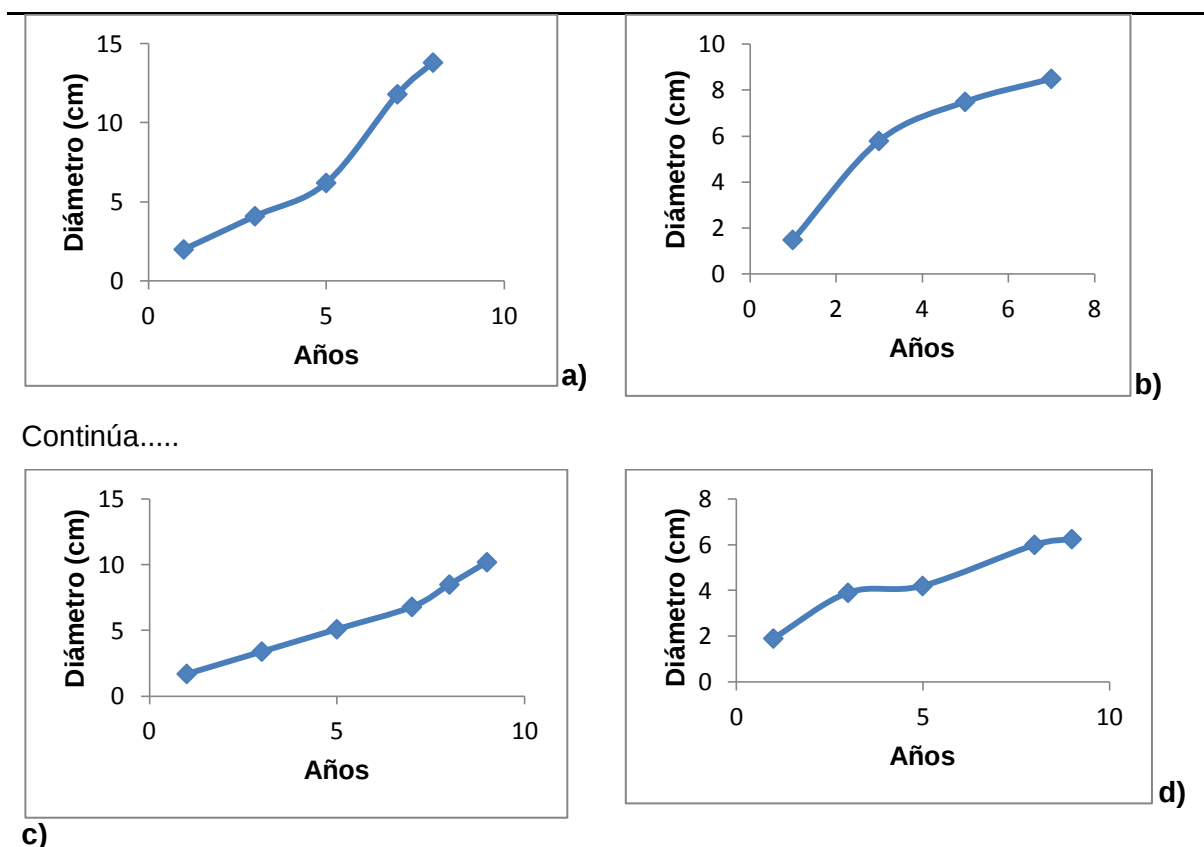


Figura (11). Curva de crecimiento de las principales familias de las especies seleccionadas: a) Familia Leguminosae, b) *Guazuma ulmifolia*, c) familia Burseraceae, d) Género *Acacia* sp. Fuente: Cervantes y Sotelo, (2002).

Materia orgánica del suelo

La fórmula que se utilizó para calcular la adicionalidad de las existencias de carbono en el suelo en las tecnologías agroforestales propuestas fue la establecida por el IPCC (2006) que se describió con anterioridad en el apartado del establecimiento de la Línea Base de las unidades de paisaje. Los factores de cambio de existencias para la zona agrícola, de pastizal y de vegetación de poca densidad se mantuvieron igual que en la línea base, sin embargo se agregó el factor de cambio de existencias de cultivo de árboles (Cuadro 5) pues existen el supuesto de que se hará un cambio de uso del suelo mediante el establecimiento de árboles en las unidades de paisaje.

Cuadro 5. Factores de existencia utilizados para la adicionalidad de la materia orgánica del suelo.

Factores de existencia	Cultivo (maíz, sorgo)	Cultivo de árboles	Bosque natural	Pastizal
F_{LU}	0.8	1	1	1
F_{MG}	1	1.09	1	0.97
F_I	1	1.37	1	1

Fuente: IPCC, 2006.

El SOC de referencia que se usó para este caso fue el que se determinó en el inventario realizado en esta investigación solo hasta 30 cm de profundidad; el SOC de referencia se multiplicó por la superficie de uso del suelo que se mantendrá como tal y por la superficie que ocupará la densidad de árboles propuesta. De esta manera se procedió a aplicar la fórmula establecida por el IPCC (2006).

4.9. Determinación del incremento económico

4.9.1. Costos de establecimiento

Lo primero que se realizó fue determinar el costo total del establecimiento de las tecnologías agroforestales propuestas, siguiendo la metodología establecida por García y Rodríguez (2010) que consiste en calcular el cargo por mano de obra, cargo por maquinaria y equipo y cargo por consumos; dando como resultado el costo de establecimiento y mantenimiento de las tecnologías propuestas.

Estos cargos se obtuvieron del catálogo de concepto y rendimiento propuesta por García y Rodríguez (2010); modificando el costo actual por jornal y por herramienta a utilizar. En la Figura 12 se ilustra de manera general los pasos a seguir para calcular el costo total de establecimiento y mantenimiento.

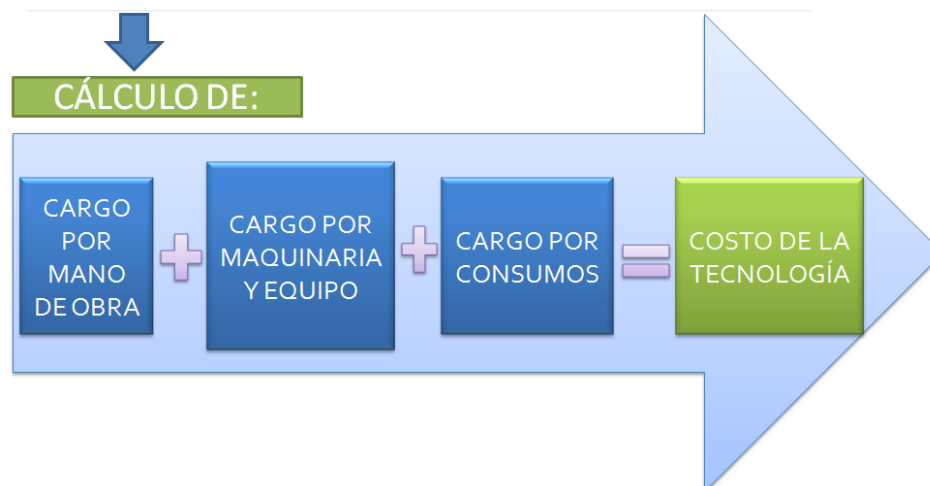


Figura 12. Pasos a seguir para calcular el costo total de establecimiento y mantenimiento de las tecnologías agroforestales propuestas.

4.9.2. Beneficios económicos

Los beneficios económicos que se obtendrán de las tecnologías agroforestales propuestas se calcularon tomando en cuenta el pago por servicios ambientales en el aspecto de captura de carbono a nivel nacional y a nivel internacional, así como la venta de leña. Los cálculos se realizaron para 20 años después de establecida la plantación bajo el supuesto de que se mantendrá la densidad de árboles propuesta.

Pago por servicios ambientales

Para calcular el pago por servicios ambientales a nivel internacional, se buscó en literatura a aquellas instituciones dedicadas al mercado de Carbono Forestal, entre las que se encontró a REDD+ (Reducción de Emisiones de Deforestación y Degradación) y el MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio). Según el reporte del *Estado de los Mercados de Carbono Forestal 2013* de Forest Trends' Ecosystem Marketplace, el precio que están pagando estas instituciones por Mg de carbono por hectárea es de \$7.8 dólares.

Utilizando el valor del dólar en la fecha de Noviembre de 2014 que fue de \$13.9 pesos, se tiene que un Mg de carbono cuesta alrededor de \$108.42 pesos en moneda nacional. Este valor se multiplicó por las toneladas de carbono por

hectárea que se adicionarán con las tecnologías agroforestales propuestas. A nivel nacional la institución que paga los servicios ambientales es la CONAFOR, la cual engloba todos los servicios ambientales que puede generar un bosque sin separar cada uno de ellos. El monto actual que está pagando está en un rango de \$1,000-\$3,000 por hectárea.

Venta de leña

Para calcular el beneficio que se obtendrá de la venta de leña dentro de 20 años después de establecidas las tecnologías agroforestales, se determinó el volumen total del árbol a esa edad, estimando el número de cargas de leña que se obtendrían. El resultado se multiplicó por el costo de la carga de leña a nivel local. La carga de leña es la unidad de medida a nivel local la cual equivale a 0.17 m³. Por lo que 1m³ de leña contiene 5.8 cargas. El costo de la carga depende del tipo de especie que varía entre \$100.00-\$85.00 (Vázquez, 2014).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización de unidades de paisaje

5.1.2. Mapa fisiográfico

En la Figura 13 se muestra la distribución espacial de los rangos de pendientes del área de estudio. En total de las 2,687 ha de la superficie de la zona de estudio, se delimitaron tres rangos de pendiente; el que cubre mayor superficie es el de 2-8% de pendiente descrito como moderadamente inclinado con el 42% de la superficie total del área de estudio y casi en igual proporción los terrenos casi planos y los inclinados con 30% y 28%, respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Superficie por rango de pendientes en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Rango de pendientes (%)	Descripción	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
0-2	Casi plano	798	30
2-8	Moderadamente inclinado	1131	42
8-15	Inclinado	758	28

Fuente: Elaboración propia.

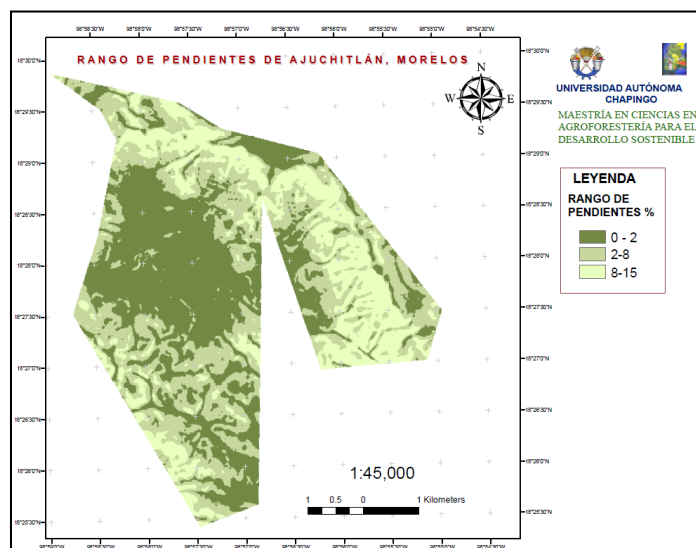


Figura 13. Rango de pendientes de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

El rango altitudinal que se presenta en Ajuchitlán oscila entre 1000 y 1800 msnm, la parte más alta se ubica al Este y la más baja al Oeste. En total se delimitaron cuatro geoformas distintas en el terreno que se describen en el Cuadro 7 y se ilustran en la Figura 14. Donde podemos observar que la ladera moderadamente inclinada es la más representativa ya que ocupa el 42% de la superficie de estudio; por último se tiene a la cima de ladera con solamente el 9% de la superficie total del terreno.

Cuadro 7. Geoformas delimitadas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Descripción de la Geoforma	Rango de pendiente (%)	Rango altitudinal	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ladera moderadamente inclinada	2-8	1200-1400	1131	42
Ladera inclinada	8-15	1300-1500	758	28
Valle Fluvial casi plano	0-2	1000-1200	547	20
Cima de Ladera	0-2	1500-1800	251	9

Fuente: Elaboración propia.

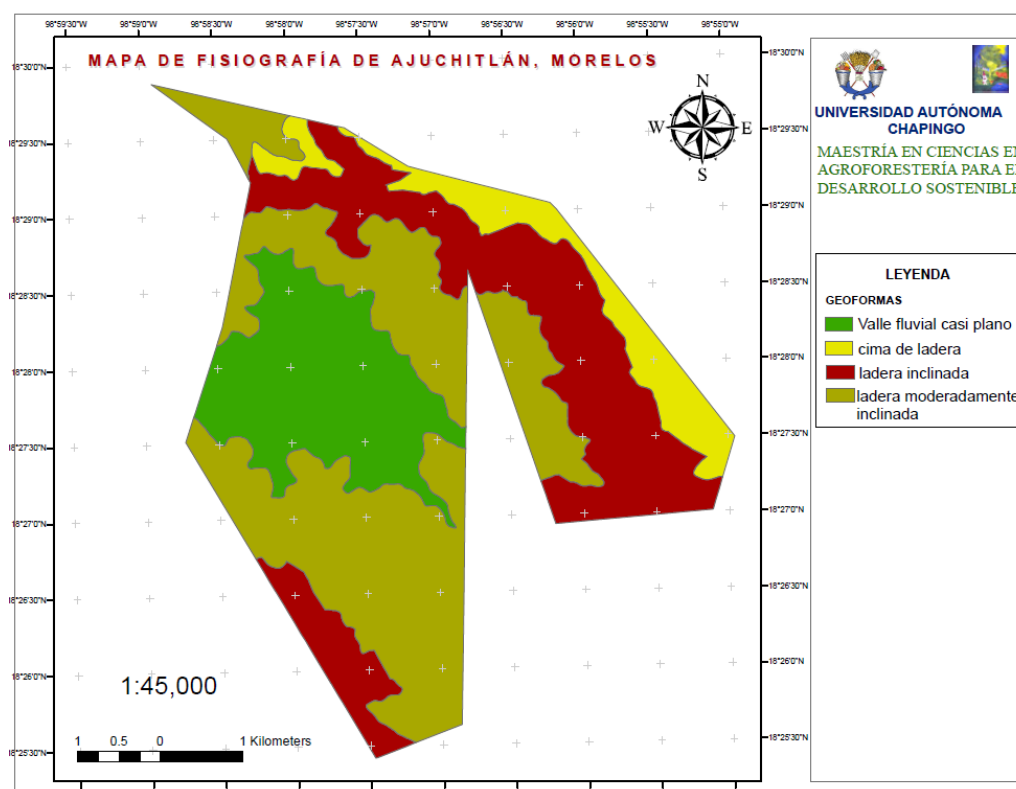


Figura 14. Mapa de Fisiografía de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

5.1.3. Mapa climático

Mapa de temperatura

Los modelos generados para elaborar el mapa de temperatura se presentan en el Cuadro 8, los cuales son muy similares a los generados por Gómez (2008) para elaborar los mapas de temperatura del ejido El Limón, Morelos ubicado a 8 km del área de estudio.

Cuadro 8. Ecuaciones de regresión lineal simple generados para realizar el mapa de temperatura de, Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Parámetro	Ecuación de regresión lineal simple
Anual	$T = 29.22 - 0.0047 h$
Enero	$T = 25.14 - 0.0037 h$
Febrero	$T = 27.22 - 0.0042 h$
Marzo	$T = 29.31 - 0.0041 h$
Abril	$T = 31.57 - 0.0045 h$
Mayo	$T = 32.84 - 0.0052 h$
Junio	$T = 32.12 - 0.0058 h$
Julio	$T = 30.47 - 0.0054 h$
Agosto	$T = 30.17 - 0.0052 h$
Septiembre	$T = 30.07 - 0.0054 h$
Octubre	$T = 29.13 - 0.0050 h$
Noviembre	$T = 26.98 - 0.0041 h$
Diciembre	$T = 25.60 - 0.0039 h$

T= Temperatura h= altura. Fuente: Elaboración propia.

Una vez generadas las ecuaciones se realizaron los mapas de temperatura anual y mensuales que se presentan en las Figuras 15 y 16. Los datos de temperatura anual y mensual obtenidos se presentan en el siguiente Cuadro en donde se puede observar que los meses más fríos son Enero y Diciembre con temperaturas medias de 21.5°C; los meses más calurosos son Abril y Mayo con temperaturas de 26.6°C y 27.5°C respectivamente.

Cuadro 9. Temperatura media anual y mensual en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Rangos de T	T_Media Anual	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Agst	Sep	Oct	Nov	Dic
20-21	20.7	18.5	19.5	22.5	23.5	23.5	21.5	20.5	20.5	20.5	20.5	19.5	18.5
21-22	21.3	18.5	20.5	22.5	24	24.5	22.5	21.5	21.5	21	21	20	19
22-23	22.5	19.5	21.5	23.5	25	25.5	24	23	23	22.5	22	21	20
23-24	23.5	20.5	22.5	24.5	24.5	26.5	25	24	24.5	23.5	23.5	22.5	21.5
24-25	24	21.5	22.5	24.5	26.5	27.5	25.5	24.5	24.5	24.5	23.5	22.5	21.5

Fuente: Elaboración propia.

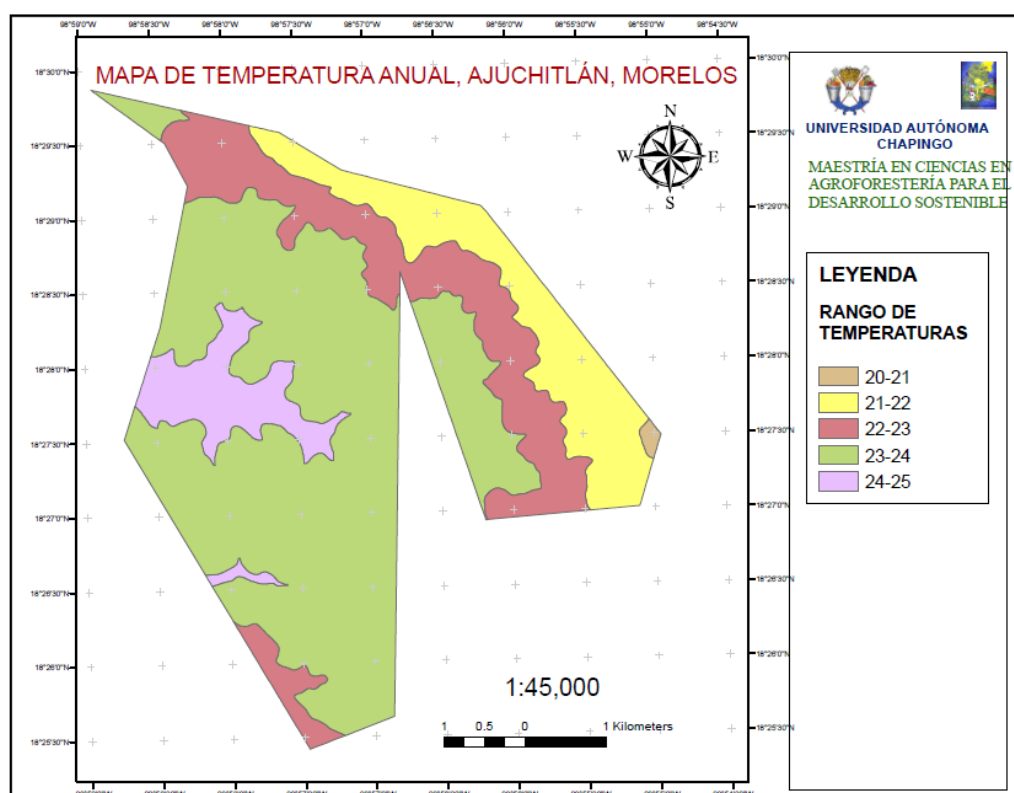
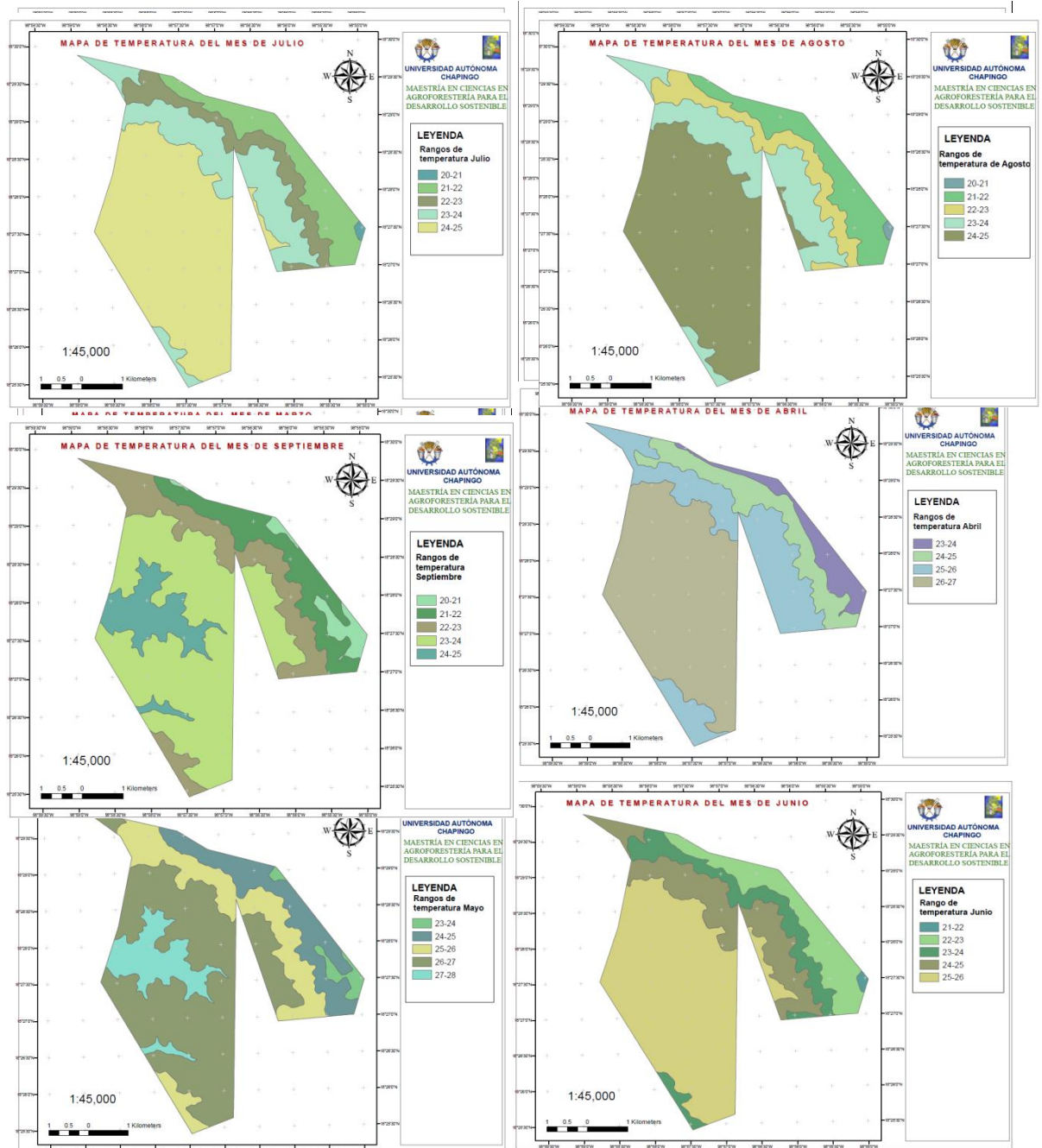


Figura 15. Mapa de temperatura anual de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.



continua...

