



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

POSGRADO DE INGENIERIA

**LA PRODUCCION SUSTENTABLE DE ENERGIA
MEDIANTE UNA PLANTACION ENERGETICA: EL
CASO DE CUENTEPEC**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERIA

INGENIERIA EN ENERGIA – ECONOMIA DE LA ENERGIA

P R E S E N T A :

RICARDO VAZQUEZ PERALES

TUTOR:

DR. JORGE ISLAS SAMPERIO

2009





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Con amor y agradecimiento, a mis padres:

Celerino y Rosa Isabel.

Con cariño y agradecimiento, a mis hermanos:

Rolando, Roberto y Rogelio.

Con afecto y aprecio, a mis amigos(as):

Gloria, Lorely, Josema y Nancy, Jane, Andrea,
Juan Carlos y Graciela, Ernesto y Marie.

A la memoria (†) de:

Javier Vázquez

Keith y Delia Pheby

Pablo Buenos Aires

Daniel Jiménez

Siembro robles y pinos y sicomoros;
quiero llenar de frondas esta ladera,
quiero que otros disfruten de los tesoros
que darán estas plantas cuando yo muera.

.
. .
.

Hay que ser como el agua, que va serena
brindando al mundo entero frescos raudales.
Hay que imitar al viento, que siembra flores
lo mismo en la montaña que en la llanura,
y hay que vivir la vida sembrando amores,
con la vista y el alma siempre en la altura.

Dijo el loco, y con noble melancolía
por las breñas del monte siguió trepando,
y al perderse en las sombras, aún repetía:
— ¡Hay que seguir sembrando! ¡Siempre
Sembrando!

Marcos Rafael Blanco Belmonte

Agradecimientos

Esta tesis doctoral no se hubiera realizado sin el apoyo de muchas personas e instituciones, a quienes quiero expresar mi agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Jorge Islas por dirigir esta tesis, depositando en mí su confianza al encomendarme un proyecto de investigación tan importante; por facilitar el apoyo institucional que estuvo a su alcance y porque su contraparte crítica coadyuvó en forma definitiva a que profundizara mi contribución intelectual. Con especial gratitud quiero referirme a la Dra. Ivonne Toledo García, de quien recibí sus conocimientos y experiencias de biología y microbiología ambiental; por iniciarme experimentalmente como practicante de biología, en el laboratorio y en el campo, y porque gracias a su entusiasmo, esfuerzo y ayuda, tuve siempre un apoyo constante para lograr paso a paso todos los objetivos de la tesis. Así mismo, atesoro de la Dra. Esperanza Martínez Romero, haberme brindado su asesoría, apoyo e interés sincero en el proyecto, dando seguimiento al avance de mi investigación y porque generosamente facilitó el uso de su laboratorio. Al Dr. Javier Aguillón Martínez le estoy agradecido porque su contribución intelectual, asesorías y discusiones enriquecieron la tesis por completo; también, por haberme facilitado el uso de su laboratorio y porque imprimió entusiasmo y motivación en la investigación. Al Dr. Fabio Manzini le agradezco haber hecho de mi tesis una labor gustosa, brindándome en todo momento su amistad y apoyo, y porque aun siendo esta una tesis de ingeniería, siempre dio relevancia a los aspectos sociales. Profundamente, estoy agradecido con el Dr. Raúl García Barrios, porque con su ejemplo, comprometido con las causas sociales y ambientales, ha sido un referente invaluable en mi desarrollo profesional, y porque en muchas ocasiones me asesoró de manera sincera y comprensiva, compartiendo conmigo sus conocimientos y reflexiones.

Sin falta, debo dar reconocimiento y agradecimiento a quienes a lo largo de la tesis me apoyaron con su trabajo profesional, principalmente Jorge Ramírez Guerrero y María de Jesús Pérez Orozco. Jorge me ayudó a llevar a cabo el trabajo de campo y de laboratorio en las diferentes etapas de la investigación: en el estudio del consumo de leña en Cuentepec, en el establecimiento y mantenimiento del campo experimental, en la realización del estudio alométrico y en la medición y captura de datos de las plantaciones. María de Jesús contribuyó con un esfuerzo dedicado, ayudándome en la construcción de la base de datos de las mediciones de las plantas y en su análisis

estadístico; también, su colaboración fue imprescindible para desarrollar el programa de cómputo de análisis financiero de la plantación. Así mismo, debo agradecer el esfuerzo y dedicación las personas que me apoyaron en el trabajo de campo: Javier Bautista, Anayeli Almazo, Patricia López, Marisa García, Sakyamuni Chavarro, Carolina Corral y Circe Martínez.

Debo dar gracias también a los investigadores, que sin estar en mi comité tutorial, en muchas ocasiones me dieron asesoría y apoyo de forma generosa y sincera. De forma especial, agradezco el apoyo, motivación y amistad que el Dr. Rubén Dorantes me brindó desde el inicio de la tesis. También, al Dr. Omar Masera y al Dr. Víctor Berrueta, por asesorarme y transferirme la metodología del estudio de la dinámica del consumo de leña; a la Dra. Eliane Ceccon, por su ayuda y acompañamiento al diseñar, seleccionar y establecer los sitios experimentales, y por haberme asesorado en temas de estadística y agroforestería. Así mismo, agradezco la asesoría y apoyo de: Dra. Ma. Fernanda Paz, Dr. Luis García Barrios, Dr. Isaac Pilatowski, Dra. Angelina Martínez Yrizar, Dr. Martin Ricker, Ing. Enrique Riegelhaupt, M.I. Paloma Macías y M.C. Mirna Guevara.

El trabajo en Cuentepec me brindó una experiencia de calidez humana que me permitió conocer vívidamente la cultura indígena de este pueblo. Debo agradecer a las autoridades ejidales y comunales de Cuentepec por apoyar la investigación facilitando permisos con la mayor agilidad posible y por convocar a reuniones de la comunidad en varias ocasiones. Como una fuente de inspiración, mantendré la memoria de Don Pablo Buenos Aires (†) y de Don Daniel Jiménez (†); tuve el honor contar con su trabajo y amistad, y recibir sabios consejos de ellos. Fue muy valiosa la ayuda, amistad y colaboración que me brindaron el maestro Javier Campos, Agapito Jiménez, Lucino Buenos Aires, Ismael y Héctor Jiménez. Una experiencia inolvidable fue conocer 49 familias de Cuentepec que nos permitieron estudiar sus hábitos de consumo de combustibles domésticos durante una semana; sería muy larga la lista de quienes gustosamente nos permitieron entrar en su vida familiar.

A lo largo de la tesis recibí el apoyo de muchas personas que me ayudaron sinceramente. Especialmente, estoy agradecido con Graciela Maldonado, porque sus consejos y acompañamiento me ayudaron a transformar una etapa de sacrificios en un proceso de crecimiento y desarrollo personal. Estoy en deuda — por su apoyo moral, material, y por el tiempo que me dedicaron — con Lorely Galván, Gloria Carmona, Juan Carlos y Graciela, Marco Aurelio Hernández, José Manuel y Nancy, Ernesto y Carla,

Andrea Rang, Olufunke Cofie, Allana Krolikowski, Ernesto y Marie, Beatrice Brigs, Pilar Lomelín, Rebeca Castro y María Luisa Eschenhagen.

Esta tesis se realizó gracias al financiamiento de varias instituciones. El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) me apoyó con una beca doctoral para mi sostenimiento y el Fondo Mundial de Conservación de la Naturaleza (WWF) me otorgó la Beca Príncipe Bernardo de los Países Bajos para poder concluir la investigación; PAPIIT-UNAM (Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica) y CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) dieron el apoyos económico para iniciar el proyecto de establecimiento de la plantación energética. El grueso del proyecto experimental fue financiado mediante el Fondo Sectorial CONAYT-SEMARNAT (proyecto 443).

ÍNDICE

	Página
Introducción	1
Capítulo 1:	13
Estado del arte de la producción de biomasa mediante plantaciones energéticas.	
1.1 Panorama general de las plantaciones energéticas	15
1.2 La silvicultura intensiva	17
1.3 Competencia de la bioenergía por el uso del suelo	22
1.4 Agroforestería: una alternativa para la bioenergía sustentable	26
1.5 Conclusiones	36
Capítulo 2:	38
Antecedentes socioeconómicos, diseño experimental e introducción al campo del sitio experimental <i>El Colorín</i> .	
2.1 Contexto socioeconómico	39
2.2 Ubicación geográfica y entorno natural	45
2.3 Diseño experimental	46
2.4 Producción de plántulas, introducción al campo y mantenimiento de acacias	56
2.5 Siembra y mantenimiento del cultivo de frijol	58
2.6 Métodos de medición y captura de datos	60
2.7 Discusión	61
2.8 Conclusiones	63
Capítulo 3:	65
Análisis alométrico y energético de la biomasa aérea de <i>Acacia cochliacantha</i> y <i>Acacia pennatula</i> .	
3.1 Marco teórico alométrico y energético	66
3.2 Métodos y materiales en alometría y energética	72
3.3 Resultados y discusión	77
3.4 Conclusiones	87

Capítulo 4:	89
Análisis de la productividad de <i>A. cochliacantha</i> , <i>A. pennatula</i> y <i>P. vulgaris</i> en plantaciones energéticas agroforestales, y monocultivos agrícolas y forestales.	
4.1 Métodos de análisis	90
4.2 Análisis de fertilidad del suelo	93
4.3 Supervivencia de acacias	98
4.4 Crecimiento y producción de biomasa de las acacias	100
4.5 Producción de frijol	110
4.6 Evaluación conjunta de la producción de frijol y biomasa arbórea	111
4.7 Conclusiones	113
Capítulo 5:	115
Modelos económicos de plantaciones energéticas forestales y agroforestales	
5.1 Economía de sistemas forestales	116
5.2 Modelo de valoración económica de plantaciones energéticas	120
5.3 Modelos de optimización analíticos y funciones empíricas	128
5.4 Programación dinámica y simulación biofísica	132
5.5 Integración del modelo económico en un marco de sustentabilidad	135
5.6 Conclusiones	140
Capítulo 6:	141
Construcción de escenarios de producción y análisis financiero de plantaciones energéticas forestales y agroforestales	
6.1 Método analítico de construcción de escenarios de producción	142
6.2 Escenarios de producción de <i>A. pennatula</i> en el sitio experimental <i>El Colorín</i> .	145
6.3 Análisis financiero de los tratamientos con <i>A. pennatula</i> y <i>P. vulgaris</i> en <i>El Colorín</i> .	149
6.4 Conclusiones	166
Conclusiones	167
Referencias bibliográficas	173
ANEXOS	193

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
2.1 Descripción de los tratamientos experimentales.	53
2.2 Valores promedio de los parámetros de fertilidad inicial del suelo.	56
2.3 Resumen de resultados de la colecta de germoplasma.	57
2.4 Resultados de escarificación y germinación de las semillas de <i>A. pennatula</i> y <i>A. cochliacantha</i> .	58
2.5 Fertilización aplicada a los tratamientos experimentales en <i>El Colorín</i> .	61
3.1 Intervalo de dimensiones de los individuos utilizados como muestra en las pruebas destructivas alométricas.	74
3.2 Resumen de ecuaciones de alométricas de <i>A. cochliacantha</i> y <i>A. pennatula</i> en <i>El Colorín</i> , Cuentepec, 2006.	80
3.3 Densidad real (gravedad específica) de la madera de <i>A. cochliacantha</i> en la región de Cuentepec (g cm^{-3}).	81
3.4 Densidad real (gravedad específica) de la madera de <i>A. cochliacantha</i> en la región de Cuentepec (g cm^{-3}).	81
3.5 Gravedad específica (<i>densidad</i>) de la madera de <i>A. pennatula</i> en Cuentepec y Chamilpa, Morelos (g cm^{-3}).	82
3.6 Poder calorífico alto (HHV), poder calorífico bajo (LHV) en base seca y base húmeda, y densidad de <i>A. cochliacantha</i> y <i>A. pennatula</i> .	83
3.7 Poder Calorífico, carbón fijo (%FC), materia volátil (%VM) y contenido de ceniza (%ac) (valores estimados a partir del HHV_d).	83
3.8 Análisis de elementos principales en <i>A. cochliacantha</i> y <i>A. pennatula</i> con muestras de <i>El Colorín</i> y de individuos silvestres.	84
4.1 Especies y fertilización en los tratamientos experimentales.	90
4.2 describe detalladamente los fertilizantes y las dosis que se aplicaron.	90
4.3 Parámetros de fertilidad del suelo al inicio y al final del estudio en <i>El Colorín</i> .	93
4.4 Supervivencia en los tratamientos experimentales en el sitio experimental <i>El Colorín</i> .	99
4.5 Energía estimada de la biomasa leñosa de los árboles en los tratamientos experimentales (MJ ha^{-1}) a los 16 meses en <i>El Colorín</i> .	109
4.6 Carbono capturado en biomasa leñosa de los árboles en los tratamientos experimentales (kg ha^{-1}) a los 16 meses en <i>El Colorín</i> .	109
4.7 Producción neta de frijol en los tratamientos experimentales (kg ha^{-1})	111
4.8 Producción neta de frijol y biomasa leñosa (kg ha^{-1}).	
4.9 Índice de Equivalencia del Suelo (<i>LER</i>) en los tratamientos agroforestales con espaciamiento 2x5 m en los monocultivos.	112
4.10 Índice de equivalencia del suelo en los tratamientos agroforestales (<i>LER</i>), suponiendo el doble de producción en monocultivos con densidad de espaciamiento (2x2.5 m).	112
6.1 Escenarios de producción de leña (kg ha^{-1}) en los tratamientos experimentales con acacias.	150
6.2 Producción de frijol en los tratamientos experimentales (kg ha^{-1}).	150
6.3 Flujo de efectivo de los tratamientos experimentales de <i>El Colorín</i> .	155

6.4 Valor Presente Neto (VPN) de los tratamientos experimentales.	158
6.5 Valor Presente Neto (VPN) de los tratamientos experimentales, $r = 5\%$	163
A1.1 Análisis elemental del tejido vegetal del material foliar de <i>A. cochliacantha</i> en el sitio <i>El Colorín</i>	193
A1.2 Análisis elemental del tejido vegetal del material foliar de <i>A. pennatula</i> en el sitio <i>El Colorín</i>	193
A2.1 Ingresos en los tratamientos experimentales	194
A2.2 Costos de inversión de los tratamientos forestal (T5) y agroforestales (T4 y T6).	195
A2.3 Costos de establecimiento de los tratamientos agrícolas (T7 y T8) en <i>El Colorín</i>	195
A2.4 Costos anuales del monocultivo forestal (T5)	195
A2.5 Costos anuales del tratamiento agroforestal fertilizado químicamente (T4)	196
A2.6 Costos anuales del tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6)	196
A2.7 Costos anuales del tratamiento agrícola fertilizado biológicamente (T7)	197
A2.8 Costos anuales del monocultivo agrícola fertilizado químicamente (T8)	197
A2.9 Flujo de efectivo de los tratamientos experimentales de <i>El Colorín</i>	198

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
2.1 Ubicación del Glacis de Buena Vista, zona de barrancas, y el Sitio Experimental <i>El Colorín</i> .	46
2.2 Patrón de precipitación pluvial en la región centro de Morelos.	48
2.3 Fotografías de <i>A. pennatula</i> en Cuentepec, Morelos (a y b) y fruto de <i>A. pennatula</i> .	49
2.4 Fotografías de <i>A. cochliacantha</i> en Cuentepec, Morelos.	50
2.5 Distribución de las parcelas en el sitio experimental.	54
2.6 Parcela agroforestal modelo.	55
3.1 Fracción promedio de biomasa leñosa y foliar en <i>A. cochliacantha</i> y <i>A. pennatula</i> en diciembre de 2006, a los 18 meses de establecimiento en el campo.	78
4.1 Supervivencia de <i>A. cochliacantha</i> y <i>A. pennatula</i> .	98
4.2 Supervivencia de acacias en los tratamientos experimentales en <i>El Colorín</i> .	99

4.3 <i>Diámetro de la base (db) promedio en los tratamientos con A. cochliacantha y A. pennatula a los 2, 5, 12 y 16 meses de introducción al campo.</i>	101
4.4 <i>Diámetro de la Cobertura Mayor en los tratamientos experimentales (valor promedio e intervalos al 95% de confianza) a los 2, 5, 12 y 16 meses en El Colorín.</i>	104
4.6 <i>Biomasa leñosa en los tratamientos con A. cochliacantha y A. pennatula a los 5, 12 y 16 meses en El Colorín. Resultados en kg ha⁻¹.</i>	108
4.7 <i>Biomasa foliar por hectárea en los tratamientos con A. cochliacantha y A. pennatula a los 5, 12 y 16 meses en El Colorín.</i>	108
4.8 <i>Productividad en los tratamientos con frijol en El Colorín.</i>	110
5.1 <i>Modelo de crecimiento sigmoideal.</i>	117
5.2 <i>Meta-modelo de análisis de plantaciones energéticas, forestales y agroforestales.</i>	138
6.1 <i>Gráfica de la función $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$, con $\eta^1 < \eta^0$.</i>	144
6.3 <i>Escenarios de la función de producción $Q^1(t)$ del tratamiento T6.</i>	148
6.4 <i>Ingresos anuales por el cultivo de frijol (pesos).</i>	151
6.5 <i>Ingresos de los tratamientos por la cosecha de leña al final del ciclo de rotación (pesos).</i>	152
6.6 <i>Participación porcentual de los costos de establecimiento (tratamientos T4, T5 y T6, antes de aplicar el subsidio PROARBOL).</i>	153
6.7 <i>Distribución de costos de establecimiento en los tratamientos agrícolas (T7 y T8).</i>	154
6.8 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio de la leña (r = 15%).</i>	159
6.9 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio del frijol (r = 15%).</i>	159
6.10 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROCAMPO (r = 15%).</i>	160
6.11 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROARBOL (r = 15%).</i>	160
6.12 <i>Análisis de sensibilidad del VPN ante variaciones en la tasa de descuento, r.</i>	161
6.13 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio de la leña (r = 5%).</i>	164
6.14 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio del frijol (r = 5%).</i>	164
6.15 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROCAMPO (r = 5%).</i>	165
6.16 <i>Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROARBOL (r = 5%).</i>	165
A2.1 <i>Diagrama de flujo del análisis financiero de plantaciones energéticas</i>	199

Resumen

Esta tesis doctoral presenta una investigación sobre plantaciones energéticas forestales y agroforestales, y sobre el cultivo de frijol. La investigación propone a los sistemas agroforestales como una alternativa para la bioenergía sustentable, si se practica por pequeños y medianos campesinos y silvicultores de países en desarrollo.

La investigación muestra el caso de estudio de un proyecto teórico-experimental de sistemas forestales y agroforestales con especies arbóreas leñosas de la Selva Baja Caducifolia de México: *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula*; y frijol flor de mayo (*Phaseolus vulgaris* L.); para probar el efecto de las asociaciones agroforestales y la aplicación de biofertilizantes inoculados (*Rhizobium etli* y *Glomus intrarradices*) en comparación con los sistemas de monocultivo y la fertilización con agroquímicos. El proyecto se realizó en el campo experimental *El Colorín*, que ejidatarios de Cuentepec, un poblado indígena (nahua) del Estado de Morelos, facilitaron. En la investigación se desarrollan modelos alométricos para estimar la biomasa aérea de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* y se realizan análisis termoquímicos para caracterizar el potencial dendroenergético de la leña de estas especies. También se presentan modelos de valoración y análisis económico, propuestos para plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas, extendiendo el análisis a plantaciones con sistema de cosecha por podas y a la captura de carbono. Dado que el estudio de las plantaciones energéticas se plantea como un problema complejo, se presenta un meta-modelo que integra métodos y modelos de aspectos biológicos, económicos y financieros, en un marco integrado de sustentabilidad. También se presenta una metodología para construir escenarios comparativos de producción forestal futura con base en mediciones iniciales y el conocimiento de la producción de un tratamiento de referencia. Finalmente, se muestra un ejercicio exploratorio de análisis financiero.

En cada sección se presentan resultados, teóricos o experimentales, que permiten llegar a conclusiones que aportan avances en el conocimiento de las plantaciones energéticas.

Introducción

La biomasa ha sido uno de los combustibles primordiales de la humanidad a lo largo de su historia. Desde el inicio de las civilizaciones, la combustión de biomasa generó calor para la cocción de alimentos, la calefacción doméstica, para hornear cerámica, fundir metales y forjar herramientas e instrumentos metálicos. En la actualidad, la biomasa mantiene su importancia como combustible tradicional en muchas comunidades rurales y urbanas, principalmente en países en desarrollo; el IEA (2006) estimó que en 2004 cerca de 2,500 millones de personas, un tercio de la población mundial, y el 52% de la población de los países en desarrollo, depende directamente de combustibles tradicionales de biomasa para la cocina y la calefacción domésticas. En México, el Balance Nacional de Energía señala que la leña proporcionó el 35% (247 PJ) de la energía del sector residencial (SENER, 2006) (principalmente por la población rural).

Aunque en el último siglo las principales fuentes primarias de energía han dependido de los combustibles fósiles, a partir de la crisis del petróleo de 1973 la biomasa se reconsideró como una alternativa con potencial para sectores de consumo energético de gran escala, como el industrial, el comercial, el del transporte y el público. Principalmente en países que en la década de 1970 no eran petroleros, como Brasil, Suecia y Finlandia (entre otros), con territorio apto para la producción forestal o agrícola intensiva, se dio mayor impulso a la bioenergía, desarrollando gradualmente tecnologías y mercados de biocombustibles para mejorar su seguridad energética (Goldemberg, 2002; Nass *et al.*, 2007). Sin embargo, aunque el sector de la silvicultura intensiva (forestal) se consolidó como fuente de materias primas y energía para la industria, posteriormente se reconoció que en muchos casos el sector forestal intensivo no tuvo el impacto que se esperaba en el bienestar de los pequeños campesinos y silvicultores de las comunidades rurales de países en desarrollo (Steepler y Nair, 1987).

En la actualidad se ha probado que con las nuevas tecnologías, toda la biomasa (sea de tipo lignocelulósico, azúcares o almidones) puede aprovecharse para convertirse en biocombustibles modernos, como gas de síntesis, aceites de pirólisis, etanol, metanol, biodiesel, en calor o en electricidad. Sin embargo, aunque la producción actual de biocombustibles modernos se basa principalmente en los cultivos de caña de azúcar

(Goldemberg, 2002) y maíz (Wescott, 2007) (principalmente en Brasil y Estados Unidos), hay estudios que estiman que la biomasa leñosa (lignocelulósica) tiene mayor potencial energético que la biomasa con base en carbohidratos o almidones (de cereales y azúcares), ya que una hectárea de tierra puede producir más energía potencial a partir de biomasa lignocelulósica (Graham *et al.*, 1995). Comparando la ganancia de energía de los sistemas silvícolas y los agrícolas (antes de la conversión a biocombustibles), en las especies de cultivos anuales (incluyendo oleaginosas y cereales) la ganancia energética puede ser de <1 a 5 veces¹, mientras que en las especies leñosas la ganancia puede ser de 10 a 25 veces (incluyendo los fertilizantes, pesticidas, herbicidas, fuerza de trabajo y gasolina/diesel de la maquinaria) (Patzek, 2004; Mead y Pimentel, 2006).

Un tema que ha cobrado relevancia en los últimos años, se refiere a la relación entre la producción de biocombustibles y la disponibilidad y precios de los alimentos a nivel mundial. Se ha considerado (Brown, 2008) que uno de los factores que influyen actualmente en el aumento del precio de los alimentos es el uso de cereales y oleaginosas para la producción de biocombustibles²; se argumenta (Newel, 2007) que los mercados de bienes alimentarios están cada vez más ligados a los mercados de los combustibles, como se observó en 2008 en la crisis de la tortilla en México³. Ante el aumento global de la demanda de biocombustibles, también se ha levantado la preocupación por los impactos ambientales que pueden resultar de su producción si no se

¹ En la producción de etanol derivado del cultivo de caña de azúcar el caso de Brasil emblemático; Macedo *et al.* (2004) mostraron resultados de análisis donde la ganancia de energía es de 1 a 8.3 y a 10.2. Sin embargo, otros estudios mencionan que balance de energía en el etanol de caña de azúcar es menor, 1:3.2 (Andreoli y de Souza, 2007).

² También se dice hay otros factores que influyen en el aumento de los precios de los alimentos: (1) el aumento de la demanda de alimentos por las principales economías emergentes, China e India, (2) los factores del cambio climático que provocan la disminución y pérdida de cosechas, y (3) el control y especulación que ejercen los monopolios que manejan la distribución de alimentos (UNCTAD, 2008).

³ México es el tercer importador mundial de maíz del mundo; importa cerca del 40% de maíz que consume (CEEES, 2008). Estados Unidos, principal productor de maíz a nivel mundial, se ha convertido en los últimos años en el principal fabricante de etanol a nivel mundial. Al entrar en vigor el Tratado de Libre Comercio México-USA en 2008, integrando los mercados agrícolas de ambos países, el precio de la tortilla en México aumentó 50% durante el primer tercio de 2008, afectando la economía de millones de familias mexicanas (Carlson, 2008).

realiza bajo criterios de sustentabilidad⁴. Un argumento que cuestiona la sustentabilidad ambiental de los biocombustibles se refiere a los impactos (negativos) derivados del uso de agroquímicos (fertilizantes y pesticidas sintéticos) en la agricultura y la silvicultura intensivas (Joergenssen y Kristensen, 1996; Fritsche, 2006), ya que en el caso de la fabricación de nitrógeno (elemento esencial para el desarrollo de las plantas), su proceso de fabricación es intensivo en el consumo de combustibles fósiles (principalmente gas natural o combustóleo), lo que contribuye a un menor balance energético y a la emisión de CO₂ y NO_x a la atmósfera (Wensel, 2006; Patzek, 2004).

De lo expuesto anteriormente se deduce que para hacer compatible el objetivo de producir biomasa en gran escala para la producción de biocombustibles modernos con los objetivos del milenio (UNO⁵) y del desarrollo sustentable, confirmados en la iniciativa WEHAB⁶ en Johannesburgo, se requiere de un movimiento concertado para guiar la producción de biomasa hacia la agricultura y silvicultura sustentables, favoreciendo el bienestar de los pequeños campesinos de zonas rurales pobres de países en desarrollo (Sagar y Kartha, 2007).

De acuerdo con este propósito, la forestería social (Hyde y Köhlin, 2000) ofrece alternativas de sistemas para producir biomasa leñosa y alimentos en sistemas de manejo que buscan la sustentabilidad social, ambiental y económica, como son la agroforestería y el manejo sustentable del bosque. La agroforestería es la combinación (simultánea o secuencial) de árboles con cultivos agrícolas, en sistemas productivos donde los componentes árbol-cultivo se complementan y forman en conjunto sistemas de uso de la tierra, ecológica, social y económicamente sustentables (ICRAF⁷). En la agroforestería es frecuente el uso de especies perennes leguminosas, que participan en el proceso de fijación biológica de nitrógeno, ofreciendo la posibilidad de aportar nitrógeno de forma natural, y por lo tanto, de disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos

⁴ Un ejemplo de esto se ha presentado en Malasia, donde se ha identificado que prácticas inadecuadas del manejo de plantaciones de palma de aceite causan deforestación extendida y pérdida de biodiversidad (Sagar y Kartha, 2007).

⁵ Millenium Development Goals (www.un.org/millennium)

⁶ WEHAB initiative: Water, Energy, Health, Agriculture and Biodiversity.

⁷ www.icraf.org World Agroforestry Center (International Council for Research in Agroforestry).

(Räsänen, 2002). Algunos ejemplos exitosos de forestería social (en Brasil, India y Australia) muestran que las comunidades forestales y las cooperativas de pequeños propietarios pueden vender la producción de biomasa a empresas de pulpa, taninos y bioenergía en condiciones de mayor equidad social y sustentabilidad ambiental que los esquemas de grandes monopolios de tierra y recursos naturales (Larson *et al.*, 1994; SCMCC, 2003; Hooda *et al.*, 2006).

Para contribuir al desarrollo de alternativas sustentables de forestería social que sean apropiables por pequeños y medianos campesinos y silvicultores de países en desarrollo, esta tesis se propone investigar y desarrollar sistemas productivos de bajos insumos (disminuyendo la cantidad de agroquímicos aplicados), utilizando tierras de baja y mediana fertilidad que no compitan por el uso del suelo con la producción de alimentos.