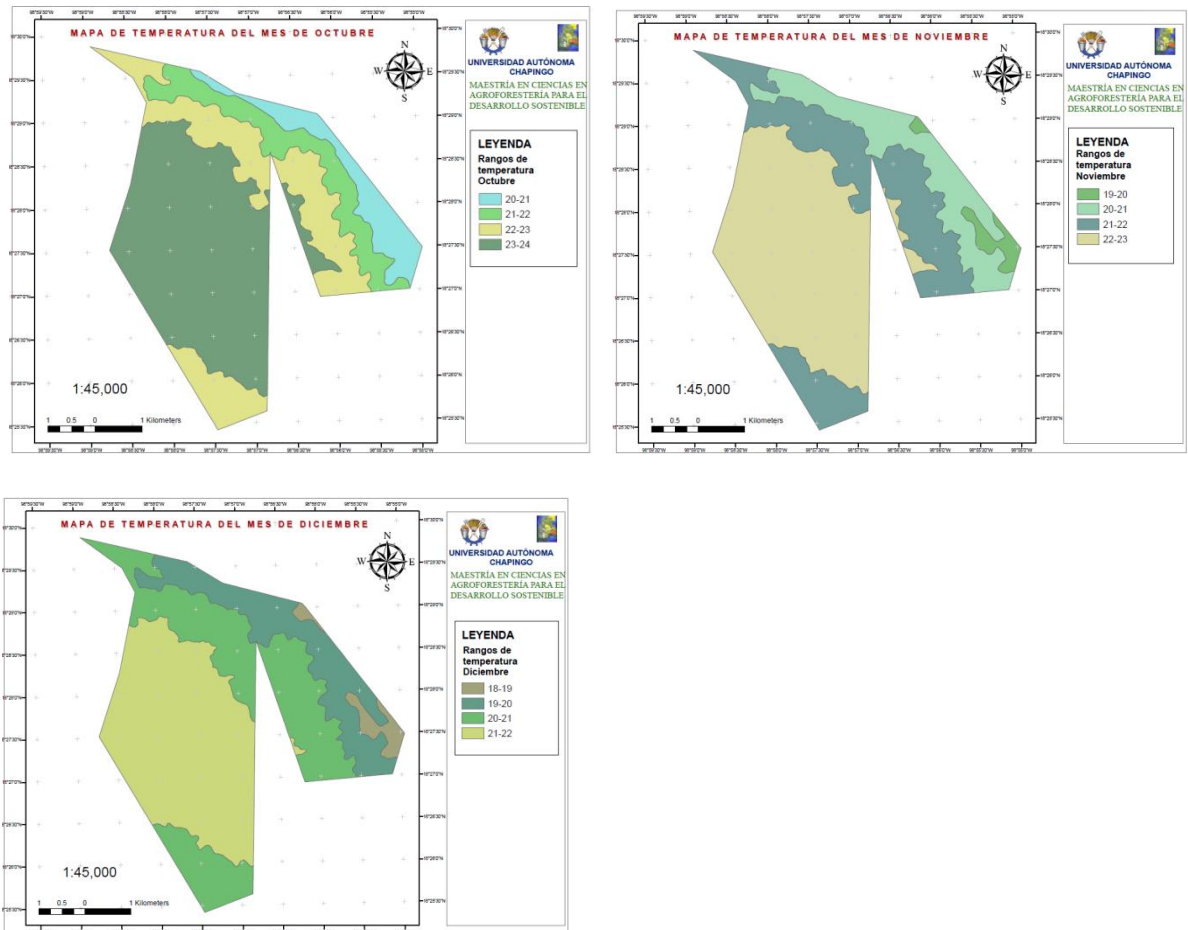


Figura 16. Mapas de isotermas mensuales de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Mapa de precipitación

En el Cuadro 10 se muestra el valor estimado de precipitación media anual y mensual por cada rango que se determinó para la zona de estudio y en la Figura 17 se presenta el mapa de precipitación generado. En donde podemos observar que existe un marcado periodo de lluvias y uno de secas; la temporada de lluvias comienza en Mayo y finaliza en Octubre con una precipitación mayor en el mes de Junio. La temporada de seca inicia en Noviembre y termina en Abril; esto corresponde con lo que reporta Hernández (2008).

Cuadro 10. Valor estimado de precipitación anual y mensual por rango de precipitación en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Rangos anuales	Parámetro	P_ anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
800-900	Valor estimado	863.6	11.3	1.3	1.3	11.6	63.3	186.6	170	170	170	65	11.6	1.6
900-1000	Valor estimado	974.5	12.6	2.5	6.6	13.2	66.6	206.6	190	190	190	75	13.2	8.2
1000-1100	Valor estimado	1068.1	11.3	3.8	8.2	17.5	75	213.2	210	210	210	85	17.5	6.6

Fuente: Elaboración propia.

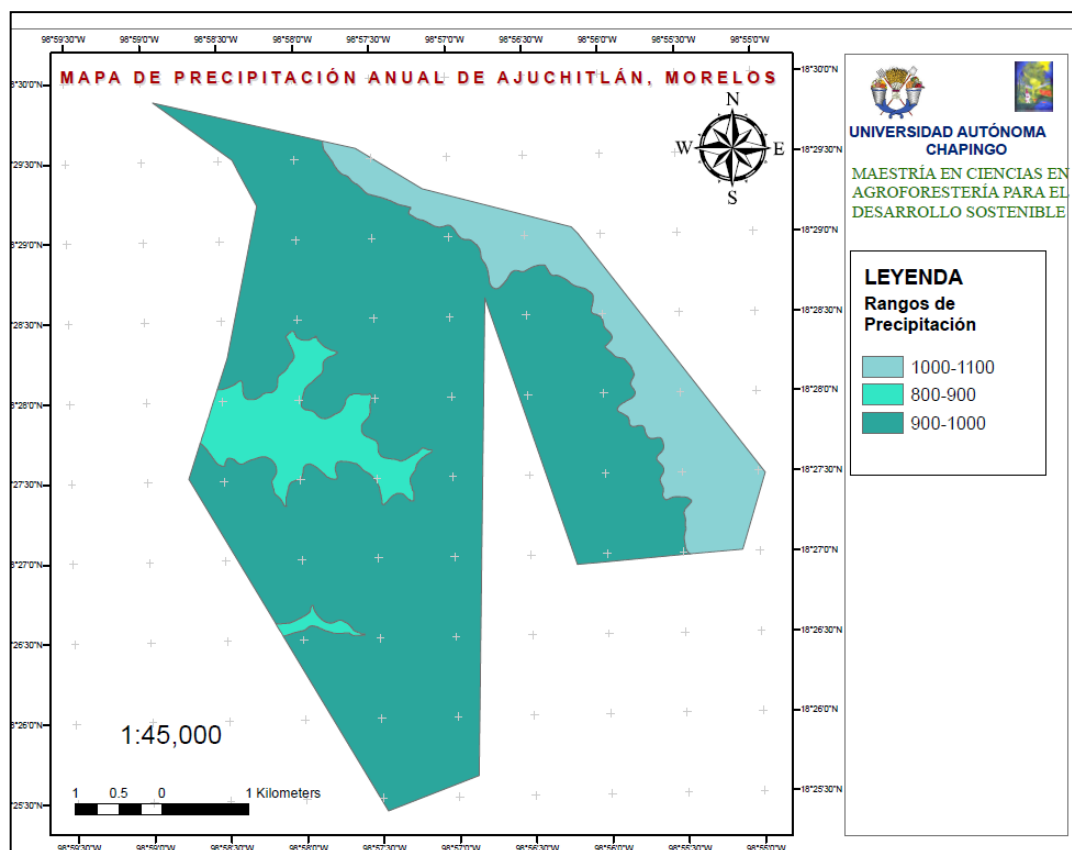


Figura 17. Mapa de precipitación media anual de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Áreas de influencia climática (AIC)

Con los resultados obtenidos de precipitación y temperatura y de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificado por García, en la AIC se encontraron tres climas diferentes en Ajuchitlán, los cuales se describen en el Cuadro 11 en donde se observa que el clima Cálido, el más seco de los

subhúmedos ($Aw_0(w)(i')g$) es el que predomina más en la zona de estudio con un porcentaje de 67% de toda el área. En la Figura 18 se muestran de manera espacial los climas encontrados en Ajuchitlán.

Cuadro 11. Climas encontrados en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Clima	Descripción	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
$Aw_0(w)(i')g$	Cálido, el más seco de los subhúmedos con régimen de lluvias de verano y un porcentaje de precipitación invernal menor a 5, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales y marcha de la temperatura del tipo Ganges.	1813	67
$Aw_1(w)(i')g$	Cálido, el normal de los subhúmedos con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor a 5, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales y marcha de la temperatura del tipo Ganges.	471	17
$A(C)w_1(w)(i')g$	Semicálido del grupo de los cálidos, el normal de los subhúmedos con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor a 5, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales y marcha de la temperatura del tipo Ganges.	401	15

Fuente: Elaboración propia.

Estos datos coinciden con lo generado por Gómez, (2008) en toda la Reserva de la Biosfera de la Sierra de Huautla, Morelos en donde encontró cinco tipos de clima, predominando el tipo $Aw_0(w)(i')g$. El INEGI, (2009), solo registra tres tipos de clima en la Reserva, siendo muy general en la comunidad de Ajuchitlán donde solo se observa que predomina el clima $Aw_0(w)(i')g$.

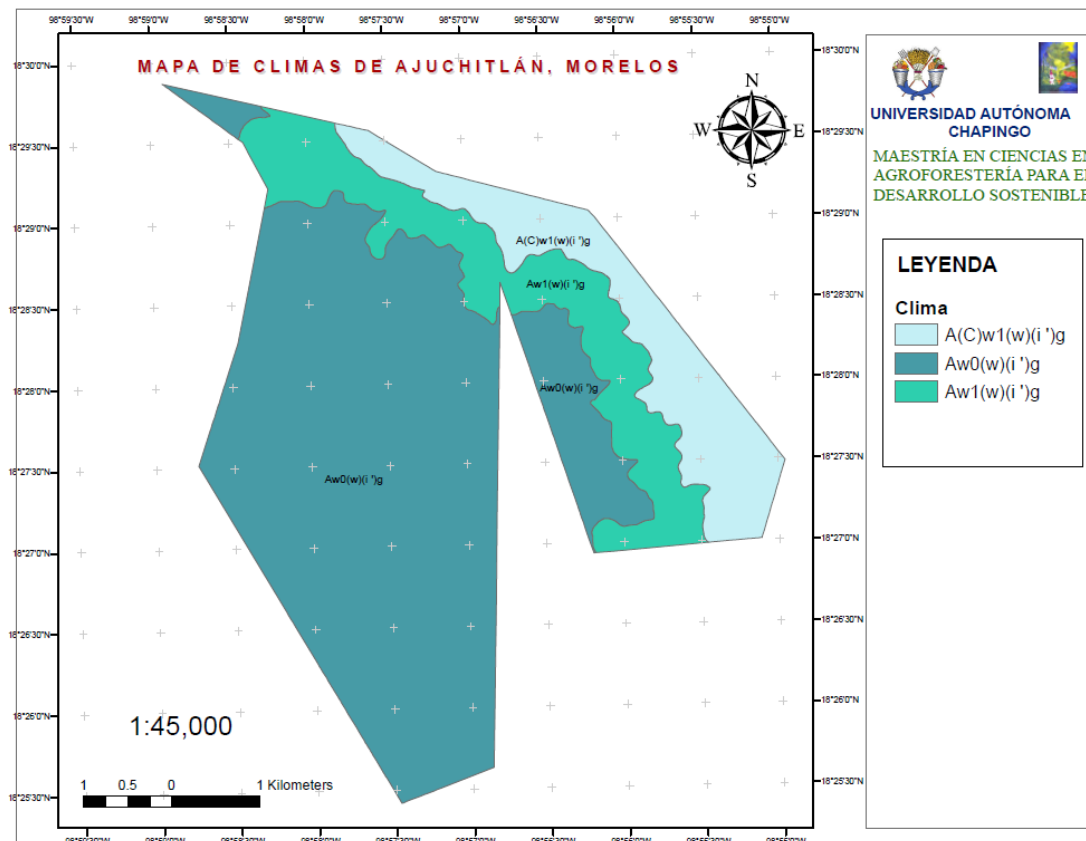


Figura 18. Mapa de climas de acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por García; en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

5.1.4. Mapa de uso de suelo y vegetación

En total fueron 11 tipos de uso de suelo y vegetación delimitados en la zona de estudio en donde predomina claramente la Vegetación Secundaria de Selva Baja Caducifolia (SBC) de densidad media que ocupa el 42% de la superficie total, seguida de la Vegetación Secundaria de Selva Baja Caducifolia de alta densidad con el 24%. La superficie dedicada a la agricultura y pastizal suma el 19% del total. Así mismo se tiene una pequeña zona de Pastizal inducido con Bosque de Encino (BE) de moderada densidad que ocupa el 0.6% de la superficie. En el Cuadro 12 se muestran los usos de suelo y vegetación encontrada en la zona de estudio y en la Figura 19 se muestra la distribución espacial de las mismas.

Cuadro 12. Uso de suelo y vegetación encontrados en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Tipo de vegetación	Área (ha)	Porcentaje (%)
Vegetación Secundaria de SBC de densidad media	1134	42
Vegetación Secundaria de SBC de alta densidad	654	24
Agricultura de temporal anual Mecanizada	278	10
Vegetación Secundaria de SBC de poca densidad	250	9
Agricultura de Roza-Tumba-Quema	165	6
Pastizal inducido con SBC de poca densidad	79	3
Pastizal inducido e introducido	70	3
Zona Urbana	23	1
Pastizal inducido con BE de moderada densidad	18	0.6
Pastizal inducido con SBC de densidad media	9	0.3
Cuerpo de agua	5	0.1

Fuente: Elaboración propia.

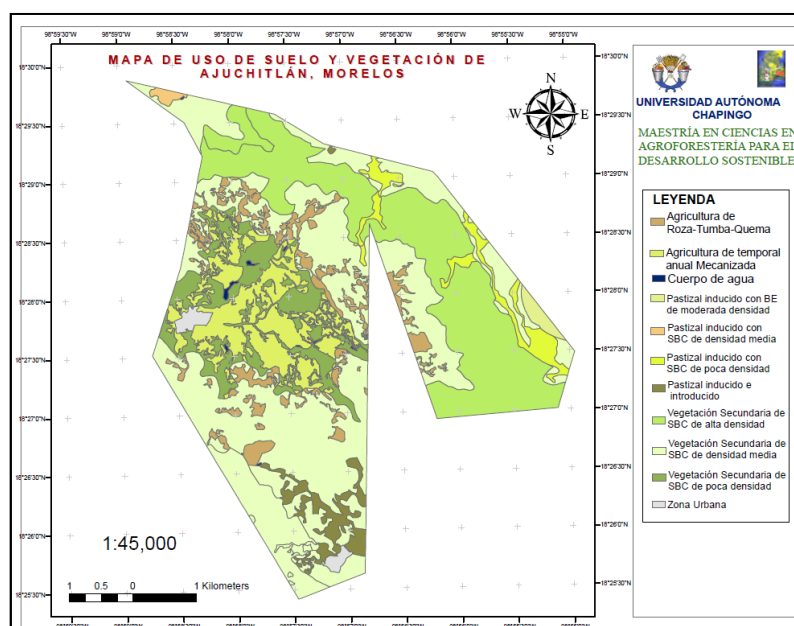


Figura 19. Mapa de uso de suelo y vegetación de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

5.1.5. Unidades de Paisaje

A partir de la sobreposición de los mapas de Uso del Suelo y Vegetación, Unidades Climáticas y el de Geoformas, se obtuvieron 16 Unidades de Paisaje de las cuales se encuentran incluidos los cuerpos de agua y la zona urbana, quedando 14 unidades con algún tipo de vegetación o uso de suelo diferente. La Unidad que predomina más en la zona es la Vegetación secundaria de Selva Baja Caducifolia de densidad media en un clima Aw_0 (w) (í) g en una ladera moderadamente inclinada, con el 32% de la superficie total. La unidad de paisaje con menor representatividad fue Pastizal inducido con SBC de densidad media en un clima Aw_0 (w) (í) g en una ladera moderadamente inclinada con solo 9 ha de la superficie total de la zona de estudio.

La zona dedicada a la agricultura y al cultivo de pastos inducidos e introducidos para el ganado solo representa en total el 19% de la superficie. Por lo que la Vegetación Secundaria de Selva Baja Caducifolia en sus diferentes densidades y condiciones climáticas así como fisiográficas representan un uso importante en la región tanto para el ganado como para la comunidad; ya que durante la época de lluvias la vegetación natural es la única fuente de alimento para el ganado, disminuyendo los gastos de los productores (Uribe, 2012). En el Cuadro 13 se describen las unidades de paisaje relativamente homogéneas encontradas en la zona de estudio y en la Figura 20 se muestra la distribución geográfica de las mismas.

Cuadro 13. Unidades de Paisaje Relativamente Homogéneas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

Clave de Identificación	Unidad de Paisaje Relativamente Homogénea	Área (ha)	Porcentaje (%)
SBC_DM_LM	Vegetación Secundaria de SBC de densidad media en un clima Aw_0 (w) (í) g en una ladera moderadamente inclinada.	872	32
SBC_AD_Aw1 (w)_LI	Vegetación Secundaria de SBC de alta densidad en un clima Aw_1 (w) (í) g en una ladera inclinada.	402	15

Ag_TM_V	Agricultura de temporal anual Mecanizada en un clima $Aw_0(w)$ (í) g en un Valle fluvial casi plano.	278	10
SBC_PD_V	Vegetación Secundaria de SBC de poca densidad en un clima $Aw_0(w)$ (í) g en un Valle fluvial casi plano.	250	9
Ag_RTQ_LM	Agricultura de Roza-Tumba-Quema en un clima $Aw_0(w)$ (í) g en una ladera moderadamente inclinada.	165	6
SBC_DM_CL	Vegetación Secundaria de SBC de densidad media en un clima $A(C) w_1(w)$ (í) g en una cima de ladera.	136	5
SBC_DM_LI	Vegetación Secundaria de SBC de densidad media en un clima $Aw_0(w)$ (í) g en una ladera inclinada.	126	4
P_SBC_PD_CL	Pastizal inducido con SBC de poca densidad en un clima $A(C) w_1(w)$ (í) g en una cima de ladera.	79	3
P_I_LM	Pastizal inducido e introducido en un clima $Aw_0(w)$ (í) g en una ladera moderadamente inclinada.	70	3
SBC_AD_LM	Vegetación Secundaria de SBC de alta densidad en un clima $Aw_1(w)$ (í) g en una ladera moderadamente inclinada.	40	2
SBC_AD_CL	Vegetación Secundaria de SBC de alta densidad en un clima $Aw_1(w)$ (í) g en una cima de ladera.	34	1
Z_U	Zona Urbana	24	2
P_BE_DM_CL	Pastizal inducido con BE de densidad media en un clima $A(C) w_1(w)$ (í) g en una cima de ladera.	18	0.6
P_SBC_DM_LM	Pastizal inducido con SBC de densidad media en un clima $Aw_0(w)$ (í) g en una ladera moderadamente inclinada.	9	0.3
C_A	Cuerpo de agua	5	0.1

Fuente: Elaboración propia.

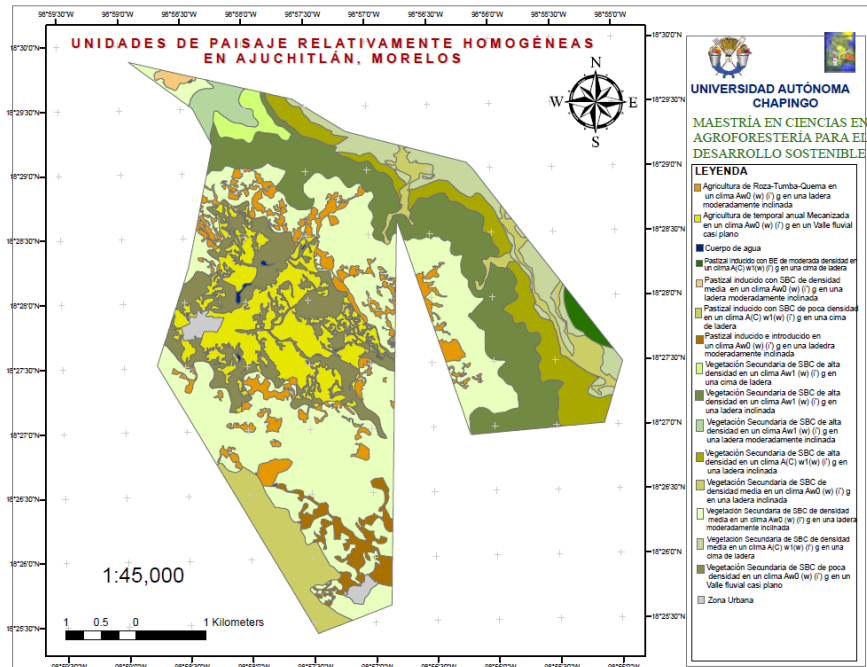


Figura 20. Unidades de paisaje Relativamente Homogéneas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

5.2. Puntos de muestreo

Cada Unidad de paisaje tuvo tres repeticiones que se establecieron cerca de caminos o veredas debido a que el Relieve del lugar es muy accidentado. En total se obtuvieron 42 puntos de muestreo que fueron localizados en campo con un GPS. En la Figura 21 se muestra la distribución espacial de los puntos seleccionados.

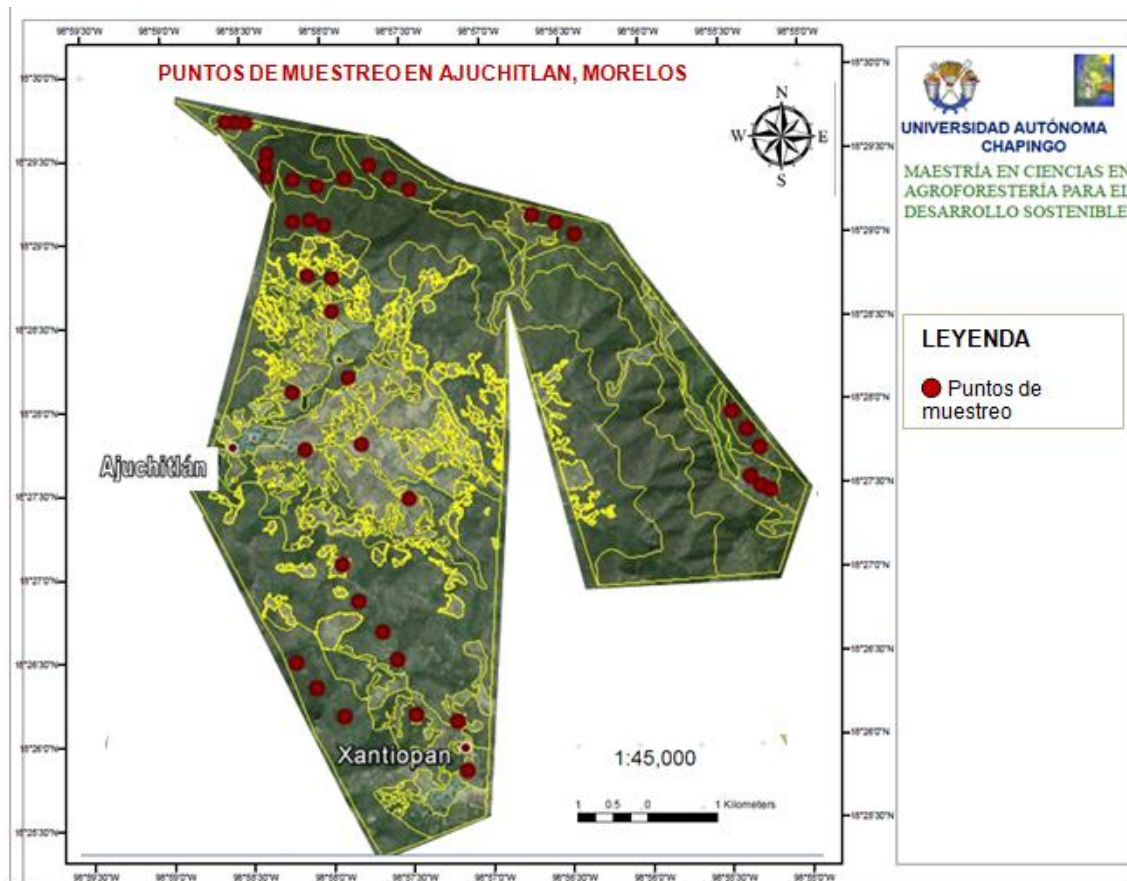


Figura 21. Puntos de muestreo en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

5.3. Contenido de carbono en la biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo

5.3.1. Biomasa viva

En total se encontraron 64 especies en el inventario forestal realizado; en el Cuadro 14 se muestran las 15 especies más abundantes, en donde se puede observar que *Euphorbia schlechten* representa el 20% de todos los individuos registrados, sin embargo esta especie está considerada por los pobladores como una especie invasora sin ningún uso conocido hasta el momento; *Bursera bipinnata* con el 8% es la segunda especie más abundante, esta especie es muy importante para los pobladores por la extracción de copal que realizan cada año.

Cuadro 14. Especies más abundantes registradas en el inventario forestal.

NOMBRE COMÚN	ESPECIE	No. De individuos	Porcentaje (%)
Estumeca	<i>Euphorbia schlechten</i>	339	20
Copal	<i>Bursera bipinnata</i>	141	8
Cuachalalate	<i>Amphiterygium adstringens</i>	100	6
Cubata	<i>Acacia cochliacantha</i>	95	6
Tepemesquite	<i>Lysiloma divaricata</i>	95	6
Tecolhuistle	<i>Mimosa benthami</i>	91	5
Palo dulce	<i>Eysenhardtia polstachya</i>	87	5
Bejuco		67	4
Guayacan	<i>Conzattia multiflora</i>	66	4
Encino	<i>Quercus magnoliaefolia</i>	57	3
Cazahuate	<i>Ipomoea arborescens</i>	56	3
Cuahulote	<i>Guazuma ulmifolia</i>	40	2
Cuajote blanco	<i>Bursera lacifolia</i>	34	2
Tepehuage	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	33	2
Espino blanco	<i>Acacia pennatula</i>	25	1

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados son similares a los encontrados por Hernández *et al.* (2011) en un estudio florístico para determinar la dieta del venado cola blanca en tres ejidos de la Reserva de la Sierra de Huautla, entre las que se encuentra Ajuchitlán; en donde encontró que las especies más abundantes son *Euphorbia schlechten*, *Lysiloma divaricata* y *Mimosa benthami* sumando el 37.29% del total del índice de valor de importancia.

En el Cuadro 15 se muestra la comparación de medias del contenido de Carbono en Mg ha^{-1} en el estrato arbóreo y arbustivo.

Cuadro 15. Comparación de medias del contenido de Carbono en Mg ha⁻¹ en el Estrato arbóreo y arbustivo.

Unidad de Paisaje	Medias C Mg ha ⁻¹	Varianza
Ag_RTQ_LM	4.9 a	0
P_SBC_PD_CL	10.71 a	45
SBC_PD_V	17.6 ab	38
SBC_AD_LM	27.1 ab	4.6
SBC_DM_LM	28.63 ab	123
P_SBC_DM_LM	30.6 ab	48
SBC_DM_CL	31.63 ab	70
SBC_DM_LI	35.83 ab	83
SBC_AD_CL	36.2 ab	169
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	39 ab	221
P_BE_DM_CL	60.17 b	330
SBC_AD_A (C) w ₁ (w)_LI	60.32 b	339

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

Las unidades de paisaje con mayor contenido de carbono en el estrato arbóreo y arbustivo son: P_BE_DM_CL y SBC_AD_A (C) w₁ (w)_LI; siendo significativamente diferentes a las demás unidades de paisaje. En ambas unidades se encontraron individuos de la especie *Quercus magnoliaefolia* la cual es predominante, con un valor de importancia de 22 y 10% respectivamente; esta especie es la que almacena mayor contenido de carbono en la biomasa en comparación con las otras es por ello que estas unidades de paisaje superan casi al doble a las demás unidades que no tienen como elemento principal a esta especie. Las unidades de paisaje correspondientes a la zona Agrícola y de Pastizal Inducido no se muestran en este Cuadro debido a la ausencia del estrato arbóreo y arbustivo.

En el Cuadro 16 se muestra la comparación de medias del contenido de Carbono en Mg ha⁻¹ en el estrato herbáceo, el cual dio como resultado que las unidades de paisaje con una diferencia significativa son la zona agrícola y de pastizal inducido (P_I_LM y Ag_TM_V).

Las otras unidades de paisaje no tienen diferencias significativas entre sí; esto se puede deber a que el muestreo se realizó en la época seca lo que pudo afectar en gran medida la poca presencia del estrato herbáceo.

Cuadro 16. Comparación de medias del contenido de Carbono en Mg ha⁻¹ en el Estrato herbáceo.

Unidad de Paisaje	Medias C Mg ha ⁻¹	Varianza
SBC_DM_LI	0.07 a	0.001
Ag_RTQ_LM	0.11 a	0
SBC_AD_LM	0.12 a	0.001
SBC_DM_CL	0.18 a	0.001
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	0.19 a	0.01
SBC_DM_LM	0.24 a	0.05
SBC_AD_A (C) w ₁ (w)_LI	0.25 a	0.01
P_SBC_PD_CL	0.27 a	0.002
SBC_PD_V	0.35 a	0.01
P_SBC_DM_LM	0.39 a	0.006
P_BE_DM_CL	0.48 a	0.04
SBC_AD_CL	0.49 a	0.002
P_I_LM	2.04 b	0.2
Ag_TM_V	2.2 b	0
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)</i>		

Fuente: Elaboración propia.

Los valores mostrados en los Cuadro 15 y 16 son similares con lo reportado por Gómez (2008) el cual determinó el contenido de carbono en un Bosque de Encino y en una Selva Baja Caducifolia en edades de 10, 20 y 40 años en la comunidad del Limón, Sierra de Huautla. En donde encontró que el Bosque de Encino de 10 años tiene un contenido de carbono de 69 Mg ha⁻¹. En cuanto a la Selva Baja Caducifolia de 40 años, determinó contenidos de carbono de 33 Mg ha⁻¹ siendo muy similar a los resultados obtenidos en esta investigación de Selva Baja Caducifolia de densidad media y alta con contenidos de carbono entre 27-39 Mg ha⁻¹.

En contraste las unidades de paisaje con menor cantidad de carbono fueron Ag_RTQ_LM, SBC_PD_V y P_SBC_PD_CL con contenidos de carbono de 4.9, 17.6 y 10.71 Mg ha⁻¹. Esto se debe fundamentalmente a la baja densidad de árboles y arbustos en estas unidades. Los contenidos de carbono para todas las unidades de paisaje son bajos en comparación con lo que encontró Vargas *et al.* (2008) en una Selva Baja Caducifolia en la Península de Yucatán con valores de C de 69 Mg ha⁻¹. Esto se puede deber a que los contenidos de carbono en la parte aérea están fuertemente influenciados por la edad de las selvas y en menor grado por la variación en la temperatura y precipitación (Read y Lawrence, 2003). Así mismo el máximo potencial de biomasa aérea de este tipo de vegetación está limitado por la profundidad del suelo, la habilidad de las plantas para acceder a los nutrientes y por el agua disponible en la estación seca (Campo y Vázquez-Yanes, 2004).

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, se puede decir que las unidades de paisaje con mayor contenido de carbono en la biomasa viva son P_BE_DM_CL y SBC_AD_A (C) w₁ (w)_LI siendo estadísticamente iguales. Las unidades con menor contenido de carbono fueron las zonas agrícolas y de pastizal así como aquellas con una vegetación de Selva Baja Caducifolia con poca densidad.

5.3.2. Materia Orgánica Muerta

Los resultados del contenido de Carbono en Mg ha⁻¹ en la hojarasca se muestran en el Cuadro 17, en donde se observa que no hubo diferencias significativas entre unidades de paisaje. A pesar de no existir una diferencia estadísticamente significativa entre unidades, se puede observar que la mayor cantidad de hojarasca se registró en el Bosque de Encino y la Selva Baja Caducifolia de densidad media, localizadas en la cima de la ladera. En el Cuadro 18 se muestra el contenido de carbono en ramas muertas con un diámetro mayor a 5 cm. En donde se observa que la unidad de paisaje de SBC_AD_A (C) w₁ (w)_LI es la que tiene mayor contenido de carbono siendo estadísticamente diferente a las demás.

Cuadro 17. Comparación de medias del contenido de Carbono en Mg ha⁻¹ en la hojarasca.

Unidad de Paisaje	Medias C Mg ha ⁻¹	Varianza
SBC_AD_CL	0.3 a	0.02
SBC_DM_LM	0.35 a	0.019
SBC_DM_LI	0.39 a	0.04
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	0.64 a	0.006
P_SBC_DM_LM	0.66 a	0.11
SBC_AD_A (C) w ₁ (w)_LI	0.67 a	0.11
P_SBC_PD_CL	0.67 a	0.42
SBC_AD_LM	0.81 a	0.059
SBC_PD_V	1.16 a	0.068
P_BE_DM_CL	1.36 a	0.25
SBC_DM_CL	1.54 a	0.49
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)</i>		

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18. Comparación de medias del contenido de Carbono en Mg ha⁻¹ de ramas muertas.

Unidad de Paisaje	Medias C Mg ha ⁻¹	Varianza
P_SBC_PD_CL	0.01 a	0
SBC_DM_LM	0.18 a	0.004
SBC_PD_V	0.19 a	0.008
SBC_AD_CL	0.19 a	0
SBC_AD_LM	0.27 a	0.03
SBC_DM_CL	0.27 a	0.026
P_SBC_DM_LM	0.28 a	0.002
SBC_DM_LI	0.33 ab	0.023
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	0.46 ab	0.02
P_BE_DM_CL	0.47 ab	0.07
SBC_AD_A (C) w ₁ (w)_LI	1 b	0.13
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)</i>		

Fuente: Elaboración propia.

No fue posible realizar colecta de mantillo ya que fue difícil diferenciarlo debido a que estaba integrado al suelo en su totalidad. Esto se puede deber a que en los ecosistemas con una estación seca bien definida (como en las Selvas Bajas Caducifolias), la caída de hojarasca es máxima durante ese período y su descomposición es más rápida en el siguiente período húmedo, alcanzando tasas de descomposición hasta 30% más altas en estos períodos de humedad (Álvarez, 2007). Martínez-Yrízar (1984), encontró que la descomposición de la hojarasca en una Selva Baja Caducifolia de Jalisco ocurrió prácticamente durante la estación lluviosa.

La Unidad de Paisaje que obtuvo el mayor contenido de carbono en la materia orgánica muerta fue P_BE_DM_CL con 1.83 Mg ha^{-1} ; seguida con muy poca diferencia de la unidad SBC_DM_CL con 1.81 Mg ha^{-1} . El mayor contenido de carbono en las unidades de paisaje fue aportado por la hojarasca. Estos valores son similares a los reportado por Gómez *et al.* (2012) en Selva Baja Caducifolia de 10 años de edad en la misma región de estudio con contenidos de C de 1.9 Mg ha^{-1} ; los valores de las demás unidades de muestreo están muy por debajo de lo reportado en esa investigación.

El contenido de biomasa de la materia orgánica muerta de P_BE_DM_CL y SBC_DM_CL (3 Mg ha^{-1} y 3.8 Mg ha^{-1} respectivamente) se asemejan a lo encontrado por Saynes *et al.* (2005) en un estudio realizado en la Sierra de Huautla, Morelos, que estimó que los residuos producidos por los árboles en un año para la fase de bosque tropical seco secundario temprano fue de 3.8 Mg ha^{-1} . Sin embargo los valores estimados para todas las unidades de paisaje están por debajo de los rangos estimados por Martínez-Yrízar (1995) para los bosques tropicales secos a nivel mundial que fue de 3.2 a 12.3 Mg ha^{-1} . Esto se puede deber a que el contenido de materia orgánica muerta en el piso forestal está ampliamente influenciado según las características de la especie con mayor valor de importancia en la zona de muestreo, pues entre más pequeñas sean las hojas se tendrá menos biomasa que otras especies con hojas de mayores dimensiones (Gómez *et al.*, 2012).

5.3.3. Materia orgánica del suelo

De manera general, se puede decir que en casi todas las unidades de paisaje (a excepción de la parte agrícola) la mayor parte del carbono subterráneo se encontró en los primeros 15 cm de profundidad y fue disminuyendo conforme aumentaba (Cuadro 19).

Cuadro 19. Carbono Orgánico del Suelo por profundidad en las diferentes unidades de paisaje.

Unidades de Paisaje	Profundidad 0-15 (C Mg ha ⁻¹)	Varianza	Profundidad 15-30 (C Mg ha ⁻¹)	Varianza	Profundidad 30-45 (C Mg ha ⁻¹)	Varianza
SBC_DM_LM	69 ab*	5	44.5 a	107	39.8 a	11
SBC_DM_LI	72.2 ab	119	40.6 a	98	32.8 a	0.08
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	73.2 ab	37	33.7 a	7	Nd**	
SBC_AD_A (C) w ₁ (w)_LI	56.2 ab	443	43.8 a	130	Nd	
SBC_DM_CL	57.1 ab	129	34.5 a	211	26 a	2
SBC_PD_V	48.1 ab	114	43.1 a	71	38.1 a	
SBC_AD_CL	82.2 b	5.5	44.4 a	179	Nd	
P_SBC_PD_CL	47.3 ab	35	32.2 a	98	Nd	
P_BE_DM_CL	60 ab	360	42.2 a	448	22.3 a	53
SBC_AD_LM	50.6 ab	94	39 a	82	39 a	154
P_SBC_DM_LM	60 ab	193	46 a	15	Nd	
P_I_LM	38.4 ab	253	28.7 a	53	32.8 a	120
Ag_TM_V	30.3 a	184	39.9 a	3	26.4 a	29
Ag_RTQ_LM	44.8 ab	484	36.1 a	27	24.6 a	3

*Medias con una letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

** Nd= No hay datos debido a que la profundidad del suelo es menor

Fuente: Elaboración propia.