Con base en lo expuesto anteriormente, la presente tesis doctoral presenta un caso de estudio con la siguiente hipótesis general como guía de investigación:

Los sistemas agroforestales con las especies arbóreas leguminosas nativas de México *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula*, asociados con el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L), biofertilizados con un consorcio de inóculo bacteriano y micorrizas (*Rhizobium etli* y *Glomus intrarradices*), pueden ofrecer alternativas de producción simultánea de biomasa leñosa de buena calidad dendroenergética y frijol para el autoconsumo o venta, disminuyendo el uso de fertilizantes sintéticos, contribuyendo al autoabastecimiento de necesidades de leña, alimentos y generación de ingresos de pequeños y medianos campesinos, y por lo tanto, disminuyendo la competencia por el uso del suelo entre la bioenergía y la producción de alimentos.

Con base en esta hipótesis, la investigación se propuso llevar a cabo los siguientes objetivos generales: (1) realizar un proyecto experimental para estudiar sistemas productivos de las especies leñosas de la Selva Baja Caducifolia de México *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula*, y del frijol flor de mayo (*Phaseolus vulgaris* L.), para probar el efecto de las asociaciones agroforestales y la aplicación de biofertilizantes inoculados (*Rhizobium etli* y *Glomus intrarradices*) en comparación con la fertilización con agroquímicos, en Cuentepec, Temixco, Morelos, un poblado indígena que utiliza la leña

como el principal combustible de uso doméstico; (2) desarrollar modelos alométricos que permitan estimar la biomasa aérea de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* y realizar análisis termoquímicos para caracterizar el potencial dendroenergético de la madera de estas especies, y (3) revisar y proponer modelos de análisis económico de plantaciones energéticas, para integrar los aspectos biológicos, económicos y financiero, que contribuyan al manejo sustentable de las plantaciones energéticas, mostrando un ejercicio de análisis financiero exploratorio.

De forma más particular, la tesis se enfoca en responder las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el patrón de consumo de combustibles domésticos en el caso de Cuentepec? ¿Cuáles son las relaciones alométricas que pueden estimar la biomasa aérea leñosa, foliar y total de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*? ¿Cuáles son los valores de los parámetros termoquímicos que caracterizan las propiedades dendroenergéticas de la leña ambas especies? ¿Cuál es la productividad de los diferentes diseños de monocultivo y agroforestería? ¿Qué tipo de fertilización del frijol (biológica o química) ofrece mayor productividad de frijol y cuál es su influencia en el desarrollo de las acacias en los sistemas agroforestales? ¿Qué métodos y modelos permiten analizar la economía de las plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas? ¿Cómo pueden integrarse los aspectos de sustentabilidad ambiental y económica involucrados en plantaciones energéticas? ¿Cuál es el potencial de rentabilidad de los tratamientos experimentales para los propietarios de agricultura comercial y agricultura de subsistencia? Para responder a estas preguntas se partió de varios conocimientos, premisas e hipótesis, que establecieron las bases de la investigación, a los que se hace referencia en los siguientes párrafos.

Para describir el patrón de consumo energético en Cuentepec, esta investigación se basó en la experiencia de otros estudios (Masera, 1995) que desarrollaron metodologías para analizar el patrón de consumo energético en comunidades rurales. En visitas preliminares al poblado se observó que leña y el olote (un rastrojo de maíz) son combustibles de uso doméstico primordial en la comunidad. Las familias de Cuentepec dedican largas jornadas de trabajo para autoabastecerse de leña, en colecta de libre acceso a las fuentes naturales de leña (el bosque secundario), o gastan ingresos monetarios cuando la compran a los leñadores.

En cuanto a la estimación de la biomasa aérea de las acacias, los métodos de regresión simple y multivariada pueden utilizarse para deducir ecuaciones alométricas, a partir de datos generados mediante pruebas destructivas, para estimar la biomasa aérea de ambas especies (total, foliar y leñosa). Con base en la experiencia de otros autores (Chidumayo, 1988; House, 2004), se partió de la premisa de que en este tipo de especies arbóreas, que se ramifican desde la base del árbol, los mejores estimadores de la biomasa son el *área de la base* (AB) y el *área de la cobertura* (AC) (o bien, el diámetro de la base, *db*, y el diámetro de la cobertura mayor, *DCM*). Así mismo, como lo han observado otros estudios de especies similares (Oyenkwelu, 2003; Parresol, 1999), las regresiones múltiples (de más de una variable) pueden ofrecer mejores correlaciones de los datos y las variables predictivas.

Respecto a la calidad energética de la leña de estas especies, este estudio parte del conocimiento empírico de los campesinos, leñadores(as) y usuarios de leña de Cuentepec, que expresaron que la leña de *A. cochliacantha* y de *A. pennatula* tiene propiedades dendroenergéticas sobresalientes que las hacen convenientes para su aprovechamiento. Ellos (y ellas) afirman que “*estas especies ofrecen leña que produce buen calor, poco humo y hace buena brasa*”. Adicionalmente, expresan que “*ambas especies son adecuadas para prosperar en las condiciones de suelo degradado y sequía de la zona, y tienen un crecimiento comparativamente más rápido que el de otras especies leñosas (tepeguajes, palo dulce, encino)*”.

Los tratamientos experimentales se diseñaron para probar las hipótesis de que las asociaciones agroforestales de estas especies de acacias, y la biofertilización, ofrecen la posibilidad de obtener mayor productividad simultánea de biomasa arbórea y frijol *flor de mayo* (*Phaseolus vulgaris* L.). Como *A. cochliacantha* y *A. pennatula* son dos especies leguminosas, nativas de la región, se presume que pueden ser adecuadas para su asociación agroforestal porque tienen la capacidad de aportar nitrógeno naturalmente, por participar en el proceso de fijación biológica de nitrógeno. Así mismo, se propuso probar la hipótesis de que la biofertilización con el consorcio de inóculo bacteriano (*Rhizobium etli*) y micorrizas arbusculares (*Glomus intrarradices*), ofrece la posibilidad de incrementar la productividad del frijol y mejorar la productividad de biomasa de las acacias cuando se asocian con el frijol en sistemas agroforestales. Otros estudios (García-Barrios L. y Ong, 2004), han mostrado que los sistemas agroforestales presentan asociaciones de

facilitación y/o competencia entre las especies, de manera que su desempeño puede afectarse o favorecerse significativamente.

El componente económico del proyecto de investigación se basa la teoría de modelos económicos que integran variables biológicas y económicas en funciones matemáticas del valor (VPN) de los sistemas forestales, agrícolas y agroforestales. Después de revisar algunos de los modelos existentes (en la literatura), en la tesis se amplía el modelo de Cacho *et al.*, (2002) para tratar explícitamente los casos de los monocultivos agrícolas y forestales, pero también se extiende el modelo para incluir variables del manejo con podas y captura de carbono. Se presenta una discusión de los métodos para solucionar el modelo, mostrando la complejidad del tema y algunas funciones de producción biológica aplicables al modelo.

Ya que las plantaciones energéticas (forestales y agroforestales) son sistemas muy complejos (por el número de variables e interacciones dinámicas presentes), el estudio de su sustentabilidad ambiental y económica representa una tarea de gran complejidad. Ésta tesis propone un metamodelo de análisis dentro de un marco integrado de sustentabilidad ambiental y económica, que incluye: bases de datos, herramientas de análisis biofísico, modelos de simulación, análisis económico-financieros y campos experimentales. No se incluyó un componente de sustentabilidad social debido a que los aspectos que se cubren son suficientemente amplios como objetivos de investigación doctoral, pero el conocimiento que se genera permitiría su integración.

Además, se propuso realizar un ejercicio de análisis financiero (exploratorio) para analizar los factores que influyen en la viabilidad de algunos de los sistemas productivos del campo experimental *El Colorín*. Este análisis se llevó a cabo con el propósito de analizar si los sistemas agroforestales de *A. pennatula* y frijol, biofertilizados, ofrecen ventajas en cuanto a su rendimiento financiero, con respecto a la fertilización química y los monocultivos.

Para llevar a cabo esta tesis doctoral fue necesario realizar investigación teórica y experimental multidisciplinaria, integrando diferentes campos de la ciencia y el conocimiento, como la biología, la ingeniería energética, las ciencias agronómica y forestal, diferentes métodos de planificación social participativa, así como la economía y

las finanzas. Puede decirse que muchos de los resultados de esta tesis se deben a la colaboración entre investigadores y campesinos: desde el planteamiento, establecimiento y mantenimiento del proyecto, hasta la obtención de resultados.

El trabajo de campo de esta investigación se realizó con la colaboración y en el territorio de la comunidad de Cuentepec, un poblado del municipio de Temixco, Estado de Morelos. Cuentepec es una comunidad indígena nahua, de aproximadamente 3,120 habitantes, con la singularidad de mantener vigente su cultura indígena y ser la única en el Estado de Morelos donde aproximadamente el 99% de la población habla náhuatl. La principal actividad económica en Cuentepec es la agricultura de subsistencia. Al igual que otros pueblos indígenas, Cuentepec es un poblado que concentra gran parte de su población en situaciones de pobreza y extrema pobreza (INAFED, 2005).

El trabajo de campo inició con un acercamiento a las autoridades e informantes clave del pueblo. Como producto de visitas de conocimiento del lugar, así como de varias reuniones participativas y entrevistas con autoridades, campesinos, mujeres, leñadores(as), estudiantes y ancianos, se identificó la necesidad de mejorar la oferta de leña para consumo doméstico, pero también las necesidades de mejorar el auto-abastecimiento de alimentos y la generación de ingresos monetarios. Se realizaron varias asambleas con los comuneros y ejidatarios del pueblo, en las que se expuso la propuesta del establecimiento de un campo experimental de sistemas forestales, agroforestales y agrícolas, para generar alternativas productivas de leña, alimentos e ingresos monetarios. Los ejidatarios facilitaron el terreno en el predio *El Colorín*, donde se estableció el campo experimental del proyecto.

El estudio de la dinámica del consumo de combustibles domésticos se basó en una muestra de 49 familias de Cuentepec que permitieron realizar entrevistas a profundidad y cuantificar el consumo de leña, olote y gas LP durante una semana. Con base en este estudio se reconoció que en Cuentepec la leña y el olote son los principales combustibles de uso doméstico para la cocción de alimentos; también, se constató que el auto-abastecimiento de leña es una actividad que demanda gran parte de la fuerza de trabajo familiar en la recolección de libre acceso en los lomeríos y barrancas del territorio de Cuentepec.

En el campo experimental se estableció un mosaico de 8 tratamientos que se replicaron en cuatro parcelas cada uno. Cada parcela con acacias tiene un espaciado de 2x5 m entre acacias, que mantiene cuatro filas de 11 acacias (espaciadas a 2 m cada una) y tres callejones de 5 m de ancho entre las filas de acacias. En los tratamientos agroforestales, se cultivó frijol en los callejones entre acacias. El crecimiento (dimensional) y mortalidad de las plantas se registró periódicamente durante 16 meses de observación en una base de datos (en *Excel Microsoft Office MR*) de todas las plantas. La cosecha de frijol se registró en muestras que colectaron la cosecha en espacios de 3x3 m. Únicamente se trabajó con la cosecha de la temporada de lluvia de 2005, pues la cosecha de la temporada de 2006 fue siniestrada por la intrusión de ganado bovino. Para probar los efectos de los tratamientos sobre la productividad se emplearon varios métodos de análisis estadístico: la prueba Shapiro Wilk, el análisis de varianza (ANOVA), la prueba *t de student*, la prueba de Fischer y la prueba de Tuckey (HSD). El análisis estadístico se realizó empleando el Software *Estatística 6.0*.

Para desarrollar ecuaciones alométricas, a partir de regresiones simples y múltiples, fue necesario generar datos mediante pruebas destructivas de individuos arbóreos de ambas especies del campo experimental. Para ello se adaptaron los procedimientos que sugirieron Stewart y Salazar (1992) de corte, registro del peso, seccionamiento en componentes (foliar y leñoso) y secado en estufa a 70° C durante 48 horas. Las pruebas destructivas se basaron en una muestra de 12 individuos de *A. cochliacantha* y 12 de *A. pennatula*, más la adición de algunas de las ramas más grandes, como lo hizo Acosta-Mireles *et al.*, (2002), para llegar a muestras de tamaño de 21 elementos de *A. cochliacantha* y 20 elementos de *A. pennatula*. Las pruebas destructivas se realizaron cuando las plantas tenían 18 meses de crecimiento. Por otro lado, el análisis de los parámetros termoquímicos se basó en muestras más pequeñas: el análisis del poder calorífico superior (HHV_d , en base seca) se realizó en muestras de 10 piezas de madera de cada especie, colectadas de individuos del campo experimental *El Colorín*, y de 8 piezas de madera (de cada especie) colectadas del bosque secundario de la región norponiente del Estado de Morelos. Los análisis de composición elemental y de metales pesados contaron solo con tres muestras (debido al costo de esta prueba).

Después de haber hecho una revisión, discusión y ampliación de los modelos de análisis económico de plantaciones forestales y agroforestales, se propuso realizar un ejercicio de

análisis financiero (exploratorio) para analizar los factores que inciden en viabilidad de los tratamientos experimentales agroforestales y monocultivos con *A. pennatula* y frijol establecidos en *El Colorín*. Una limitante que parecía impedir el análisis fue el periodo de datos tan corto con el que se contó: tan solo 16 meses de registro del crecimiento de las acacias. Esta limitante impidió contar con la función de productividad biológica a lo largo de varios años, por lo que no era posible predecir la cosecha futura de biomasa. Sin embargo, con el propósito de realizar un ejercicio de análisis exploratorio, se decidió adoptar como supuesto de análisis que la cosecha se realizaría a los 10 años de crecimiento de las plantas⁸. A partir de esta suposición se establecieron varios criterios metodológicos. En primer lugar, con la colaboración de leñadores de Cuentepec, se buscaron en el bosque secundario de la zona de Cuentepec árboles de *A. pennatula* que tuvieran aproximadamente 10 años de edad (de acuerdo a la experiencia de los leñadores). Aplicando las ecuaciones alométricas, desarrolladas a partir de las muestras destructivas, se hizo una aproximación de la biomasa aérea de esta muestra de árboles del bosque secundario. A partir de la información que se derivó de esta muestra, se aplicó un método de construcción de escenarios de producción que se desarrolló en esta tesis para explorar tres casos de análisis de producción. El análisis financiero exploró además la sensibilidad ante variaciones en los precios de la leña, el frijol y de los subsidios PROARBOL y PROCAMPO.

La tesis desarrolla el proyecto de investigación a lo largo de 6 capítulos. El Capítulo 1 presenta una revisión y discusión del estado del conocimiento sobre plantaciones energéticas, incluyendo las técnicas silvícolas en uso y las implicaciones ambientales y socioeconómicas de la silvicultura intensiva y la forestería social. También, una revisión de los argumentos más relevantes del debate entre la bioenergía, la producción de alimentos y la conservación ambiental. Se expone también una síntesis del estado del conocimiento en agroforestería, destacando su potencial para la bioenergía sustentable.

El Capítulo 2 presenta el contexto socio-económico y ambiental de la investigación de campo y el diseño experimental de los tratamientos en el sitio *El Colorín*. Se incluyen

⁸ Verjwist y Telenius (1999) mencionan que 10 años es un tiempo de rotación frecuente en plantaciones energéticas de rotación corta.

aspectos socio-económicos, geográficos y ambientales de Cuentepec y de sus alrededores. Se describe el diseño de los tratamientos experimentales, así como los métodos de producción de plántulas y su introducción al campo en el sitio. El capítulo aporta una discusión sobre el diseño experimental y los métodos de introducción al campo.

El Capítulo 3 presenta los resultados de investigación de modelos alométricos y caracterización energética de las especies *A. cochliacantha* y *A. pennatula*. Con base en pruebas destructivas y análisis de regresión uni-variados y multivariados, se desarrollan ecuaciones alométricas que permiten estimar la biomasa aérea en pie (*total, leñosa y foliar*) de ambas especies en función de parámetros dimensionales (*diámetro de la base y cobertura mayor*). También se presentan los resultados del análisis de caracterización termoquímica-energética de ambas especies, incluyendo: análisis inmediato, análisis elemental y análisis de elementos pesados. Con base en las ecuaciones alométricas y los parámetros termoquímicos que resultaron de ambos análisis, se presentan ecuaciones generales para estimar la energía disponible y el carbono almacenado en la biomasa en pie de individuos y plantaciones energéticas de ambas especies.

El Capítulo 4 presenta los resultados del análisis de productividad biológica de los tratamientos experimentales (forestales, agroforestales y agrícolas). Se muestra un resumen de los cambios en el suelo como efecto de los tratamientos experimentales; se evalúa la supervivencia y producción de biomasa leñosa de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* en los tratamientos experimentales, convirtiendo los resultados a su equivalente de energía potencial y carbono capturado. Así mismo, se evalúa la producción de frijol en los tratamientos agroforestales y en los monocultivos, analizando particularmente la respuesta de este cultivo a la asociación con las acacias y al tipo de fertilización: biológica o química. Se realiza también un análisis para comparar la eficiencia del uso del suelo, desde el punto de vista de productividad biológica entre los tratamientos (LER, *Land Equivalence Ratio*).

El Capítulo 5 presenta una revisión de la teoría económica forestal y expone un modelo de análisis económico de plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas, que se amplía para el manejo con podas y la captura de carbono. El capítulo discute las ventajas y desventajas de las opciones para resolver el modelo, ya sea por métodos de

programación dinámica, modelos empíricos y analíticos, y mediante modelos de simulación biofísica. También se presenta un meta-modelo que integra los modelos de análisis económico y financiero con los campos experimentales, los modelos de simulación biofísica y el análisis de ciclo de vida para llegar a la evaluación de la sustentabilidad en un marco de integrado que permita mejor toma de decisiones y avanzar hacia nuevos diseños de sistemas productivos.

El Capítulo 6 presenta un método analítico para construir escenarios de producción futura de biomasa forestal. El método permite proponer escenarios de producción de biomasa de un tratamiento alternativo respecto a un tratamiento de referencia, deduciendo los parámetros de la especie (en el sitio) del modelo de Gamponia y Mendelsohn (1987). Para aplicar el método se requiere conocer la comparación de la biomasa de los tratamientos en un tiempo inicial, así como una referencia de la producción futura del tratamiento de referencia en un tiempo final (o de análisis). A partir de los resultados de la construcción de escenarios se realiza un ejercicio de análisis financiero exploratorio comparativo, únicamente de los tratamientos del sitio experimental *El Colorín* con *A. pennatula* y *Phaseolus vulgaris*.

Finalmente, se presenta un resumen de los resultados y las conclusiones de este trabajo de investigación.

Capítulo 1

Estado del arte de la producción de biomasa mediante plantaciones para el sector energético.

La biomasa se puede definir como el material orgánico que producen las plantas mediante el proceso de fotosíntesis, en el que sintetizan luz, agua y CO₂, quedando almacenada la energía solar en enlaces químicos que a su vez puede ser liberada mediante procesos como la combustión, la digestión o la descomposición (McKendry, 2002). La biomasa ha sido el combustible primordial de la humanidad a lo largo de su historia. En la actualidad, mantiene su importancia como combustible tradicional en comunidades rurales y urbanas de muchos países en desarrollo, pero en los últimos años se ha revelado su potencial como combustible alternativo de uso comercial e industrial, que si es producido bajo criterios de sustentabilidad puede ofrecer energía renovable de emisiones neutras (Larson y Kartha, 2000).

El término *cultivo agroenergético* o *cultivo de agrocombustibles* define a los sistemas agrícolas que aprovechan especies herbáceas, de cereales, de oleaginosas o de azúcares, que se cultivan anualmente con el objetivo de aprovechar su alto contenido de azúcares, almidones¹ y lípidos para convertirlos en biocombustibles (Trossero, 2001). Algunos ejemplos de especies de uso agroenergético son el maíz (*Zea mays*), el sorgo dulce (*Sorghum saccharatum*), la remolacha (*Beta vulgaris*) y la colza (*Brassica napus*). A diferencia de los cultivos agroenergéticos, la silvicultura² ofrece alternativas de cultivos para la producción de biomasa para obtención de energía con especies perennes, conocidas también como *plantaciones energéticas* (FAO, 2004). Las plantaciones energéticas producen biomasa leñosa (lignocelulósica), constituida principalmente por celulosa y en menor porcentaje por hemicelulosa y lignina³

¹ El almidón es un polisacárido de reserva alimenticia, predominante en las plantas, que proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Los almidones comerciales se obtienen principalmente de las semillas-cereales: maíz, trigo, arroz; y de algunas raíces y tubérculos: yuca, mandioca, papa, remolacha. (<http://es.wikipedia.org> 10/11/2007).

² La silvicultura se define como el arte y ciencia del control del establecimiento, crecimiento, composición, salud y calidad de los bosques y tierras leñosas para satisfacer, sobre bases de sustentabilidad, las diversas necesidades y valores de los dueños y de la sociedad (Helms, 1998).

³ La madera se constituye principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa (Sjöström, 1993). La celulosa es material orgánico más abundante en la tierra; está constituida por cadenas largas de moléculas (polímeros) formadas por unidades de glucosa unidas por átomos de oxígeno; forma parte de

(Graham *et al*, 1995). A los sistemas de producción de biomasa para la bioenergía que utilizan especies perennes leñosas se les conoce también como *plantaciones de leña* o *plantaciones dendroenergéticas* (FAO, 2004).

Con el reciente auge de la biomasa como biocombustible moderno se ha levantado un fuerte debate mundial cuestionando la sustentabilidad de la bioenergía, principalmente por sus efectos en la seguridad alimentaria cuando se utilizan especies comestibles, y por los posibles impactos ambientales y sociales si no se realiza bajo criterios de sustentabilidad (Fritsche *et al.*, 2006, Haverkort *et al.* 2007)

Este capítulo presenta una revisión y discusión del estado del conocimiento científico sobre plantaciones energéticas, incluyendo las técnicas silvícolas en uso y sus implicaciones ambientales y socioeconómicas. También desarrolla la discusión sobre la competencia por el uso del suelo entre la bioenergía y la producción de alimentos, y propone a los sistemas agroforestales como una alternativa para proveer sustentablemente materia prima a la producción de bio-energía.

Los objetivos particulares del capítulo son:

- 1) Presentar una revisión de las técnicas de manejo silvícola intensivo y discutir sus implicaciones ambientales y socioeconómicas.
- 2) Exponer el debate de la competencia de la bioenergía con otros usos del suelo y discutir las alternativas para su conciliación.
- 3) Presentar el estado del conocimiento en agroforestería y discutir las oportunidades que ofrece como alternativa hacia la bioenergía sustentable.
- 4) Destacar en conclusiones las oportunidades para la investigación experimental en producción de biomasa sustentable para la bioenergía.

los tejidos estructurales de las plantas (aproximadamente por un 50% de la madera es celulosa). La lignina es un polímero amorfo que representa aproximadamente de un cuarto a un tercio de la madera; constituye una parte integral de las paredes celulares, dando rigidez y estructura a las plantas. La hemicelulosa es un heteropolisacárido que también forma parte de las paredes del tejido vegetal; puede representar un 29% de la madera.

1.1 Panorama general de las plantaciones energéticas

A partir de la crisis del petróleo de la década de 1970 y de la preocupación de entonces por el agotamiento de los recursos naturales (Meadows *et al.*, 1972), se consideró viable producir biomasa en plantaciones forestales dedicadas, principalmente con dos objetivos: (1) aumentar la productividad forestal por hectárea, y (2) liberar a los bosques de la presión por la extracción de sus recursos (Krieger, 2001).

En 1996 (UNO, 1996) el avance en el manejo silvícola había mostrado la posibilidad de llegar a producir grandes volúmenes de biomasa por hectárea en plantaciones intensivas (particularmente en el trópico): hasta 70 toneladas por hectárea anuales en sistemas experimentales, mientras que la productividad del bosque bien manejado se encontraba en el rango de 15 a 25 toneladas. La biomasa de plantaciones no representó una alternativa económicamente viable para los países en los que los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón mineral) continuaron siendo abundantes y baratos (Andersson *et al.*, 2002), pero en países sin abundantes recursos energéticos fósiles la biomasa encontró entornos más favorables para su desarrollo como combustible industrial y comercial, como en Brasil y Suecia (IAEA, 2006).

Las plantaciones energéticas tuvieron experiencias mixtas, de fracaso y éxito, cuando atendieron la escasez crítica de leña rural (Andersson *et al.*, 2002), enfrentando obstáculos para competir económicamente con la leña obtenida por libre acceso y competir con el costo de oportunidad de recursos como el suelo y la fuerza de trabajo de otras alternativas con mercados más desarrollados (*e.g.* agricultura) (Hyde y Köhlin, 2000; Cook *et al.*, 2001). Para tener una idea de los factores que llevaron al fracaso a algunas plantaciones energéticas de leña rural, Mead (2001) ha resumido los principales problemas: (1) las plantaciones cambiaron a otros usos más rentables que la energía, (2) los campesinos se desanimaron porque la leña tuvo un precio bajo en el mercado, (3) faltó participación en las comunidades locales, (4) se ignoraron los aspectos sociales (tenencia de la tierra, sistemas de gobierno, necesidades locales, fuerza de trabajo), y (5) no se garantizaron los derechos de propiedad sobre el suelo, los árboles y sus beneficios.

Por otro lado, las plantaciones energéticas de leña han mostrado experiencias de éxito cuando se dedican a satisfacer la demanda de mercados industriales, como el del carbón vegetal para la pequeña y gran industria, y de biomasa para energía en centros

urbanos, como en Brasil, Suecia, Dinamarca y Finlandia (Johansson *et al.*, 2002; Joergensen y Oestegard, 2006; IAEA, 2006). En la actualidad, este tipo de plantaciones continúan siendo económicamente viables y recientemente encuentran mayor demanda por la ampliación internacional del mercado de biocombustibles modernos (IEA Task 30, 2002; EU, 2006). Hooda y Rawat (2006) señalan que en el contexto actual de agotamiento de los recursos fósiles y del calentamiento global, las plantaciones energéticas leñosas pueden proveer biomasa para su uso directo como combustibles tradicionales (leña o carbón vegetal) o para producir biocombustibles modernos (como el biodiesel, etanol, gas de síntesis, o calor y electricidad), sustituir combustibles fósiles y mitigar el calentamiento global.

Mead y Pimentel (2006) compararon la ganancia de energía (antes de la conversión a biocombustibles) de los sistemas de producción de biomasa leñosa (perennes) y de los agrícolas (cultivos anuales), concluyendo que en las especies anuales (incluyendo las oleaginosas y los cereales) la ganancia energética puede ser de <1 a 5, mientras que en las especies leñosas (perennes) la ganancia puede ser de 10 a 25 (incluyendo los fertilizantes, pesticidas, herbicidas, fuerza de trabajo y gasolina/diesel de la maquinaria). Con el fin de optimizar los recursos y maximizar los beneficios, en plantaciones energéticas se prefiere utilizar las especies de mayor productividad primaria neta⁴ en rotaciones cortas⁵ y que sus co-productos puedan aprovecharse económicamente, mejorando así la rentabilidad (Sirén, 1982; Verjwist, 2003).

Anderson *et al.*, (2002) señalan que la tendencia de la producción con plantaciones energéticas se dirige hacia sistemas de mayor intensidad en el uso del suelo: mayor densidad de plantas por hectárea, especies de crecimiento más rápido y técnicas de optimización de recursos. Landsberg *et al.* (1997) indican que las plantaciones de rotación rápida deben optimizar los recursos naturales (ambiental y económicamente), mediante la aplicación de conocimiento teórico y práctico de aspectos biológicos y físicos (e.g. irrigación, control de malezas, fertilización). Verwijst (2003) comenta que este tipo de plantaciones pueden ser mucho más productivas que la mayoría de los

⁴ En las plantas, una fracción de la energía que se asimila mediante la fotosíntesis se libera en el proceso de respiración. A la fracción de biomasa remanente entre los procesos de fotosíntesis y respiración, que queda fija en la planta (fitomasa), se le conoce como productividad primaria neta (Clark *et al.*, 2001).