La unidad de paisaje con más concentración de carbono orgánico del suelo en los primeros 15 cm fue SBC_AD_CL con 82.2 Mg ha⁻¹ siendo estadísticamente diferente a los demás datos; seguida de las unidades de paisaje con vegetación de densidad alta y media con rangos de carbono de 73-50 Mg ha⁻¹.

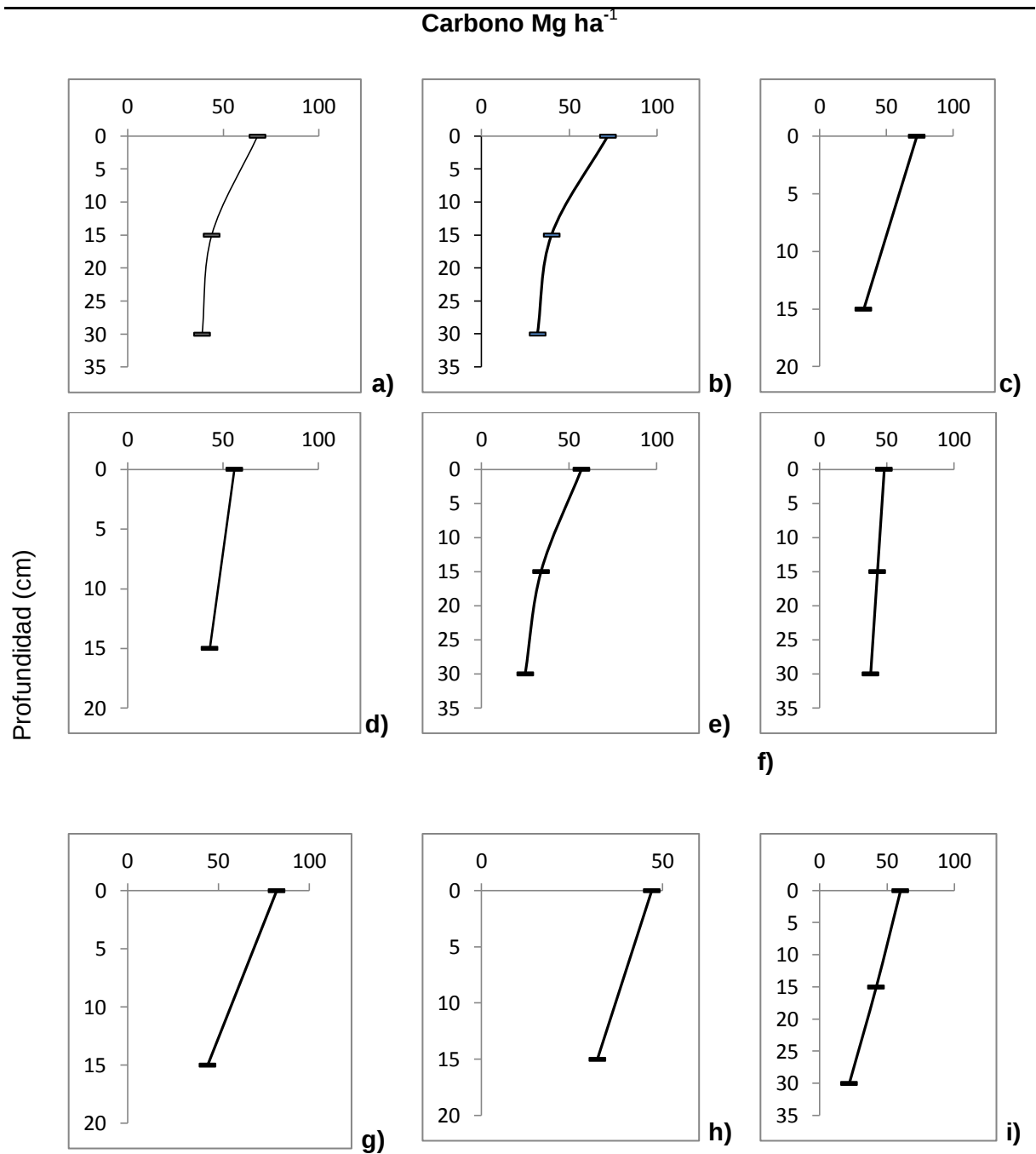
La unidad de paisaje con menor contenido de carbono orgánico del suelo fue la zona agrícola (Ag_TM_V) con 30.3 Mg ha⁻¹, seguida de las zona de pastizal inducido, roza-tumba-quema y las unidades de vegetación de Selva Baja Caducifolia con poca densidad de árboles, con contenidos de carbono de 38-48 Mg ha⁻¹.

Los rangos de profundidad de 15-30 y 30-45 no tuvieron diferencias estadísticamente significativas en los datos. Los datos mostrados en el Cuadro 19 en los primeros 15 cm de profundidad, son mayores a los reportados por Gómez (2008) quien reporta 47 Mg ha⁻¹ en la vegetación de Selva Baja Caducifolia de 40 años de edad, 35 Mg ha⁻¹ para edad de 20 años y 18.4 Mg ha⁻¹ para vegetación de 10 años. Esto se puede deber a que la precipitación es mayor en las unidades de paisaje de éste estudio con rangos entre 900-1100 mm y con tipos de clima más frescos en comparación con la comunidad del Limón. El valor registrado en la zona agrícola es similar al registrado en la vegetación de Selva Baja Caducifolia de 20 años de edad, pues la precipitación en ambas zonas está entre los 800 mm.

Así mismo, los contenidos de carbono orgánico del suelo encontrados en esta investigación siguen siendo mayores en comparación con los reportados por el IPCC (2006) el cual estima 63-67 Mg ha⁻¹ en los primeros 30 cm de profundidad en la zona agroecológica tropical cálida estacionalmente seca. Los contenidos de carbono orgánico del suelo de la zona agrícola y pastizal, así como de la vegetación de selva baja caducifolia de poca densidad a los 30 cm de profundidad son similares a los encontrados por Acosta *et al.* (2001) en áreas agrícolas de cultivos anuales en terrenos de ladera de la Región Mazateca, Oaxaca con rangos de C de 76-104 Mg ha⁻¹.

La distribución del contenido de carbono orgánico del suelo en las diferentes profundidades estudiadas, sigue un patrón de J invertida en la mayoría de las unidades de paisaje, tal como lo indica lo reportado por Cleve y Powers (1995) en un informe sobre el contenido de materia orgánica del suelo en el norte de California y sureste de Oregon. Este comportamiento no se dio en la zona

agrícola en donde se encontró que la mayor parte del carbono se localizaba en el rango de profundidad de 15-30 cm; probablemente a que en esa zona realizan barbecho y rastreo cada año lo que modifica la estructura del suelo (Figura 22).



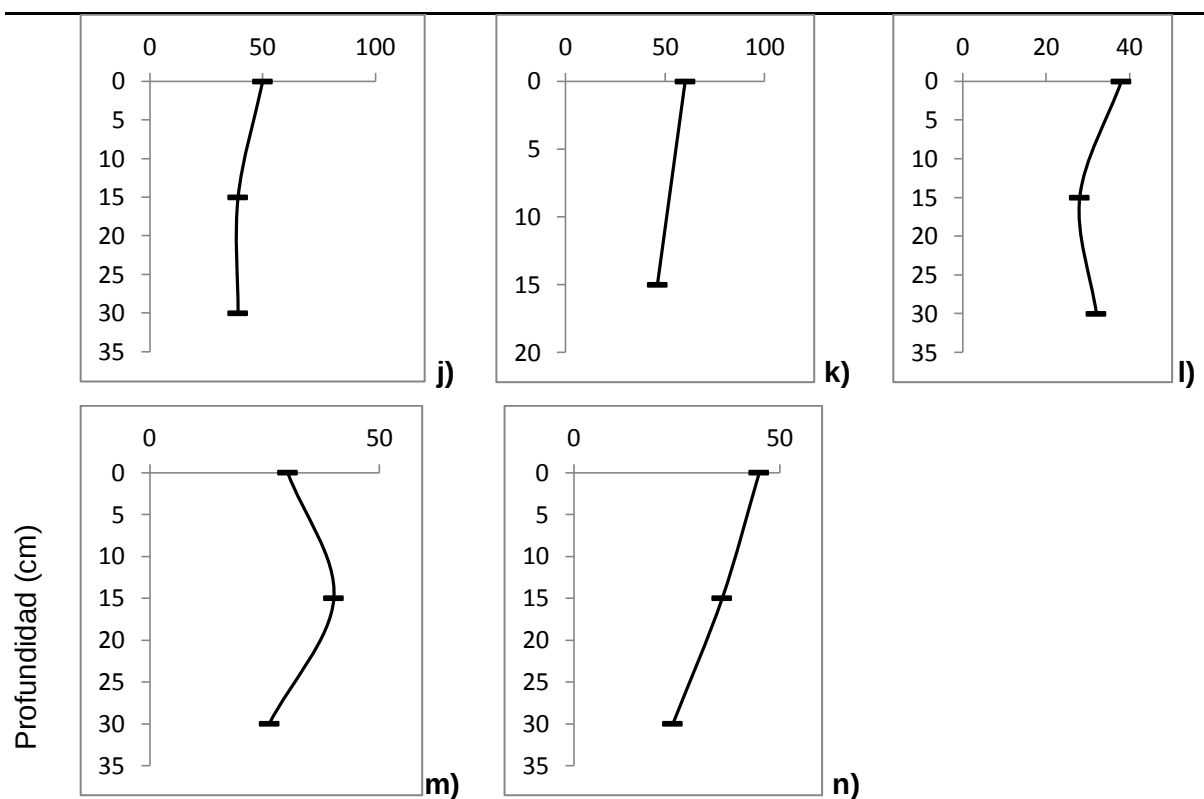


Figura 22. Distribución del contenido de carbono en las diferentes profundidades en cada unidad de paisaje; a) SBC_DM_LM; b) SBC_DM_LI; c) SBC_AD_Aw₁ (w)_LI; d) SBC_AD_A (C) w₁ (w)_LI; e) SBC_DM_CL; f) SBC_PD_V; g) SBC_AD_CL; h) P_SBC_PD_CL; i) P_BE_DM_CL; j) SBC_AD_LM; k) P_SBC_DM_LM; l) P_I_LM; m) Ag_TM_V; n) Ag_RTQ_LM

5.4. Línea Base

5.4.1. Biomasa Viva

Como se puede observar en el Cuadro 20 y la Figura 23, la unidad de paisaje que seguirá teniendo mayor contenido de carbono en una proyección de 20 años será P_BE_DM_CL seguida de SBC_AD_A (C)_LI, esto se debe fundamentalmente a que en estas unidades la especie con mayor valor de importancia es *Quercus magnoliaefolia* que tiene un incremento medio anual en biomasa de 2.2 Mg ha⁻¹ en comparación con las especies de selva baja que tienen un incremento medio anual de 1.7 Mg ha⁻¹.

Cuadro 20. Carbono (Mg ha^{-1}) del estrato arbóreo y arbustivo en una proyección de 20 años.

Unidad de Paisaje	C (Mg ha^{-1}) en el Año 0	C (Mg ha^{-1}) en el Año 20
P_BE_DM_CL	60	79.57
SBC_AD_A (C)_LI	46.66	61.6
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	38.30	53.18
SBC_AD_CL	35.83	50.90
SBC_DM_LI	35	49.87
SBC_DM_CL	31.66	44.099
P_SBC_DM_LM	30	42.12
SBC_DM_LM	28.3	41.73
SBC_AD_LM	26.66	41.77
SBC_PD_V	17.5	29.20
P_SBC_PD_CL	10	24.59
Ag_RTQ_LM	4.5	11.45
Ag_TM_V	2.2*	2.2
P_I_LM	2*	2

*Contenido de carbono en el estrato herbáceo

Fuente: Elaboración propia.

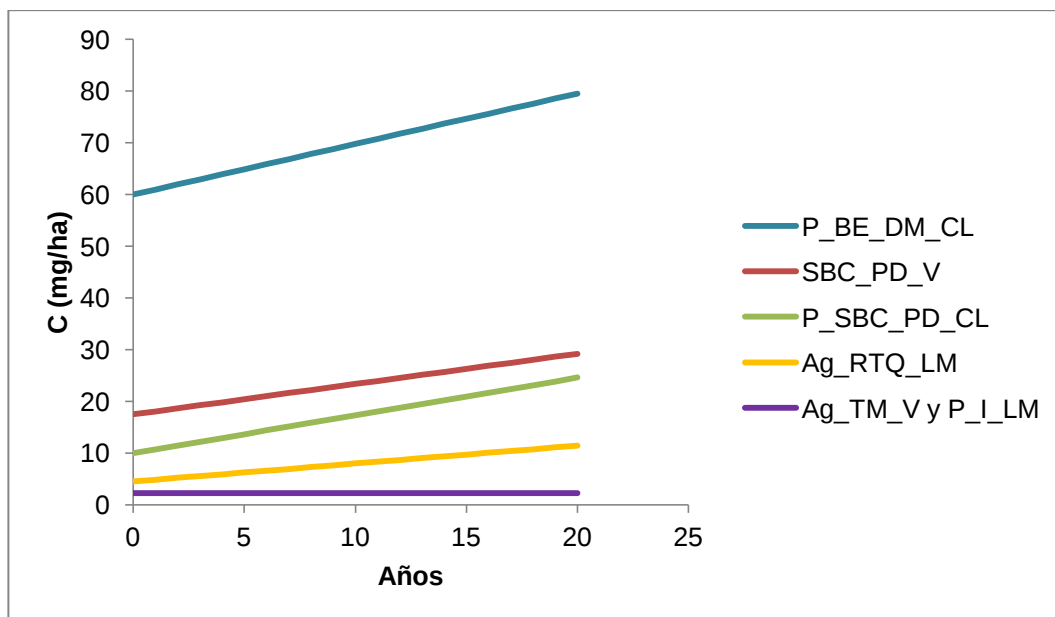


Figura 23. Línea base de la biomasa viva de las unidades de paisaje con menor contenido de carbono comparado con la de mayor contenido a los 20 años.

Las unidades de vegetación de Selva Baja Caducifolia con poca densidad a pesar de que seguirán teniendo bajos contenidos de carbono a los 20 años, tendrán un aumento similar al de las demás unidades de paisaje con vegetación de Selva Baja de densidad media y alta, las cuales tienen un rango de aumento de carbono de 12-14 Mg ha⁻¹. La zona de roza-tumba-quema solo tendrá un aumento de 6 Mg ha⁻¹ debido a la baja densidad de especies arbóreas que existen en ella.

Para el caso de la zona agrícola y de pastizal se determinó que el contenido de carbono será el mismo suponiendo que los cultivos y pastizales tendrán el mismo rendimiento en biomasa durante los últimos 20 años. Vargas *et al.* (2008) encontró en una selva tropical caducifolia madura de 29 años, contenidos de carbono de 67 Mg ha⁻¹ que son superiores a los estimados en esta investigación a los 20 años. A pesar de ello se encuentran en el rango global reportado para este tipo de vegetación de 23-273 Mg ha⁻¹ (Martínez-Yrizar, 1995) excepto para el caso de agricultura de roza-tumba-quema.

5.4.2. Materia orgánica del suelo

Al igual que los resultados que se obtuvieron en el inventario de la materia orgánica del suelo realizado en esta investigación, la unidad de paisaje que tendrá mayor tasa anual de cambio durante los últimos 20 años será SBC_AD_CL. Las unidades de paisaje con menor tasa anual de cambio seguirán siendo las zonas agrícolas y de pastizal (Cuadro 21).

Cuadro 21. Contenido de carbono (Mg ha⁻¹) de la materia orgánica del suelo en una proyección de 20 años.

Unidades de Paisaje	C (Mg ha ⁻¹) Año 0	C (Mg ha ⁻¹) año 20	Tasa anual de cambio
SBC_AD_CL	126.6	188.2	3.08
SBC_DM_LM	113.50	164.00	2.43
SBC_DM_LI	112.8	162.6	2.4
P_BE_DM_CL	102.2	152.4	2.51
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	106.90	148.80	2.10
SBC_AD_A (C) w1 (w)_LI	100.00	148.50	2.43
P_SBC_DM_LM	106	147	2.05
SBC_DM_CL	91.6	131.2	1.98
SBC_PD_V	91.00	130.00	1.95
SBC_AD_LM	89.6	127.2	1.88
P_SBC_PD_CL	84.2	116.4	1.61

P_I_LM	65.09	79.75	0.73
Ag_RTQ_LM	64.64	59.28	-0.26
Ag_TM_V	56.24	42.48	-0.68

Fuente: Elaboración propia.

La tasa anual de cambio para la vegetación secundaria de Selva Baja Caducifolia y Bosque de Encino se encuentra en un rango de C de 1.61-3.08 Mg ha⁻¹ al año, que en promedio sería de 2.2 Mg C ha⁻¹ al año que es similar a lo reportado por Vargas *et al.* (2008) que menciona una tasa de acumulación a largo plazo de 2.5 Mg C ha⁻¹ al año en una selva tropical seca madura de Yucatán. En el caso de la zona agrícola, la tasa anual de cambio es negativa debido a que a través del tiempo y al no haber una entrada de materia orgánica, se da el proceso de degradación de la misma, mediante la mineralización del humus, generando una disminución conforme pasa el tiempo. Aparte de los factores climáticos, principalmente la temperatura, los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. Así mismo la materia orgánica del suelo es por lo general más baja donde la degradación es más severa. (FAO, 2002).

La tasa anual de cambio de la zona agrícola que se presenta en el Cuadro 21 es la que se generó utilizando las ecuaciones del IPPC (2006). La tasa anual de cambio que se obtuvo con la ecuación de Ortiz *et al.* (1994) fue de 6% considerándose como una degradación biológica severa. Estos resultados son mayores en comparación con lo encontrado por Gueye (2010) quien estimó una pérdida de contenido orgánico del suelo a profundidades de 0-30 cm de -0.13 Mg ha⁻¹ al año en una selva baja caducifolia en una ladera en Michoacán en el período de 1986-2001. Por medio de ambos métodos se tiene una disminución en la materia orgánica del suelo, sin embargo la tasa anual de cambio obtenida por el método del IPCC (2006) puede variar según el SOC de referencia que se utilice. En cambio en el método de Ortiz *et al.* (1994) no existen variaciones pues utiliza datos específicos de la zona sobre clima y suelo.

5.5. Diseño de tecnologías Agroforestales

Las unidades de paisaje relativamente homogéneas donde se observó un bajo contenido de carbono tanto en la biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo fueron las zonas de agricultura mecanizada (Ag_TM_V); agricultura de rosa-tumba-quema (Ag_RTQ_LM); pastizal inducido e introducido (P_I_LM); pastizal con Selva Baja Caducifolia con poca densidad en la cima de la ladera (P_SBC_PD_CL); y Vegetación Secundaria de SBC de poca densidad en el Valle fluvial (SBC_PD_V).

La tecnología agroforestal propuesta para las tres primeras zonas es la de cercas vivas ya que según lo observado y de acuerdo con Uribe (2012), Yescas (2012) y Cortez (2012) se ha identificado que la principal problemática es el cercado; esto se debe a que es un área netamente ganadera, por lo que los propietarios de los predios tienen cercas muertas para evitar el paso del ganado a otras áreas, invirtiendo una gran cantidad de dinero y tiempo para la reparación año con año de las mismas. Esto genera presión para las especies arbóreas que son utilizadas para obtener postes para cercos muertos. No se recomienda otro tipo de tecnología en estas áreas, ya que los predios de cada agricultor son pequeños y fraccionados.

En la unidad P_SBC_PD_CL, se observó degradación y erosión del suelo, así como poca densidad de especies y una presencia importante de *Euphorbia schlechtendalii* con un Valor de Importancia de 27%, aportando solo 142 kg/ha de carbono en la parte aérea. Esta especie es considerada por la comunidad como invasora, muy agresiva y de poca utilidad. La práctica recomendada es Barreras Vivas con especies rusticas que sirvan para retener el suelo y generen condiciones adecuadas para restaurar posteriormente con especies arbóreas que sean de utilidad, que aumenten el contenido de carbono en el sitio y que sustituyan gradualmente a *Euphorbia schlechtendalii*.

Para la unidad SBC_PD_V, se recomienda hacer un enriquecimiento de especies para aumentar el contenido de carbono ya que actualmente el carbono que acumula la parte aérea es solo de 17 Mg ha⁻¹. En la Figura 24 se muestra la distribución espacial de las tecnologías propuestas en el área de estudio.