⁵ En Norteamérica se considera a un sistema forestal de rotación corta cuando su tiempo de corte es de 6 a 10 años; en Europa se considera un tiempo de rotación forestal corto de 3 a 4 años; la diferencia se debe al tipo de especies utilizadas (Culshaw y Stokes, 1995). En esta tesis se manejará el término *rotación forestal corta* a un tiempo de corte ≤ 10 años.

bosques naturales, ofreciendo adicionalmente servicios ambientales para contrarrestar la erosión y contaminación del suelo, mitigar el daño a los acuíferos y otros efectos adversos de la agricultura y la forestería convencionales. Ante las expectativas de producción que se esperan de la silvicultura intensiva para la bioenergía, Fritsche *et al.* (2006) recomiendan que aunada a la necesidad de lograr mayor productividad se requiere asegurar la sustentabilidad de los sistemas productivos.

A nivel global, la producción de madera tiene la tendencia a desplazarse hacia las zonas tropicales y subtropicales, principalmente por las altas tasas de crecimiento que ofrecen algunas especies en las latitudes bajas (Sizer *et al.*, 2005). Los resultados permiten observar una ventaja comparativa de costos a favor de las zonas tropicales: las especies de eucalipto y acacia producen de 20 a 60 m³ por hectárea anualmente, con tiempos de rotación de 5 a 12 años, mientras que en los climas templados y boreales esos niveles se alcanzan solo con las técnicas más intensivas (Sizer *et al.*, 2005). En los climas templados la eficiencia de la fotosíntesis varía de 0.3-1.35%, mientras que en los climas tropicales de 0.5-2.5% (Hooda y Rawat, 2006).

Por otro lado, la forestería social (Hyde y Köhlin, 2000) ofrece una gama de alternativas y estrategias de manejo y producción que los pequeños campesinos pueden aprovechar, como el manejo sustentable del bosque, los sistemas agroforestales y los sistemas silvo-pastorales. Si se promueve la producción de biomasa mediante programas de forestería social, incluyentes de los pequeños y medianos propietarios, desarrollando y transfiriendo tecnología rural apropiada, se promovería el autoabastecimiento de leña y alimentos, generando ingresos por la venta de los excedentes de producción, generando empleos y cuidando también la conservación ambiental (Kartha y Larson, 2000).

1.2 La silvicultura intensiva

En silvicultura intensiva el principal objetivo de las plantaciones es producir el mayor volumen de biomasa con calidad uniforme para proveer materias primas para uso industrial. Cuando se produce biomasa de forma intensiva para la bioenergía se utilizan técnicas que son comunes a las plantaciones forestales para la industria, pero la variedad de especies aprovechables se amplía a cualquier especie con potencial energético, por lo que se pueden incluir especies que no son de interés para la

industria maderera, para pulpa o de interés alimentario, e.g. arbustos y otras especies de las zonas tropicales secas y húmedas (Mead, 2001).

No obstante que ha habido avances significativos en el mejoramiento de las especies de interés industrial, aun queda un amplio margen para mejorar las técnicas silvícolas y continuar con pruebas experimentales de muchas especies (Brown, 2000a). Entre los aspectos por mejorar se incluyen: selección adecuada de las especies a los sitios de producción, técnicas de germinación y propagación de las especies, mejoramiento selectivo de las especies, técnicas de almacenamiento de plántulas, técnicas de crecimiento en vivero, manejo mejorado en el traslado y establecimiento, preparación de sitios y mejoramiento del suelo, control de malezas, técnicas de cosecha, métodos de fertilización, mantenimiento, experimentación con nuevas especies, control biológico y químico de plagas y de enfermedades (Brown, 2000b).

En la silvicultura intensiva para la industria, y también en las plantaciones energéticas de rotación rápida, se prefieren las especies de crecimiento rápido. Las especies más utilizadas en las zonas tropicales y subtropicales son eucaliptos, pinos, acacias y leucaenas, mientras que en las zonas templadas y boreales se utilizan principalmente álamos, sauces y coníferas (entre otras). El uso de especies exóticas ofrece ventajas que han incentivado su introducción en diferentes países (Cossalter y Pye-Smith, 2003); sin embargo, la introducción de especies exóticas se ha criticado porque puede representar diferentes riesgos (especialmente en monocultivos extensos): inducir la pérdida de biodiversidad, fomentar el desarrollo de plagas y enfermedades (WRM, 1999; Cossalter y Pye-Smith, 2003). Las plantaciones con especies exóticas muestran al inicio mayor resistencia a los ataques de plagas, pero una vez que los consumidores se adaptan a la especie pueden aprovecharse de las condiciones de monocultivo (Carrere y Lohman, 1996).

Las experiencias han mostrado que la introducción de especies exóticas merece cuidados especiales (Fritsche *et al.*, 2006). En general, los monocultivos y las especies exóticas son más propensos a los daños causados por las plagas que las plantaciones mezcladas y las especies nativas (Ciesla, 2001); las especies nativas están más adaptadas a las condiciones de estrés locales, por lo que reducen los riesgos catastróficos por plagas, enfermedades y sequías (Kartha y Larson, 2000). En Brasil, la regulación ambiental requiere que el 25% del área de las plantaciones se mantenga con la vegetación original para ayudar a la preservación de la biodiversidad y los ecosistemas originales (Kartha y Larson, 2000).

Para el sector de la bioenergía, Verjwist (2003) recomienda apoyar el uso de especies nativas para reducir los riesgos por pérdidas por plagas y/o enfermedades (y evitar así el uso de pesticidas). Considerando que es necesario minimizar riesgos ambientales, preservar la biodiversidad, fortalecer la autonomía por contar con las fuentes originales de germoplasma y el conocimiento de su manejo, se plantea que desarrollar técnicas para domesticar, mejorar y propagar especies nativas para su uso en plantaciones energéticas debiera ser una prioridad para el desarrollo de la bioenergía en los países tropicales (Verjwist, 2003).

La silvicultura intensiva utiliza frecuentemente herbicidas y plaguicidas sintéticos para controlar malezas, pastos y especies invasoras que compiten con severidad por recursos como agua, nutrientes y luz, inhibiendo el desarrollo de los árboles o arbustos de interés, y para controlar las plagas, hongos y fauna nociva para las plantaciones (Ketchum y Rose, 2003). El uso de herbicidas y plaguicidas químicos (especialmente los de espectro amplio) es una práctica que se ha criticado por sus impactos negativos al ambiente (FSC, 1996); por ejemplo, en el suelo afecta a los micro-organismos (y también a los organismos de niveles superiores), que son necesarios para el ciclaje de nutrientes y el balance ecosistémico (Kartha y Larson, 2000). Otras técnicas silvícolas, orgánicas no-intensivas, que han mostrado resultados efectivos, incluyen diferentes técnicas, como la aplicación de coberturas vegetales contra las hierbas competidoras (McDonald y Helgerson, 1990).

Frecuentemente se asocia la calidad de la madera con su densidad (Brown, 2000a), pero se sabe que en las especies arbóreas existe considerable variación en las características de la madera: entre una especie y otra, en un mismo individuo entre la corteza y el núcleo, entre la copa y la base, entre los individuos de un mismo lote, y entre los que están en la misma región o los de regiones diferentes (Kellison, 1967). Algunos de los aspectos de la calidad de las propiedades de la madera pueden abordarse desde la ingeniería: aplicando nuevas tecnologías, ampliando el uso a más especies o para hacerla más homogénea se aprovechan piezas pequeñas, como los chips y los pellets (Sizer *et al.*, 2005).

La ciencia genómica y la biotecnología brindan la oportunidad de aplicar innovaciones que pueden contribuir significativamente al mejoramiento de la calidad y de la producción silvícola en diferentes condiciones ambientales. Hasta el momento, la investigación biotecnológica ha dado mayor importancia a las plantaciones

comerciales de uso industrial (Zobel *et al.*, 1989, Sizer *et al.*, 2005), incluyendo en los aspectos de mayor interés: cambios en las tasas de crecimiento y en la forma de los árboles, densidad de la madera, las dimensiones de las fibras (longitud, diámetro, grosor de la pared celular), el contenido de celulosa, lignina, humedad y resina, resistencia a enfermedades y plagas, la tolerancia a los herbicidas y la capacidad del sistema radicular (entre otros) (Sizer *et al.*, 2005). Algunos autores sugieren que la investigación en genética y biotecnología debe incluir aspectos de bioseguridad (Peña y Séguin, 2001).

La fertilidad del suelo es un tema muy importante a considerar para el sostenimiento de los sistemas silvícolas, especialmente en las plantaciones intensivas, en las que la mayor parte de la materia orgánica se retira, restituyendo artificialmente los nutrientes para la siguiente rotación (Anderson *et al.*, 2002). Desafortunadamente, en la silvicultura intensiva se aplican frecuentemente fertilizantes en exceso, considerando una extravagancia los estudios del balance de nutrientes (Tucker, 1999). Respecto a la fertilidad del suelo, varios autores afirman que la disponibilidad de nitrógeno es la principal limitante de la productividad en las plantas en la mayoría de los ecosistemas (Seastedt y Knapp, 1993; Vitousek *et al.*, 1997). Además del nitrógeno, la disponibilidad de fósforo (P) y potasio (K) en el suelo también son factores críticos en la productividad de biomasa, y aún más si se trata de sistemas agrícolas o forestales intensivos (Tucker, 1999). Cuando estos nutrientes se aportan de forma inorgánica difícilmente logran asimilarse o fijarse, como es el caso del nitrógeno, que aproximadamente 50% se transfiere al ambiente, irrumpiendo el ciclo natural: se lixivia al suelo y a los sistemas acuáticos, provocando contaminación y desequilibrios ecológicos (Matthew y Hammond, 1999). El uso de fertilizantes inorgánicos libera además óxido nitroso y dióxido de carbono durante su fabricación, lo cual reduce el balance de captura de carbón atmosférico, especialmente si en su fabricación se utilizan combustibles fósiles como el carbón mineral o el gas natural (Joergenssen y Kristensen, 1996; Fritsche, 2006)⁶.

Mientras que la deficiencia de fósforo solo puede ser corregida por la adición externa de fertilizante mineral o de materia orgánica (Marschner, 1995), el nitrógeno puede reabastecerse de forma natural mediante el proceso de fijación biológica de nitrógeno (FBN) que realizan las leguminosas en asociación con bacterias (rizobios) (Budowsky

⁶ En algunos casos el 90% del costo directo de la fabricación del nitrógeno inorgánico lo constituye el dispendio de gas natural (Wenzel, 2004).

y Russo, 1997). En las plantaciones intensivas se utilizan árboles leguminosos, como *Acacia magnium*, para aportar nitrógeno de forma natural (Kartha y Larson, 2000).

Ante las implicaciones ambientales positivas y negativas que se pueden derivar de la producción de plantaciones energéticas intensivas, la Unión Europea ha establecido estándares ambientales de producción sustentable de biomasa: cumplir requisitos de bajo impacto al suelo por los insumos utilizados (fertilizantes, pesticidas y herbicidas), baja lixiviación de nitratos y mantenimiento de la biodiversidad (Joergensen, 2003). La investigación sobre la sustentabilidad de la bioenergía es una ciencia muy joven aún, hay muy pocos datos de campo y estudios experimentales, y en particular, en los países en desarrollo su evaluación es más compleja porque la diversidad de climas no permiten la simple aplicación de los estándares del norte (con climas y suelos diferentes) (Fritsche *et al.*, 2006). Al respecto, la Agencia Internacional de Energía (IEA) ha establecido los programas “Task 30: *Plantaciones de rotación corta para sistemas de bioenergía*” y “Task 31: *Sistemas forestales convencionales para la producción sustentable de bioenergía*”⁷ con el objetivo de compartir, analizar, disseminar y promover el conocimiento científico que lleve a la sustentabilidad económica y ambiental de la producción de biomasa para la energía.

Considerando que la bioenergía intensiva puede ocupar extensiones considerables de suelo a nivel global, Fritsche *et al.*, (2006) han hecho las siguientes recomendaciones para minimizar la degradación del suelo:

- excluir cultivos energéticos que impliquen labranza intensiva (tractores y maquinaria) y la cosecha bajo tierra (como la remolacha);
- establecer límites máximos a la pendiente del suelo en plantaciones energéticas;
- establecer las tasas máximas de extracción de residuos agrícolas y forestales (específicas para el tipo de suelo y de cultivo);
- establecer niveles aceptables de la extracción de residuos agrícolas y forestales, de manera que no se afecte negativamente el humus y el contenido de carbón del suelo;
- aplicar prácticas de manejo y de cosecha que reduzcan los riesgos de erosión y compactación del suelo (sistemas de irrigación y equipo de cosecha);
- sistemas de irrigación que prevengan la salinización, excluyendo las especies y sistemas que no sean adecuados para el tipo de suelo;

⁷ <http://www.ieabioenergytask30.org/> y <http://www.ieabioenergytask31.org/>

- definir estándares sobre la toxicidad y biodegradabilidad de los agroquímicos, prefiriendo los fertilizantes orgánicos/biológicos y el control de plagas sin químicos.

Adicionalmente, la sustentabilidad social en la producción de biomasa (principalmente en los países en desarrollo) se plantea como un reto de mayor complejidad, ya que implica el acuerdo de intereses entre diferentes actores sociales en temas como: la distribución de los beneficios, cambios o mantenimiento de los derechos de propiedad de la tierra, la competencia y las consecuencias de la bioenergía con otros usos del suelo (e.g. alimentos) y los programas de extensión rural (agrícolas y forestales) (e.g. transferencia de tecnología y minimización de riesgos de inversión por factores económicos y ambientales) (Kartha y Larson, 2000). Algunos de estos aspectos son abordados por la Agencia Internacional de energía en el programa Task 29: *Socioeconomic drivers in implementing bioenergy projects*⁸.

Aunque hay entusiasmo por los cultivos y plantaciones de alto rendimiento, Lanzini (2006) comenta que “*alta productividad*” no es el factor más importante para los pequeños campesinos de países en desarrollo; puede tener más sentido plantar especies de menor rendimiento si sus productos son de uso multipropósito (para diversificar los ingresos, minimizar el riesgo y cubrir necesidades de autoconsumo), si se requieren menos insumos o trabajo, si la especie fija nitrógeno o si permite rotar los cultivos o asociarlos.

1.3 Competencia de la bioenergía por el uso del suelo

Macedo (2006), señala que la posibilidad de utilizar tierra para producir energía se debe considerar en el contexto de otras necesidades de uso del suelo, siendo la producción de alimentos la de mayor peso social, aunque otros aspectos como la preservación de la biodiversidad, los ecosistemas, el cuidado del paisaje y la hidrografía merecen también atención pertinente.

Ya que la preocupación por la producción de alimentos es uno de los aspectos de mayor peso en el debate de la competencia por el uso del suelo, conviene mencionar el concepto de seguridad alimentaria. Aunque es muy amplio y no existe una definición

⁸ www.ieabioenergytask29.org/

universal, de acuerdo a la Cumbre Mundial sobre la Alimentación de 1996, 112 jefes de estado y 186 dirigentes de países señalaron que existe seguridad alimentaria cuando *“todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos, inocuos y nutritivos, para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana”* (FAO, 1996).

De forma más específica, Macedo (2006) señala que las políticas de los países para garantizar el suministro seguro de alimentos a su población (al menos en lo que se llama “alimentos básicos”) se basan en dos estrategias principales: (1) lograr la capacidad para ser autosuficientes en la producción de alimentos, promoviendo la inversión en infraestructura, el desarrollo tecnológico, los subsidios y la protección de mercados (entre otros), o (2) mantener las condiciones económicas adecuadas para poder adquirir e importar los alimentos necesarios sin tener que producirlos localmente, dedicando la economía a los sectores con ventajas comparativas en la exportación, aunque se tengan que importar los alimentos si estos ofrecen desventajas comerciales en su producción.

Se ha mencionado que el uso de granos y productos involucrados en la cadena alimenticia son los que presentan mayores impactos en la seguridad alimentaria si se utilizan para la producción de biocombustibles. Se argumenta que las fluctuaciones en los precios de los biocombustibles afectan la disponibilidad y accesos a los alimentos, ya que a un aumento en la demanda (y en los precios) de los biocombustibles corresponde un aumento (del precio) y disminución de la oferta de los alimentos (elasticidad directa y cruzada de la demanda) (Newell, 2007)⁹. La oposición social (Oxfam, 2007)¹⁰ al uso de cereales, azúcares y oleaginosas, de uso alimenticio, ha motivado mayor investigación para mejorar la producción y conversión en biocombustibles de biomasa no involucrada en las cadenas alimenticias.

La investigación más reciente está desarrollando nuevas tecnologías para producir biocombustibles a partir de la biomasa lignocelulósica en lugar de utilizar los

⁹ Newell (2007) muestra que existe una correlación entre la elasticidad en el precio del etanol y los precios de los alimentos (incluyendo harinas, carnes, lácteos y otros derivados), ya que se inducen cambios en la demanda y precios de granos y azúcares involucrados en las cadenas alimenticias.

¹⁰ Oxfam es una organización líder a nivel mundial en la ayuda humanitaria de emergencia con programas de desarrollo a largo plazo en comunidades vulnerables; forma parte de un movimiento mundial para poner fin al comercio injusto y combatir el cambio climático (<http://www.oxfam.org/es>).

almidones (Sung y Cheng, 2002; Saha, 2003; Wyman, 2007). Como los almidones se producen a partir del cultivo de cereales, la sustitución por biomasa lignocelulósica puede reducir considerablemente la competencia con los alimentos por el suelo agrícola; la biomasa de lignina y celulosa puede provenir de residuos municipales, residuos agrícolas, del aprovechamiento de los bosques, de plantaciones energéticas y de otros biomas (e.g. pastizales, matorrales). Considerando que la madera es la fuente de biomasa más abundante (Knauf, 2006), el aprovechamiento de los bosques y las plantaciones dedicadas son alternativas que ofrecen mayor potencial de productividad para la bioenergía.

El *Internacional Food Policy Research Institute* (IFPRI) llevó a cabo un estudio para evaluar los efectos de la producción de biocombustibles sobre la disponibilidad y consumo de alimentos utilizando el modelo IMPACT (*Internacional Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade*) (von Braun y Pachauri, 2006). El estudio mostró que en un escenario de gran escala de *“crecimiento agresivo de la producción de biocombustibles”* los precios de muchos alimentos se incrementarían considerablemente. En otro escenario se evaluó el impacto de los biocombustibles utilizando tecnologías de celulosa, observando que mitigarían considerablemente el impacto en los mercados de los sistemas alimentarios. El IFPRI concluyó que el efecto de la expansión de los biocombustibles sobre la seguridad alimentaria depende mucho de las políticas relacionadas con la tecnología que se utilice y de la forma en que se realice el comercio (von Braun y Pachauri, 2006).

Desde el punto de vista tecnológico, von Braun y Pachauri (2006) argumentan que la demanda de alimentos y biocombustibles llevarán a la optimización tecnológica del uso del suelo; que aún existe amplio margen para incrementar la productividad por hectárea, de manera que puede cubrirse tanto la demanda de alimentos como la de biocombustibles; sin embargo, reconocen que aunque haya más comida *per capita*, el problema continúa siendo de inequidad social, ya que la población en inseguridad alimentaria no tiene los ingresos para comprar la comida que necesita (Lanzini, 2006). También argumentan (von Braun y Pachauri, 2006) que si la producción de biomasa llega a proveer ingresos a los pequeños campesinos, la bioenergía puede contribuir favorablemente en mejorar la seguridad alimentaria.

Otra alternativa importante para reducir la competencia por el uso del suelo consiste en la recuperación de suelos degradados que no son de interés para la producción de alimentos o la conservación natural. Al respecto, la producción de biomasa con

especies perennes (lignocelulósicas) puede contribuir significativamente en la reducción de la erosión, ya que después del segundo año de establecimiento pueden aportar cantidades significativas de cobertura vegetal (Wiesenthal *et al.*, 2006). Desde 1996, la ONU mencionó que esta alternativa ofrecería efectos ambientales positivos, ya que hay extensas zonas deforestadas y de suelos degradados que pueden ser utilizadas por plantaciones energéticas (UNO, 1996). En 2006, Lal estimó que aún con bajos rendimientos se puede obtener potencialmente un 25% de la energía global primaria que se produce mediante plantaciones energéticas en suelos degradados, con oportunidades de restauración ambiental e impulso a la economía de comunidades rurales.

Aunque las plantaciones energéticas pueden establecerse en suelos degradados con la tecnología adecuada, el costo de oportunidad que representa dejar a un lado la producción en tierras de buena fertilidad y el costo de rehabilitación de los suelos degradados son dos obstáculos económicos que merecen atención. Azar *et al.*, (2000) investigaron la comparación de la economía de las plantaciones de eucalipto en el noreste de Brasil en buenas vs malas tierras, mostrando que el valor de las altas cosechas que se esperan en las tierras más fértiles compensa el costo adicional que implica su compra, por lo que los inversionistas optarán por las mejores tierras y no por las degradadas; por ello, Azar *et al.*, (2000) insisten que las políticas gubernamentales deben garantizar el adecuado ordenamiento territorial y el uso de tierras degradadas.

El propósito de hacer compatible el uso en gran escala de los biocombustibles modernos con los objetivos del desarrollo sustentable requiere un movimiento concertado hacia la agricultura sustentable, favoreciendo el bienestar de pequeños campesinos de zonas rurales pobres de países en desarrollo (Sagar y Kartha, 2007). Si la oportunidad que ofrecen las plantaciones energéticas para mejorar la rentabilidad del suelo se aprovecha para el desarrollo de pequeños campesinos y propietarios originales, puede fomentarse un desarrollo más sustentable, con mayores posibilidades para preservar el medio ambiente y distribuir los beneficios con mayor equidad (Larson y Kartha, 2000). Algunos ejemplos de forestería social en Brasil, India y Australia muestran que las comunidades forestales y las cooperativas de pequeños propietarios de granjas forestales venden la producción de biomasa a empresas de pulpa, taninos y bioenergía en condiciones de mayor equidad y sustentabilidad ambiental (Larson *et al.*, 1994; SCMCC, 2003; Hooda *et al.*, 2006).

Considerando estos elementos, resulta pertinente realizar cuidadosamente la planificación del uso del suelo con relación a la bioenergía. Se plantea necesario considerar las innovaciones tecnológicas, los efectos económicos sobre las cadenas alimenticias, así como las implicaciones sociales y ambientales de cada uso del suelo.

1.4 Agroforestería: una alternativa para la bioenergía sustentable

La agroforestería es la combinación (simultánea o secuencial) de árboles con cultivos agrícolas, o con ganadería, en sistemas productivos donde los componentes árbol-cultivo o árbol-ganadería se complementan y forman en conjunto sistemas de uso de la tierra, ecológica, social y económicamente sustentables (ICRAF¹¹).

Una de las cualidades más importantes que ofrece la agroforestería es la capacidad para producir simultáneamente alimentos y productos arbóreos (frutas, madera, leña, forraje). En una descripción un poco más amplia, los Sistemas Agroforestales Simultáneos (SAFS) asocian simultáneamente árboles o arbustos con cultivos anuales de alimentos, buscan mejorar y mantener la productividad biológica de los ecosistemas, conservar la fertilidad del suelo (reduciendo o sustituyendo el uso de agroquímicos por el ciclaje de nutrientes orgánicos) en sistemas donde se favorecen las interacciones árbol-cultivo-suelo de facilitación¹² y mutualismo, al mismo tiempo que controlan las interacciones de competencia e interferencia (Ong y Leakey, 1999; García-Barrios L. y Ong, 2004; Jama *et al.*, 2004).

Los beneficios que se esperan de la agroforestería varían entre sistemas específicos, pero de forma generalizada se le reconoce como una estrategia que puede ser adoptada principalmente por pequeños campesinos, por lo que también se considera importante para lograr los Objetivos de Desarrollo del Milenio¹³: *erradicar la pobreza y*

¹¹ www.icraf.org World Agroforestry Center (International Council for Research in Agroforestry).

¹² Una planta es facilitadora de otra cuando modifica una o más condiciones del ambiente biofísico de forma favorable para la segunda (Ong y Leakey, 1999).

¹³ Los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (Millennium Development Goals) son el resultado del análisis y revisión de la situación y problemática del mundo por la Organización de las Naciones Unidas; establecen objetivos para erradicar la pobreza y el hambre (ODM 1), lograr la educación primaria universal (ODM 2), equidad de género (ODM 3), reducir la mortalidad infantil y mejorar la salud materna (ODM 4 y 5), combatir el SIDA (ODM 6), asegurar la sustentabilidad ambiental (7) y desarrollar alianzas globales para el desarrollo (ODM 8) (www.un.org/millennium).

el hambre, promover la equidad social y la sustentabilidad ambiental (Cassman *et al.*, 2005; Leakey *et al.*, 2005; Garrity, 2007). Puede decirse que por sus múltiples funciones contribuye en diversificar los ingresos de los campesinos, ayuda a que la producción de alimentos sea más rentable, mejora la calidad de los alimentos, conserva la biodiversidad, mejora y mantiene los recursos del suelo, mejora la calidad del agua y participa en la captura de carbón atmosférico (Cassman *et al.*, 2005; Leakey *et al.*, 2005). Sin embargo, la adopción de la agroforestería ha sido limitada en los países en desarrollo, principalmente por obstáculos que pueden clasificarse en cinco categorías: incentivos económicos, condiciones biofísicas, riesgo e incertidumbre, preferencias de los hogares y limitados recursos patrimoniales (Mercer y Pattanayak, 2003). No obstante esto, y aunque aparentemente los costos de oportunidad de la agroforestería sobrepasan los beneficios inmediatos de la conservación del ambiente, se afirma que hay motivos suficientes para promover su adopción y práctica (e.g. diversificación de los ingresos, sustitución de fertilizantes agroquímicos) (Pattanayak y Mercer, 1996).

El potencial que ofrece la agroforestería para recuperar suelos degradados y mejorar la fertilidad ha sido ampliamente reconocido por contribuir favorablemente en el mantenimiento del ciclaje de nutrientes y en la actividad biológica, mejorar la retención de humedad, reducir la toxicidad por acidificación, proteger al suelo de altas temperaturas, reducir la escorrentía por la lluvia y erosión, así como mejorar la estructura y permeabilidad del suelo (Kang, 1992; Place *et al.*, 2005).

La agroforestería se ha consolidado como una estrategia que maneja un conjunto de técnicas para transferir nutrientes entre los elementos de los sistemas: el decaimiento de las hojas, la aplicación regular de las podas como cobertura del suelo y la poda de las raíces para disminuir la competencia con los cultivos asociados y aportar nutrientes orgánicos al suelo; a estos sistemas se les llama también *barbechos mejorados* ("*improved fallows*") (Jama *et al.*, 2004; de Costa *et al.*, 2005). Aunque en varios casos se ha observado que estos sistemas mejoran significativamente el contenido de nutrientes y de carbón orgánico en el suelo (Kass *et al.*, 1997; de Costa *et al.*, 2005), es necesario evaluar continuamente sus condiciones de manejo: la productividad del follaje de los árboles, su contenido de nutrientes, la fertilidad del suelo y su capacidad para aprovechar las coberturas (Jama *et al.*, 2004).

Desde el punto de vista de sustentabilidad socioeconómica, la agroforestería tiene mayores posibilidades que la silvicultura intensiva para atender las desigualdades y

promover el desarrollo sustentable; a diferencia de la plantaciones industriales intensivas puede ser adoptada preferentemente por campesinos con pequeñas parcelas (Garrity, 2004). Algunas de las actividades sobresalientes de la investigación en agroforestería son la búsqueda y experimentación para domesticar especies de interés económico-ambiental en sus ambientes locales, desarrollar sistemas de manejo ecosistémico que aprovechan los conocimientos y participación de los campesinos (Leakey e Izac, 1996), la innovación en nuevas tecnologías de producción y procesamiento, así como el desarrollo de la comercialización de los nuevos productos y servicios (Russell y Franzel, 2004; Leakey *et al.*, 2005).

Estado del conocimiento en agroforestería

En la década de 1970, la Organización de Naciones Unidas, a través de la FAO¹⁴, promovió la agroforestería al observar que la revolución verde agrícola y el sector forestal convencional para la industria no habían sido efectivas para solucionar los problemas de seguridad alimentaria y degradación de los recursos forestales de muchas comunidades rurales de los países en desarrollo (Steepler y Nair, 1987).

A finales de la década de 1970, y durante la década de 1980, se promovieron los sistemas agroforestales con el optimismo de contar con una estrategia ambientalmente sustentable, idónea para mejorar la autosuficiencia de los campesinos con escasos recursos (Steepler, 1987). Se pensaba que para obtener los beneficios de la agroforestería bastaba con aplicar un diseño adecuado, tener éxito en el establecimiento y continuar con un manejo adecuado (Kang, 1992). En esa época se establecieron las bases del conocimiento científico de la agroforestería como campo de estudio, partiendo de los conocimientos y métodos que ofrecían las ciencias biológicas y las tecnologías disponibles de la silvicultura y agricultura convencionales. Entre los campos de estudio que se utilizaron se incluyen: botánica, genética, fisiología vegetal, bioquímica, técnicas de reproducción y propagación, métodos de fertilización, técnicas de control de plagas y malezas, tecnologías de cosecha y los métodos de análisis estadístico, entre otros. Sin embargo, con el paso del tiempo se reconoció que el estudio de la agroforestería se debe abordar desde una perspectiva sistémica, interdisciplinaria.

¹⁴ FAO, (Food and Agriculture Organization); Organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas.

Al inicio de la investigación en agroforestería se estudiaron la botánica y genética de las especies de mayor interés y se amplió el conocimiento a nuevas especies, incluyendo muchas arbustivas (Burley, 1987); se sistematizaron las colecciones de germoplasma y se mejoraron los métodos de reproducción, incluyendo la polinización y germinación de semillas bajo control y se avanzó en el mejoramiento genético de las especies de mayor interés (Brewbaker, 1987). En bioquímica, la investigación amplió el conocimiento de las sustancias de muchas plantas y de sus potenciales aplicaciones, analizando también las propiedades alelopáticas¹⁵ de las especies de mayor interés con la intención de definir sus efectos en diseños con diferentes combinaciones de especies (Brewbaker, 1987). Más adelante, al inicio de la década de 1990, se compilaron los resultados del análisis de tejido vegetal de muchas especies tropicales para evaluar su contenido de nutrientes en el material foliar y evaluar su capacidad para el ciclaje, pero se reconoció la existencia de mucha variabilidad en los resultados debido a la influencia de diferentes factores: las técnicas de manejo, las fuentes y heterogeneidad de las semillas de origen (germoplasma), el ambiente físico y biótico de las plantas, las edades y etapas de desarrollo, las condiciones de la investigación, secciones de muestreo y las técnicas de extracción de las muestras (Drechsel y Zech, 1992).

En cuanto al estudio de la fisiología vegetal y la biología molecular, inicialmente se investigaron procesos como la fijación biológica de nitrógeno (FBN), la fotosíntesis y la transpiración, la resistencia a la sequía y la respuesta de los estomas a la radiación solar en casos específicos (Huang *et al.*, 1985). En este campo, la investigación experimental llevó a conocer los factores limitantes del desarrollo de ciertas especies bajo condiciones específicas del suelo, en gradientes de diferentes variables: acidez, disponibilidad de nutrientes, salinidad, contaminación y permeabilidad (Hutton, 1983 y 1984).

Como se ha mencionado, de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, la disponibilidad de nitrógeno representa el factor limitante más importante en la mayoría de los ecosistemas. Frecuentemente, en los SAFS, se aprovecha el nitrógeno fijado biológicamente por los rizobios para movilizarlo y transferirlo a otros elementos del sistema (Klass, 1997). La Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) es el

¹⁵ La alelopatía es la capacidad que tienen las plantas para inhibir bioquímicamente el desarrollo de otras plantas, con las que compiten por recursos como agua, nutrientes en el suelo y luz (Ferguson y Rathinasabapathi, 2003).

proceso en el que microorganismos específicos incorporan el nitrógeno atmosférico (en su forma di-atómica N_2) de la biósfera hacia compuestos químicos asimilables por las plantas. La FBN es un proceso vital para el medio ambiente y la humanidad: en la nutrición, el contenido proteico de los alimentos depende del nitrógeno, en ecología es muy importante en las dinámicas fisiológicas de microorganismos y de organismos de nivel superior, y económicamente representa una alternativa viable para sustituir los fertilizantes inorgánicos en la agricultura y la silvicultura (Zahran, 1999).

Aunque se han estudiado diferentes procesos de la FBN, la asociación rizobio-leguminosa (bacteria-planta) ha sido objeto de extensas investigaciones por sus aplicaciones en la agricultura y la silvicultura (Danso, 1992; Zahran, 1999). En las leguminosas, la FBN se lleva a cabo con base en la relación simbiótica de la planta con los rizobios, que hospedados en nódulos en las raíces realizan la reducción de nitrógeno atmosférico (N_2) a amonio (NH_4^+), con la mediación de la enzima bacteriana nitrogenasa para traspasarlo completamente a la planta (hospedador), que a su vez lo transfiere al ambiente de forma orgánica (Olivares, 2007). La transferencia de nitrógeno planta-ambiente puede darse por varias vías: (i) exudados de las raíces, (ii) micorrizas (hongos), (iii) decaimiento y descomposición de hojas y tallos, (iii) aplicación de la poda de leguminosas como cobertura del suelo, (iv) descomposición de los nódulos de las raíces y (v) por los desechos de animales (Peoples *et al.*, 1995).

Profundizando en la investigación sobre FBN se ha estudiado y experimentado sobre la identificación, aislamiento y cultivo de los simbioses específicos de las leguminosas para aplicarlos en condiciones específicas de competencia o de limitantes ambientales (Budowsky y Ruso, 1997). Aplicando los métodos y avances de la biología molecular y la ciencia genómica se han identificado en algunas especies vegetales rizobios específicos con tolerancia a diferentes condiciones ambientales; estos, se han aislado, caracterizado (y/o modificado) y se han cultivado para lograr niveles óptimos de fijación de nitrógeno, aplicándolos, por ejemplo, en sitios de estrés ambiental (e.g. acidez o alcalinidad, salinidad, sequía, calor, deficiencias de nutrientes) o de alta competencia con las cepas nativas (Zahran, 1999).

Otro factor limitante del crecimiento de las plantas que ha merecido atención científica es el fósforo (P) (Kass, 1997). Algunos estudios han mostrado que el uso de micorrizas puede ser más efectivo para mejorar el aprovechamiento del fósforo en las leguminosas que aplicarlo directamente (Danso *et al.*, 1992), pero también se ha

observado que la aplicación de coberturas vegetales, ricas en este nutriente, pueden incorporarlo de forma orgánica de forma efectiva y económica (Jama *et al.*, 2004).

Respecto a la dinámica de las interacciones entre las asociaciones de especies, inicialmente se realizaron estudios experimentales que contribuyeron a definir algunos efectos de asociaciones específicas (Drechsel *et al.*, 1991; Karim *et al.*, 1991); sin embargo, al inicio de la década de 1990 se reconoció que el conocimiento de las interacciones planta-cultivo-suelo era aun incipiente (Kang, 1992). En cuanto a los flujos y balances de nutrientes, se observó que los sistemas bajo regímenes continuos de extracción de la producción eran capaces de soportar mayor movilización en el flujo de nutrientes que los sistemas que mantienen a los árboles completos (sin aprovechamiento) que requieren bajos niveles de insumos adicionales. Se concluyó que las podas, la cantidad de nutrientes adicionados y presentes en el suelo, así como la aplicación de coberturas afectan las dinámicas de FBN (Kass *et al.*, 1997). También se identificó que en muchas ocasiones la agroforestería no ha tenido éxito debido a que el desempeño de las especies depende de muchos factores ambientales, difíciles de determinar y manejar, por lo que se ha reconocido la importancia de ampliar la investigación a una mayor diversidad de especies, de casos de estudio y de condiciones ambientales (Karim *et al.*, 1991; Kass *et al.*, 1997), así como a domesticar especies nativas (Okello, 2001).

Entre los principales problemas de la agroforestería se identificó que la FBN depende de diferentes factores limitantes, algunos específicos de las especies, como la edad de las plantas y el tipo de *rhizobia* participantes; otros factores limitantes pueden ser de tipo ambiental, como la humedad del suelo, la estación climática, la temperatura, la fertilidad del suelo, la toxicidad en el suelo y/o la presencia de micorrizas; así mismo, se identificó que las técnicas de manejo, como las podas, el tiempo de rotación y el diseño espacial influyen en la FBN (Danso *et al.*, 1992). Además, se reconoció que la arquitectura (estructura) y las técnicas de manejo de las raíces (sistema radicular) influyen en las dinámicas de competencia y facilitación en las interacciones árbol-cultivo-suelo (podas intensivas pueden disminuir la capacidad de FBN) (Danso *et al.*, 1992; Van Noordwijk y Purnomodishi, 1995). Una conclusión importante en la década de 1990 fue el reconocimiento de que debido a la asociación de especies en la agroforestería se pueden presentar efectos positivos de facilitación y/o efectos negativos de competencia, y que con base en este hecho los beneficios potenciales de la agroforestería se pueden esperar en función del balance de las interacciones

(positivas y negativas) de los componentes, considerando las restricciones biofísicas de cada sistema y el manejo utilizado (Sánchez, 1995).

Con estas consideraciones se dio mayor atención a la investigación del análisis de las interacciones planta-cultivo-suelo, reconociendo la necesidad de dar mayor relevancia a las interacciones bajo la superficie del suelo, a los efectos de la poda de raíces, así como a los efectos de los árboles sobre las plagas, herbívoros y patógenos. Al final de la década de 1990 la investigación en las interacciones biofísicas en agroforestería se concentró en: (1) ampliar el conocimiento sobre la diversidad de especies arbóreas, (2) determinar las interacciones entre sistemas en diferentes escalas espaciales y temporales, (3) mejorar la comprensión de las interacciones subterráneas, (4) evaluar las implicaciones ambientales de la agroforestería, en especial en los trópicos, y (5) desarrollar programas de manejo para maximizar los beneficios (Rao *et al.*, 1998; García-Barrios L. y Ong, 2004).

La revisión de muchas experiencias de la década de 1990 hizo evidentes tres hechos importantes (García-Barrios L. y Ong, 2004): (i) los árboles pueden proveer productos cruciales para los campesinos y facilitar los cultivos asociados, pero también pueden ejercer mayor competencia de lo que se había pensado, (ii) las prácticas dedicadas a lograr mayor productividad arbórea pueden aumentar la competencia con los cultivos, y (iii) el balance de efectos positivos y negativos son específicos del sitio. La investigación de estos hechos llevó a considerar los sistemas agroforestales imitando los procesos dinámicos y de sucesión de los ecosistemas naturales (Ong y Leakey, 1999). Desde esta perspectiva se generaron nuevos conceptos, modelos predictivos y herramientas de evaluación dinámica.

El programa WaNuLCAS (van Noordwijk y Lusiana, 1999) es un ejemplo de una plataforma de integración y análisis de sistemas agroforestales: utiliza métodos y teorías de sistemas complejos para modelar los sistemas agroforestales, ofrece la posibilidad de simular dinámicamente procesos del crecimiento de las plantas, subterráneos y sobre el suelo, en escalas espaciales como en el campo, dentro de un ambiente biofísico dinámico, provee versatilidad para experimentar con un amplio rango de cultivos y especies arbóreas, ofrece diferentes opciones de sistemas de manejo y permite modificar funciones de pedotransferencia (van Noordwijk y Lusiana, 1999). La habilidad de WaNuLCAS para simular los sistemas agroforestales sin tener que realizar difíciles y costosos experimentos de campo, o en su caso, permitiendo

compararlos o validarlos, lo ha consolidado como una importante herramienta de investigación y manejo aplicado (van Noordwijk *et al.*, 2004).

En cuanto a la captura de carbono, aunque se ha reconocido el potencial de la agroforestería para capturar y mitigar los efectos del CO₂, hay rezagos en la valoración de sus servicios, principalmente por la escasa disponibilidad de datos cuantitativos de sistemas específicos (Albrecht y Kandji, 2003). Los métodos de cuantificación del carbón almacenado por sistemas forestales y agroforestales se basa principalmente en modelos alométricos que permiten estimar la biomasa en pie mediante pruebas destructivas (Stewart y Salazar, 1992; Clark *et al.*, 2001) y en modelos computacionales (como el CO2FIX) que permiten el análisis y evaluación de las dinámicas de los flujos de carbón, desarrollados recientemente (Schelhaas *et al.*, 2004). Como en casi todos los sistemas agroforestales los resultados son específicos del sistema, se necesita ampliar la base de casos de estudio para contar con datos de diferentes climas, especies y sistemas de manejo. Como estrategia de captura de carbono, la agroforestería cuenta con almacenes en diferentes niveles: en la biomasa aérea del árbol, en las raíces superficiales y profundas, y en el carbón que se aporta al suelo por el decaimiento de hojas y raíces (Schelhaas *et al.*, 2004).

García-Barrios L. y Ong (2004) señalan que la revisión de experiencias muestra un fracaso parcial de los SAFS cuando la competencia por recursos es crítica y se utilizan especies de rápido crecimiento con densidades relativamente altas, especialmente en casos donde es vital mantener la productividad de los cultivos asociados y predominan la sequía y los suelos degradados. Plantean que se necesita desarrollar una perspectiva flexible para diseñar sistemas agroforestales, manejando la densidad de los árboles y las técnicas de manejo en función de: (a) las limitantes ambientales y económicas y (b) el valor relativo de los cultivos y de los productos y servicios de los árboles.

Por otro lado, la investigación también ha avanzado en la integración del componente humano en el manejo de las interacciones agroforestales. Se ha comprendido que las motivaciones socioeconómicas influyen fuertemente en la forma en que los campesinos perciben y manejan las interacciones árbol-cultivo, y que las recomendaciones basadas solamente en la productividad del terreno son insuficientes para el adecuado manejo y sustentabilidad en el largo plazo (García-Barrios L. y Ong, 2004, Garrity, 2005). El desarrollo de la investigación en sistemas agroforestales, con prácticas de manejo adecuadas, presenta retos importantes para atender las

necesidades de las familias campesinas y para ampliar las escalas de aplicación, logrando a su vez la sustentabilidad ante las dinámicas ambientales y sociales.

El potencial de la agroforestería en la bioenergía

Dado que los países de las zonas tropicales y sub-tropicales cuentan con una ventaja comparativa en la Productividad Primaria Neta de biomasa, la bioenergía representa una oportunidad viable para el desarrollo sustentable. Sin embargo, las técnicas de manejo y las condiciones de desarrollo del sector bioenergético no pueden ser iguales a las de los países del norte, donde los climas, mercados y relaciones entre los actores involucrados son muy diferentes a las de los países tropicales. Por ello, uno de los principales retos de la bioenergía consiste en desarrollar sistemas de producción de biomasa que sean económicamente rentables, adecuados a los climas y ecosistemas locales en zonas tropicales y subtropicales, garantizando a su vez la producción sostenida y el cuidado del ambiente, y sobre todo que sean adoptables y convenientes para los campesinos y comunidades de los países en desarrollo (Mead, 2001).

La base biológica de especies tropicales ofrece una amplia diversidad de alternativas para diseñar sistemas adecuados a diferentes condiciones edafológicas, climáticas y económicas. Varios autores (Gutteridge y Shelton, 1994; Mead, 2001; Ramashandra y Kamakshi, 2005) señalan que muchas leguminosas arbóreas tropicales cumplen con las características deseables para la producción de biomasa leñosa en plantaciones energéticas: son de rápido crecimiento, fijan nitrógeno, son fáciles de establecer, pueden ser podadas, tienen alto poder calorífico, su leña produce poco humo, tienen capacidad de supervivencia en diferentes sitios (incluyendo los suelos degradados) y son de uso multipropósito. Algunas de estas leguminosas leñosas tropicales, adecuadas para su aprovechamiento en bioenergía y agroforestería, son: *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Calliandria calothyrsus*, *Albizia lebeck*, *Acacia farnesiana*, *A. cochliacantha*, *A. auriculiformis*, *A. pennatula* y *A. senegal*. La experiencia muestra que en sistemas agroforestales bien manejados se pueden obtener cantidades considerables de leña, fertilizando también los cultivos asociados con la aplicación del follaje como cobertura; en Kenia, por ejemplo (Jama *et al.*, 2004), un sistema con *Calliandria calothyrsus* puede producir 10 t ha⁻¹ de leña a partir del tercer año de establecimiento: suficiente para cubrir las necesidades una familia de 6 o 7 personas, con la posibilidad adicional de vender los excedentes. Adicionalmente, explorar la posibilidad de aprovechar arbustos y especies nativas locales para la

producción sustentable de leña es una alternativa atractiva y potencialmente viable (Okello *et al.*, 2001).

La agroforestería no pretende sustituir a las plantaciones industriales intensivas de rotación corta para la energía, pero debido a la vulnerabilidad y riesgos (ambientales) de los monocultivos de gran escala (Kerr, 2002), y por la necesidad de mantener la producción de alimentos y promover el desarrollo rural con equidad (Garrity, 2005), se visualiza como una estrategia adecuada para la bioenergía sustentable, tanto en países desarrollados (Current *et al.*, 2007) como en países en desarrollo (Mead, 2001). Sin el obstáculo de capital que representa la silvicultura industrial intensiva, los SAFS permiten producir biomasa leñosa de acuerdo a la escala de los recursos patrimoniales de los campesinos, sin dejar de producir alimentos en sus terrenos ni desatender la satisfacción de leña para uso doméstico (Pandey, 2007); además, permiten generar ingresos adicionales por la venta de los productos multipropósito de las especies arbóreas y por la venta de excedentes de leña en los mercados locales (o regionales) de carbón vegetal o de leña, que puede ser para uso industrial. Dependiendo del capital disponible, de las motivaciones de los campesinos, de su organización y de las condiciones del mercado, la agroforestería y la forestería social, pueden ofrecer la posibilidad de intensificar y extender la producción de biomasa leñosa para atender en una escala de mayor volumen los mercados de leña industrial y de biomasa para los biocombustibles modernos.

La promoción de la agroforestería se percibe como un medio para conciliar los conflictos de uso del suelo, ya que ofrece la posibilidad de atender las necesidades de diferentes actores sociales y se le reconoce como una estrategia adecuada para rehabilitar el suelo y mitigar el cambio climático mediante la captura de carbón (Schroeder *et al.*, 1993, Albrecht y Kandji, 2003; Pandey, 2007). Con un adecuado manejo para mantener un balance energético positivo (minimizando el uso de agroquímicos), los sistemas agroforestales tienen el potencial para proveer biomasa para fabricar biocombustibles con balance de emisiones neutro que desplacen una fracción de los combustibles fósiles (Hooda y Rawat, 2006).

1.5 Conclusiones

A continuación se presentan conclusiones derivadas de la revisión y discusión presentada en este capítulo.

- En este capítulo se destacó la importancia y necesidad de desarrollar sistemas de producción de biomasa (principalmente de biomasa leñosa) apropiados para los pequeños campesinos de países tropicales en desarrollo. Aunque en los países tropicales existen ventajas comparativas para la producción de biomasa (eficiencia fotosintética y bajos costos del suelo y de la fuerza de trabajo), desde la perspectiva del pequeño campesino hay aspectos que pueden ser más importantes en la toma de decisiones, como la elección de especies de uso multipropósito, preferir sistemas con bajos requerimientos de insumos (sin fertilizantes ni maquinaria) y mantener la satisfacción de necesidades de autoconsumo, como la leña doméstica y los alimentos. Algunos casos de estudio (e.g. Jama *et al.*, 2004) han mostrado que la forestería social tiene alternativas (como la agroforestería) con la posibilidad de abastecer necesidades de autoconsumo alimentario y energético, y generar ingresos por la venta de excedentes de producción.
- La competencia de la bioenergía por el uso del suelo presenta varios aspectos de interés socioeconómico y ambiental, de los que se destacan algunos. La revisión del tema mostró que para cada tipo de cultivo y biocombustible, la formulación de políticas y recomendaciones requiere analizar específicamente las consecuencias en las cadenas alimenticias, la conservación del hábitat natural y las implicaciones sociales de los monocultivos, pero a su vez considerar los aspectos positivos cuando existe la posibilidad de recuperación de suelos degradados, generación de ingresos y producción de alimentos. El buen manejo de plantaciones energéticas debiera inducir la conservación del medio ambiente, garantizar la seguridad alimentaria, minimizar los conflictos por la tenencia del suelo y generar beneficios para todos los actores sociales. Al respecto, la revisión del tema ha permitido concluir que la agroforestería es una estrategia que ofrece la posibilidad de conciliar los objetivos de producción de biomasa para la energía y producción de alimentos.
- Desde el punto de vista biológico, la agroforestería ofrece oportunidades para la producción de biomasa para la bioenergía. Varias especies arbóreas leñosas tropicales ofrecen cualidades idóneas para utilizarse en plantaciones energéticas y en sistemas agroforestales: alto poder calorífico, bajas emisiones de humo, fijan

nitrógeno biológicamente, son de uso multipropósito, muestran rápido crecimiento, pueden prosperar en suelos degradados y/o se pueden asociar con cultivos de alimentos.

- Aunque el avance en el conocimiento científico de los SAFs ha logrado contribuciones significativas, aun hay grandes necesidades de investigación para comprender muchas de las dinámicas biofísicas de las interacciones planta-cultivo-suelo en los SAFs, para domesticar especies nativas con la participación de los campesinos, para desarrollar biofertilizantes para diferentes cultivos y condiciones ambientales, mejorar el ciclaje de nutrientes y modelar las interacciones de los componentes.
- La investigación en SAFs también puede profundizar en el desarrollo de modelos y herramientas de evaluación cuantitativa de las diversas variables biofísicas, en la estimación de la productividad de biomasa, así como en el registro y evaluación económica-financiera de sistemas productivos específicos.

Capítulo 2

Antecedentes socioeconómicos, diseño experimental e introducción al campo.

En los últimos años ha crecido el interés en la agroforestería como una alternativa de mitigación del cambio climático y por la oportunidad que ofrece de producir biomasa para sustituir combustibles fósiles (Abdula, 2005). La cuestión de la bioenergía moderna se plantea en el reto por desarrollar sistemas de producción y conversión de biomasa que sean económica, ambiental y socialmente sustentables. Se ha mencionado que la agroforestería es una alternativa que puede contribuir sustancialmente en los países en desarrollo, donde predominan pequeños campesinos que practican agricultura de subsistencia, para lograr objetivos como la seguridad alimentaria y el mantenimiento de servicios ambientales relacionados con la captura de carbono y agua (Garrity, 2004).

Este capítulo presenta los antecedentes y la descripción del proyecto de investigación sobre plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas que se realizó en el campo experimental *El Colorín*, en el territorio de la comunidad indígena nahua de Cuentepec, en el Estado de Morelos. La comunidad de Cuentepec mantiene vivos muchos de sus usos y costumbres tradicionales, tanto de gobierno y cultura como de economía familiar: el 99% de la población habla lengua náhuatl y utiliza la leña como el principal combustible de uso doméstico. La recolección de leña y el cultivo de alimentos son quizá las principales actividades económicas de las familias. En este pueblo es evidente la necesidad de mantener la producción de alimentos, la provisión de leña sustentable y la generación de ingresos monetarios.

El capítulo presenta los antecedentes generales del proyecto, el diseño experimental, así como la descripción de los métodos utilizados en el establecimiento y mantenimiento de las plantaciones energéticas.

Los objetivos particulares del capítulo son los siguientes:

- 1) Presentar el contexto socio-económico de Cuentepec y su situación en cuanto al consumo de biomasa como energético rural.
- 2) Presentar los antecedentes geográficos y ambientales del campo experimental.
- 3) Describir el diseño de los tratamientos experimentales, así como los métodos de producción de plántulas e introducción al campo.
- 4) Hacer una discusión sobre los antecedentes de la plantación, el diseño experimental y los métodos de análisis que deben desarrollarse.

2.1 Contexto socioeconómico

Cuatepec es un pueblo del municipio de Temixco, Estado de Morelos, con población indígena nahua; único en el Estado de Morelos en el que 99% de los habitantes hablan la lengua náhuatl (CDI, 2005). Aunque se encuentra relativamente cerca de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Cuernavaca (a 15 km en línea recta o a 45 minutos de trayecto en automóvil), el territorio de Cuentepec se encuentra entre el sistema de barrancas del Glacis de Buenavista que durante mucho tiempo lo mantuvo aislado geográficamente de la metrópoli. Así como otras poblaciones indígenas del Estado de Morelos, concentra población en situaciones de pobreza y extrema pobreza (INAFED, 2005). Además del mantener vigente la lengua náhuatl, Cuentepec manifiesta su singularidad cultural en diferentes aspectos de la vida cotidiana, como la vestimenta de las mujeres, los rituales (agrícolas, civiles, religiosos) y sus fiestas patronales (Landázuri, 1997); también en su forma de gobierno (Paz, 2005), en el manejo de los recursos naturales e incluso en la preferencia por la leña sobre otros combustibles al cocinar.

Propiedad de la tierra

El territorio de Cuentepec se gobierna bajo dos regímenes de tenencia del suelo: ejidal¹ y comunal². La superficie total del territorio de Cuentepec es de 10,346

¹ Los bienes ejidales son las tierras, bosques y aguas concedidas mediante resolución presidencial, sentencia del Tribunal Superior Agrario o mediante la aportación de terrenos para la constitución de nuevos ejidos. Los bienes ejidales son susceptibles de uso y aprovechamiento de forma individualizada, de acuerdo con la propia resolución o sentencia, o de conformidad con las decisiones tomadas por la asamblea (Procuraduría Agraria, 2005).

hectáreas (has), de las que 7200 son de uso ejidal y 3146 son terrenos comunales (Landázuri-Benítez, 1997). En 1999, la propiedad ejidal benefició oficialmente a 421 ejidatarios en un total de 4678 hectáreas, mientras que en 2001 el padrón de tierras comunales quedó conformado por 194 beneficiarios en una extensión de 2389 hectáreas (Paz, 2005). Documentos sobre la tramitación de tierras (Registro Agrario Nacional, Cuentepec; citado por Paz, 2005) clasifican a las tierras ejidales de Cuentepec de tipo cerril y de pasto, haciendo referencia a su baja calidad, como excesivamente pobres, deslavadas, delgadas y pedregosas, señalando que únicamente un 10% son aptas para cultivos de temporal: las que se ubican en las mesetas de las lomas que separan las barrancas. La agricultura con riego se practica en una porción de tierra de tan solo diez hectáreas, administrada por un grupo de 60 campesinos (comuneros y ejidatarios) (Paz, 2005).

Población y actividades económicas³

En 2004 Paz (2005) condujo un censo de viviendas en Cuentepec, registrando un total de 3126 personas en el poblado. En el censo predominó la población joven: el 50% de individuos se concentra en grupos de menos de 20 años y poco más del 60% son menores de 24 años. Prevalece el patrón de vivienda de familia extendida patri-virilocal, en el que la familia de los hijos varones casados habita en el mismo predio (vivienda) de los padres, aunque mantienen economías separadas. El patrón más

² Los bienes en el régimen comunal se caracterizan porque la titularidad corresponde a la comunidad; su aprovechamiento es derecho de todos los miembros, de manera colectiva, a menos que la asamblea decida establecer porciones de terreno individual. Los terrenos de propiedad comunal son inalienables, imprescriptibles e inembargables, excepto que se aporten para la constitución de sociedades civiles o mercantiles. La comunidad, mediante el acuerdo de la asamblea podrá cambiar al régimen ejidal (Procuraduría Agraria, 2005).

A partir de 1992, con la reforma al Artículo 27 de la Constitución Mexicana, se modifica el régimen ejidal, autorizando la certificación de parcelas individuales y el permiso para que los campesinos puedan repartir, heredar, rentar o vender su tierra por fracciones sin comprometer todos sus derechos. Con este cambio, las decisiones sobre el destino de las parcelas bajo el régimen ejidal pueden considerarse de índole individual; en cambio, bajo el régimen comunal las decisiones de propiedad y manejo de las parcelas deben ser producto de los acuerdos de la asamblea (Procuraduría Agraria, 2005).

³ La información de esta sección se tomó del Informe Técnico del Censo de Vivienda en Cuentepec (Paz, 2005).

frecuente es el de dos hogares por vivienda, aunque se llegó a encontrar el caso de diez hogares en un predio.