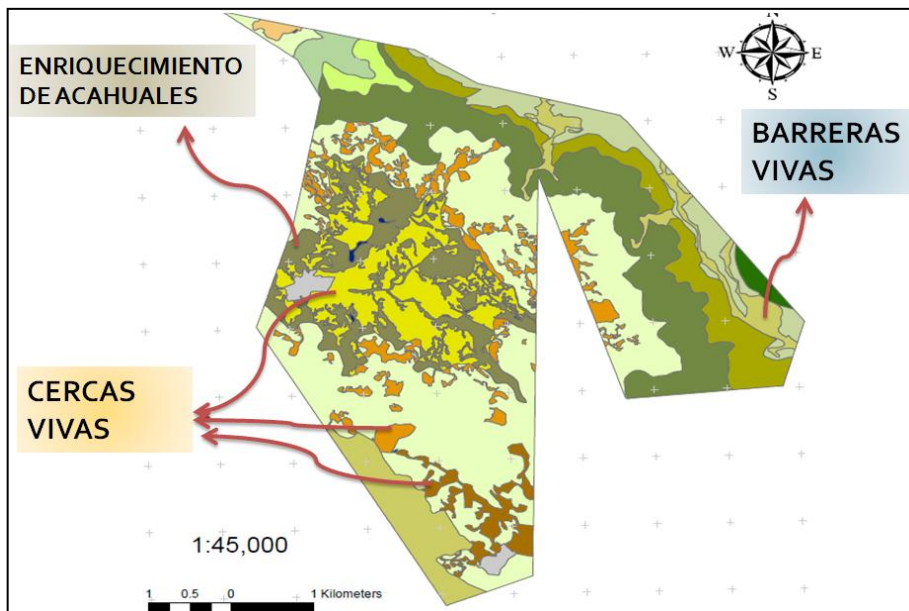


Figura 24. Distribución espacial de las tecnologías agroforestales propuestas.

5.5.1. Selección de especies

Para seleccionar las especies a utilizar en las tecnologías agroforestales propuestas, se determinó la cantidad de biomasa, el contenido de carbono y el Valor de Importancia por especie en cada unidad de paisaje. En el Cuadro 22 se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 22. Especies seleccionadas con mayor contenido de carbono en Mg ha⁻¹ por Unidad de Paisaje.

Unidad de Paisaje	Especie	VI (%)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
P_BE_DM_CL	<i>Quercus magnoliaefolia</i>	22.39	84	39
SBC_AD_A (C) w1 (w)_LI	<i>Quercus magnoliaefolia</i>	9.61	45	20
SBC_PD_V	<i>Acacia cochliacantha</i>	65.41	34	15
SBC_DM_LI	<i>Lysiloma divaricata</i>	13.95	30	14
SBC_AD_Aw ₁ (w)_LI	<i>Lysiloma divaricata</i>	21.28	30	13
SBC_DM_CL	<i>Mimosa benthami</i>	12.97	25	11
SBC_AD_CL	<i>Lysiloma divaricata</i>	12.12	22	10
SBC_AD_LM	<i>Guazuma ulmifolia</i>	11.37	18	8
P_SBC_DM_LM	<i>Guazuma ulmifolia</i>	9.90	18	8
SBC_DM_LM	<i>Bursera bipinnata</i>	7.31	14	6
P_SBC_PD_CL	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	7.12	8	4

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del Cuadro 22 dependen del número de individuos que se encontraron en cada unidad de paisaje en el inventario del estrato arbóreo y arbustivo. *Quercus magnoliaefolia* obtuvo los valores más altos de contenido de carbono debido a que las Unidades donde se encontró estaban representadas casi en su totalidad con dicha especie.

En base a los resultados del Cuadro 22 se estimó la cantidad de carbono por especie a distintas categorías diamétricas para conocer cuál de ellas almacena más carbono de forma individual, en donde se observó que de igual forma *Quercus magnoliaefolia* sigue siendo la especie que acumula mayor cantidad de carbono al igual que *Guazuma ulmifolia*, seguida de *Lysiloma divaricata*, que tiene el mismo contenido de carbono que *Lysiloma acapulcensis* y *Mimosa benthami*, la penúltima especie por orden de importancia es *Bursera bipinnata*; por último se tiene a *Acacia cochliacantha*. Las especies que presentan el mismo contenido de carbono se debe a que se aplicó la misma fórmula por tener un crecimiento y densidad básica de la madera similar.

En la Figura 25 se muestra el contenido de carbono por especie a distintas categorías diamétricas, en donde se observa que en sus primeras etapas todas las especies contienen contenidos de carbono similares entre sí. Conforme van aumentando en diámetro las especies de crecimiento más lento (*Quercus magnoliaefolia* y *Guazuma ulmifolia*) superan al doble a las especies de crecimiento rápido. Esto se puede deber a que las especies de crecimiento más lento se caracterizan por tener una madera más densa, fustes gruesos y muchas ramas lo que hace que el carbono fijado sea mayor (Pérez *et al.*, 2007).

En cambio *Acacia cochiacantha* es una especie arbustivas de rápido crecimiento que solo alcanza alturas máximas promedio de 6-7 m, con fustes delgados, ramificados y hojas pequeñas, lo que reduce la cantidad de biomasa producida y por lo tanto menor carbono fijado. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, las especies a utilizar son las que se muestran en el gráfico entre las que se incluye a *Gliricidia sepium* por fijar un contenido de carbono similar al de *Acacia cochiacantha*.

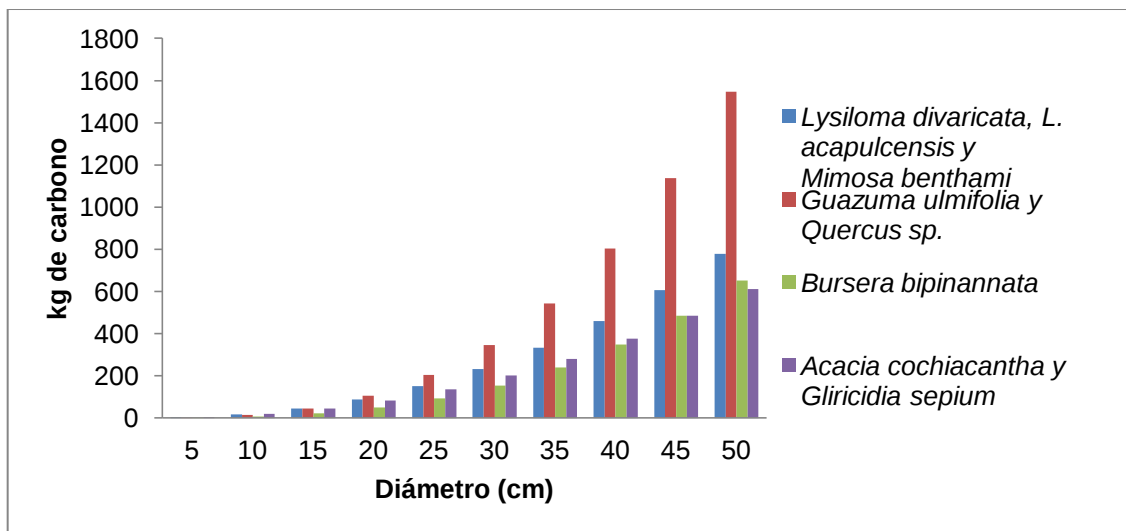


Figura 25. Especies con mayor contenido de carbono por categoría diamétrica.

Todas las especies seleccionadas son de usos múltiples y presentan un índice de valor cultural con algún grado de importancia según lo reportado por Burgos (2014) en un estudio realizado en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos. Donde encontró que las especies con mayor valor cultural son *Mimosa benthami* y *Acacia cochiacantha* con el 82 y 43% del total de las especies estudiadas. *Lysiloma divaricata* tiene un valor del 39%, *Gliricidia sepium* y *Guazuma ulmifolia* 21%, *Bursera bipinnata* 14% y *Quercus magnoliaefolia* con 7%. *Lysiloma acapulcensis* no se encuentra entre las especies con algún valor cultural esto se puede deber a que al igual que *Quercus magnoliaefolia* se desarrollan principalmente en la cima de la ladera lo que hace difícil su aprovechamiento.

5.5.2. Características generales de las especies seleccionadas

A continuación se describen las características botánicas generales de las especies seleccionadas, así como algunos usos importantes en la agroforestería.

***Guazuma ulmifolia* (Cuaulote)**

Descripción Botánica: *Guazuma ulmifolia* conocida comúnmente por la comunidad como Cuaulote, es una especie perteneciente a la familia Sterculiaceae. Es un árbol caducifolio de hasta 25 m de altura, con un diámetro normal promedio de 30-40 cm. Generalmente tiene un tronco derecho, ramificado desde la base. Los frutos son cápsulas, moreno oscura a negra cuando está totalmente madura, de olor y sabor dulce (Pennington y Sarukhán, 2005). En la zona de estudio el diámetro promedio fue de 12.7 cm.

Distribución en el área de estudio: Según lo encontrado en los mapas elaborados en este estudio, se encontró que se desarrolla muy bien en el clima Aw_0 (w) (í)g y Aw_1 (w) (í)g en altitudes de 1100 a 1300 msnm. En laderas moderadamente inclinadas. En temperaturas medias anuales de 22-24°C y precipitación anual de 900-1000 mm.

Usos agroforestales: Es un árbol muy apreciado en la agroforestería principalmente en los sistemas silvopastoriles ya que el forraje y los frutos son altamente nutritivos y palatables para el ganado; así mismo produce leña de alta calidad y carbón (Pérez, 2010). De acuerdo a un estudio realizado en diversas comunidades de la Reserva de la Biosfera de Sierra de Huautla se identificó que esta especie tiene un alto valor forrajero y es ampliamente usada por los campesinos en tecnologías agroforestales como cercos vivos, bancos forrajeros y pastura en callejones (Cortez, 2012).

***Quercus magnoliaefolia* (Encino blanco)**

Descripción botánica: Esta especie pertenece a la familia Fabaceae, es un árbol de 5 a 25 m de altura con diámetros de 15-60 cm; en el área de estudio se encontró un diámetro promedio de 16.5. La corteza es café clara a oscura y agrietada. El fruto es una bellota (Arizaga *et al.*, 2009).

Distribución en el área de estudio: En el área de estudio se observó que se desarrolla bastante bien en el clima A(C) w₁ (w) (í') g en la cima de ladera y ladera inclinada a una altura de 1550-1650 msnm. En rangos de precipitación anual de 1000-1100 mm y rangos de temperatura media anual de 21-22°C. En literatura se reporta que puede estar entre los 600-2800 msnm en suelos pedregosos (Arizaga *et al.*, 2009).

Usos agroforestales: En un estudio realizado por Moreno *et al.* (2013) se encontró que en Morelos esta especie es dejada en las zonas de cultivo conocidas como *tlacolol* que consiste en dejar árboles de usos múltiples en zonas con vegetación nativa que será transformada en áreas ganaderas o de cultivo. Esta especie es apreciada por tener una buena calidad de la madera, leña para carbón y frutos comestibles para el ganado.

***Lysiloma divaricata* (Tlahuitol)**

Descripción botánica: *Lysiloma divaricata* es un árbol pequeño a mediano, alcanzando alturas de hasta 15 m, con copa abierta. El diámetro promedio encontrado en la zona de estudio fue de 11.5 cm. La corteza es gris parduzca o casi negra, con prominentes puntos naranja en su superficie. El fruto es una vaina aplanada de color café. El sistema radicular es profundo con nódulos poblados de bacterias del género *Rhizobium* que asimilan el nitrógeno atmosférico (Cervantes y Sotelo, 2002).

Distribución en el área de estudio: En Morelos esta especie se encuentra en el 5° lugar de índice de importancia (Cervantes y Sotelo, 2002). Esto se corrobora con los resultados encontrados en este estudio ya que se distribuye en 9 de 11 Unidades de Paisaje relativamente homogéneas con especies arbóreas. Se desarrolla con más éxito en altitudes que van de 1100-1400 msnm; en climas Aw_0 (w) (í) g y Aw_1 (w) (í) g; en la cima de ladera y ladera inclinada. En rangos de temperatura media anual y precipitación anual de 22-24°C y 900-1100 mm respectivamente.

Usos agroforestales: En un estudio realizado en Tomatlán, Jalisco en una Selva Baja Caducifolia se encontró que esta especie tiene un alto potencial para ser usado en sistemas silvopastoriles debido a su diversidad de usos, entre los que destacan el potencial forrajero de los frutos (Miranda *et al.*, 2007). Yescas (2012) encontró que *Lysiloma divaricata* es la especie más apreciada en la comunidad de los Sauces, localizada en la Reserva de la Biosfera, Sierra de Huautla, debido a su alta capacidad dendroenergética, siendo una especie preferida para el establecimiento de tecnologías agroforestales tales como árboles dispersos en potreros y cercos vivos.

***Lysiloma acapulscensis* (Tepehuaje)**

Descripción botánica: Pertenece a la familia Mimosoideae, es un árbol con una altura promedio de 5 m, el diámetro promedio encontrado en la zona de estudio fue de 16.5 cm aunque en literatura se reportan diámetros máximos de hasta 75 cm, tiene el tronco ligeramente torcido, con ramas horizontales gruesas; copa redondeada y densa (Pennington y Sarukhán, 2005).

Distribución en el área de estudio: Se encontró en este estudio que ésta especie se desarrolla mejor en climas A(C) w_1 (w) (í) g en cimas de laderas a alturas de 1600-1700 msnm. En rangos de precipitación anual de 1000-1100 mm y rangos de temperatura media anual de 21-22°C.

Usos agroforestales: En Morelos esta especie ocupa el 4° lugar de valor de importancia por sus diversos usos, como: leña, madera, postes para cercos y construcción, y por su gran potencial forrajero (Boyás *et al.*, 1993). En un estudio realizado por Yescas (2012) se determinó que esta especie es la segunda más preferida para ser usada en tecnologías agroforestales con mayor potencial dendroenergético en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla.

***Mimosa benthami* (Tecolhuixtle)**

Descripción botánica: Arbustos o arboles pertenecientes a la familia Mimosaceae con alturas de 4-6 m. El diámetro promedio registrado en campo fue de 11 cm. Se caracteriza por tener ramas jóvenes acostilladas de color rojizo; las ramas maduras son cuadrangulares con aguijones dispuestos a lo largo de las costillas. Es una especie endémica de México (Grether *et al.*, 2006).

Distribución en el área de estudio: Se encontró que esta especie tiene un buen desarrollo en los tres tipos de clima obtenidos en este trabajo los cuales son: Aw_1 (w) (í) g, Aw_0 (w) (í) g, y A(C) w_1 (w) (í) g. En rangos altitudinales de 1200-1600 msnm; rango de precipitación anual y temperatura media anual de

900-1100 y 21-24°C. Principalmente en las cimas de laderas y laderas moderadamente inclinadas.

Usos agroforestales: Es altamente apreciada para construcciones rurales por poseer una madera dura, también es usada para leña y morillos. El follaje suele ser utilizado como forraje para el ganado (Matías, 2013). Es una especie vulnerable debido a la alta explotación humana, la poca regeneración y la presencia de plagas que está generando mortalidad importante en la zona de estudio. Según Burgos (2014) esta especie es utilizada por los pobladores de Ajuchitlán, Tlaquitenango, Morelos en cercas vivas, cultivo en callejones y árboles dispersos en potreros.

***Bursera bipinata* (Copal chino)**

Descripción botánica: Perteneciente a la familia Burseraceae. Puede ser un arbusto o árbol que alcanza un tamaño de 1.5 a 8 m de altura, con tronco delgado y torcido. La importancia de este árbol es que produce la resina conocida como copal (Linares y Bye, 2008). El diámetro promedio de los árboles medidos en campo fue de 11 cm.

Distribución en el área de estudio: Se distribuye principalmente en la altitud de 1500-1700 msnm; en rangos de temperatura y precipitación anual de 22-24°C y 900-1100 mm respectivamente; en cimas de ladera y laderas moderadamente inclinadas. Prácticamente se desarrolla en todos los climas de Ajuchitlán ($Aw_1(w)(i')$ g, $A(C)w_1(w)(i')$ g $Aw_0(w)(i')$ g).

Usos agroforestales: Puede ser usada como cercos vivos ya que se regeneran fácilmente. La madera se puede utilizar para artesanías, de la resina aromática se derivan diversos productos como incienso, aceite esencial y barnices. Es usado como leña y como especie melífera (Terrones, 2007). En Morelos se ha reportado su uso en la tecnología agroforestal de árboles dispersos en cultivos y cercas vivas en los linderos de sus parcelas (Moreno et al., 2013).

***Acacia cochiacantha* (Cubata)**

Descripción botánica: Es una especie arbórea y arbustiva perteneciente a la familia Leguminosae, mide desde 1.5 hasta 4.5 m de altura (Olivares *et al.*, 2011), aunque en el área de estudio se encontraron alturas de hasta 7 m. El diámetro registrado en la zona fue de 7.4 cm.

Distribución en el área de estudio: Esta especie se distribuye principalmente en el clima Aw₀ (w) (í') g; en ladera moderadamente inclinada y valle fluvial casi plano; en rangos de temperatura y precipitación anual de 23-25 °C y 800-1000 mm. En altitudes de 1100-1300 msnm.

Usos agroforestales: Según Boyás, *et al.* (1993) ocupa el 6° lugar de importancia en el estado de Morelos por su aprovechamiento como combustible, postes para cercos y construcción; también sobresale por su uso como tutores y en la elaboración de implementos agrícolas; además de ser muy apreciada en los sistemas silvopastoriles por su alto valor forrajero. En un estudio realizado por Cortez (2012) esta especie ocupa el 2° lugar en orden de importancia para ser utilizada en sistemas silvopastoriles en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla.

***Gliricidia sepium* (Mata Rata)**

Descripción botánica: Árbol o arbusto de la familia Fabaceae de 2 a 15 m de altura, con diámetros promedio registrados en la zona de estudio de 21.5 cm aunque se reporta en la literatura que pueden existir diámetros máximos de 60 cm. La forma del árbol es variable, desde erecta y recta en algunas procedencias, hasta retorcida y muy ramificada, con tallos múltiples originados cerca de la base (SIRE, 2003).

Distribución en el área de estudio: Se distribuye únicamente en el valle fluvial casi plano; en el clima Aw₀ (w) (í') g; en altitudes de 1100-1150 msnm y rangos de temperatura y precipitación de 24-25 °C y 800-900 mm.

Usos agroforestales: Es una especie muy apreciada por su alto valor forrajero para el ganado. Las hojas contienen un alto porcentaje de proteína cruda (18 a 30%). Su valor de digestibilidad de la hoja seca es alto, va de 48 a 78%. Otros usos importantes es que produce leña de excelente calidad; es maderable, medicinal y melífera (SIRE, 2003).

5.5.3. Cercas vivas

Se recomienda realizar cercas vivas en las áreas de agricultura y pastizal inducido para delimitar las parcelas y reducir los altos costos de establecimiento y mantenimiento de las cercas muertas. Las parcelas de cultivo y pastoreo se encuentran principalmente en el Valle Fluvial Casi plano. El tipo de clima en esta zona es un $Aw_0(w)(i')$ g, con una precipitación anual de 900-1000 mm y un rango de temperatura de 23-24°C. Con una fisiografía de valle fluvial casi plano y moderadamente inclinado. Con rangos de pendiente de 0-8%.

Especies seleccionadas

Las especies recomendadas para el establecimiento de las cercas vivas son aquellas que se observó que se adaptan fácilmente a las condiciones de clima, precipitación, temperatura, y fisiografía de la zona agrícola-ganadera. Las especies recomendadas son: *Gliricidia sepium*, *Acacia cochiacantha*, *Mimosa benthami* y *Guazuma ulmifolia*. El principal objetivo de los cercos vivos aquí propuestos es delimitar las parcelas pero también pueden para venta de leña una vez que hayan alcanzado el turno deseado, ya que todas las especies seleccionadas tienen una buena calidad de leña apreciada por los pobladores. Como actualmente la mayoría de las parcelas están delimitadas con cercos muertos la estrategia sería establecer gradualmente los postes de cerco vivo hasta sustituir los postes muertos, esto se hace con la finalidad de prevenir el daño causado por los animales cuando ramonean (Reyes y Martínez, 2011).

Espaciamiento y densidad de plantación

En literatura existen muchas propuestas para el espaciamiento de la plantación, sin embargo en este trabajo se utilizará un espaciamiento de 4 m entre planta, intercalando un poste muerto cada dos metros. Dando un total de 100 plantas/ha. Una separación menor podría reducir los rendimientos del cultivo debido a la competencia por luz y nutrientes. El alambre de púas se debe colocar cuando las plantas estén bien enraizadas y tengan un grosor de más de 15 cm. El arreglo se ilustra en la Figura 26.