Las condiciones de escolaridad que prevalecen en el poblado son precarias. La mayor parte de la población ha cursado niveles escolares correspondientes a algunos grados de primaria, aunque esto se debe a que la población es predominantemente joven, ya que en la actualidad se cuenta con mayor oferta educativa (preescolar, primaria, secundaria y bachillerato) (Paz, 2005). Aunque la mayoría de los niños y jóvenes acude a la escuela, esto no sucedió con los adultos mayores a 45 años, que seguramente se encuentran en el grupo que no cuenta con estudios (el 13.85% de la población total) (Paz, 2005).

La principal actividad económica de la localidad es la agricultura de subsistencia para el autoconsumo, a la que se dedica el 22% de la población (678 personas). El principal cultivo es el maíz (80%) y en segundo lugar el sorgo (20%), cultivados principalmente para el autoconsumo (directamente o indirectamente para alimentar el ganado); adicionalmente se cultiva frijol, chile y cacahuate (Paz, 2005).

La ganadería se considera también una actividad económica importante en la localidad (Paz, 2005). El ganado pastorea en pastizal abierto de uso común, incluyendo tierra de comuneros y de ejidatarios, que en total suma una extensión de más de 2,000 hectáreas. Además del ganado de los propietarios de Cuentepec, se pastorea ganado de los poblados vecinos: Ahuatenco (Estado de México), Miacatlán y de la cabecera de Temixco (Morelos). Como producto de un convenio entre pueblos, Ahuatenco abastece de agua a Cuentepec a cambio de que su ganado pastoree en los terrenos de Cuentepec; sin embargo, no se sabe cuánto ganado de Ahuatenco pastorea en los terrenos de Cuentepec (Paz, 2005). También se crían aves de corral y puercos.

Otra actividad económica importante es el trabajo asalariado fuera de la localidad. En 80% de los hogares al menos una persona se emplea en trabajos fuera de Cuentepec: en el sector de la construcción, como jornaleros agrícolas, en trabajos domésticos y en el comercio eventual (Paz, 2005). Otras actividades económicas son la producción de artesanías de alfarería y la venta de escobas hechas con varas silvestres.

No obstante la cercanía de Cuentepec con la ciudad de Cuernavaca, su población se encuentra en situación de pobreza y marginación social. Las fuentes de empleo asalariado son muy escasas en el poblado y el ingreso económico es muy precario, el

10% de la población adulta no cuenta con ingresos, el 16% recibe menos de un salario mínimo, el 48% recibe de uno a dos salarios mínimos y el 16% recibe de dos a cinco salarios mínimos (INEGI, 2000). Un indicador notable de la marginación social es el índice de mortalidad infantil: en el año 2000 la mortalidad de niños nacidos de mujeres entre 15 y 49 años era del 12.67% (INEGI, 2000).

Servicios

Se realizaron visitas al poblado y sus alrededores, y reuniones con los campesinos, reconociendo el estado de los servicios públicos y privados con los que cuenta el poblado. Hay grave escasez de agua potable aunado a condiciones sanitarias deficientes, incluyendo el inadecuado manejo de residuos sólidos y deficiente control de vectores de infección (animales principalmente). La red de distribución eléctrica abarca la mayor parte del pueblo. El acceso terrestre es fácil en transporte motorizado por carretera pavimentada y se cuenta con dos compañías privadas de transporte colectivo que ofrecen el servicio de traslado a Cuernavaca, cada hora, todos los días. Se cuenta con comunicación telefónica domiciliaria y en casetas públicas. Muy pocas calles tienen cubierta de pavimento, algunas están empedradas, pero la mayoría son de tierra.

Situación energética y aprovechamiento de la biomasa

En abril de 2005 se condujo en Cuentepec un estudio para conocer el patrón de consumo de los combustibles domésticos utilizados en la cocción de alimentos y calefacción doméstica (datos propios). La información se recabó con base en una muestra de 49 familias que permitieron la medición de su consumo de combustibles durante siete días, y en la aplicación de un cuestionario a una muestra de 100 familias. Además se realizaron entrevistas a profundidad a informantes clave: autoridades, ancianos, mujeres, ejidatarios, estudiantes. A continuación se presenta un resumen de los resultados más sobresalientes de dicho estudio.

Los principales combustibles domésticos utilizados para la cocción de alimentos y calefacción son la leña, el olote⁴ y el gas LP. La leña y el olote son biocombustibles tradicionales muy importantes en este poblado. Se observaron las siguientes tendencias al momento del estudio: (1) el 100% de las familias utiliza la leña en la cocción de alimentos, (2) el 96% de la población utiliza olote como combustible complementario y (3) el 86% de la población son usuarios mixtos de leña, gas LP y olote. El gas LP se distribuye en camiones repartidores por las calles del pueblo; se vende en tanques de 20 y 30 kg. Se observó (y confirmó en entrevistas) que el uso mixto de biocombustibles tradicionales y gas LP es una estrategia para aprovechar al máximo los recursos económicos familiares. Aunque la mayoría de las familias cuenta con estufa de gas, éste se utiliza a discreción, principalmente para cocinar comidas que requieren bajo dispendio energético (calentar comida ya preparada y bebidas). En cambio, la leña y el olote se utilizan en cocciones que requieren mayor dispendio energético, como el nixtamal⁵, las tortillas, los guisados, los caldos de frijoles y para calentar agua para el aseo personal. La contabilidad de leña y el análisis de la estructura poblacional permitieron concluir que el consumo *per capita* (por adulto estándar⁶) de leña en Cuentepec es aproximadamente de 1kg al día. En otros estudios se ha encontrado que el consumo de leña *per capita* en comunidades rurales de climas más fríos es mayor⁷ (Masera, 1997), pero en climas cálidos es similar (del Amo, 2002). El implemento más utilizado para la combustión de leña y olote es el fogón en forma de herradura (o *tlecuil*, en náhuatl), construido con barro o cemento sobre un pretil (base) de piedra o adobe.

El abastecimiento de leña se realiza aprovechando principalmente la biomasa muerta o viva del campo, mediante la recolección de libre acceso en las zonas de campo abierto alrededor del pueblo. Como en gran parte del territorio de Cuentepec la cobertura vegetal es escasa (principalmente en la temporada seca), la extracción de

⁴ El olote es el núcleo de la mazorca de maíz que queda como residuo después de ser desgranada. Es un buen combustible, ya que enciende al fuego con facilidad y da buen calor, aunque se consume rápidamente.

⁵ El nixtamal es la preparación de la masa a partir de la cocción de granos de maíz con cal para la elaboración de tortillas.

⁶ Los factores de equivalencia a "adulto estándar" se definen en términos de edad y sexo, de acuerdo a la tabla de equivalencia de la FAO mostrada en *Guidelines for planning, monitoring and evaluating cookstove programmes* (Joseph, 1990).

⁷ En poblaciones donde el gas LP no se usa tanto o el clima es más frío el consumo de leña llega a 2 kg *per capita* (Masera, 1997).

leña se obtiene principalmente de los árboles y arbustos de las tierras de cultivo, de la vegetación en las lomas y laderas de las barrancas, y de la vegetación en las orillas de los caminos. Usualmente, en la recolección de leña participa toda la familia, pero debido a que muchos hombres del pueblo salen a trabajar fuera de la localidad, esta actividad la realizan con mayor frecuencia mujeres, ancianos y niños. Una jornada de recolección puede ocupar entre 3 y 9 horas, dependiendo de la cantidad de leña recolectada, de la distancia a la fuente de abastecimiento y de las condiciones de acceso.

Otra forma de abastecimiento de este combustible se llevaba a cabo mediante su comercio. Leñadores de los pueblos vecinos, Ahuatenco y Ajuchitlán (Estado de México), vendían leña (hasta el 2005) por las calles de Cuentepec, principalmente de encino. Aunque en 2005 el 68% de las familias se abastecía de leña mediante la recolección y extracción de este recurso, un 10% la compraba a vendedores y un 22% combinaba el autoabastecimiento con la compra. A mitad del año 2005 las autoridades del Estado de Morelos prohibieron la comercialización de leña, restringiendo su aprovechamiento al autoabastecimiento, como lo especifica la NOM-012-RECNAT-1996. No obstante esta medida, la leña continúa siendo una mercancía, pero ahora se vende en un mercado “*clandestino*” al interior de las casas. Aunque la mayoría de los vendedores son leñadores locales todavía hay leñadores de Ahuatenco. En estas condiciones es más difícil cuantificar y analizar el volumen y la dinámica de este mercado.

Para las familias de Cuentepec el uso de la leña en la cocina es una tradición cultural y una estrategia económica para maximizar los recursos familiares, sustituyendo o disminuyendo el consumo del gas LP. Cuando se recolecta la leña tiene un costo relativamente bajo: el costo de oportunidad del trabajo familiar; las familias emplean principalmente el trabajo de mujeres, niños y ancianos, que se cotiza en menor valor en el mercado laboral; sin embargo, considerando que las jornadas de recolección pueden requerir hasta 9 horas y largas caminatas de carga, el abastecimiento puede representar una pesada carga de trabajo para las familias. Por otro lado, dado que la cobertura vegetal es escasa en la región, principalmente en la temporada seca (durante casi 8 meses), el abastecimiento para una población de aproximadamente 3,120 habitantes representa una carga importante para el medio ambiente.

Las especies arbóreas preferidas como fuente de leña en Cuentepec, por sus cualidades dendroenergéticas como buen calor, buena brasa y pocas emisiones de

humo, son las siguientes: encinos (*Quercus spp.*), tepeguajes (*Lysiloma divaricata* y *Lysiloma acapulcensis*), huisache (*Acacia farnesiana*), tehuiztle rojo o cubata (*Acacia cochliacantha*), tehuiztle blanco o tepame (*Acacia pennatula*) y palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*). Estas especies son cada vez más escasas en el territorio de Cuatepec y sus alrededores, principalmente por causas como el pastoreo de ganado, la expansión de la frontera agrícola y por su aprovechamiento para utilizarse como postes y leña de consumo doméstico.

2.2 Ubicación geográfica y entorno natural

La zona geográfica que circunscribe al sitio experimental en Cuatepec es la bioregión de la micro-cuenca del río Tembembe: región hidrológica No.18 del Río Balsas, cuenca del río grande de Amacuzac 18FF (IMTA, 1999-2000), ubicada al sur de la cordillera del Eje Neo-volcánico, asentada sobre rocas sedimentarias e ígneas correspondientes al periodo plio-cuaternario en el pie de monte volcánico Glacis de Buenavista (Martínez-García y López-Blanco, 2005). De acuerdo a la carta edafológica de la Cuenca del Río Tembembe y al Programa Estatal de Desarrollo Urbano 2007-2012 el suelo es del tipo Feozem háplico + Litosol (Hh + I/2) con textura media (IMTA, 1999-2000; Gobierno del Estado de Morelos, 2007).

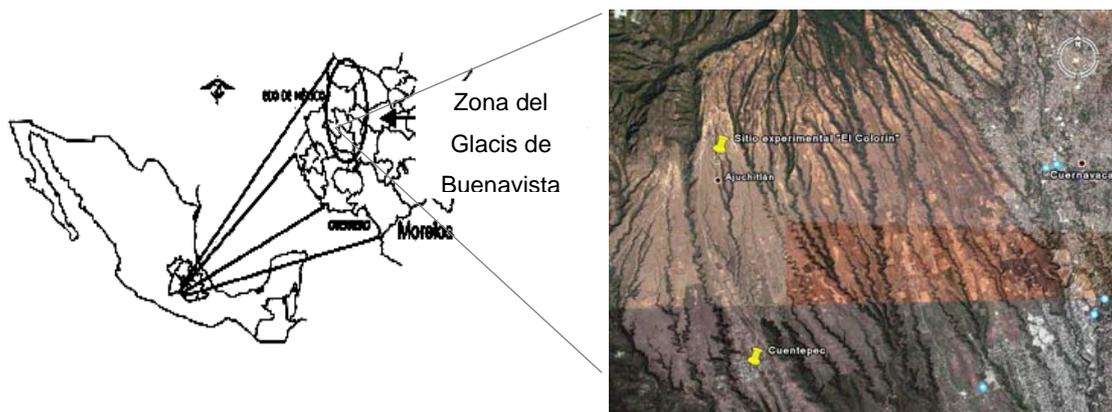


Figura 2.1 Ubicación del Glacis de Buena Vista, zona de barrancas, y el Sitio Experimental "El Colorín".

El territorio de Cuatepec abarca zonas de Selva Baja Caducifolia y zonas de transición entre la Selva Baja Caducifolia (SBC) y el Bosque Templado. Aunque la vegetación original debió ser muy diversa, como resultado de perturbaciones de origen humano predominan actualmente el pastizal y los suelos erosionados con escasa

cobertura vegetal (Gobierno del Estado de Morelos, 2007). No obstante esto, en algunas zonas como las montañas de la Sierra Neovolcánica, en la zona protegida de la reserva arqueológica de Xochicalco, en las laderas de las barrancas y de arroyos del Río Tembembe, se conserva todavía vegetación de las selvas y los bosques originales. Además de las especies leñosas que se prefieren para el consumo doméstico en Cuentepec, entre la vegetación original que se mantiene remanente en la región se encuentran especies de la SBC como los guajes (*Leucaena leucocephala* y *Leucaena esculenta*), copal y otras burseras (*Bursera copallifera*, *Bursera spp.*), parota (*Enterolobium cyclocarpum*), cuahulote (*Guazuma ulmifolia*), amates (*Ficus spp.*), *Eysenhardtia polystachya* (palo dulce) y guamuchil (*Pithecellobium dulce*), entre otras especies.

2.3 Diseño experimental

Dadas las condiciones socio-económicas Cuentepec y de su entorno biofísico, se planteó la necesidad de investigar sistemas de producción de biomasa para la energía, con la intención de mejorar la disponibilidad de leña local y diversificar los ingresos económicos familiares, preservando el entorno natural. Como se ha mencionado, los sistemas agroforestales integran la asociación simultánea (o secuencial) de varias plantas que incluyen árboles perenes (leñosos) y/o cultivos de alimentos en el mismo espacio de terreno (Huxley, 1983).

En cuanto al diseño experimental, se plantea principalmente la conveniencia de las asociaciones planta-cultivo con las especies leguminosas leñosas *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula* (endémicas de la región, preferidas como leña) en sistemas agroforestales simultáneos. A su vez, se pretende evaluar si el consorcio de biofertilizantes de *R. etli* y micorrizas es competitivo para sustituir a los fertilizantes agroquímicos en este tipo de sistemas, clima y tipo de suelo.

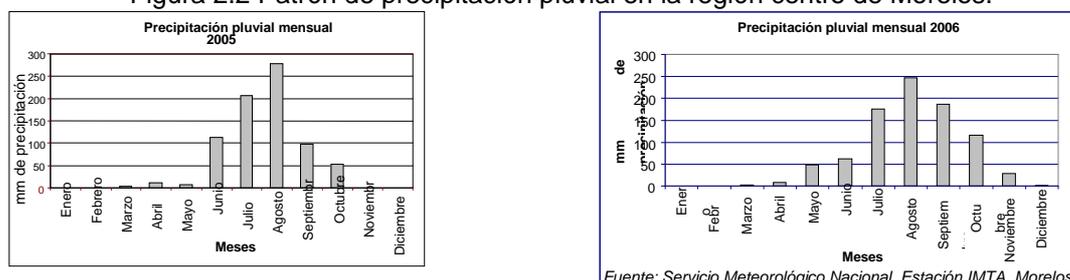
2.3.1 Ubicación y clima del sitio experimental

El sitio experimental se estableció en el predio *El colorín*, ubicado en el territorio del poblado de Cuentepec, municipio de Temixco, en el norponiente del Estado de Morelos, colindando con los límites territoriales del Estado de México. El predio se

localiza aproximadamente a 1 km al oriente del la barranca del río Tembembe, 4 km al sur del poblado de Ahuatenco (pueblo del Estado de México), 7 km al norte del poblado de Cuentepec y a 10 km al poniente de la ciudad de Cuernavaca. Las coordenadas de localización son 18°55' 21.57" N y 99°20' 1.52" W. De acuerdo a la distinción de zonas del Estado de Morelos (por sus componentes físicos, bióticos y antrópicos, correspondiente a rasgos geográficos distintivos o dominantes) *El colorín* se ubica en la zona geocológica “*barrancas*” (Gobierno del Estado de Morelos, 2007).

El colorín se encuentra a una altitud aproximada de 1250 msnm. El clima de la región es cálido-seco tipo Awo(w) con temperatura media de 21 °C a 24 °C y temperaturas máximas y mínimas de 39 °C y 5 °C (IMTA, 1999-2000; H. Ayuntamiento de Temixco, 2005; Gobierno del Estado de Morelos, 2005). La precipitación pluvial anual varía de 1000-1200 a 1200-1500 mm, distribuida de 5 a 7 meses de temporada de lluvia (de mayo a octubre) y 5 a 6 meses de sequía (noviembre a mayo). Los vientos dominantes corren del noroeste hacia el suroeste (H. Ayuntamiento de Temixco, 2005; Gobierno del Estado de Morelos, 2005).

Figura 2.2 Patrón de precipitación pluvial en la región centro de Morelos.



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Estación IMTA, Morelos.

2.3.2 Especies utilizadas

Especies arbóreas

Acacia cochliacantha y *Acacia pennatula* son especies arbóreas leguminosas de la Selva Baja Caducifolia de mesoamérica (género: *Acacia*, subfamilia: *Mimosoidae*) encontradas desde el sur de los Estados Unidos hasta Centroamérica (Rico Arce, 2001). Rico Arce (2001) menciona que junto con *A. farnesiana*, las especies *A. cochliacantha* y *A. pennatula* son las de mayor distribución en la República Mexicana.

Otros estudios (Brazier *et al.*, 1967; van Kessel *et al.*, 1983; Román Miranda, 2001, Rico Arce, 2001; López-Merlín *et al.*, 2003; Quintanar-Isaías *et al.*, 2004; OFI-CATIE, 2004; Heil *et al.*, 2004; Jiménez-Ferrer *et al.*, 2007) han contribuido a la base de conocimiento de estas especies con estudios sobre su bioquímica, características nutritivas y aprovechamiento. Rico Arce (2001) describe a *A. pennatula* como un árbol o arbusto de hasta 8 m de altura, caracterizada por tener un fruto ancho y leñoso, con espinas delgadas y cónicas; comenta que es una especie propia de la vegetación secundaria, que prospera en altitudes desde 250-2200 m), florece y fructifica de mayo a octubre, y que en su propagación el ganado es un factor importante. OFI-CATIE (2004) menciona que los principales productos de *A. pennatula* son la leña y el carbón, aunque también se utiliza para alimentar ganado (con 15% de proteína en los frutos); también se utiliza como fuente de taninos, para proveer postes y como medicina; como leña arde lentamente con poco humo, produce buenas brasas y se seca en tan solo 2 semanas. Brazier *et al.* (1967) muestran resultados experimentales de *A. pennatula* en los que obtuvieron valores de la densidad de la madera de 0.96 y contenido de ceniza del 2.8% en el material foliar (en base seca).

El CATIE⁸ (OFI-CATIE, 2004) indica que como *A. pennatula* es una leguminosa, aporta nitrógeno de forma natural al ecosistema⁹, lo que la hace apta para prosperar en suelos de baja fertilidad, pero que al asociarse en sistemas agroforestales puede competir por agua con los cultivos; además, por su capacidad para rebrotar desde el tocón (la base) es apta para su manejo en plantaciones energéticas (OFI-CATIE, 2004). También, el CATIE (OFI-CATIE, 2004) observó que en zonas secas su crecimiento es lento, variando de 1 a 2.5 m anuales.

Figura 2.3 Fotografías de *A. pennatula* en Cuentepec, Morelos (a y b) y fruto de *A. pennatula*.



a. *A. pennatula* adulta.



b. *A. pennatula* juvenil.



c. Fruto de *A. pennatula*.

⁸ CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

⁹ Roskoski *et al.* (1982) encontró que *A. pennatula* puede fijar 34 kg de N ha⁻¹ anuales

Rico Arce (2001) describe a *A. cochliacantha* como un arbusto de 4 m de alto con espinas cimboriformes (en forma de barquita), rojizas cuando son jóvenes, pardas cuando son maduras; menciona que es una especie característica de la vegetación secundaria, abundante en zonas perturbadas, que florece casi todo el año y sus frutos son comestibles por el ganado. Quintanar-Isaías *et al.* (2004) describen a *A. cochliacantha* como un arbusto de hasta 5 m de altura, con diámetro de hasta 20 cm. Carranza-Montano (2003) reportaron que la madera de *A. cochliacantha* tiene una densidad (*gravedad específica*) de 0.75 y que presenta un contenido de ceniza del 8% en el material foliar y un 7.92% en los frutos.

Figura 2.4 Fotografías de *A. cochliacantha* en Cuentepec, Morelos.



Quintanar-Isaías *et al.* (2004) mencionan que *A. cochliacantha* puede crecer en zonas perturbadas sustituyendo a otras especies del bosque o constituir formaciones boscosas de especie única, llamadas “*cubateras*”, en densidades de población de hasta 400 individuos por km²; mencionan también que su madera tiene una densidad (*gravedad específica*) de 0.75.

Camargo-Ricalde *et al.* (2002) observó que comunidades de árboles/arbustos de *Mimosa spp.*, como *A. cochliacantha*, contribuyen en mejorar las condiciones de los nutrientes del suelo (materia orgánica, nitrógeno total, fósforo, calcio) y en regular factores ambientales como la temperatura. Se ha registrado que son especies de uso multipropósito utilizadas en México como fuentes forrajeras, como cercas vivas, en apicultura, artesanía, fuentes de taninos para la curtiduría y para su uso medicinal (Pinto Ruiz *et al.*, 2002; Jiménez Ferrer *et al.*, 2007). Algunos autores (Coutolenc Brenis *et al.*, 2005, y Rico Arce, 2001) han corroborado que *A. cochliacantha* es apreciada como fuente leñosa en las comunidades rurales. En observación directa en zonas rurales de la Sierra de Huautla, Morelos, se constató que ambas especies son preferidas como leña de calidad, producen buen carbón y generan poco humo en la combustión (García-Barrios R. y Vázquez-Perales, 2005).

Frijol

Phaseolus vulgaris L. (frijol común) es uno de los cultivos alimenticios más importantes en el mundo; mejorar su manejo y producción es un propósito científico de relevancia social, ambiental y económica (Ngome, 2006). Por ser una leguminosa de amplio uso, es muy importante en términos ambientales, ya que atenúa la degradación del suelo al disminuir la extracción de nitrógeno (N) mineral y por disminuir el uso de agroquímicos que afectan la fertilidad del suelo; en términos sociales, porque la nutrición de gran parte de la humanidad está ligada al cultivo de frijol; en términos económicos, porque ofrece la oportunidad de reducir la dependencia nacional de agroquímicos importados (que implican la consecuente pérdida de divisas) y mejorar la rentabilidad de los cultivos. En algunos casos se ha cuantificado que el cultivo de frijol puede aportar, por medio de la Fijación Biológica de Nitrógeno, 110 kg de nitrógeno ha⁻¹ al suelo (Shiferaw *et al*, 2004). Ante la apertura del comercio de México con USA y Canadá, en el Tratado de Libre Comercio de Norte América (TLCAN), cobra mayor relevancia aumentar la productividad de este cultivo utilizando innovaciones biotecnológicas que garanticen la sustentabilidad ambiental y favorezcan el sostenimiento económico de los campesinos de escasos recursos.

En México, la producción de frijol tiene niveles de producción de mucha variación. En el año 2002 México era el quinto productor de frijol en el mundo, contribuyendo con el 6.8% de la producción mundial, pero no lograba cubrir su demanda nacional, por lo que también participaba con el 4.67% de las importaciones mundiales (Ortega Rivas y Ochoa Bautista, 2003). El promedio nacional de productividad por hectárea es de 629 kg ha⁻¹, cercano al del promedio mundial, aunque menor que el de China, Indonesia, USA y Canadá, que producen arriba de 1 ton ha⁻¹ (Ortega Rivas y Ochoa Bautista, 2003).

Aunque el frijol es una especie de vital importancia para la alimentación mundial, comparado con otras leguminosas se considera una especie con menor capacidad para fijar nitrógeno atmosférico; mientras un cultivo de frijol aporta biológicamente cerca de 110 kg ha⁻¹ una plantación de *Leucaena* (guaje) puede fijar de 100 a 282 kg ha⁻¹ de nitrógeno (Camacaro *et al*, 2004) (Shiferaw *et al*, 2004). Por ser una leguminosa de temporal, el sistema radicular del frijol es muy pequeño en comparación el de las especies perennes (árboles y arbustos).

Biofertilizantes aplicados

Rhizobium etli y micorrizas

Rhizobium etli (Segovia *et al.*, 1993) es la bacteria que se hospeda simbióticamente, y de forma predominante, en los nódulos de *Phaseolus vulgaris* (frijol) en México y en muchos países de América Latina (Aguilar *et al.*, 2004; Wang, 2008). Aunque *R. etli* forma simbiosis efectiva con *Phaseolus vulgaris* y *Mimosa affinis* (Wang, 1999), se ha descubierto su capacidad para inocular al maíz como endófito (dentro del organismo vegetal) (Gutiérrez-Zamora y Martínez-Romero, 2001). Shiferaw *et al.* (2004) han mostrado que la aplicación de biofertilizantes inoculados ofrecen alternativas viables para mejorar la fijación biológica de nitrógeno del frijol (y otros cultivos), mejorando la productividad, disminuyendo los costos y mejorando el balance energético al evitar el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos que en su fabricación implican la emisión de CO₂ y otros GEI (Gas de Efecto Invernadero).

Las micorrizas son “asociaciones simbióticas establecidas entre las hifas de un hongo y las raíces de una planta” (Xoconostle y Ruiz, 2002). Los hongos de las micorrizas arbusculares penetran en las células corticales de las raíces en las plantas vasculares (que tienen tejidos lignificados para conducir agua y nutrientes). La aplicación de micorrizas ayuda a que las plantas extiendan su área radical (raíces), mejorando su resistencia y adaptabilidad al ambiente. El mayor beneficio de las micorrizas se atribuye a que incrementan en las raíces de las plantas el alcance a los nutrientes del suelo, en especial de fósforo, ya que contribuyen a que se extienda el área de contacto radical en el suelo, incrementando el flujo de nutrientes hacia las micorrizas y raíces (Xoconostle y Ruiz, 2002); también modifican el ambiente de la raíces y mejoran el almacenamiento de los nutrientes (Bolan, 1991). Se ha mencionado que las micorrizas pueden ser mucho más eficientes que las raíces de las plantas en la movilización de fósforo, ya que la tasa de adquisición de fósforo por las micorrizas puede ser hasta seis veces mayor que el de los pelos de las raíces sin micorriza (Bolan, 1991). Kung'u (2004) observó que utilizando inoculación con micorrizas, *Senna spectabilis* mostró mayor crecimiento en biomasa aérea y en biomasa radicular, y que la colonización con micorrizas protegió a las raíces de los patógenos del suelo, incrementando su crecimiento y adquisición de nutrientes.

2.3.3 Diseño de los tratamientos y descripción del sitio experimental

El sitio experimental es un terreno de aproximadamente 10,200 m², ubicado sobre una loma con pendientes ligeras de 0° a 5° de inclinación, descendientes al oriente y poniente hacia dos pequeños arroyos de temporal con distancias aproximadas de 50 metros de los límites del terreno. Se tiene acceso desde Cuentepec por un camino secundario de terracería, transitable durante todo el año, aunque con dificultades en la temporada de lluvias. El terreno había sido utilizado anteriormente para el cultivo de maíz, pero al momento de iniciar el proyecto tenía cinco años sin cultivarse.

Diseño experimental

El experimento consiste de ocho tratamientos experimentales que incluyen monocultivos forestales de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, sistemas agroforestales de *A. cochliacantha* o *A. pennatula* en asociación simultánea con *Phaseolus vulgaris* (frijol Flor de Mayo), fertilizado químicamente o fertilizado biológicamente inoculándolo con el consorcio *Rhizobium etli* - micorriza y monocultivos agrícolas de *Phaseolus vulgaris*, fertilizados químicamente o biológicamente. El biofertilizante lo proveyó la empresa “Biofábrica Siglo XXI” y consiste de un consorcio de inóculos de *Rhizobium etli* de la cepa CIAT 652 y micorriza arbuscular del género *Glomus intrarradices*. Los ocho tratamientos experimentales se describen en la Tabla 2.1 mostrando los tipos de sistema, las especies utilizadas y el tipo de fertilización (biológica o química).

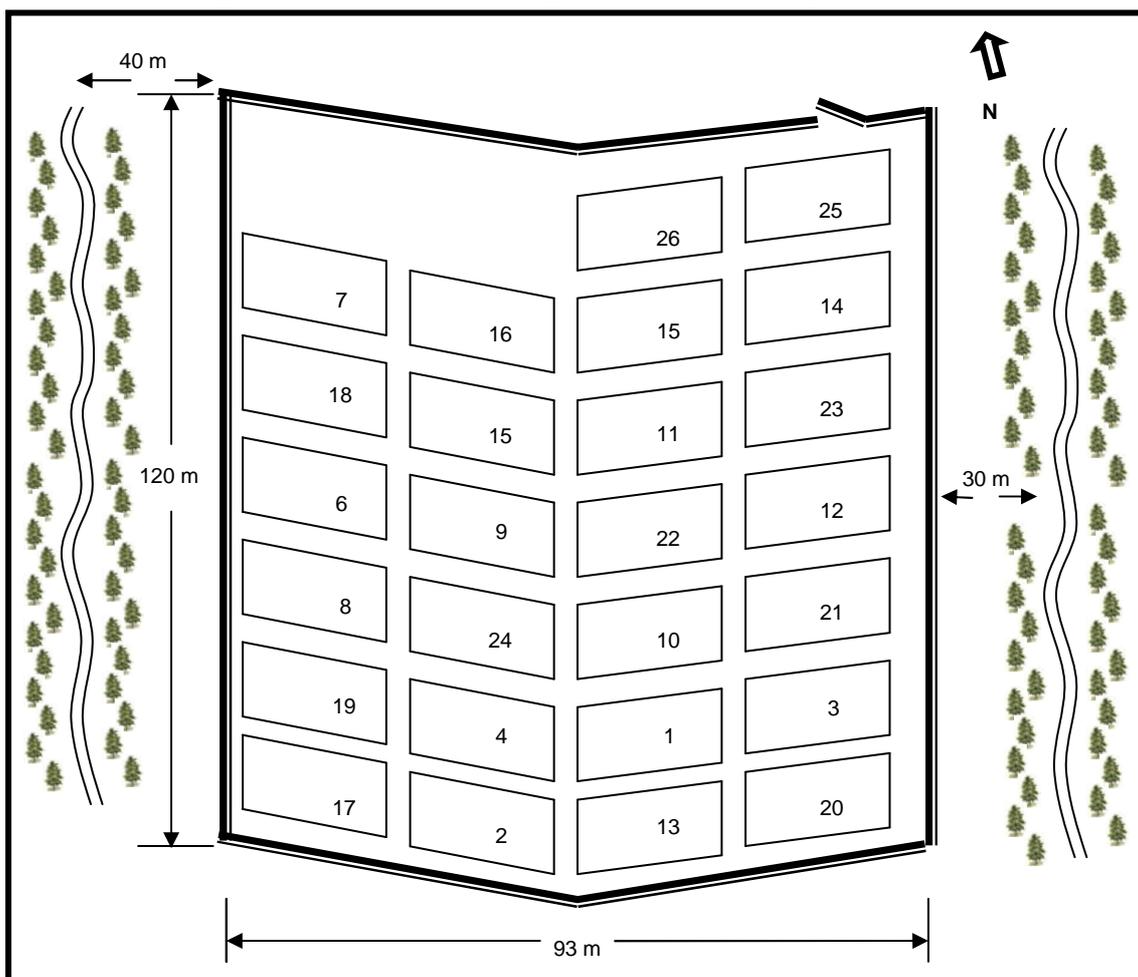
Tabla 2.1 Descripción de los tratamientos experimentales

Tratamiento	Sistema	Especie arbórea	Especie alimenticia	Fertilización <i>P. vulgaris</i>
T1	AF	<i>A. cochliacantha</i>	<i>P. vulgaris</i>	QUIM
T2	MF	<i>A. cochliacantha</i>		
T3	AF	<i>A. cochliacantha</i>	<i>P. vulgaris</i>	BIO
T4	AF	<i>A. pennatula</i>	<i>P. vulgaris</i>	QUIM
T5	MF	<i>A. pennatula</i>		
T6	AF	<i>A. pennatula</i>	<i>P. vulgaris</i>	BIO
T7	MA		<i>P. vulgaris</i>	BIO
T8	MA		<i>P. vulgaris</i>	QUIM

AF: agroforestal MF: monocultivo forestal MA: monocultivo agrícola

El experimento se realizó de acuerdo a un diseño de unidades distribuidas al azar. La unidad experimental es la parcela de 15 m de ancho por 20 m de largo (300 m²). En el caso de los tratamientos agroforestales (T1, T3, T4 y T6) y de los monocultivos forestales (T2 y T5), cada uno tiene cuatro réplicas, pero los monocultivos de frijol (T7 y T8) tienen una sola parcela. En total se establecieron 26 parcelas en el terreno, que cubren un área aproximada de 7800 m², cuya distribución (al azar) se muestra en la siguiente figura.

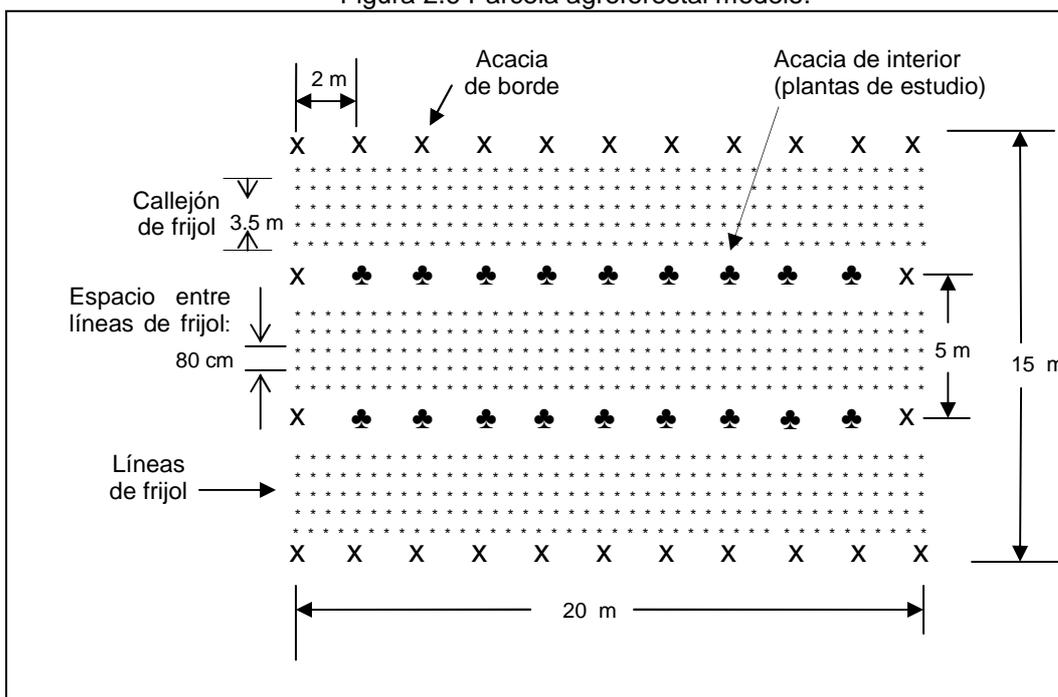
Figura 2.5 Distribución de las parcelas en el sitio experimental



El diseño de espaciamiento de las parcelas agroforestales (y forestales) se definió con base en criterios que consideraron el tamaño de las plantas cuando son adultas, en el bosque secundario, y un espacio adecuado para que los campesinos pudieran utilizar el implemento de yunta con tracción animal. El diseño de la parcela estándar consiste de cuatro filas con 11 individuos de acacia, en líneas continuas de 20 m con espaciamiento de 2 m entre individuos y 5 m entre líneas, dejando un callejón; así, el

espaciamiento entre acacias es de 2x5 m. Se sembró frijol en los callejones, dejando una distancia de 0.75 m entre la línea de acacias y la primer línea de frijol de cada callejón. Se sembraron cinco líneas de frijol en cada callejón con una distancia entre líneas de a 0.8 m y 0.4 m entre matas. Se sembraron tres semillas de frijol por mata. Con este diseño, la superficie dedicada al frijol representa el 70% de la parcela, mientras que las acacias ocupan el 30% restante. La siguiente figura ilustra la parcela agroforestal modelo.

Figura 2.6 Parcela agroforestal modelo.



Las parcelas de los tratamientos de monocultivo forestal tienen las mismas dimensiones y espaciamiento entre acacias que las parcelas agroforestales (2x5 m), pero en los callejones no se sembró ningún cultivo. En las parcelas de monocultivo agrícola se sembró frijol en la totalidad del lote.

Como cada parcela experimental se constituye de 44 acacias (26 en los bordes y 18 de interior) y cada tratamiento cuenta con 4 réplicas, se cuenta con un total de 176 acacias por tratamiento experimental.

Suelo

Previamente al establecimiento experimental se realizó un análisis de diagnóstico de fertilidad inicial del suelo¹⁰. Los resultados lo describieron como un suelo de textura fina y densidad aparente normal, arcilloso en la mayor parte del terreno y franco-arcilloso en algunas zonas menores, con buen intercambio gaseoso y velocidad media de infiltración del agua por contar con materia orgánica en niveles moderadamente altos (del 2.9% al 4.17%). Se clasificó como un suelo ácido con pH entre 5.03 y 5.29, abajo del rango adecuado para la mayoría de los cultivos agrícolas. La capacidad de intercambio catiónico se identificó como media (CIC 22.96 +/-1 Cmol(+) Kg⁻¹). El nitrógeno total se encontró en niveles medio y alto, principalmente por el contenido de materia orgánica. El contenido de nitrógeno inorgánico (nitratos, NO₃⁻, y amonio, NH₄⁺) se clasificó como alto, con una reserva adecuada para ser absorbida durante el siguiente cultivo. Los nutrientes: Fósforo (P), Potasio (K) y Calcio (Ca) se encontraron en niveles bajos, con necesidades de fertilización adicional. De todos los micronutrientes, se encontró solamente deficiencia en Zn, aunque el contenido en cobre, boro y molibdeno se encontró en rangos críticos; en hierro y manganeso el contenido se encontró alto.

La siguiente tabla muestra una síntesis cuantitativa del promedio de los principales parámetros de fertilidad en su estado inicial.

Tabla 2.2 Valores promedio de los parámetros de fertilidad inicial del suelo.

pH	% MO	NT mg kg ⁻¹	N-NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	N-NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	Ca mg kg ⁻¹
5.1125 +/- 0.12	3.665 +/- 0.65	0.21975 +/- 0.03	25.97 +/- 14	26.72 +/- 8.3	7.0725 +/- 0.78	143.5 +/- 55	1060.75 +/- 96

CIC Cmol(+) Kg ⁻¹	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura
22.9675 +/- 1	27.4 +/- 2.5	29.1 +/- 1.8	43.5 +/- 3.3	Arcilloso

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

¹⁰ El análisis lo realizó el Laboratorio Central de Suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo. Las muestras se conformaron por el método de muestras compuestas y se redujeron a 1 kg mediante la técnica de cuarteos.

2.4 Producción de plántulas, introducción al campo y mantenimiento de acacias

2.4.1 Colecta de semillas

En las zonas de bosque primario y secundario del Estado de Morelos se identificaron sitios con individuos de las especies *A. cochliacantha* y *A. pennatula* con el potencial para utilizarse como fuentes de germoplasma. Se identificó a la Reserva de la Zona Arqueológica de Xochicalco y a la Reserva de la Biósfera Sierra de Huautla como los sitios de mayor potencial, aunque también se identificó la presencia de estas especies en Tehuiztla, en Chamilpa, y en gran parte del territorio del Estado de Morelos. Estos lugares se ubican en zonas características o de transición de la Selva Baja Caducifolia; tienen altitud y precipitación pluvial similar a las del sitio experimental “*El Colorín*”, con temperatura promedio ligeramente más cálida.

Para utilizarse como fuente de semillas se seleccionaron árboles con apariencia vigorosa y sana, con vainas de color oscuro, correspondiente a su fase madura, de acuerdo a la época del año de maduración (febrero-abril). Las semillas se metieron en bolsas de plástico durante la recolección en campo y se identificaron con la fecha y lugar del sitio de colecta. Para cada una de las especies se hicieron colectas de aproximadamente dos mil semillas.

2.4.2 Métodos de almacenamiento de semillas

Las semillas se almacenaron a temperatura ambiente (más de 10 °C) en frascos de vidrio cerrados herméticamente que se identificaron con la fecha y el nombre de la especie. Al término de las jornadas de recolección se contó con una cantidad considerable de germoplasma de semillas de las dos especies.

Tabla 2.3 Resumen de resultados de la colecta de germoplasma

Especie	Fecha de colecta	Cantidad de semillas	Peso (g) promedio de las semillas	Lugar de colecta
<i>A. cochliacantha</i>	Febrero, 2005 Marzo, 2005	2000	3.6	Sierra Huautla Xochicalco
<i>A. pennatula</i>	Febrero y Marzo, 2005	2000	8.6	Chamilpa, Cuernavaca.

2.4.3 Germinación de acacias

Se revisaron los métodos de ruptura de la dormancia de las semillas (Cervantes *et al*, 1996; D'Aubeterre *et al.*, 2002), identificándolos para lograr mayor prontitud, sincronía y porcentaje de germinación.

Se identificaron los siguientes métodos de escarificación y ruptura de dormancia:

- Escarificación mecánica (por rasuración);
- Shock térmico (por inmersión en agua a 70°C);
- Escarificación química (utilizando Hipoclorito de Na al 60% o H₂SO₄ concentrado);
- La combinación de los métodos anteriores

Escarificación y germinación óptima

Por inspección visual se seleccionaron semillas nuevas, íntegras, sin presencia física de daños (piquete de insecto o fractura de la semilla), con tamaño de 3 a 5 mm, de color verde a café claro, que visualmente mostraran buen aspecto de salud de la semilla.

Como primer paso, se hicieron ranuras en las semillas en áreas lejanas al embrión (escarificación mecánica) y se sumergieron durante dos minutos en alcohol de caña al 96%; posteriormente se colocaron en un frasco esterilizado con ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 95% de concentración en el que se dejaron inmersas durante 10 o 20 minutos, con agitación continua, dependiendo de la especie (20 min *A. cochliacantha* y 10 min *A. pennatula* (Tabla 2.4). Se retiró el ácido, se lavaron las semillas 5 veces con agua destilada estéril y se dejaron remojando durante 20 minutos en agua esterilizada¹¹.

Tabla 2.4 Resultados de escarificación y germinación de las semillas de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*.

Espece	Método de escarificación más exitoso	Tiempo de latencia (TL)	Porcentaje de germinación
<i>A. cochliacantha</i>	Ranuración mecánica + 20 minutos de inmersión en H ₂ SO ₄	3 días	92%
<i>A. pennatula</i>	Ranuración mecánica + 10 minutos de inmersión en H ₂ SO ₄	3 días	98%

¹¹ Este proceso se realizó en un ambiente estéril bajo una campana de flujo laminar.

Posteriormente se colocaron de 15 a 50 semillas en cajas de Petri con 25 ml de agar-agua (0.8% esterilizado) por caja. Se incubaron a una temperatura de 28-30 °C durante 48 horas en oscuridad.

Después del surgimiento de la radícula y de su crecimiento aproximado a 2 cm, las plántulas se colocaron en charolas de germinación (de 50 ml en cada cavidad), con vermiculita lavada y esterilizada, a la que se añadió solución de Fahraeus (27g/20 ml) libre de Nitrógeno; todo esto para facilitar el crecimiento de la radícula sin exponerla a contaminación. Las plántulas se mantuvieron en oscuridad durante 24 horas a 30°C de temperatura para promover la etiolación del hipocotilo. En total se produjeron 1500 plántulas de cada especie con este método.

2.4.4. Estancia en invernadero y vivero

Después de la germinación se trasplantaron las plántulas a bolsas de plástico, de 15x15 cm, con 300 g de tierra, y se mantuvieron durante dos semanas en invernadero. Posteriormente, para su adaptación al clima tropical seco se trasladaron al vivero en Huajintlán, Morelos, a 50 km al sur de Cuentepec, con un clima ligeramente más cálido y húmedo del sitio experimental, donde fueron nuevamente trasplantadas a bolsas más grandes, de 30x15 cm, con tierra y composta (50/50%). Permanecieron en vivero durante tres meses, donde fueron regadas semanalmente. Al final de este periodo se observó una supervivencia promedio del 87% de las plántulas.

2.4.5 Preparación del terreno

Como se ha mencionado anteriormente, el terreno se había dejado descansar durante cinco años de cualquier actividad agrícola. Como primer paso se realizó un barbecho (arado) inicial con tractor. El terreno se cercó con postes y alambre de púa para protegerlo de la intrusión de ganado de pastoreo. No fue necesario remover vegetación original como arbustos o árboles.

2.4.6 Introducción al campo y mantenimiento de acacias

El proyecto se basó en un diseño experimental completamente al azar, que incluyó 26 cuadros de 15 x 20 m. Después de ser sorteados los cuadros para las parcelas se

trazaron líneas para acacias y callejones para el cultivo del frijol y se procedió a cavar huecos de 30 cm de profundidad en los sitios correspondientes a la introducción de cada acacia. Las acacias se introdujeron al campo de forma manual con el trabajo de la familia del propietario del terreno. Al día siguiente de la introducción se dio un riego auxiliar a las acacias. En cada planta se colocó una etiqueta con la inscripción informativa del cuadro, tratamiento y código de identificación de la planta. Las poblaciones de plantas que cubrió el estudio fueron las siguientes: en todo el proyecto, 1056 plantas, y en cada uno de los tratamientos, 176 plantas.

Durante la temporada de lluvia se realizó una limpieza de maleza a las acacias en un perímetro de medio metro. Al año se renovaron las etiquetas de identificación de las plantas.

2.5 Siembra y mantenimiento del cultivo de frijol

Preparación del sitio

Como primer paso se demarcaron en los tratamientos agroforestales las áreas de callejones para el cultivo de frijol. El suelo de cultivo se preparó arándolo con la yunta de tracción animal. Se cuidó que los animales y la yunta no lastimaran las acacias situadas en los bordes de los callejones.

Introducción y fertilización

El frijol se introdujo en el suelo en grupos de tres semillas por punto de siembra. La siembra se realizó en la última semana de junio de 2006. Los tratamientos T1, T4 y T8 se fertilizaron químicamente de acuerdo a la dosis N-K-P (en kg ha⁻¹) 00-100-200 (potasio y superfosfato de calcio triple), mientras que los tratamientos biológicos (T3, T6 y T7) se fertilizaron con consorcio de inóculo bacteriano *Rhizobium etli* y micorriza *Glomus intrarradices*, impregnados a la semilla previamente a la introducción al suelo. En los tratamientos con frijol fertilizado químicamente se aplicó una dosis de fósforo equivalente a 200 kg ha⁻¹ (en superfosfato de calcio triple), repartida en los callejones de cultivo; también se aplicaron los micronutrientes Boro, Zinc y Molibdeno en las dosis recomendadas tras el análisis de fertilidad del suelo¹²: Bo=15 kg ha⁻¹, Zn= 25 kg

¹² Los análisis de fertilidad del suelo los realizó el Laboratorio de Análisis de Suelo de la Universidad Autónoma de Chapingo.

ha⁻¹ y Mo =1 kg ha⁻¹. La Tabla 2.5 resume la fertilización que se aplicó a todos los tratamientos experimentales en 2005 y 2006.

Tabla 2.5 Fertilización aplicada a los tratamientos experimentales en *El Colorín*.

	Fertilización de acacias		Fertilización de <i>P. vulgaris</i>	
	2005	2006	2005	2006
T1	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	00-100-200 + Bo, Zn, Mo	00-100-200 + Bo, Zn, Mo
T2	Sin fertilización	P, Bo, Zn, Mo		
T3	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	<i>R. etli</i> y micorriza	<i>R. etli</i> y micorriza
T4	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	00-100-200 + Bo, Zn, Mo	00-100-200 + Bo, Zn, Mo
T5	Sin fertilización	P, Bo, Zn, Mo		
T6	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	<i>R. etli</i> y micorriza	<i>R. etli</i> y micorriza
T7			<i>R. etli</i> y micorriza	<i>R. etli</i> y micorriza
T8			00-100-200 + Bo, Zn, Mo	00-100-200 + Bo, Zn, Mo

Dosis: K=100 ha⁻¹ P=200 kg ha⁻¹, Bo=15 kg ha⁻¹, Zn= 25 kg ha⁻¹, Mo =1 kg ha⁻¹.

2.6 Métodos de medición y captura de datos

Se construyó una base de datos (en EXCEL 3.0) en la que periódicamente se capturó la información del estado de salud y las dimensiones de cada una de las acacias, lo que permitió manejar los datos de forma individual (por planta) o en grupos: por parcela, especie, tratamiento, posición (borde, fila, número de planta). Adicionalmente se construyó una base de datos para registrar la información de los gastos y materiales utilizados en todas las actividades del proyecto, incluyendo los materiales, traslados, jornales y servicios prestados por externos.

Medición de los parámetros dasométricos¹³ de las acacias

A los 2, 5, 12 y 16 meses de la introducción se realizaron inspecciones de control para supervisar el estado físico de las acacias y para medir los siguientes parámetros: *supervivencia y estado de salud, diámetro de la base, número de ramas, altura total, altura de la copa, cobertura mayor y cobertura menor (diámetros)*. Las mediciones se

¹³ La dasometría es la rama de la ciencia que se ocupa de la medición de los árboles, determinación del volumen de los bosques y del crecimiento de árboles y bosques.

realizaron con cintas métricas y con vernier (pie de rey) en la población total de acacias del proyecto.

Medición y cosecha de frijol

Al final de la temporada de lluvia (en noviembre de 2005) se realizó un muestreo sistematizado de la producción de frijol de cada tratamiento. Se tomaron tres muestras por parcela, una en cada uno de los tres callejones, cosechando las vainas de las matas en un área de muestreo de 3x5 m. Las vainas se secaron al sol durante un día y se procedió a registrar el peso de la producción, con vaina y sin vaina.

2.7 Discusión

Cuentepec, Morelos, se caracteriza por diferentes condiciones socioeconómicas mencionadas en este capítulo, como la singularidad cultural nahua del poblado, la marginación socioeconómica de la mayor parte de la población, la dedicación de los ejidatarios al sector agropecuario de subsistencia, la escasa disponibilidad de agua en el territorio del poblado y en las viviendas, así como las relaciones con los pueblos vecinos.

En cuanto al uso de combustibles para uso doméstico, destaca la importancia que los biocombustibles tradicionales leña y olote tienen en la comunidad; la leña, al ser un natural de libre acceso contribuye a economizar recursos familiares. Se presentó un resumen de la investigación de campo sobre el consumo de leña y olote en el poblado; se mencionaron las especies leñosas que las familias prefieren como dendro-combustibles y se describió la escasez general de leña en el territorio del poblado de Cuentepec. Se hizo notar que las jornadas de recolección de leña pueden ser una carga de mucho trabajo físico para las familias, y que considerando una población cercana a 3100 personas, la presión de extracción sobre las fuentes naturales de leña puede ser muy intensa.

A partir de estas condiciones se planteó la necesidad de mejorar la disponibilidad de leña local sin afectar las fuentes naturales de este recurso, destacando también las necesidades de mantener y mejorar la producción de alimentos para el consumo

humano y la generación de ingresos monetarios para mejorar la economía familiar. Una alternativa para atender estas necesidades la ofrecen los sistemas agroforestales, ya que permiten la producción simultánea de leña, alimentos y subproductos, procurando el mantenimiento de la fertilidad del suelo y de los ecosistemas, con la posibilidad de generar ingresos adicionales por la venta de excedentes de producción.

Considerando estas condiciones y alternativas, el proyecto investiga diferentes sistemas productivos de biomasa leñosa y frijol en sistemas agroforestales y en monocultivos. Así mismo, se considera que la fertilización biológica representa una alternativa para disminuir los costos de fertilización, mantener la fertilidad y resiliencia de los ecosistemas y disminuir los impactos ambientales negativos de los fertilizantes agroquímicos. Sin embargo, dado que los sistemas agroforestales son sistemas complejos, en los que las influencias entre dos cultivos simultáneos pueden ser de facilitación o competencia, es necesario evaluar experimentalmente la evolución y resultados de cada sistema para poder llegar a conclusiones sobre su contribución al mantenimiento ambiental, la producción de biomasa leñosa, las cualidades energéticas de la biomasa, la producción de frijol y la conveniencia económica de producirlos simultáneamente. Para realizar la investigación se han propuesto ocho tratamientos experimentales que incluyen dos especies de acacia, *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, y frijol, *Phaseolus vulgaris*, con fertilización química y biológica, en las parcelas del campo experimental *El Colorín*.

La evaluación de la productividad de la cosecha los tratamientos de frijol puede evaluarse empleando métodos estadísticos que comparen la cosecha de las parcelas experimentales; sin embargo, la evaluación de la producción de biomasa de las acacias presenta la necesidad de desarrollar metodologías específicas para este proyecto. En sistemas forestales de especies con troncos altos, la biomasa se calcula usualmente con ecuaciones alométricas en función de la variable *diámetro a la altura del pecho* (DAP) (Brown, 1997), pero en el caso de especies que se ramifican desde la base, como son muchas de las selvas bajas caducifolias y sabanas, y el caso de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, no hay ecuaciones alométricas generales aplicables a estas acacias. Un paso necesario en esta investigación es desarrollar ecuaciones alométricas, específicas de estas especies, que en función de parámetros dimensionales permitan estimar su biomasa aérea, permitiendo diferenciar la fracción de biomasa leñosa de la biomasa foliar y leñosa.

Dado que las familias de Cuentepec dependen de la leña para cubrir sus necesidades básicas de cocción de alimentos, la producción de plantaciones sustentables dendroenergéticas podría dedicarse al consumo familiar y para generar ingresos adicionales por la venta de excedentes. Si la biomasa producida en plantaciones dendroenergéticas sustentables se promoviera como una estrategia de desarrollo de mayor escala, podría ofrecer sustentablemente materia prima para generadores de electricidad y productores de biocombustibles modernos. Sin embargo, considerar que biomasa lignocelulósica producida sustentablemente por pequeños campesinos en plantaciones dendroenergéticas (forestales o agroforestales) requiere evaluaciones económicas y financieras de diferentes casos de estudio.

2.8 Conclusiones

- Cuentepec es un pueblo con la singularidad cultural nahua en condiciones de marginación socioeconómica, en donde destaca la importancia de los biocombustibles tradicionales leña y olote en la economía familiar. Con un consumo *per capita* de 1 kg de leña al día, su obtención en las fuentes naturales de libre acceso representa una carga de trabajo importante para las familias y para el medio ambiente. En el poblado se prefiere leña de especies como encinos (*Quercus spp.*), tepeguajes (*Lysiloma spp.*), tehuiztle, tepame y huisache (*Acacia spp.*), que con excepción del huisache son escasas en la región.
- La producción de plántulas confirmó que aunque en el territorio Cuentepec son escasas las especies *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, en el Estado de Morelos se cuenta con fuentes de germoplasma de calidad de estas especies, y que las actividades de germinación, crecimiento en invernadero y vivero pueden realizarse óptimamente con las técnicas que se describieron en este capítulo.
- La introducción de acacias al campo se realizó con apego al diseño experimental, lo mismo que la siembra del cultivo de frijol. Aunque la producción de frijol puede evaluarse con métodos de análisis estadístico sobre muestras de la cosecha, la evaluación de la producción de biomasa de las acacias requiere desarrollar metodologías específicas, particularmente ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa foliar y leñosa de estas especies, así como sus propiedades termoquímicas.

Capítulo 3

Análisis alométrico y energético de la biomasa aérea de *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula*.