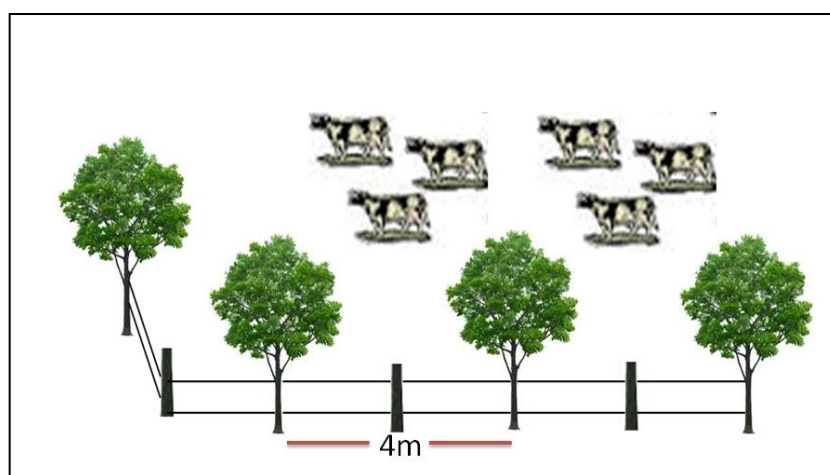


Figura 26. Arreglo espacial de los árboles en los cercos vivos propuestos.

5.5.4. Barreras vivas

En la Unidad de Paisaje P_SBC_PD_CL se observó un alto grado de erosión (Figura 27). Por lo que se recomienda realizar la práctica de barreras vivas que servirán para controlar en cierto grado los niveles de erosión de los suelos, reduciendo la velocidad del agua de escorrentía pendiente abajo y la remoción del suelo, permitiendo que las partículas finas del suelo se sedimenten en la parte superior de las barreras vivas y se formen terrazas naturales (Cubero, 1999). Con esta estrategia se detendrá el proceso degradativo del suelo y con el tiempo se incrementará el potencial productivo del mismo.



Figura 27. Erosión observada en la unidad de paisaje P_SBC_PD_CL.

Especies seleccionadas

Una de las especies recomendadas para esta actividad es *Opuntia lubrica* y *Bursera bipinnata*. A pesar de que *Opuntia lubrica* no es tan representativa en esta zona teniendo un índice de importancia de 6%, es recomendada por diversos autores como una buena especie para ser implementada en barreras vivas en terrenos con alta erosión pues se desarrolla adecuadamente y tiene una alta sobrevivencia (Bolaños *et al.*, 2013). *Bursera bipinnata* es una especie con un alto valor de importancia en esta área (18%) y es una especie que se ramifica desde el nivel del suelo en sus primeras etapas, además de ser una especie muy apreciada por los pobladores por su resina. Por lo tanto también se recomienda para esta práctica.

Espaciamiento y densidad de plantación

Para el establecimiento del nopal las pencas deben ser recolectadas y puestas a cicatrizar una semana antes de su establecimiento, las pencas deben contar con al menos una altura de 20 cm. La separación entre plantas debe ser de 20 cm entre ellas sobre dos hileras de manera intercalada, a lo largo de las curvas de nivel (Figura 28). Como referencia, en el estado de Tamaulipas, el distanciamiento entre curvas a nivel ha sido de 16.6 m, en pendientes de 5 a 15%, en suelos poco profundos con degradación ligera, dando buenos

resultados (Bolaños *et al.*, 2012). La densidad de plantación sería de 3012 plantas/ha.

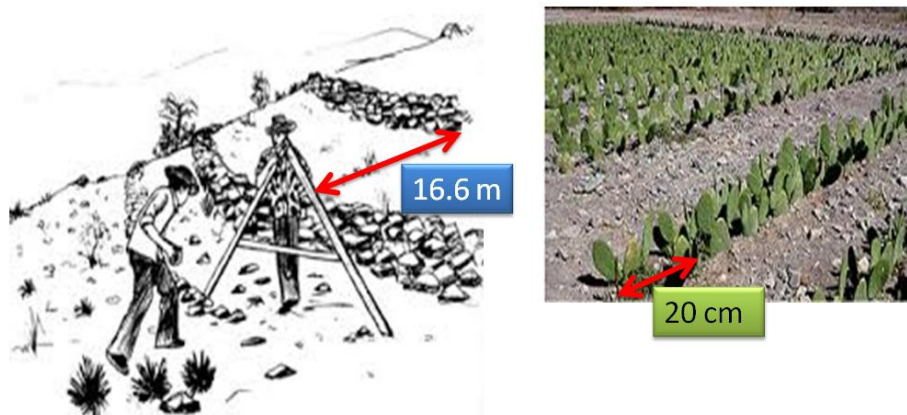


Figura 28. Espaciamiento de las curvas de nivel y entre planta y planta en las barreras vivas propuestas.

5.5.5. Enriquecimiento de acahuals

Una vez que las condiciones de suelo tengan mejores condiciones en la unidad de paisaje P_SBC_PD_CL es recomendable realizar un enriquecimiento de acahual con especies que tengan mayor capacidad de fijación de carbono e ir desplazando poco a poco a la especie *Euphorbia schlechtendalii* que es considerada por los pobladores como una plaga sin ningún uso aparente. Esta tecnología agroforestal también se recomienda en la unidad de SBC_PD_V. Esto se hará con la finalidad de aumentar el contenido de carbono y la riqueza de especies en el área. Ya que actualmente solo existen 7 especies, capturando 17 Mg C ha^{-1} en el estrato arbóreo y arbustivo.

Especies seleccionadas

Las especies seleccionadas para el enriquecimiento de acahual de la unidad de paisaje P_SBC_PD_CL son: *Bursera bipinata* y *Quercus magnoliaefolia* que son las especies que mejor se adaptan a las condiciones de esta zona. Para la segunda Unidad de Paisaje (SBC_PD_V) se recomiendan las especies

Lysiloma divaricata, *Lysiloma acapulcensis*, *Mimosa benthami* y *Guazuma ulmifolia*.

Espaciamiento y densidad de plantación

Para el establecimiento de la plantación en los acahuales, se recomienda realizar brechas de 2 m de ancho en dirección este-oeste, en donde se plantan los árboles a cada 3 m. Entre línea y línea de árboles se dejan 7 m de acahual natural. Dando una densidad de árboles de 476 árboles/ha. Si se encuentran árboles grandes, de más de 20 cm de diámetro deben dejarse (Soto *et al.*, 2011). El arreglo espacial de esta tecnología se ilustra en la Figura 29.

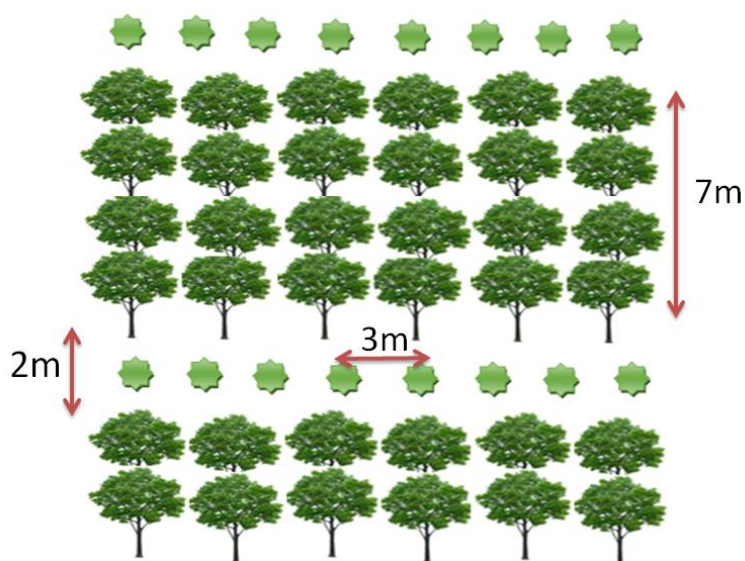


Figura 29. Arreglo espacial del enriquecimiento de acahuales.

5.5.6. Obtención y calidad de planta

Ayala (2014) realizó un estudio sobre la propagación de especies arbóreas de uso múltiple en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos, llegando a la conclusión de que la planta obtenida en vivero fue la que tuvo mayores valores de sobrevivencia en campo en el primer año de establecida la plantación. Se recomienda que la planta sea producida en contenedor, pues es sin duda la

técnica más adecuada para producir plántula en vivero ya que otras técnicas como el caso de raíz desnuda, plantación por estacas o varetas generan poca supervivencia en campo debido a que el terreno debe ser plano, profundo y con poca pedregosidad (Pimentel, 2009); estas condiciones son difíciles de encontrar en la zona de estudio.

La planta se puede obtener del vivero ubicado dentro del poblado de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos. En este vivero se produce planta del área de estudio para cuestiones de reforestación. Sin embargo es importante que la planta tenga la calidad y las características adecuadas para este fin. Para tener una planta de calidad, es necesario tomar en consideración las técnicas de producción en vivero, la densidad de siembra, el tipo de sustrato, los riegos, la fertilización, micorrización, tamaño del envase o bolsa, así como otros factores como luz, temperatura, y fase de endurecimiento.

Al termino del ciclo productivo de la planta en vivero, es fundamental tomar en cuenta atributos morfológicos y fisiológicos para determinar si efectivamente la planta es de calidad o no. Los atributos morfológicos que se deben tomar en consideración son: forma de la parte aérea, altura, diámetro del cuello de la raíz, forma de la raíz, nivel de micorrización, biomasa anhidra y yema apical. Los principales atributos fisiológicos que se deben tomar en cuenta son: concentración de carbohidratos, la concentración de nutrientes en el follaje, la tensión hídrica, el estado de desarrollo de las yemas y el nivel de fitohormonas. Para medir los atributos fisiológicos es necesario acudir a un laboratorio, sin embargo es fundamental medir por lo menos los atributos morfológicos ya que se correlacionan con la supervivencia y crecimiento en campo (Rodríguez, 2008).

5.5.7. Plantación en campo

A pesar de tener todos los cuidados mencionados anteriormente en vivero, se debe capacitar adecuadamente a los encargados de transportar la planta a la zona de plantación, debido a que si no se hace correctamente la planta

disminuirá su calidad o puede morir en campo. Se deben utilizar vehículos cerrados y trasladar las plantas debidamente cubiertas, para protegerlas del viento e insolación, y con ello evitar la deshidratación (SIRE, 2003). Otro aspecto que hay que tomar en consideración es la plantación y preparación del terreno, pues si el terreno no está bien preparado o la plantación no se hace correctamente, a pesar de que la planta sea de calidad, abra poco porcentaje de supervivencia (Pimentel, 2009).

La preparación del terreno debe realizarse después de la primera lluvia. Para el caso de las cercas vivas y el enriquecimiento de acahual se recomienda que los hoyos de plantación sean dos veces más anchos y dos veces más hondos que la bolsa donde creció la planta en el vivero. Es indispensable que se separen los primeros 10-20 cm de tierra excavada, ya que esta porción es la más fértil de todo el suelo extraído (SICTA, 2012).

Es recomendable plantar en las tardes o cuando la radiación haya disminuido, para evitar que las plantas se deshidraten. Al momento de la plantación se debe checar que las raíces no estén enroscadas, si así fuera se deben cortar con una navaja muy filosa por lo menos un centímetro de la raíz. Posteriormente se quita la bolsa evitando no dañar las raíces laterales y se coloca de lado para que el sustrato no se desprenda. La planta se coloca en el hoyo procurando que no quede el cuello hundido. La tierra que se extrajo de los primeros 10-20 cm se coloca en el fondo y la que se extrajo del fondo se coloca en la superficie; luego se aprieta suavemente para que no queden grandes espacios con aire (Soto et al., 2008).

En el caso de las barreras vivas se recomienda trazar las curvas a nivel con un aparato "A", iniciándose de la parte alta hacia la parte baja del terreno. El material a utilizar son estacas, piedras o cal para identificar las marcas realizadas al mismo nivel. El primer paso a seguir es colocar el aparato "A" en la parte alta del terreno y señalar una marca inicial, a partir de ésta se medirá la distancia de separación de las diferentes curvas a nivel aguas abajo (SICTA, 2012). El aparato "A" se mueve en dirección del trazo, colocando el primer

extremo del instrumento en la última marca realizada y así sucesivamente, hasta llegar al otro lado del terreno. Posteriormente se debe realizar un surco para plantar las especies seleccionadas. Se recomienda que la excavación para el establecimiento de las barreras sea de 10 cm de profundidad por al menos 15 cm de ancho o hasta donde las condiciones del suelo lo permitan (Figura 30). Posteriormente las especies se plantan sobre el surco. Se aporca o arrima la tierra, con una herramienta manual, de modo que la especie quede bien plantada sobre el surco (Bolaños *et al.*, 2012).

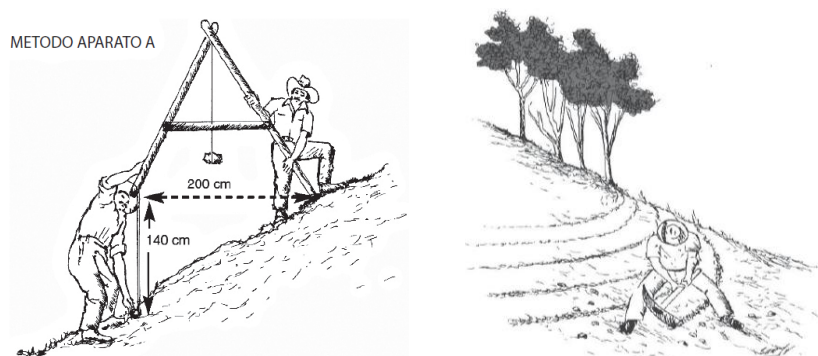


Figura 30. Trazo de las curvas de nivel con el aparato "A".

5.5.8. Cuidados de la plantación

Para evitar pérdidas por consumo o pisoteo del ganado, Soto *et al.* (2008) recomienda colocar llantas de reciclado, varas o tubos de PVC. En el primer año de plantación es fundamental realizar deshierbes alrededor de las plantas, en un radio de 20 cm alrededor de la cepa, por lo menos 2 veces al año o hasta que el árbol tenga una altura considerable para superar la competencia. El deshierbe debe realizarse preferentemente una o dos semanas posteriores a la temporada de lluvias (SIRE, 2003). Es fundamental realizar un retrasplante para reponer a aquellas plantas que no lograron sobrevivir. En caso de que la plantación este muy densa se debe aplicar raleos eliminando aquellos arboles débiles y enfermos. Para evitar plagas y enfermedades es necesario que la planta esté bien nutrida, por lo que se propone realizar fertilización utilizando composta de residuos de cosecha y excremento de ganado (Rodríguez, 2008).

5.6. Adicionalidad de cada tecnología agroforestal

5.6.1. Biomasa viva

Cercas vivas

El contenido de carbono que se adicionará en las zonas agrícolas y de pastizal mediante la implementación de cercas vivas, depende de la especie que se utilizará. En la Figura 30 se muestra la cantidad de carbono que se tendrá en la biomasa aérea con las diferentes especies propuestas. En donde se puede observar que la especie que fijará mayores contenidos de carbono será *Mimosa benthami* a los 20 años de haberse establecido, con aproximadamente 17 Mg ha⁻¹, seguido de *Gliricidia sepium* con 15 Mg ha⁻¹ superando a más del doble a *Guazuma ulmifolia* y *Acacia cochiacantha* quienes fijarán 4.5 y 1.5 Mg ha⁻¹ respectivamente.

A pesar de que *Guazuma ulmifolia* fue la especie que resultó acumular mayor cantidad de carbono en la biomasa aérea, en la Figura 31 se puede observar lo contrario pues solo fijará 4.5 Mg ha⁻¹. Esto se debe fundamentalmente a que esta especie tiene un crecimiento en diámetro más lento que las otras especies teniendo su máxima acumulación hasta los 50 cm de diámetro que sería aproximadamente hasta los 50 años de establecida la plantación.

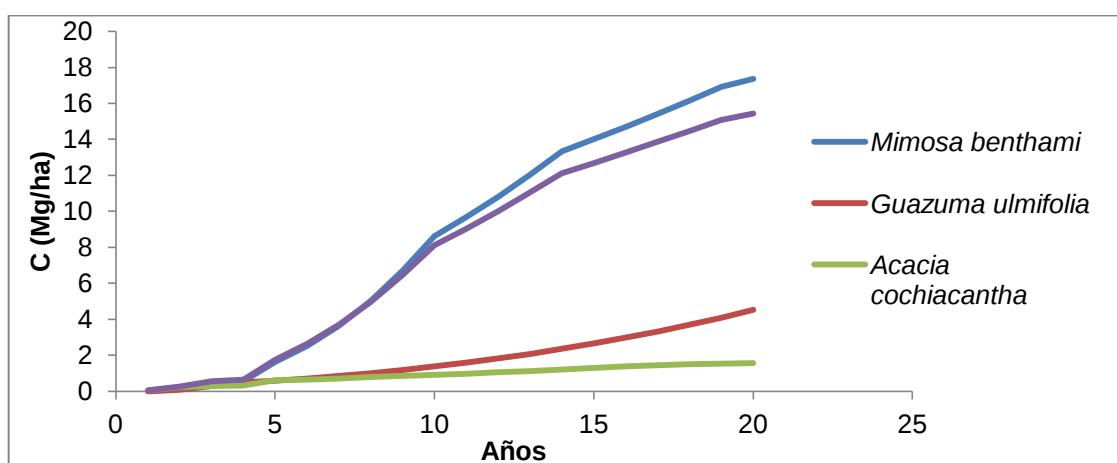


Figura 31. Fijación de carbono en la biomasa aérea según el tipo de especie propuesta en una proyección de 20 años.

En el Cuadro 23 se muestra la adicionalidad que se tendrá en las zonas agrícolas y de pastizal según la especie que se utilice para el cerco vivo. La zona de roza-tumba-quema será la que tendrá mayor incremento en comparación con las demás, pues actualmente cuenta con algunos árboles dispersos en los cultivos. Suponiendo que esos árboles seguirán en pie durante los últimos 20 años, más los árboles que se adicionarán en los cercos vivos, se tiene un valor mayor en el contenido de carbono en comparación con la zona agrícola de temporal mecanizado y del pastizal, que no cuentan actualmente con árboles en el sistema, las cuales tendrán un incremento similar en el contenido de carbono a los 20 años de establecida la plantación.

Cuadro 23. Adicionalidad de carbono aéreo (Mg ha^{-1}) según la especie a utilizar en los cercos vivos en la zona agrícola y de pastizal en una proyección de 20 años.

Unidad de paisaje	<i>Mimosa benthami</i> C (Mg ha^{-1})	<i>Guazuma ulmifolia</i> C (Mg ha^{-1})	<i>Acacia cochiacantha</i> C (Mg ha^{-1})	<i>Gliricidia sepium</i> C (Mg ha^{-1})
Ag_RTQ_LM	28	15.6	12.6	26.5
Ag_TM_V	19.5	6.7	3.7	17.6
P_I_LM	19.3	6.5	3.5	17.4

Fuente: Elaboración propia.

Los rangos del contenido de carbono adicionado en las cercas vivas utilizando *Guazuma ulmifolia* y *Acacia cochiacantha* ($3.5\text{-}15.6 \text{ Mg ha}^{-1}$), están muy por debajo de los rangos establecidos por Schroeder (1994) que van de $21\text{-}50 \text{ Mg ha}^{-1}$ en diferentes tecnologías agroforestales en áreas tropicales subhúmedas, sin embargo el contenido de C para el caso de *Mimosa benthami* y *Gliricidia sepium* establecidas en Ag_RTQ_LM se encuentra dentro del rango establecido en dicho estudio. El contenido de carbono estimado para todas las especies está por debajo de lo que reporta ECOSUR (2002) en cercos vivos propuestos en la zona tzeltal, Chiapas con 72 Mg ha^{-1} en una proyección de 25 años. Esto se puede deber fundamentalmente al tipo de especie utilizada en la zona, así como a las condiciones climáticas del lugar, las cuales son muy diferentes al área de estudio.

Barreras vivas

Con el establecimiento de *Bursera bipinnata* en las barreras vivas que se propone establecer en la unidad de paisaje de P_SBC_PD_CL, se adicionará al sistema aproximadamente 87 Mg ha⁻¹ suponiendo una sobrevivencia de 753 árboles/ha. Estando dentro del rango global reportado de 23 a 273 Mg ha⁻¹ para este tipo de vegetación (Martínez-Yrizar, 1995). Esto se debe a la alta densidad de árboles que se propone introducir en la zona para reducir el grado de erosión observado en la misma. No fue posible calcular cuánto adicionará *Opuntia lubrica* pues es complicado conocer el incremento medio anual en diámetro de dicha especie. En la Figura 32 se hace una comparación del contenido de carbono que se tendrá a los 20 años utilizando *Bursera bipinnata* y lo que se tendrá si no se hace un cambio de uso del suelo con prácticas de mejoramiento.