Acacia cochliacantha (Humb. & Bonpl. ex Willd) y *Acacia pennatula* (Schldl. & Cham) son especies arbóreas leguminosas de la selva baja caducifolia de México y Centroamérica apreciadas en comunidades rurales como buena leña (Couttolenc-Brenis, 2005; Rico Arce, 2001). En algunos estudios se ha evaluado su capacidad de regeneración en condiciones naturales de bosque secundario (Álvarez Yépez *et al.*, 2004; López-Merlín *et al.*, 2003); sin embargo, para utilizarlas como fuentes de biomasa leñosa para la bioenergía es necesario evaluar su productividad en plantaciones energéticas dedicadas. Como requisito previo a la evaluación de los incrementos netos de producción anual es necesario contar con modelos que permitan estimar la biomasa en pie a partir de parámetros dimensionales y evaluar los parámetros energéticos de ambas especies para estimar la energía contenida en la biomasa de un lote o plantación.

Este capítulo se propone desarrollar modelos que permitan evaluar cuantitativamente la producción de biomasa en pie de *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula* durante el periodo de estudio de la plantación experimental y evaluar el potencial energético de la biomasa leñosa de ambas especies.

Los objetivos particulares son los siguientes:

1. Desarrollar ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa en pie de individuos arbóreos de *Acacia cochliacantha* y *Acacia pennatula* en los rangos dimensionales y edades de la plantación en el sitio experimental “El colorín”.
2. Comparar la producción de biomasa total y la asignación de recursos de las dos especies en biomasa foliar y dendromasa (biomasa leñosa).
3. Analizar los parámetros que definen las características energéticas de la biomasa de las dos especies para calificarlas como combustibles.
4. Con base en las ecuaciones alométricas desarrolladas, en las mediciones de las dimensiones de las acacias y en las características energéticas de las dos

especies, estimar la energía disponible y el carbono capturado en la biomasa en pie en individuos y plantaciones con estas especies.

3.1 Marco teórico alométrico y energético

3.1.1 Teoría alométrica

En 1936, Huxley y Teissier acuñaron el término “*alometría*” para definir el estudio del cambio relativo de las dimensiones (una o más variables) de un cuerpo en relación al cambio de una variable indicativa general (Blackstone, 1987; Gayon, 2000). Más recientemente se definió *alometría* como el estudio del cambio de una variable general, indicativa del tamaño de un cuerpo, debido a cambios en variables de su morfología (forma) (Bookstein *et al*, 1985). Hasta la actualidad, muchos modelos para estimar la biomasa de especies arbóreas (Singh & Singh, 1991; Verwijst y Telenius, 1999; Brown, 1997; Návar *et al*, 2002; Onyekwelu, 2003) se basan en el modelo potencial $Y = aX^b$ para derivar ecuaciones de regresión alométricas a partir de parámetros morfológicos (las dimensiones usualmente) y de datos generados mediante pruebas destructivas. La mayoría de los modelos para estimar la biomasa de los árboles toman como variable independiente el diámetro a la altura del pecho (a 1.3 m) (Brown, 1997; Onyekwelu, 2003); sin embargo, como en muchas de las especies de árboles y arbustos de las zonas tropicales secas el tronco se divide en varias ramas desde la altura de la base, este parámetro no es tan útil como variable predictiva como lo son el diámetro (o el área) de la base y las dimensiones de la copa (Chidumayo, 1988; Coughenour *et al.*, 1990; Young y Francombe, 1991; Návar *et al.*, 2002; House, 2004).

Al transformar los datos a su logaritmo, el modelo potencial puede ser presentado como una ecuación lineal simple log-log como la siguiente: $\log(Y) = \log(a) + b \times \log(X) + \log(\epsilon)$, donde Y es la biomasa estimada, X es la variable dimensional independiente o predictiva, $\log(a)$ el intercepto de la regresión, b es la pendiente, o tasa de cambio del log de la biomasa respecto a un cambio en el log de la variable independiente, y ϵ el error en la estimación.

Dada la complejidad de la estructura morfológica de las especies del trópico seco, para mejorar la estimación y explicar los cambios en la producción de biomasa ha sido necesario emplear métodos de regresión múltiple, combinando el área (o el diámetro)

de la base con las dimensiones de la copa, la altura total o la densidad de la madera. Simpson *et al* (1960) y Jolicoeur (1963) hicieron notar que no es evidente la forma de expandir las ecuaciones alométricas a más variables y posteriormente Parresol (1999) expuso el uso de métodos multivariados para estimar la biomasa de árboles. En especies arbustivas del trópico seco se ha confirmado que la aplicación de métodos de regresión múltiple mejora la correlación y disminuye el error en la estimación (Návar *et al*, 2002). Mediante regresiones múltiples por pasos se han logrado modelos alométricos para especies individuales y para transectos (o zonas) con diversas especies de las selvas caducifolias de México: Návar *et al*. (2002) desarrollaron ecuaciones alométricas multivariadas de 15 especies arbustivas en las zonas tropicales secas (de matorral) de Tamaulipas utilizando como variables predictivas (independientes) el *diámetro de la base* y la *altura*, mientras que Martínez-Yrizar *et al*. (1992) desarrollaron ecuaciones alométricas multivariadas generales de una selva baja de Jalisco, utilizando como variables predictivas el *diámetro de la base*, la *altura* y la *densidad de la madera*. En otro estudio, House (2004) desarrolló ecuaciones alométricas para acacias africanas del sitio experimental *Baringo* en Kenia, con base en los parámetros dimensionales *área de la base* y *área de la cobertura*, obteniendo coeficientes de correlación (R^2) entre 0.9 y 0.97.

El modelo de regresión múltiple se puede expresar también en la forma log-log, como se muestra a continuación:

$$\log(Y) = \log(a) + b_1 \log(X_1) + b_2 \log(X_2) + b_3 \log(X_3) + \dots + b_m \log(X_m) + \log(\varepsilon) \quad (3.1)$$

Donde X_1, X_2 hasta X_m son m variables independientes (o predictivas), $\log(a)$ es el intercepto de la regresión, b_1, b_2, \dots, b_m son las pendientes y ε es el error en la estimación. Para expresar la estimación en las unidades originales (kg), las ecuaciones de tipo log-log pueden re-transformarse al modelo potencial (multiplicativo, no lineal). El modelo potencial con más de una variable se expresa como sigue:

$$Y = aX_1^{b_1} X_2^{b_2} \dots X_m^{b_m} \varepsilon \quad (3.2)$$

Oyenkwelu, (2003) expone que en alometría se utilizan con frecuencia los modelos logarítmicos (log-log o ln-ln) porque pueden obtenerse mediante regresiones simples o múltiples y porque regularmente pueden extrapolarse mejor que los modelos lineales o ponderados. Parresol (1999) y Oyenkwelu, 2003) explican que la desventaja de los modelos logarítmicos estriba en que la suma del valor estimado de los componentes

no es igual al valor estimado de las ecuaciones de la biomasa total, porque el ajuste de la regresión en logaritmos (natural o base diez) estima la media geométrica en lugar de la media aritmética. Al respecto, Parresol (1999) indica que para obtener un resultado sin sesgo al transformar a las unidades originales es necesario multiplicar por un factor de corrección (FC), que puede expresarse así:

$$FC = \exp (SEE^2/2) \text{ o bien, } \exp (\text{varianza}/2) \quad (3.3)$$

Donde *SEE* es el error estándar de la regresión y la varianza es la raíz cuadrada del error cuadrático medio.

Basados en los datos generados a partir de una muestra destructiva, las pendientes b_i de la regresión log-log expresan la dependencia de un cambio de la variable Y en las variables X_i ; sin embargo, encontrar que en una muestra existe una relación de dependencia de la variable Y con la(s) variable(s) X_i (debido a alguna de las $b_i \neq 0$) no significa que dicha relación se cumple necesariamente en la población total.

El análisis de varianza (ANOVA) permite probar la significancia de la regresión en su conjunto: prueba que al menos una $b_i \neq 0$, implicando que la variable dependiente, "Y", se explica por la variable X_i (Zar, 1999). El método requiere identificar las fuentes de variación (de la regresión), sus respectivos grados de libertad (gl)¹, calcular para cada fuente de variación el cuadrado medio (MS) y aplicar la prueba F (Fischer). Para realizar la prueba de hipótesis de un parámetro individual ($H_0: b_i=0$) se utiliza la *prueba t de Student*². Cuando la prueba de hipótesis ($H_0: b_i=0$) arroja $p < \text{el nivel de significancia}$ (e.g. 5%), se acepta como verdadera H_A y se concluye que la relación de dependencia b_i entre las variables Y y X_i es significativamente representativa de la relación funcional en la población.

¹ Los grados de libertad (gl) indican el número de fuentes de variación sin sesgo (independientes linealmente).

² La prueba *t* se basa en el cálculo el cociente entre b_i y su error estándar (S_b), $t = b_i/S_b$.

3.1.2 Efecto de los tratamientos experimentales en las regresiones alométricas

Cuando adicionalmente se desea considerar el efecto que una o más variables nominales (o escalares), resulta útil hacer una expansión del modelo agregando una (o más) variables “*dummy*” (Zar, 1999). Por ejemplo, si se desea evaluar si la variable “*tratamiento experimental*” (T1, T2, etc.) tiene efecto sobre la variable dependiente (biomasa), el modelo puede ampliarse agregando dicha variable como una “*dummy*” (Zar, 1999). Al ejecutar el análisis, se adicionan columnas en la tabla de valores para las variables *dummy* en las que se introducen las combinaciones de valores 1 y 0 para identificar a la variable en cuestión. Este método, permite realizar la prueba de hipótesis ($H_0: b_i=0$) para determinar si los tratamientos tienen efecto (significativo) en la regresión. Si la prueba acepta la hipótesis H_A ($p \leq 5\%$), se concluye que el modelo con la variable adicional (*dummy*) ofrece una estimación significativamente más precisa que el modelo “sencillo”; si la prueba acepta H_0 ($p > 5\%$) se concluye que no conviene considerar la tercer (o cuarta) variable en la estimación.

3.1.3 Teoría de análisis energético

La evaluación del potencial energético de los combustibles (incluyendo a la biomasa) se basa en el estudio del poder calorífico y de las propiedades termoquímicas de los materiales. A continuación se resumen los principales aspectos que incluye el análisis termoquímico de evaluación energética.

Contenido de humedad

Hulscher (1997) explica que el contenido de humedad de la biomasa se expresa como una fracción (%) del peso de la biomasa. El contenido de humedad puede expresarse como una fracción de la biomasa total (con agua), de la biomasa seca con ceniza o de la biomasa seca sin ceniza. Las siguientes ecuaciones calculan el contenido de humedad de acuerdo a la base de referencia (Hulscher, 1997).

Contenido de humedad en base húmeda:
$$mc_w = W_{H_2O} / W_{wm} \quad (3.4)$$

Contenido de humedad en base seca:
$$mc_d = W_{H_2O} / (W_{daf} + W_{ash})$$

Contenido de humedad en base seca sin ceniza:
$$mc_{daf} = W_{H_2O} / W_{daf}$$

Donde W_{H_2O} es el peso del agua, W_{ash} es el peso de la ceniza y W_{daf} es el peso del material seco sin ceniza.

Poder calorífico

El Poder Calorífico Superior (HHV_d , por sus siglas en inglés) de un combustible expresa la cantidad de energía total que puede liberar en la combustión de una unidad de masa (en base seca) a volumen constante en una atmósfera de oxígeno (Núñez-Regueira *et al.*, 2001; Overend, 2003). El HHV_d es un parámetro útil para caracterizar la eficiencia de la combustión de la biomasa porque expresa la energía total del combustible, incluyendo la energía en el vapor generado en la reacción del hidrógeno (H) y oxígeno del material durante la combustión. El poder calorífico superior se mide mediante la prueba D2015-00 (ASTM-2001) con bomba calorimétrica. El valor que se obtiene del análisis con bomba calorimétrica expresa la energía total del material en base seca (no depende de la humedad del material).

El Poder Calorífico Inferior (LHV_d , por sus siglas en inglés) expresa la energía de un combustible descontando la energía del vapor generado en la combustión por la reacción del hidrógeno y el oxígeno intrínsecos en el material. Los poderes caloríficos superior e inferior se relacionan por la siguiente ecuación (Culp, 1979; Núñez-Regueira *et al.*, 2001; Hakkila y Parikka, 2003):

$$LHV_d = HHV_d - 2.45 \times (9H)_d \quad (3.5)$$

Donde H_d es la fracción de hidrógeno de la muestra seca.

Cuando la biomasa está húmeda los poderes caloríficos en base húmeda y base seca se relacionan mediante la siguiente ecuación (Hakkila y Parikka, 2003):

$$LHV_w = LHV_d - 2.45 \times (mc / (100 - mc)) \quad (3.6)$$

Donde LHV_w es poder calorífico inferior cuando la biomasa está húmeda, LHV_d es el poder calorífico inferior de la biomasa seca y mc es el contenido de humedad.

Contenido de ceniza (ac)

La ceniza es el material inorgánico, no gaseoso, remanente de la combustión. Varios autores (Oberberger *et al.*, 1997; Overend, 2003; y Hakkila y Parikka, 2003) explican

que las cenizas se componen de sustancias que las plantas absorben a lo largo su vida (K, S, B, Na, Cl, Ca, Si, Cu, e incluso metales pesados). Overend (2003) señala la importancia de determinar el contenido de cenizas en tres puntos: (1) pueden afectar la eficiencia de los sistemas de conversión de la energía, (2) contienen elementos necesarios para el reciclaje de nutrientes (NPK y otros) (principalmente en el suelo), y (3) por las implicaciones a la seguridad ambiental y a la salud pública por la emisión de las cenizas al ambiente. La prueba ASTM E1755-01 establece un estándar para determinar experimentalmente el contenido de ceniza en la biomasa.

Densidad

En su definición más simple, la densidad (d), o gravedad específica, es la masa por unidad de volumen (Panshin y Zeeuw, 1970), pero (para la biomasa) puede decirse que es el peso seco de un volumen de biomasa dividido entre el peso de un volumen equivalente de agua. La densidad d , o gravedad específica, es un parámetro que indica qué tan pesada y dura es la madera (Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2001).

Hulscher (1997) explica que en la biomasa hay tres tipos de densidades a las que hay hacer referencia: *la densidad real, la densidad aparente y la densidad en bulto*. La densidad real (o gravedad específica, d_r) es la que se utiliza con mayor frecuencia, e indica el peso de la pieza sólida de biomasa por unidad de volumen (d_r). Zobel y Buijtenen (1989) ha mostrado que la densidad real en la madera varía de 0.1 a 1.4. La *Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera* (IAWA) clasificó a la densidad real de la madera como baja <0.40, mediana de 0.4 a 0.75, y alta > 0.75 (IAWA, 1989).

Análisis inmediato (*proximity analysis*)

Los parámetros anteriormente descritos se concentran frecuentemente en un resumen: el *análisis inmediato*, que ofrece la caracterización preliminar de un combustible. El *análisis inmediato* incluye el HHV_d , el contenido de humedad, el contenido de ceniza, la materia volátil (VM) y el contenido de carbón fijo (FC). La suma de los componentes del *análisis inmediato* constituyen el total de la muestra:

$$FC\% + VM\% + ac\% + mc\% = 100\% \quad (3.7)$$

Para la biomasa como combustible, Sheng y Azevedo (2005) desarrollaron una ecuación de regresión general que relaciona el contenido de ceniza con el poder calorífico. A continuación se expresa dicha ecuación:

$$HHV_d(\text{MJ/kg}) = 19.914 - 0.2324 \times (\% \text{ ceniza}) \quad (3.8)$$

Así mismo, Demirbas (1997) desarrolló ecuaciones que relacionan el HHV_d , con el carbón fijo (FC) y la materia volátil (VM).

$$HHV_d = 0.196 \cdot FC + 14.119 \quad (3.9)$$

$$HHV_d = 0.312 \cdot FC + 0.1534 \cdot VM \quad (3.10)$$

Análisis elemental (ultimate analysis)

El contenido de los elementos principales de los combustibles: C, H, N, S, O, y cenizas, se resume en el *análisis elemental (ultimate analysis)*, con datos que se obtienen a partir de muestras en base seca.

Los metales pesados Cu, Mn, Cd, Pb, Zn y el Cl se analizan para presentarse en un resumen.

Klass (2004) y Sheng y Azevedo (2005) desarrollaron fórmulas para estimar el HHV_d a partir del contenido elemental de la biomasa, que se presentan a continuación:

Klass: $HHV_d(\text{MJ Kg}^{-1}) = 0.4571 \cdot C - 2.7 \quad (3.11)$

Sheng y Azevedo: $HHV_d(\text{MJ/kg}) = -1.3675 + 0.3137 \cdot C + 0.7009 \cdot H + 0.0318 \cdot O \quad (3.12)$

3.2 Métodos y materiales en alometría y energética

3.2.1 Metodología de pruebas alométricas

Las muestras utilizadas en las pruebas destructivas incluyeron individuos de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* a los 18 meses de crecimiento (en diciembre de 2006). La selección de individuos para las muestras se realizó con base en el registro más reciente de mediciones de los individuos capturado en la base de datos de la plantación experimental, que incluyó los parámetros dimensionales: *altura total*,

diámetro de la base, el número de ramas, altura de la copa (tocón) y las longitudes de los ejes mayor y menor de la cobertura (copa).

Selección de muestras para las pruebas destructivas

Las pruebas destructivas de árboles son regularmente difíciles de realizar porque requieren mucho tiempo y trabajo de campo, las principales limitantes son el tiempo y los recursos humanos disponibles, por lo que el tamaño de las muestras, n , suele ser reducido, ajustándose a los recursos disponibles³. A continuación se describe en mayor detalle el procedimiento de selección de la muestra.

A partir del registro y captura de las mediciones de campo, se observó que las poblaciones totales de plantas tuvieron distribuciones de frecuencia normales (gaussianas) a lo largo del intervalo de dimensiones de la variable *diámetro de la base*. Dado que los recursos humanos y materiales para realizar las pruebas de campo estaban limitadas, se decidió tomar muestras de 12 elementos de cada especie. Con base en la información de la base de datos de las dimensiones de las plantas se seleccionaron 12 individuos de *A. cochliacantha* y 12 de *A. pennatula* con *diámetros de la base* distribuidos a lo largo del intervalo dimensional de la población de cada especie. El tamaño de las muestras se tomó en función de los recursos humanos y materiales con los que se contó para realizar el trabajo de pruebas destructivas, incluyendo la medición, corte, seccionamiento, medición del peso (fresco, en campo, y seco, en laboratorio), traslado al laboratorio y secado en estufa. Las muestras incluyeron al menos 3 individuos cada tratamiento experimental. No obstante que el tamaño de la muestra fue limitado, permitió obtener resultados con coeficientes de correlación relativamente altos (como se mostrará más adelante) y errores de estimación relativamente pequeños. Considerando que en ambas especies la arquitectura de las ramas es muy similar a la de la planta completa, se cortó la rama más grande de varios individuo para agregarla como un elemento adicional de la muestra (como lo hizo Acosta-Mireles *et al.*, 2002), ampliando de esta manera el intervalo de estimación y el tamaño de las muestras. Una vez que se agregaron

³ Otros estudios alométricos generaron los datos para las regresiones con base en pruebas destructivas con muestras de tamaño "n" similares: Acosta-Mireles *et al.* (2002) utilizó $6 < n < 12$; Návar *et al.* (2002) utilizaron $n=15$; Monroy-Rivera y Návar-Chaidez (2004) utilizaron $n=3$; Banaticla *et al.* (2004) compilan varios estudios alométricos con $7 < n < 30$.

algunas ramas, las muestras quedaron constituidas por 21 elementos de *A. cochliacantha* y 20 individuos de *A. pennatula*.

El intervalo de las dimensiones de las muestras sobre las que se realizaron las pruebas destructivas se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 Intervalo de dimensiones de los individuos utilizados como muestra en las pruebas destructivas alométricas.

Especie	N	Área de la base (cm ²)		Área de la cobertura (m ²)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<i>A. cochliacantha</i>	21	0.31	3.63	0.058	2.70
<i>A. pennatula</i>	20	1.39	11.43	0.063	2.23

Los procedimientos para realizar las pruebas destructivas (corte, seccionamiento y medición del peso de los componentes) se basaron en la metodología propuesta por Stewart y Salazar (1992). Justo antes del corte, cada individuo se volvió a medir en sus parámetros dimensionales; se midieron los diámetros perpendiculares de la base del tronco con un calibrador (vernier); luego se cortó la acacia desde la base y se seccionó en sus componentes principales: hojas y folíolos, ramas y tronco. Cada componente se pesó en fresco en el campo utilizando una balanza digital de precisión (0.01 g) (Ohaus Adventurer) y se secó en estufa a 70°C durante 48 horas. Al final del secado se volvió a pesar cada componente utilizando la báscula digital y se registró su valor de peso correspondiente. Los datos se clasificaron en dos grupos principales: *biomasa foliar* (que incluyó solo las hojas y folíolos) y en *biomasa leñosa* (o *dendromasa*, que incluyó al tocón y las ramas). La información se organizó en una base de datos para facilitar su procesamiento. El *área de la base* (AB) y el *área de la cobertura* (AC) se calcularon a partir de la elipse que forman los ejes perpendiculares mayor y menor; los datos de las variables *dependiente* e *independiente* se transformaron al \log_{10} . Los parámetros de regresión se obtuvieron mediante regresiones simples y regresiones múltiples por pasos (Little y Hills, 1976; Zar, 1999; Pindyck y Rubinfeld, 2001) utilizando el software Statistica 6.0. El análisis determinó el coeficiente de correlación, R^2 , los parámetros $\log_{10}(a)$ y $\log_{10}(b)$, el error estándar de la regresión, el estadístico F y el nivel de significancia, para cada parámetro y para la regresión total. Al final se re-transformaron los parámetros al modelo potencial (multiplicativo no-lineal) multiplicándolos por el factor de corrección para obtener ecuaciones potenciales en las unidades originales de biomasa (kg).

3.2.2 Metodología del análisis energético

Como primer paso, en la plantación *El Colorín* se obtuvieron 10 muestras de madera de aproximadamente 10 cm de largo, de 1.5 a 2.5 cm de diámetro, de las ramas de *A. cochliacantha* y *A pennatula*. Inmediatamente al corte, las muestras se guardaron en bolsas de plástico de cierre hermético para transportarlas al laboratorio sin que perdieran humedad. En el laboratorio, a cada muestra se le extrajo una fracción de 10 g para secarla en estufa hasta llegar a peso constante; una fracción de cada muestra se pulverizó para se utilizó en las pruebas calorimétricas y la parte complementaria se utilizó en las pruebas de análisis químico elemental y en la medición de la densidad. El *peso específico (densidad real)* de la madera de estas especies se obtuvo aplicando el principio de desplazamiento de agua (Stewart y Salazar, 1992; Shavanas y Mohan-Kumar, 2003).

Con la intención de comparar los resultados de las pruebas termoquímicas, se obtuvieron muestras adicionales de madera la madera de *A. cochliacantha* y *A pennatula* de individuos que crecieron naturalmente en sitios de la región biogeográfica circundante a *El Colorín*: el bosque secundario del territorio de Cuentepec, en Chamilpa y en la reserva arqueológica de Xochicalco (todos estos sitios en el norte y norponiente del Estado de Morelos). Para *A. cochliacantha* se obtuvieron 4 muestras de madera (n=4) del territorio de Cuentepec y 4 muestras de árboles de la reserva de Xochicalco; para *A pennatula* se obtuvieron 8 muestras del bosque secundario de Cuentepec y 4 de individuos localizados en de Chamilpa. Los árboles para estas muestras fueron seleccionados por haber llegado a un desarrollo que los campesinos consideraron de un árbol adulto, con una edad de aproximada de 10 años (según la observación de los propietarios y los leñadores de la zona). Aunque el tamaño de estas muestra fue reducido, los resultados permitieron hacer comparaciones preliminares entre muestras de 18 meses de edad (establecidas en *El Colorín*) y árboles que crecieron naturalmente, de aproximadamente 10 años de edad.

Las pruebas del poder calorífico se realizaron utilizando una bomba calorimétrica estática marca Parr. Dentro de la bomba se colocaron pastillas compactadas, de un gramo de peso, con la madera pulverizada de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*. En todos los experimentos se llenó la bomba con Oxígeno al 99 % de pureza. El calorímetro se colocó dentro de una chaqueta isotérmica con una separación de aire

entre las superficies. La energía eléctrica para la ignición de la muestra se produjo mediante el cambio de potencial eléctrico en un capacitor. A partir del momento de la ignición se registraron los cambios de temperatura del agua, de los que se obtuvo la curva de la transferencia de calor. Con los cálculos definidos por el fabricante se obtuvo el valor del poder calorífico de cada muestra.

Los análisis de composición química elemental⁴ se realizaron utilizando un equipo Analizador Elemental *Fisons EA1108* para determinar la concentración de C, N, H, y S, mediante la oxidación completa e instantánea de la muestra en la combustión con oxígeno puro a una temperatura de 1020°C. El oxígeno (O) se estimó por la diferencia porcentual. Los análisis para determinar el contenido de metales pesados⁵ (Cu, Cd, Zn, Pb, Mn) se realizaron utilizando un espectrómetro de absorción atómica *Varian Spectr AA 220*. De acuerdo al fabricante, en este equipo la muestra se calienta hasta el punto en el que las moléculas se dividen en átomos, los átomos absorben calor y emiten radiación. Cada elemento tiene un espectro característico de emisión que permite identificarlo. Tanto en los análisis de composición química elemental como en los de metales pesados, únicamente se analizaron tres muestras (n=3)⁶.

3.2.3 Metodología de integración alométrica y energética

Los análisis alométricos y energéticos pueden integrarse con el objetivo de estimar la energía y el carbón almacenados en la biomasa aérea de los individuos en una plantación energética. Sustituyendo los valores del *área de la base* (AB) y del *área de la cobertura* (AC) en las ecuaciones alométricas y realizando los cálculos se obtiene una estimación de la biomasa en pie. Si los cálculos de biomasa de los individuos de una plantación se suman se obtiene la biomasa en pie de una plantación. Conociendo la biomasa de la plantación se puede estimar la energía contenida al multiplicar la biomasa (kg) por el poder calorífico promedio (HHV_d) de la especie. Si la biomasa de la plantación se multiplica por el contenido promedio de carbono (%C) de la especie, se puede obtener una estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de la plantación. De esta manera, la energía contenida en un individuo arbóreo de estas especies puede estimarse con la siguiente fórmula.

⁴ Prueba realizada en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación de la UNAM.

⁵ Prueba realizada en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación de la UNAM.

⁶ Por el elevado costo de la prueba solamente se analizaron tres muestras.

$$E \text{ (MJ)} = aX_1^{b_1}X_2^{b_2} (HHV_d) \quad (3.13)$$

Donde las variables independientes X_1 y X_2 son el *área de la base* (AB) y el *área de la cobertura* (AB); los parámetros a , b_1 y b_2 son los coeficientes de las ecuaciones alométricas, de acuerdo a la especie y a la fracción de biomasa que se estima: *biomasa total*, *biomasa leñosa* o *biomasa foliar*. Si se multiplica la biomasa leñosa de una plantación por el poder calorífico promedio de la madera de la especie se puede obtener una aproximación de la energía en un lote o plantación, como lo muestra la siguiente fórmula:

$$E \text{ (MJ)} = \left[\sum_{i=0}^{i=n} aX_1^{b_1}X_2^{b_2} \right] (HHV_d) \quad (3.14)$$

Similarmente, el carbono almacenado en la biomasa aérea en una plantación con estas acacias puede estimarse con la siguiente fórmula:

$$C \text{ (kg)} = aX_1^{b_1}X_2^{b_2} (\%C) \quad (3.15)$$

En donde %C es el porcentaje promedio de carbón (C) contenido en la madera de la especie de interés. Asimismo, el carbono contenido en una plantación, o lote con estas especies, puede estimarse se multiplica la biomasa de la plantación por el contenido de carbono promedio de la especie, como lo muestra la siguiente fórmula:

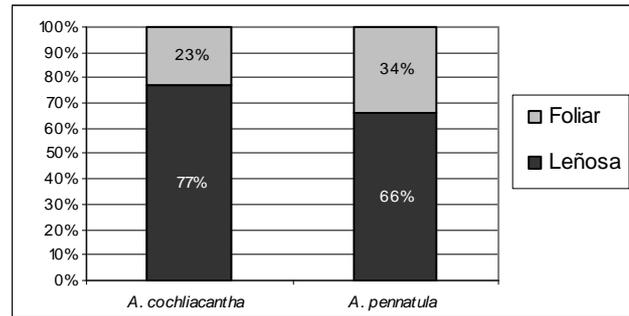
$$C \text{ (kg)} = \left[\sum_{i=0}^{i=n} aX_1^{b_1}X_2^{b_2} \right] (\%C) \quad (3.16)$$

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Resultados del análisis alométrico

A partir de las pruebas destructivas se determinó la composición de la biomasa en sus fracciones de *leñosa* (madera) y *foliar* (hojas y folíolos) aérea, para ambas especies, a los 18 meses de crecimiento en el sitio experimental, en diciembre de 2006 (inicio de la temporada de sequía), como lo muestra la Figura 3.1.