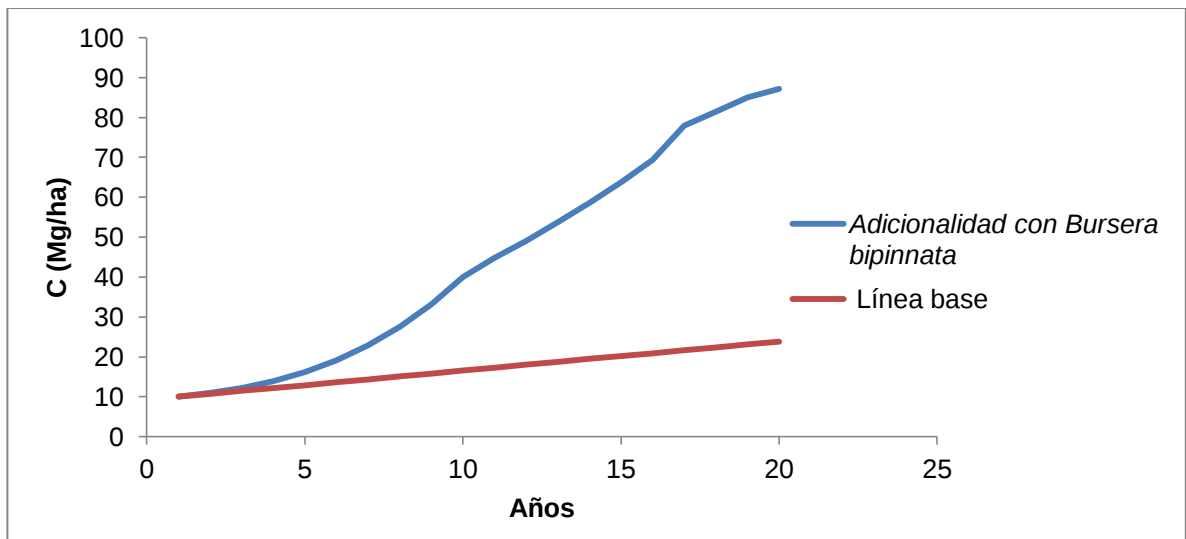


Figura 32. Contenido de carbono (Mg ha⁻¹) con la adicionalidad de *Bursera bipinnata* y de la línea base en la unidad de paisaje P_SBC_PD_CL.

Enriquecimiento de acahuales

El enriquecimiento de acahuales en la unidad de paisaje SBC_PD_V tendrá una adicionalidad en el contenido de carbono aéreo de 61 Mg ha⁻¹ utilizando todas las especies propuestas, con una sobrevivencia de 250 árboles ha⁻¹. Lo que equivale a 2 veces más de lo que tendrá en 20 años si no se le aplica ningún manejo pues solo alcanzará 28 Mg C ha⁻¹ (Figura 33). Este incremento es

similar a lo reportado por la FAO (2002) que menciona que el enriquecimiento de acahuales podría triplicar las existencias de carbono de 23 Mg ha^{-1} a 70 Mg ha^{-1} en un periodo de 25 años. Así como por lo reportado por ECOSUR (2002) con $135.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en una estimación a 25 años en la zona tojolabal, Chiapas. Sin embargo estará por debajo de lo que se tienen en una selva madura que van de $134\text{-}144 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Vargas *et al.*, 2008).

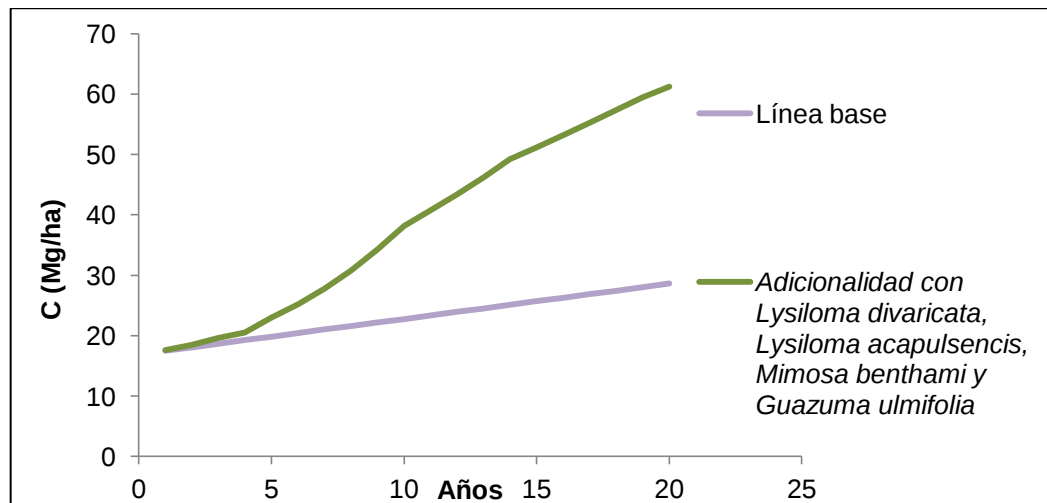


Figura 33. Contenido de carbono Mg ha^{-1}) en el estrato arbóreo en la adicionalidad y línea base en la unidad de paisaje SBC_PD_V.

Materia orgánica del suelo

Como se puede observar en el Cuadro 24, en todas las unidades de paisaje habrá una adicionalidad considerable en el contenido de carbono orgánico del suelo. Para el caso de las zonas con vegetación de SBC de densidad baja, la adicionalidad de carbono está en un rango entre $40\text{-}44 \text{ Mg ha}^{-1}$ a los 20 años de establecida la tecnología agroforestal propuesta. Con tasas de cambio anual de 1.97 y 2.24. Que es similar a la tasa de cambio anual de 2.5 Mg ha^{-1} estimada por Vargas *et al.* (2008) en los primeros 30 cm del suelo en una proyección de 20 años en una Selva Baja Caducifolia de Yucatán. Gueye (2010) también reporta una tasa de cambio anual de 2.5 Mg ha^{-1} en una Selva Baja Caducifolia de Michoacán en una proyección de 20 años. Así mismo menciona que a partir de esa edad la tasa disminuyó a $0.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La adicionalidad de carbono en las zonas agrícolas y de pastizal son de 11 Mg ha⁻¹ para Ag_TM_V; 13 Mg ha⁻¹ para Ag_RTQ_LM; y 24 Mg ha⁻¹ para P_I_LM. Con tasas de cambio anual de 0.58-1.2 Mg ha⁻¹ que se encuentran dentro del rango establecido por el IPCC (2006) en sistemas agroforestales, que van de 0.2-3.1 Mg ha⁻¹, dependiendo del tiempo de residencia de los árboles en el sistema.

Cuadro 24. Contenido de carbono (Mg ha⁻¹) adicional en la materia orgánica del suelo en una proyección de 20 años.

Unidad de paisaje	C (Mg ha ⁻¹) año 0	C (Mg ha ⁻¹) año 20	Tasa anual de cambio
Ag_TM_V	56	67.64	0.58
Ag_RTQ_LM	64.8	78.27	0.67
P_I_LM	65	89	1.2
SBC_PD_V	91	135.89	2.24
P_SBC_PD_CL	80	119.46	1.97

Fuente: Elaboración propia.

Las tecnologías agroforestales aquí propuestas son una buena alternativa para aumentar el contenido de carbono a largo plazo, sin embargo el manejo que se dé puede disminuir o aumentar la capacidad de las tecnologías en el almacenamiento de carbono en el suelo. Uno de los principales factores limitantes para el crecimiento de las plantas es la deficiencia de nutrientes. Por lo que la introducción de especies leguminosas fijadoras de nitrógeno puede ser una solución (FAO, 2002). En este caso la mayoría de las especies seleccionadas son leguminosas que pueden ser fijadoras de nitrógeno. Otra alternativa de manejo que aumentaría la capacidad de fijación de carbono para el caso de la zona de pastizal, sería introducir especies de pasto más productivas con sistemas radicales más profundos. Esto incrementará en buena medida la captura de carbono, ya que las pasturas en forma estable pueden almacenar muy altas cantidades de carbono (Fisher *et al.*, 1994).

La adicionalidad de carbono a largo plazo en los suelos agrícolas se contrapone al proceso de desertificación por medio del papel que juega el incremento de la materia orgánica sobre la estabilidad de la estructura y la retención del agua;

disminuyendo la erosión debido a la cobertura del suelo que proporcionan las plantas y los residuos que generan. Aumentando a largo plazo la productividad del sistema (FAO, 2002). Así mismo un aumento en la fijación de carbono causará un incremento en la biodiversidad activa y un funcionamiento más efectivo de los elementos biológicos del suelo, lo cual es un proceso relativamente lento en la mayoría de los suelos agrícolas que depende del tipo de manejo que se dé (Fisher *et al.*, 1994).

5.7. Evaluación de la viabilidad económica de las tecnologías agroforestales

5.7.1. Costos de establecimiento

Los resultados del costo de establecimiento de las tecnologías propuestas se muestran en el Cuadro 25, en donde se observa que el enriquecimiento de acahuales resulta ser el más barato de implementar, debido fundamentalmente a que no se necesitan tantos insumos como en las cercas y barreras vivas.

Cuadro 25. Costo de establecimiento de las tecnologías propuestas.

Cargo	Cercas vivas Costo/ha (\$)	Enriquecimiento de acahuales Costo/ha (\$)	Barreras vivas Costo/ha (\$)
Mano de obra	1,201.01	2,115.67	2,171.79
Maquinaria, equipo y herramienta	16.30	30.58	13.02
Insumos	9,859.54	1,001.80	5,318.60
Actividades de mantenimiento	1,838.00	2,276.44	4,259.12
Otros cargos	128.66	495.52	0.00
Total	\$13,043.51	\$5,920.01	\$11,762.53

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las cercas vivas el costo se eleva por la utilización de alambre de púas, en donde se gasta aproximadamente \$9,200 por ha. Para las barreras vivas, el costo de insumos se eleva por el valor unitario de *Opuntia lubrica* que es de \$3.50, el cual supera al doble el valor unitario de las otras especies (\$1.50); así mismo las actividades de mantenimiento elevaron su precio debido a la densidad de plantas que se propone implementar.

Los costos obtenidos en esta investigación se encuentran dentro del rango calculado por Sáenz *et al.* (2010) que van de \$19,923 a \$10,207 por hectárea dependiendo de la tecnología agroforestal a implementar. El costo de la cerca viva es similar a lo obtenido por Reyes y Martínez (2011), así como por Villanueva *et al.* (2008) quienes reportaron un costo aproximado de establecimiento de \$14,500 y \$14,600 respectivamente. Lo que confirma que el costo de establecimiento de una cerca viva es mucho más económico que el establecimiento de una cerca muerta. Según SEMARNAT (2010) para establecer una cerca muerta se requiere de \$17,100; este dato es inferior a lo reportado por García y Rodríguez (2010) quienes calcularon un costo total de \$31,000; esto equivale a dos veces más de lo que vale establecer una cerca viva.

Reyes y Martínez (2011) estimaron que la demanda potencial de postes para cercos muertos en Sinaloa es del orden de 90 millones de piezas, las cuales son extraídas en su totalidad de la Selva Baja Caducifolia, con un valor económico a nivel estado de 900 millones de pesos; solamente para el mantenimiento o reposición de los postes perimetrales de las unidades agropecuarias se realiza una extracción de 30.5 millones de piezas anuales.

Esta situación es muy similar a la de Morelos, en donde existe una demanda creciente de madera para postes que se utilizan para delimitar las unidades de producción agropecuaria. Sin embargo, cada vez es más costoso obtenerlos debido a los precios de transporte y la escasez de especies de buena madera para tal fin (Vázquez, 2014). De ahí surge la importancia y la necesidad de establecer cercas vivas en Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos, que además de ser más viables económicamente en comparación con las cercas muertas, disminuirán la presión que existe sobre las especies preferidas por los pobladores para obtener postes como es el caso de *Mimosa benthami* entre otras.

En general la implementación de las tecnologías agroforestales genera un costo de inversión considerable para la economía de los productores, que varía dependiendo de los costos fijos, así como de los precios actuales de insumos y mano de obra. Sin embargo, el beneficio a largo plazo tanto económico como ambiental hará que los campesinos recuperen su inversión; que si bien puede ser costeadada con sus propios recursos, también puede ser financiada por instituciones de gobierno como CONAFOR que en la actualidad da un apoyo de \$2,575/km para el establecimiento de barreras vivas; \$1,120/ha para el enriquecimiento de acahuales; y \$3,275/ha para la implementación de cercas vivas (CONAFOR, 2014).

5.7.2. Beneficios económicos

Pago por servicios ambientales

A nivel internacional el beneficio que obtendrán los productores a 20 años de establecida la tecnología de cercas vivas por la venta de carbono (Mg ha^{-1}), dependerá de la especie que se elija; en el Cuadro 26 se muestra el beneficio económico/ha según la especie a utilizar.

Cuadro 26. Beneficio económico a los 20 años por la venta de carbono a nivel internacional en Cercas vivas, según el tipo de especie.

Unidad de paisaje	<i>Mimosa benthami</i> (\$/ha)	<i>Guazuma ulmifolia</i> (\$/ha)	<i>Acacia cochiacantha</i> o <i>Gliricidia sepium</i> (\$/ha)
Ag_RTQ_LM	\$ 17,309.16	\$ 10,872.36	\$ 12,989.16
Ag_TM_V	\$ 15,815.52	\$ 9,335.52	\$ 11,452.32
P_I_LM	\$ 18,079.20	\$ 11,642.40	\$ 13,770.00

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el Cuadro 26, se obtendrá mayor beneficio económico utilizando *Mimosa benthami*, esto se debe a que es la especie que fijará más carbono en la biomasa aérea a los 20 años de establecida. Sin embargo, el beneficio económico obtenido por la venta de carbono solo tendrá una ganancia de alrededor de \$3,000-\$5,000.

En cuanto al pago recibido por la implementación de las otras especies propuestas, éste no alcanzará a cubrir los gastos iniciales de establecimiento de las cercas vivas. Debido principalmente a los contenidos de carbono que se fijarán y la densidad de árboles por hectárea.

Para el caso del enriquecimiento de acahuales y las barreras vivas, los productores tendrán un beneficio económico de \$47,400.12 y \$51,133.68 respectivamente. En estos casos el beneficio económico alcanzará a cubrir los gastos de establecimiento pues se tendrá una ganancia de \$41,480 para el enriquecimiento de acahuales y \$39,371 para las barreras vivas; esto se debe fundamentalmente a que en estas tecnologías el carbono acumulado es la suma de lo que aportarán todas las especies propuestas, pues se propone plantarlas al mismo tiempo y en la misma unidad de paisaje, así como a la alta densidad de especies que se propone establecer en las unidades de paisaje.

A nivel nacional no se puede reconocer un mercado de captura de carbono plenamente formado, dado que se paga de manera general los servicios ambientales que puede generar un sistema (Torres y Guevara, 2002). En la actualidad el pago por servicios ambientales que otorga la CONAFOR se encuentra dentro de un rango de \$1,000-\$3,000 por hectárea. Por lo que el beneficio económico será el mismo para todas las tecnologías propuestas. Este beneficio es muy bajo en comparación con los pagos que se otorgan a nivel internacional.

Actualmente es más factible realizar la venta de carbono a instituciones internacionales como REDD+, pues en Octubre de 2013, el Climate Action Registry (CAR, por sus siglas en inglés) aprobó el Protocolo Forestal Mexicano, que da lineamientos para la contabilización de proyectos de forestación, reforestación, revegetación y manejo mejorado de bosques dentro de sistemas jurisdiccionales de contabilidad de carbono. CAR está observando 3 proyectos pilotos para afinar y poner a prueba el protocolo, que de lograrse, facilitaría la entrada de compensaciones REDD a nuestro país (EM y VN, 2014).

Venta de leña

El beneficio económico que se obtendrá por la venta de leña a los 20 años de establecida la plantación depende mucho de la especie, esto se debe fundamentalmente a que el volumen depende del crecimiento en diámetro y altura de la especie. En el Cuadro 27 se muestra el volumen, el número de cargas y el costo total de leña por árbol de las especies propuestas en las tecnologías agroforestales.

Cuadro 27. Cálculo del volumen, número de carga y costo total de leña por árbol.

Especie	Volumen (m ³)	No. de Cargas	costo unitario/carga	Costo total/árbol (\$)
<i>Lysiloma divaricata</i>	3.29	19.35	100	1,934.62
<i>Guazuma ulmifolia</i>	0.54	3.16	100	316.14
<i>Quercus magnoliifolia</i>	0.54	3.16	100	316.14
<i>Mimosa benthami</i>	3.29	19.35	100	1,934.62
<i>Bursera bipinata</i>	0.99	5.83	0	0
<i>Acacia cochiacantha</i>	1.99	11.68	90	1,051.14
<i>Gliricidia sepium</i>	1.99	11.68	85	992.74
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	3.29	19.35	100	1,934.62

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el supuesto de que habrá un 10% de mortalidad de los árboles plantados en las tecnologías propuestas, en el Cuadro 28 se muestra el beneficio económico que se tendrá en cada tecnología según la especie. El beneficio se ve afectado por la densidad de árboles ha⁻¹ que se propone.

Cuadro 28. Beneficio económico por venta de leña según la especie a utilizar en cada tecnología agroforestal propuesta.

Especie	Cercas vivas (\$/ha)	Enriquecimiento de acahuals (\$/ha)	Barreras vivas (\$/ha)
<i>Lysiloma divaricata</i>		207,004.39	
<i>Guazuma ulmifolia</i>	71,131.57	33,827.01	
<i>Quercus magnoliifolia</i>		33,827.01	

<i>Mimosa benthami</i>	193,462.05	207,004.39	
<i>Bursera bipinata</i>			0
<i>Acacia cochiacantha</i>	105,113.99		
<i>Gliricidia sepium</i>	99,274.33		
<i>Lysiloma acapulcensis</i>		207,004.39	

Fuente: Elaboración propia.

El mayor beneficio a nivel individual se obtiene de *Lysiloma divaricata*, *Lysiloma acapulcensis* y *Mimosa benthami* con una ganancia de \$207,004 por la venta de leña en el enriquecimiento de acahuales. Esto se debe a que son especies preferidas para los pobladores por su alta calidad dendroenergética, lo que aumenta su valor en el mercado local (Vázquez, 2014). En cuanto a *Bursera bipinata* no se obtendrá beneficio económico en este rubro debido a que la leña no es de buena calidad dendroenergética y no tiene ningún valor económico en el mercado local. El beneficio económico que se obtendría sería por la venta de resina, sin embargo en este trabajo no fue posible contemplar dicho beneficio.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la venta de leña resulta ser el beneficio con mayor valor económico después de 20 años de establecidas las tecnologías agroforestales propuestas. Esto se debe fundamentalmente a que la leña es considerada por las familias campesinas como un recurso natural indispensable para vivir. Según FAO-SAGARPA (2007) una familia promedio necesita unos 500 kilos de leña anualmente para cubrir las necesidades de energía en la cocción de alimentos, lo que implica un consumo anual de 8 m³, equivalentes a la extracción de 32 árboles. Por lo que la implementación de tecnologías agroforestales con especies que tengan calidad dendroenergética resulta ser una alternativa viable que tiene beneficios tanto económicos como ambientales, reduciendo la presión sobre aquellas especies preferidas para leña. En el Cuadro 29 se muestra un resumen del costo de establecimiento de cada tecnología propuesta así como el beneficio que se obtendrá por la venta de leña y carbono a nivel internacional y nacional.

Cuadro 29. Costo de establecimiento y beneficio económico de las tecnologías propuestas.

Tecnología agroforestal	Costo de establecimiento	Venta de carbono (REDD+ y MDL)	Venta de carbono (CONAFOR)	Venta de leña
Cerca viva	\$13,043.51	\$18,079 - \$9,335	\$1,000- \$3,000	\$193,462- \$71,131
Enriquecimiento de acahuals	\$5,920.01	\$47,400.12	\$1,000- \$3,000	\$207,004- \$33,827
Barreras vivas	\$11,762.53	\$51,133.68	\$1,000- \$3,000	0

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro anterior, el mayor beneficio económico será obtenido por el enriquecimiento de acahuals con un costo de establecimiento relativamente bajo en comparación con los demás. Las barreras vivas serán las que tendrán un beneficio económico superior a las otras en el aspecto de venta de carbono a nivel internacional, esto se debe fundamentalmente a la densidad de árboles que se tendrá por hectárea. En cuanto a las cercas vivas a pesar de que el beneficio económico que se obtendrá es bajo comparado con las otras dos tecnologías, sigue siendo una buena alternativa para reducir el costo de mantenimiento que se gasta año con año en las cercas muertas, beneficiando en cierto punto la economía de los agricultores de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos.

6. CONCLUSIÓN

Para que los proyectos y las actividades dedicadas a la fijación de carbono, como es el caso de este estudio, tengan éxito, se debe conocer la línea base de carbono en las diferentes unidades de paisaje de interés. Por lo que la caracterización detallada del medio biofísico, es fundamental para facilitar el inventario de carbono en cada unidad de paisaje y para cada uno de sus componentes.

En este estudio se delimitaron unidades de paisaje definidas a partir de atributos geomórficos, climáticos y de uso del suelo y vegetación a nivel detallado, lo que facilitó el muestreo de cada una de estas, al tener homogeneidad en sustrato geológico y forma del paisaje, características climáticas y de uso del suelo y la vegetación considerando los diferentes sistemas productivos, y con el procedimiento de muestreo de campo se obtuvieron los contenidos de carbono en los componentes aéreos y subterráneos de cada una de las unidades de paisaje. Asimismo se conoció la diversidad vegetal, en específico de las especies arbóreas y arbustivas, las condiciones de la vegetación, se identificaron especies con alto potencial para los propósitos establecidos de incrementar los almacenes de carbono, también se determinaron las condiciones generales del suelo, lo que permitió identificar limitantes y potencialidades de cada una de las unidades del paisaje que se definieron como sistemas bio-productivos con las particularidades de sus componentes edáficos, climáticos, cubierta vegetal, relieve, lo que fue la base para el diseño de estrategias de intervención con tecnologías agroforestales que incluyan componentes locales con potencial de mejorar la calidad de dichos sistemas, en particular de incrementar los almacenes de carbono, restaurar los sistemas degradados y generar beneficios económicos para los productores.

No en todas las unidades fue posible proponer tecnologías agroforestales, en particular las que presentan un nivel alto de degradación y bajo las condiciones actuales del sistema bio-productivo, la prioridad es frenar el proceso degradativo y restaurar la capacidad productiva del sistema para que en un futuro se puedan establecer prácticas agroforestales con potencial para mantener y mejorar la calidad del suelo y que el productor obtenga mayores beneficios económicos.

En la estimación de la adicionalidad de carbono que se obtendrá con la implementación de las prácticas agroforestales en las diferentes unidades de paisaje, se observa que se incrementará lentamente, dependiendo de la tasa de incremento de los árboles; pero en los suelos se generará un aumento en la materia orgánica, lo que tendrán un impacto directo sobre la calidad y la fertilidad de los suelos. Generando efectos positivos importantes a largo plazo sobre el ambiente y la agricultura y otros bienes ambientales que pueden obtener los productores.

Los agricultores no siempre son sensibles a los problemas de la calidad del suelo, salvo que haya otras ventajas más tangibles, por lo que si se hace un buen manejo silvícola a las tecnologías agroforestales propuestas, pueden incrementar los ingresos económicos de los agricultores, principalmente por la venta de leña y la venta de bonos de carbono a instituciones internacionales como REDD+. Sin embargo para que estas instituciones otorguen el pago por la venta de carbono, los proyectos deben seguir los lineamientos establecidos en el IPCC, donde se obtenga la línea base de los reservorios de carbono y se demuestre la adicionalidad que se tendrá con la actividad a implementar; de ahí surge la importancia esencial de este trabajo.

7. RECOMENDACIONES

Para poder diseñar tecnologías agroforestales, es fundamental conocer a detalle las características ambientales y las especies nativas que se establecen mejor en el área de estudio que tengan una variedad de usos múltiples. Por lo que es recomendable realizar una zonificación detallada las diferentes unidades de paisaje a partir de una delimitación cartográfica detallada de las unidades geomorfológicas, el clima y el uso de la tierra y la vegetación, utilizando herramientas que nos ayuden a facilitar los trabajos de campo como es el caso de Sistemas de Información Geográfica.

Para saber que especies nativas se adaptan mejor al sitio y garantizar una alta sobrevivencia en campo de la plantación, es recomendable realizar un inventario forestal, identificando aquellas especies que tengan una amplia variedad de usos múltiples y que sean de utilidad para los pobladores de la comunidad, ya sea por venta de productos o bienes (leña, forraje, resinas, frutos, etc.) o por la venta de servicios ambientales. De esta manera se obtendría un mayor éxito en las tecnologías agroforestales propuestas tanto ambientalmente como económicamente. Si se quieren realizar proyectos que tengan como objetivo la venta de bonos de carbono a nivel internacional se recomienda seguir la metodología planteada en esta investigación o en su caso mejorarla, debido a que las instituciones internacionales exigen que cualquier proyecto que quiera ser beneficiado por la venta de bonos de carbono siga los lineamientos del IPCC que en este estudio se exponen de manera general.

Para futuras investigaciones que quieran continuar con lo planteado en este trabajo, estableciendo en campo las tecnologías agroforestales aquí propuestas, se recomienda realizar un monitoreo continuo de los diferentes almacenes de carbono para evaluar la efectividad del incremento de carbono tanto en la biomasa aérea como en la materia orgánica del suelo y conocer si efectivamente la tasa de cambio anual de carbono aumenta de acuerdo con los resultados presentados en este estudio.

8. LITERATURA CITADA

- Acosta M., J.D. Etchevers, C. Monreal, K. Quednow y C.Hidalgo. 2001. Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Albrecht, A., S.T. Kandji. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. Agric. Descomposición y ciclo de nutrientes, en ecosistemas terrestres de México. Laboratorio de Ecología, Facultad de Ciencias, UNAM. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria 04510, México, D.F.
- Arizaga, S., C. Martínez, C. Salcedo, y G. Bello. 2009. Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos. Primera edición. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D.F.
- Ayala, A. 2014. Propagación en campo de especies arbóreas de uso múltiple en la Sierra de Huautla, Morelos. Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.
- Bender, M., T. Sowers, and L. Labeyrie, 1994: The Dole effect and its variations during the last 130,000 years as measured in the VOSTOK ice core. *Global Biogeochemical Cycles*, 8, 363-376.
- Bolaños, J., Cardoza,V., García, C., Guerrero, H., Lira, Q., Nieves, F., Rodríguez, E., y Tejeda, S. 2013. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Cuarta Edición. SEMARNAT-CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México.
- Boyás D., J.C.; M. A. Cervantes, S.; J. M. Javelly, G.; M. M. Linares, A.; F. Solares, A.; R. M. Soto, E.; I. Naufal, T. y L. Sandoval, C. 1993. Diagnóstico Forestal del Estado de Morelos. SAGAR, INIFAP, CIRCE. 245 p.

- Burgos, H. B. 2014. Caracterización del sistema agroforestal tradicional en la Sierra de Huautla, Morelos. Tesis de maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.
- Busch, A. Sanchez-Azofeita & J. Sathaye. 2000. Estimating the greenhouse gas benefits of forestry projects: a Costa Rican case study. Report LBNL 42289. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Campo J., y Vázquez-Yanes C. 2004. Effects of nutrient limitation on aboveground carbon dynamics during tropical dry forest regeneration in Yucatán. México. *Ecosystems* 7:311-319.
- Canadell J. G., M. R. Raupach. 2008. Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320: 1456-1457.
- Carrazón, A. J. 2008. Manejo sostenible de tierras y mejoras en la producción de maíz y frijol en las poblaciones vulnerables de los programas PESA de Guatemala, Honduras, Nicaragua Y El Salvador. Informe de consultoría. Programas Especiales para la Seguridad Alimentaria -PESA- en Centroamérica. FAO.
- Cervantes, S., y Sotelo, B. 2002. Guías técnicas para la propagación sexual de 10 especies latifoliadas de Selva Baja Caducifolia En El Estado De Morelos. Mejoramiento Genético y Plantaciones Forestales del Campo Experimental Zacatepec. SAGARPA, INIFAP, CIRCE.
- Chidiak, M., Moreyra A., y Greco C. 2003. Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina: Sinergias y Desafíos. Universidad de San Andrés, CEPAL, Centro de Investigaciones para la Transformación. Buenos Aires, Argentina.
- Cleve, K. V. and Powers, R. F. 1995. Soil carbon, soil information and ecosystem development. pp. 155-199. *In*: McFree, W. W. and Kelly, M. [Eds.] Carbon forms and functions in forest soils. SSSA. U.S.A.

- CONAGUA-UACH. 2009. Restauración Hidrológica-Ambiental De La Parte Media Y Alta De La Cuenca Del Río Platanar, Comprendida Entre Los Estados De Tabasco Y Chiapas. Comisión Nacional del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.
- CONANP-SEMARNAT. 2005. Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla. 1º Edición. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. 204 p.
- CONAFOR. 2014. Conceptos y costos unitarios de apoyos para proyectos comunitarios. Anexo No. 2. RO Proders V02.
- Cortez, E. 2012. Árboles nativos con potencial forrajero para diseñar tecnologías silvopastoriles en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos. Tesis de Maestría en Ciencias Agroforestales para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.
- Cruz, L. A. 2005. Seminario de Diagnóstico de los Recursos Naturales en la Comunidad de Ajuchitlán, Tlaquiltenango, Morelos, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Cubero, D. 1999. Las barreras vivas y su aplicación en la agricultura conservacionista. Agricultura conservacionista. FAO-MAG. Congreso nacional de suelos.
- Dorado, O. A., D.M. Alonso G., Maldonado B. 2005. Educación para la biodiversidad a través de la universidad pública en áreas naturales protegidas: el caso de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos. Universidad Autónoma de Morelos.
- ECOSUR. 2002. Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas. The Edinburgh Centre for Tropical Forests. Universidad de Edimburgo. Richard Tippe.

- Ecosystem Marketplace (EM) y Valorando Naturaleza (VN). 2014. Serie de carbono forestal a inicios de 2014. Implicaciones y oportunidades para América Latina. Forest Trends' Ecosystem Marketplace. Washington, DC.
- Esquivel, B., G. Roselín, Juárez. 2013. Formulación de un proyecto REDD (Reducción de emisiones por deforestación y degradación) usando el sistema plan vivo en la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. Documento de sistematización de la experiencia en campo del proyecto. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).
- Falkowski, P.G., R.T. Barber, and V. Smetacek, 1998: Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281, 200-206.
- FAO (Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación). 2005. Proyectos forestales de fijación de carbono. [En línea]: FAO, (<http://www.fao.org/docrep/006/j2053s/j2053s09.html>).
- FAO (Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación). 2002. Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra. Dirección de Información Viale Delle Terme Di Caracalla. Roma, Italia. 95p.
- FAO-SAGARPA. 2007. Proyecto tipo: Estufas Ahorradoras de Leña. Programa Especial para la Seguridad Alimentaria. México. 17 pp.
- Field, Ch. B., M.R. Raupach, and R. Victoria. 2004. The global carbon cycle: Integrating humans, climate and the natural world. Pp 1-16 In: Ch. B. Field, and M.R. Raupach (eds). *The global carbon cycle: Integrating humans, climate, and the natural world*. SCOPE Series 62. Island press, Washington, DC.
- Fisher, M.J., I.M Rao, M.A Ayarza, C.E. Lascano, J.I. Sanz, R.J. Thomas, R.R Vera. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236-237.

- Franco, M. S. 2009. Estimación de la captura de carbono En zonas forestales. El caso del Parque Nacional Nevado de Toluca. 1a. Edición. Universidad Autónoma del Estado de México Instituto Literario núm. 100 Lote. C.P. 50000, Toluca, México.
- García, C., y E. Rodríguez. 2010. Manual de costos de obras y prácticas de restauración de suelos y reforestación. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México.
- Gómez, D. J. D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la reserva de la Biosfera "Sierra De Huautla", Morelos, México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.
- Gómez, J.D, J. D. Etchevers, A. I. Monterroso, C. Gay, J. Campo, M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*. 21 (1). 35-56.
- Gómez D.J., R. Monterroso, R. Tinoco, B. Etchevers. 2012. Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamerica*. 30 (2): 177-187.
- Grether R., B. Martínez, M. Lucknow, S. Zárate. 2006. Flora del valle de Tehuacán Cuicatlán. Fascículo 44. MIMOSACEAE Tribu Mimoseae. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Gueye, S. 2010. Potencial de captura de carbono en suelos de ladera en la subcuenca del río Piricua en Tuxpan, Michoacán. Tesis profesional. Centro de investigaciones en Geografía ambiental.
- Hernández, S.D.A. 2008. Venado cola blanca y su hábitat *Odocoileus virginianus mexicanus* Z.), en la Sierra de Huautla, Morelos. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Hernández, S.D.A, D. Cortés, R. Zaragoza, H. Martínez, B. González, C. Rodríguez, y S. Hernández. 2011. Hábitat del venado cola blanca en la

- Sierra de Huautla, Morelos, México. *Acta Zoológica Mexicana*. 27 (1): 47-66.
- Houghton, R., D. Skole, y C. Nobre. 2000. Annual Fluxes of Carbon from Deforestation and Regrowth in the Brazilian Amazon. [En línea]: MME, (www.mme.gov.br).
- IMTA. 2006. Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) versión 3. Servicio Meteorológico Nacional.
- INECC. 2012. Quinta Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Estados Unidos Mexicanos.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los estados unidos Mexicanos, Tlaquiltenango, Morelos. Clave geoestadística 17025. México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Climate Change. The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC 2006. Cambridge University Press 1st edition. 1056 pp.
- Kandji, S. T., L. V. Verchot, J. Mackensen, A. Boye, M. van Noordwijk, T. P. Tomich, C. Ong, A. Albrecht y C. Palm. 2006. Opportunities for linking climate change adaptation and mitigation through agroforestry systems. En D. P. Garrity, A. Okono, M. Grayson, y S. Parrott (Eds.), *World agroforestry into the future* Nairobi: World Agroforestry Centre. pp. 113-121.
- Linares, E., y R. Bye. 2008. El copal en México. *CONABIO. Biodiversitas*. 78:8-11.
- Martínez-Yrizar, A. 1984. Procesos de producción y descomposición de hojarasca en selvas estacionales. Tesis de Maestría. UNAM. México.

- Martínez-Yrizar, A. 1995. Biomass distribution and primary productivity of tropical dry forests. pp. 326-45. In: S.H. Bullock, H.A. Mooney, E. Medina (eds.). Seasonally dry tropical forests. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- Matías, H. 2013. Documento técnico unificado de aprovechamiento forestal maderable dentro del núcleo agrario bienes comunales de Santa Ana Tamazola, Municipio De Jolalpan. Libro Puebla, Tipo U1 Personas Físicas Prestadoras De Servicios Técnicos Forestales, Inscripciones, Volumen 2, Número 9.
- Milliman, J.D., 1993: Production and accumulation of calciumcarbonate in the ocean - budget of a nonsteady state. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 927-957.
- Miranda, R., S. Mora, H. Carvajal, y R. Ochoa. 2007. Especies forestales con diversidad de usos en un bosque tropical caducifolio de la comunidad indígena de Tomatlán, Jalisco, México. *Ciencia e Investigación Forestal*. Instituto Foresta/Chile. 183-192.
- Moreno, C., M. Toledo y A. Casas. 2013. Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*. 91(4): 375-398.
- Moutinho, P., M. Santilli, S. Schwartzman, D. Nepstad, L. Curran. Y Nobre, c. 2005. Tropical Deforestation and Kyoto Protocol.
- Navar, J., S. Estrada, C. Estrada. 2010. The effect of landuse change in the tropical dry forests of Morelos, México on carbon stocks and fluxes. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 295-307.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. Fertilidad, Salinidad y Clasificación de suelos, Estudio, Muestreo y análisis. Segunda Sección. Diario Oficial de la Federación.

- Olivares, P., N. Avilés, B. Albarrán, S. Rojas, O.A. Castelán. 2011. Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14(2): 739-748.
- Ortiz, S., G. Anaya, W. Berg. 1994. Evaluación, Cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Primera Edición. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Pennington, D., J. Sarukhán. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Tercera edición. Ediciones científicas universitarias. Universidad Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.
- Pérez, N. 2010. Evaluación de la hoja del árbol de caulote (*Guazuma ulmifolia*), como alimento para humanos. Tesis de Maestría en Alimentación y Nutrición. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Pérez, P., R. Jandl, y S. Rubio. 2007. Modelización del secuestro de carbono en sistemas forestales: Efecto de la elección de especies. *Ecología*. 21: 341-352.
- Pimentel B., L. 2009. Producción de árboles y arbustos de uso múltiple. Primera Edición. Mundi Prensa. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Prentice, I. C. G.D. Farquhar, M.J.R. Fasham, M.L. Goulden, M. Heimann, V.J. Jaramillo, H.S. Kheshgi, C. Le Quéré, R.J. Acholes and D.W.R. Wallace. 2001. The Carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. Chapter 3 Pág. 183-238.. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

- Rainforest Alliance, Gibbon A., Jeff Hayward, Julianne Baroody, Climate Initiative y. 2009. Lineamientos Para El Diseño De Proyectos De Carbono En Cafetales Usando La Metodología Agroforestal Simplificada. Fondo de Innovación de la Corporación Financiera Internacional.
- Read L., y D. Lawrence. 2003. Litter nutrient dynamics during sucesion in dry tropical forest of the Yucatán: Regional and seasonal effects. *Ecosystems* 6: 747-761.
- Reyes J., A. Martínez. 2011. Establecimiento y manejo de cercas vivas. Resultados de proyectos. Fundación Produce. SAGARPA. Gobierno del Estado de Sinaloa.
- Richey, J.E., 2004. Pathways of atmospheric CO₂ through fluvial systems. pp. 329-340 In: Ch. B. Field, and M.R. Raupach (eds). *The global carbon cycle: Integrating humans, climate, and the natural world*. SCOPE Series 62. Island press, Washington, DC.
- Rodríguez T., D. A. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Primera Edición. Mundi Prensa. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Roncal-García, S., L. Soto-Pinto, J. Castellanos-Albores, N. Ramírez-Marcial, y J. Bernardus. 2008. Sistemas Agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Iverciencia*. 33: 200-207.
- Sáenz, R., T. González, O. Jiménez, G. Larios, V. Gallardo, R. Villaseñor, R. Ibañez. 2010. Alternativas agroforestales para reconversión de suelos forestales. Primera Edición. SAGARPA. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo experimental Uruapan. México.
- Salgado L. 2004. El mecanismo de desarrollo limpio en actividades de uso de la tierra, cambio de uso y forestería (LULUCF) y su potencial en la región latinoamericana. CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo. Santiago de Chile.

- Saynes, V., C. Hidalgo, J. D. Etchevers, and J.E. Campo. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Appl. Soil Ecol.* 29: 282-289.
- Schlesinger, W.H., 1990: Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348, 233-234.
- Schroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89-97.
- SEMARNAT. 2011. Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas. 2011. Comisión de Áreas Naturales Protegidas. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SICTA. 2012. Obras de conservación de suelo y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA. Cooperación Suiza en América Central.
- SIRE. 2003. *Gliricidia sepium* (Jacquin) Kunth ex Walpers. CONAFOR. CONABIO.
- Soto-Pinto L., G. Jiménez-Ferrer, T. Lerner-Martínez. 2008. Diseño de sistemas agroforestales para la producción y la conservación. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chis. México, 93p.
- Soto-Pinto L., M. Anzueto, Q. Sotero. 2011. El acahual mejorado un prototipo agroforestal. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chis. México, 28p.
- Terrones, R. 2007. Agroforestería participativa con arbustivas nativas multiusos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Uribe G. M. 2012. La Agroforestería como factor de desarrollo rural para comunidades campesinas de la sierra de Huautla, Morelos. Tesis de grado. Universidad Autónoma Chapigo. Texcoco México.

- Vargas R., MF. Allen, E.B. Allen. 2008. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology*. 14: 109-124.
- Vázquez, C. 2014. Dendroenergía y Desarrollo Sustentable: El caso de las estufas lorena en dos comunidades del municipio de Jolalpan, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias en Desarrollo Rural Regional. Dirección de Centros Regionales Universitarios. Universidad Autónoma Chapingo.
- Villanueva C., V. Argeñal, M. Ibrahim, F. Casasola. 2008. Contribución de las cercas vivas en el control del estrés calórico en sistemas intensivos de producción de leche en trópico de bajura. VII Congreso Latinoamericano de Sistemas Agroforestales para una producción pecuaria sustentable. Sistemas silvopastoriles, un camino para una economía verde en pecuaria mundial. ISSN 2238-457X.
- Yescas A. C. A. 2012. Árboles nativos con potencial dendroenergetico para el diseño de tecnologías agroforestales en el Ejido de los Sauces, Tepalcingo, Morelos. Tesis de maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Yquise, P., V. Pocomucha, Y. Vargas. 2008. Carbono almacenado en diferentes sistemas de uso de la tierra del distrito de José Crespo y Castillo, Huánuco, Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú. 24p.