Figura 3.1 Fracción promedio de biomasa leñosa y foliar en *A. cochliacantha* y *A. pennatula* en diciembre de 2006, a los 18 meses de establecimiento en el campo (n= 21 *A. cochliacantha* y n= 20 en *A. pennatula*).



Al momento de las pruebas destructivas, la fracción de biomasa foliar fue de 23% en *A. cochliacantha*, mientras que en *A. pennatula* fue de 30%. La prueba se realizó cuando los árboles tenían 18 meses de establecimiento, al inicio de la temporada de sequía (en diciembre de 2006), cuando habían perdido una pequeña fracción de hojas⁷.

A partir de los datos generados en las pruebas destructivas se realizaron regresiones lineales y divariadas. La Tabla 3.2 presenta un resumen de las ecuaciones alométricas que dieron las mejores correlaciones para *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, en sus diferentes fracciones de biomasa. Para cada uno de estos parámetros de la regresión se indica con asteriscos (*) el nivel de significancia (p) de la prueba de hipótesis ($H_0: b_i=0$), el factor de corrección (FC) para transformar la ecuación a la forma potencial (en las unidades originales: kg) y el nivel de significancia (p) de la regresión total. En las regresiones múltiples los valores β_{AB} y β_{AC} indican contribución relativa de cada variable en la predicción conjunta de la variable dependiente⁸.

En *A. cochliacantha*, la estimación de la *biomasa total* obtuvo el mayor coeficiente de correlación ($R^2=0.94$) mediante la regresión múltiple de las variables *área de la base* (AB) y *área de la cobertura* (AC). La estimación de la *biomasa foliar* obtuvo la mejor estimación con la variable AC únicamente ($R^2=0.88$). La mejor estimación de la *biomasa leñosa* ($R^2=0.94$) se obtuvo mediante la regresión múltiple de las dos variables, AB y AC.

⁷ En las especies caducifolias la fracción de biomasa foliar es mayor durante la temporada de lluvia que en la temporada de sequía. Durante la sequía la fracción foliar decae, lo cual contribuye al ciclaje de nutrientes en el suelo (e.g. nitrógeno, fósforo, carbón).

En *A. pennatula* se obtuvo la mejor estimación de la biomasa total ($R^2=0.89$) mediante la regresión múltiple del área de la base (AB) y el área de la cobertura (AC). La estimación de la biomasa foliar mostró mejor coeficiente de correlación con la variable independiente AC únicamente ($R^2=0.83$). La mejor estimación de la biomasa leñosa (dendromasa) ($R^2=0.89$) se obtuvo mediante la regresión múltiple de AB y AC.

En este estudio se observó que las variables área de la base (AB) y área de la cobertura (AC) mostraron los coeficientes de correlación más altos ($R^2>0.83$), lo que las identifica como variables eficientes en la estimación de la biomasa total. Otras variables, como la altura total o la altura del tocón mostraron coeficientes de correlación mucho menores ($R^2<0.5$). El error estándar que se obtuvo de las regresiones fue muy bajo en todos los casos, por lo que los factores de corrección (FC) para convertir las ecuaciones a su forma potencial (en kg) fueron cercanos a la unidad. La Tabla 3.2 muestra también las funciones en su forma potencial. Estas ecuaciones son útiles para estimar la biomasa en pie (en las unidades originales, kg) de los individuos de estas especies a partir de los valores de los parámetros dimensionales AB y AC.

Realizando un análisis con variables *dummy* se probó si los tratamientos experimentales tienen efecto sobre las ecuaciones alométricas. La prueba *t* evaluó la siguiente hipótesis: los coeficientes b_i de las variables *dummy* que identifican a los tratamientos experimentales no tienen efecto significativo en las ecuaciones alométricas ($H_0: b_i=0$). Los resultados de este análisis mostraron que en este proyecto los tratamientos experimentales no tuvieron efecto significativo en los coeficientes b_i de las ecuaciones alométricas ($p>0.05$). En *A. cochliacantha* la prueba *t* mostró que los coeficientes b_i de las variables *dummy1* y *dummy2* (que identificaron a los tratamientos T1, T2 y T3) no tuvieron significancia estadística (p_1 y $p_2 >0.05$). Para la biomasa total, los coeficientes b_i de *dummy1* y *dummy2* $p_1=0.12$ y $p_2=0.16$; para la biomasa foliar, $p_1=0.21$ y $p_2=0.32$; para la dendromasa $p_1=0.15$ y $p_2=0.21$. Así mismo, en *A. pennatula* la prueba *t* mostró que los coeficientes b_i de las variables *dummy1* y *dummy2* (que identificaron a los tratamientos T4, T5 y T6) no tuvieron significancia estadística (p_1 y $p_2 >0.05$): para la biomasa total $p=0.17$ y $p=0.14$, para la biomasa foliar $p=0.28$ y $p=0.33$ y para la dendromasa $p=0.09$ y $p=0.16$.

Tabla 3.2 Resumen de ecuaciones de alométricas de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* en *El Colorín*, Cuentepec, 2006.

Función Potencial: biomasa (peso seco) = $aX_1^{b_1}X_2^{b_2}\epsilon$

Función logarítmica: $\log_{10}(\text{biomasa (peso seco)}) = \log_{10}(a) + b_1 \log_{10}(X_1) + b_2 \log(X_2) + \log_{10}(\epsilon)$

Parámetro dimensionales X_1 es el área de la base (AB) (en cm^2) X_2 es el área de la cobertura (AC) (en m^2).

Función potencial (biomasa aérea en kg de peso seco)	Regresión \log_{10} - \log_{10}									
	n	gl	R^2	Intercepto $\text{Log}_{10}(a)$	pendiente b_1 b_2		Err. Est.	FC	p	
<i>Acacia cochliacantha</i>										
biomasa total (kg)= 0.41										
$0.1022x (BA)^{0.844} (CA)^{0.4915}$ $\beta_{(BA)}= 0.582 \quad \beta_{(CA)}=$	21	(2, 18)	0.94	-0.994*****	0.844**	0.4915*	0.13003	1.008	****	
biomasa foliar (kg) =	21	(1, 19)	0.88	-1.7653*****	1.1462****		0.15100	1.011	****	
biomasa leñosa (kg) =	21	(2, 18)	0.94	-1.1173*****	0.9128**	0.4695**	0.13669	1.009	****	
$0.077 x (AB)^{0.9128} (AC)^{0.4695}$ $\beta_{(AB)}= 0.61 \quad \beta_{(AC)}= 0.38$										
<i>Acacia pennatula</i>										
biomasa total (kg) =	20	(2, 17)	0.89	-0.90*****	0.644**	0.601***	0.13467	1.009	*****	
$0.127 x(AB)^{0.644} (AC)^{0.601}$ $\beta_{(AB)}= 0.371 \quad \beta_{(AC)}= 0.622$										
biomasa foliar (kg) =	20	(1, 18)	0.83	-0.9091*****		0.7742**	0.1474	1.01	*****	
biomasa leñosa (kg) =	20	(2, 17)	0.89	-1.18747****	0.783**	0.6137***	0.15033	1.011	****	
$0.0667 x (AB)^{0.783} (AC)^{0.6137}$ $\beta_{(AB)}= 0.413 \quad \beta_{(AC)}= 0.580$										

n: tamaño de la muestra gl: grados de libertad (estimación, residual) R^2 : coeficiente de regresión (ajustado)
 b_1 y b_2 : pendientes respecto a las variables independientes FC: Factor de corrección p: nivel de significancia
 ** significativo al 0.00 *** significativo al 0.000 **** significativo al 0.0000 ***** significativo al 0.00000

3.3.2 Resultados de los análisis energético

Contenido de humedad

Al inicio de la temporada de sequía, en diciembre de 2006 (al momento de las pruebas destructivas), se midió *contenido de humedad*, mc_d , partir de registrar la diferencia entre el peso fresco y el peso seco de la biomasa aérea de las acacias (en los 20 elementos de *A. cochliacantha* y 19 *A. pennatula*). En *A. cochliacantha*, el *contenido de humedad* de la biomasa total fue 44% (+/- 5% s.d.), 50% (+/- 8% s.d.) en la biomasa foliar (hojas) y 42% (+/- 4% s.d.) en la biomasa leñosa; en *A. pennatula*, el *contenido de humedad* fue 51% (+/- 10% s.d.) en la biomasa total, 48% (+/- 6% s.d.) en la biomasa foliar y 52% (+/- 4% s.d.) en la biomasa leñosa.

Densidad

Como se mencionó anteriormente, la *densidad real* (gravedad específica) de ambas especies se midió por el principio de desplazamiento de agua (g cm^{-3}). Se observó que en *A. cochliacantha* la densidad varía mucho entre individuos de la misma región biogeográfica y diferentes edades. La Tabla 3.4 muestra un resumen de los resultados del análisis de densidad en muestras de madera de *A. cochliacantha*.

Tabla 3.4 Densidad real (gravedad específica) de la madera de *A. cochliacantha* en la región de Cuentepec (g cm^{-3}).

Edad de la planta	Sitio de colecta en Cuentepec	n	Media	Min	Max	Desv. Est.
18 meses	Plantación Colorín	10	0.76	0.65	0.82	0.06
adulto (10 años)	Reserva Xochicalco	4	0.70	0.67	0.73	0.02
adulto (10 años)	Bosque secundario	4	1.01	0.95	1.07	0.05

Estos resultados muestran que la densidad de la madera de *A. cochliacantha* puede variar dependiendo del sitio y la edad de los árboles. Las muestras analizadas en este estudio dieron resultados que de acuerdo a la clasificación de IAWA (1989) permiten clasificar la madera de *A. cochliacantha* con densidad media y alta⁹ (≥ 0.7).

⁹ La Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) clasificó a la densidad real de la madera como baja < 0.40 , mediana de 0.4 a 0.75, y alta > 0.75 (IAWA, 1989).

En *A. pennatula* la densidad de la madera mostró valores más bajos, confirmando que es una madera más ligera. Las muestras de madera más jóvenes (18 meses) mostraron menor densidad (0.74), mientras que en individuos silvestres del bosque secundario variaron de 0.8 a 0.97, aunque no llegaron a valores tan altos como los de *A. cochliacantha*. La Tabla 3.5 muestra un resumen de los resultados observados.

Tabla 3.5 Gravedad específica (*densidad*) de la madera de *A. pennatula* en Cuentepec y Chamilpa, Morelos (g cm^{-3}).

Edad de la planta	Sitio de colecta	N	Media	Min	Max	Desv. Est
18 meses	Plantación en El Colorín	10	0.74	0.62	0.86	0.10
adulta	Bosque secundario en Cuentepec	8	0.87	0.78	0.97	0.06
adulta	Chamilpa.	4	0.80	0.78	.82	0.02

Los valores más bajos de densidad corresponden a las plantas más jóvenes, aumentando el valor con la edad de los individuos: de 0.74 a 0.87 (en *El Colorín*). Los resultados también sugieren que la edad y el sitio pueden influir en el valor de la densidad específica.

Poder calorífico

Las pruebas con bomba calorimétrica mostraron que el poder calorífico superior (HHV_d , en MJ kg^{-1}) de muestras de madera de *A. cochliacantha* obtuvo valores promedio de 18.04 MJ kg^{-1} en los individuos jóvenes (18 meses en *El Colorín*). Para tener una referencia del poder calorífico en individuos adultos también se efectuaron pruebas calorimétricas en muestras de individuos adultos que crecieron naturalmente (silvestres) en la región circundante a *El Colorín*, de los que se registró un HHV_d promedio de 20.4 MJ kg^{-1} .

En *A. pennatula* los valores promedio del HHV_d fueron de 16.97 MJ kg^{-1} , en individuos de 18 meses, pero en muestras de individuos adultos silvestres se registró un valor promedio de 17.76 MJ kg^{-1} . La Tabla 3.6 muestra resultados experimentales del HHV_d , así como los valores estimados del poder calorífico inferior en base seca (LHV_d) (estimado con la fórmula 3.5) y en base húmeda (LHV_w), con un *contenido de humedad* (mc_d) del 12% (estimado con la fórmula 3.6), como el que se observó en la madera secada al ambiente en Cuentepec en la temporada de sequía (datos propios).

Harker *et al.* (1992) han mencionado que en maderas duras el poder calorífico alto (HHV_d) se encuentra en el rango de $19.73 \pm 0.98 \text{ MJ kg}^{-1}$. De acuerdo a los resultados experimentales, y al rango observado por Harker *et al.* (1992), *A. cochliacantha* muestra un poder calorífico (18.04 MJ/kg) en el rango de las maderas duras y *A. pennatula* muestra valores más bajos (16.97 MJ/kg). También se realizaron pruebas calorimétricas en muestras de madera de árboles silvestres (adultos, de aproximadamente 10 años) que crecieron en la región circundante a *El Colorín* (únicamente en muestras de 4 elementos).

Tabla 3.6 Poder calorífico alto (HHV), poder calorífico bajo (LHV) en base seca y base húmeda, y densidad de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*.

Especie Edad	Lugar de procedencia	n	HHV _d Experimental	LHV _d (estimado)	LHV _w mc=12% (estimado)	HHV _d ShyA (estimado)
<i>A. cochliacantha</i>						
18 meses	Plantación Colorín	10	18.04	16.76	16.42	19.43
adulta	Xochicalco	4	20.4	19.23	18.90	21.25
<i>A. pennatula</i>						
18 meses	Plantación Colorín	10	16.97	15.75	15.41	18.96
adulta	Chamilpa	4	17.76	16.54	16.21	18.31

Todos los valores de HHV y LHV están en MJ kg^{-1} ShyA: Sheng y Azevedo (2005)

La Tabla 3.6 muestra también los poderes caloríficos estimados con la fórmula Sheng y Azevedo (2005) (ShyA). La fórmula de Sheng y Azevedo dio una estimación más cercana a los valores experimentales de *El Colorín* que la fórmula de Klass (2005). Los valores experimentales muestran que a mayor edad del individuo la madera tiene mayor poder calorífico (HHV_d). Estos valores se pueden tomar como un indicador preliminar para realizar estimaciones aproximadas de la energía de estas especies.

Con base en los valores experimentales del es posible estimar el contenido de carbón fijo (FC), materia volátil (VM) y contenido de ceniza (Demirbas, 1997). La tabla 3.7 muestra un resumen de las estimaciones.

Tabla 3.7 Poder Calorífico, carbón fijo (%FC), materia volátil (%VM) y contenido de ceniza (%ac) (valores estimados a partir del HHV_d).

Species	HHV _d experimental	%FC (estimado)	%VM (estimado)	%ac (estimado)
<i>A. cochliacantha</i>	18.04	20.1	76.9	3.08
<i>A. pennatula</i>	16.97	14.5	81.04	4.41

La tabla muestra que aunque *A. pennatula* tiene un poder calorífico (HHV_d) menor que *A. cochliacantha*, muestra una fracción mayor de materia volátil (%VM). El contenido de ceniza (%ac) de estas especies muestra valores similares a los de otras especies arbóreas de uso energético (Batt y Tomar, 2002). Como referencia de comparación, *Eucalyptus camaldulensis* (la especie tropical de mayor uso energético) ha mostrado en valores HHV_d entre 19 y 21 MJ kg⁻¹ y valores de FC= 16.5%, VM= 82.62% y ac= 1.23% (Hulscher, 1997).

Análisis elemental y de metales pesados

La Tabla 3.8 resume los resultados del análisis de elementos principales y la Tabla 3.9 el análisis de metales pesados. Los resultados muestran el valor promedio de tres muestras de madera en cada caso, incluyendo muestras de *El Colorín* y muestras del bosque de la región de Cuentepec. El análisis elemental mostró que en *A. cochliacantha* la concentración de carbón (C) fue mayor en individuos silvestres adultos, 56.4%, mientras que en individuos juveniles de *El Colorín* el contenido de C fue 48.5 %. En *A. pennatula* la concentración de C fue 47.7% en individuos juveniles de *El Colorín*, aunque en muestras de un individuo adulto silvestre se obtuvo un valor de 45.4% de contenido de C. El contenido de hidrógeno (H) varió de 5.3% a 5.9% en ambas especies. Dentro de la capacidad de detección del equipo de análisis, se registró que el contenido de N y S fue cercano a cero en ambas especies.

Tabla 3.8 Análisis de elementos principales en *A. cochliacantha* y *A. pennatula* con muestras de *El Colorín* (n=3) y de individuos silvestres (n=3).

	Análisis elemental (%)				
	N	C	H	O	S
<i>A. cochliacantha</i>					
18 meses	~ 0	48.5	5.9	45.5	~ 0
Silvestre adulta	~ 0	56.4	5.3	38.2	~ 0
<i>A. pennatula</i>					
18 meses	~ 0	47.7	5.54	46.7	~ 0
Silvestre adulta	~ 0	45.4	5.53	49.0	~ 0

Ya que el análisis elemental mostró valores aproximados a cero en el contenido de N y S, puede esperarse que las emisiones de NO_x y SO_x de estas especies, debido a la madera, sean muy bajas.

En cuanto al contenido de metales pesados (Cu, Cd, Zn, Pb, Mn), este fue muy bajo en la mayoría de las muestras (< 0.01 %), según el rango detectable del equipo de

análisis utilizado. La mayor concentración fue de 0.04% de Zn en *A. pennatula* en *El Colorín*. La Tabla 3.9 muestra los resultados del análisis.

Tabla 3.9 Análisis de metales pesados en *A. cochliacantha* y *A. pennatula* con muestras de *El Colorín* (n=3) y de individuos silvestres (n=3).

	Análisis de metales pesados				
	Cu	Mn	Cd	Pb	Zn
<i>A. cochliacantha</i>					
18 meses	0.0004	0.0023	0.0002	0.0000	0.0002
Silvestre adulta	0.0002	0.0002	0.0002	0.0000	0.0001
<i>A. pennatula</i>					
18 meses	0.0039	0.0000	0.0001	0.0014	0.043
Silvestre adulta	0.0012	0.0012	0.0001	0.008	0.004

Estos resultados ofrecen datos preliminares en los que el contenido de metales pesados es prácticamente cero en muestras de madera (de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*) obtenidas de *El Colorín*, por lo que se esperaría que no hubiera riesgos de contaminación por estos metales en la madera producida en este sitio experimental.

3.3.3 Integración de los resultados alométricos y energéticos

Con base en los resultados de los análisis alométrico y energético de este capítulo es posible estimar la biomasa aérea de individuos de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, estimar la biomasa aérea en una plantación (o de lote de árboles), así como la energía y el carbono contenidos en la biomasa leñosa.

Sustituyendo en la fórmula 3.13 el HHV_d , los coeficientes alométricos a , b_1 y b_2 , y los valores del *área de la base* (AB) y del *área de la cobertura* (AC), se obtiene la energía contenida en la biomasa aérea leñosa de un individuo de *A. cochliacantha* o *A. pennatula*, como se expresa a continuación.

$$A. cochliacantha : E(\text{MJ}) = 0.077 \times (\text{AB})^{0.9128} (\text{AC})^{0.4695} \times (18.04) \quad (3.17)$$

$$A. pennatula : E(\text{MJ}) = 0.0667 \times (\text{AB})^{0.783} (\text{AC})^{0.6137} \times (16.97) \quad (3.18)$$

El procedimiento para calcular la energía agregada en un lote o plantación consiste en sustituir uno por uno los valores del *área de la base* (AB) y del *área de la cobertura* (AC) en la fórmula 3.14, como se expresa a continuación para ambas especies:

$$A. cochliacantha: E(\text{MJ}) = \left[\sum_{i=0}^{i=n} 0.077 \times (\text{AB})^{0.9128} (\text{AC})^{0.4695} \right] \times (18.04) \quad (3.19)$$

$$A. pennatula : E(\text{MJ}) = \left[\sum_{i=0}^{i=n} 0.0667 \times (\text{AB})^{0.783} (\text{AC})^{0.6137} \right] \times (16.97) \quad (3.20)$$

De forma similar, con base en los elementos de los análisis alométrico y energético, puede estimarse el carbono (C) contenido en la biomasa leñosa aérea de estas especies. Sustituyendo en la fórmula 3.15 el contenido de C, los coeficientes alométricos a , b_1 y b_2 , y los valores del *área de la base* (AB) y del *área de la cobertura* (AC), el C contenido en individuos de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* puede expresarse como se muestra a continuación.

$$A. cochliacantha: C(\text{kg}) = 0.077 \times (\text{AB})^{0.9128} (\text{AC})^{0.4695} \times (0.485) \quad (3.21)$$

$$A. pennatula : C(\text{kg}) = 0.0667 \times (\text{AB})^{0.783} (\text{AC})^{0.6137} \times (0.477) \quad (3.22)$$

Consecuentemente, el carbono almacenado en la biomasa leñosa de una plantación puede estimarse agregando la estimación de los individuos como se muestra a continuación para ambas especies (fórmula 3.16):

$$A. cochliacantha: C(\text{kg}) = \left[\sum_{i=0}^{i=n} 0.077 \times (\text{AB})^{0.9128} (\text{AC})^{0.4695} \right] \times (0.485) \quad (3.23)$$

$$A. pennatula : C(\text{kg}) = \left[\sum_{i=0}^{i=n} 0.0667 \times (\text{AB})^{0.783} (\text{AC})^{0.6137} \right] \times (0.477) \quad (3.24)$$

Estas fórmulas ofrecen una aproximación preliminar, basada en la información de plantas de 18 meses de crecimiento, para estimar la productividad e incrementos netos de producción de una plantación energética, en unidades energéticas (MJ) o en carbono capturado (kg).

3.4 Conclusiones

- Las ecuaciones alométricas presentadas en este capítulo permiten estimar la biomasa aérea leñosa y foliar de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, dentro de los intervalos dimensionales para los que se desarrollaron las regresiones en el sitio experimental *El Colorín*. Las ecuaciones de regresión obtuvieron los coeficientes de correlación más altos ($R^2 > 0.83$) con las variables predictivas *área de la base* (AB) y *área de la cobertura* (AC). La biomasa total y la biomasa leñosa mostraron mayores coeficientes de correlación en regresiones múltiples combinando ambas variables, AB y AC (en la biomasa total: $R^2 = 0.94$ para *A. cochliacantha* y $R^2 = 0.89$ para *A. pennatula*). Las ecuaciones de regresión para la biomasa foliar mostraron mayores coeficientes de correlación en función una sola variable AB para *A. cochliacantha* ($R^2 = 0.88$) y AC para *A. pennatula* ($R^2 = 0.83$).
- El análisis con variables *dummy* mostró que los tratamientos experimentales no tuvieron efecto significativos ($p > 0.05$) en las ecuaciones alométricas de ambas especies. En este experimento, la regla de decisión avala el uso de las ecuaciones alométricas a los individuos de de cada especie, independientemente del tratamiento experimental.
- Los valores del poder calorífico y de la densidad de la madera de *A. cochliacantha* están dentro del rango que la califican como una especie de madera dura (según quién). Cuando es joven, a los 18 meses, tiene un poder calorífico superior (HHV_d) de 18.04 MJ kg^{-1} ; cuando es adulta (aproximadamente 10 años) puede llegar a valores del HHV_d de 20.4 kg^{-1} . Puede considerarse como una especie valiosa energéticamente.
- Los valores de la densidad de *A. pennatula* la clasifican como una especie arbórea con madera de densidad media y dura. Los valores de su poder calorífico alto (HHV_d) la caracterizan como una especie de energía media, cercana a los valores de energía de las maderas duras. Cuando es joven, a los 18 meses, tiene un poder calorífico superior (HHV_d) de 16.97 MJ kg^{-1} ; cuando la planta es adulta puede llegar a valores de HHV_d de 17.89 MJ . Puede considerarse como una especie de valor energético medio.

- El contenido de metales pesados fue muy bajo en ambas especies. Esto muestra que en el sitio experimental *El Colorín*, la producción de biomasa de estas especies no representaría riesgos de contaminación por metales pesados si se utiliza en sistemas de combustión.
- Con base en los análisis alométrico y energético, este capítulo ha presentado una metodología que permite estimar la energía y el carbono contenidos en la biomasa aérea de especies que se ramifican desde la base, como *A. cochliacantha* y *A. pennatula*. Sustituyendo en las fórmulas correspondientes los valores de los coeficientes alométricos a , b_1 , b_2 , los parámetros físico-químicos HHV_d y %C, y los valores de los parámetros dimensionales AB y AC, se puede estimar la energía y el carbono de la biomasa aérea de individuos arbóreos, o bien, de forma agregada la de un lote o plantación.

Capítulo 4

Análisis de la productividad de *Acacia cochliacantha*, *Acacia pennatula* y *Phaseolus vulgaris* en plantaciones energéticas agroforestales y monocultivos agrícolas y forestales.

Por su capacidad para aportar nitrógeno atmosférico de forma natural y porque contribuyen a la estabilidad de ecosistemas frágiles, las leguminosas se han reconocido como un componente importante en la rehabilitación de sitios con suelo de baja fertilidad, en sistemas de cultivo de bajos insumos y en sistemas agroforestales (Giller y Willson, 1991).

Este capítulo presenta los resultados del análisis de la productividad biológica de los tratamientos experimentales (agroforestales y de monocultivo) en el proyecto de plantaciones energéticas en el sitio experimental *El Colorín*. Primero se presentan los métodos de análisis empleados y posteriormente los resultados experimentales de cada análisis, comparando el desempeño entre los tratamientos de acuerdo a las especies utilizadas y a los sistemas de fertilización.

La evaluación de la productividad biológica se realizó a partir de la aplicación de las ecuaciones alométricas desarrolladas en el capítulo 3. Se generó una base de datos con los valores de las mediciones de los principales parámetros dimensionales de todas las plantas de cada tratamiento experimental. La productividad de los tratamientos experimentales con frijol se evaluó solamente durante el primer año del proyecto.

Los objetivos particulares de este capítulo son los siguientes:

1. Evaluar comparativamente la supervivencia de acacias en los tratamientos experimentales.
2. Evaluar comparativamente la producción de biomasa leñosa de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* en los tratamientos experimentales establecidos en el sitio *El Colorín*.
3. Evaluar comparativamente la productividad de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol) durante el primer año del experimento.
4. Evaluar el efecto de la asociación de acacias y frijol en los sistemas agroforestales, y el efecto del tipo de fertilización del frijol en el crecimiento de las acacias.

4.1 Métodos de análisis

Aunque en el Capítulo 2 se describió el diseño de los tratamientos experimentales establecidos en el campo *El Colorín*; en esta sección profundizaremos en su descripción y presentaremos los métodos utilizados para su estudio y análisis de resultados. El proyecto experimental consiste de ocho tratamientos con las especies *A. cochliacantha* (cubata), *A. pennatula* (tepame) y *Phaseolus vulgaris* (frijol flor de mayo) en monocultivos o en asociaciones agroforestales, fertilizados química o biológicamente con *Rizhobium etli* (CIAT652) y micorrizas del género *Glomus intrarradices*. La Tabla 4.1 resume las especies utilizadas y el tipo de fertilización que se aplicó en los tratamientos experimentales.

Tabla 4.1 Especies y fertilización en los tratamientos experimentales.

	Sistema	Especie arbórea	Especie agrícola	Fertilización <i>P. vulgaris</i>
T1	AF	<i>A. cochliacantha</i>	<i>P. vulgaris</i>	química
T2	MF	<i>A. cochliacantha</i>		
T3	AF	<i>A. cochliacantha</i>	<i>P. vulgaris</i>	biológica
T4	AF	<i>A. pennatula</i>	<i>P. vulgaris</i>	química
T5	MF	<i>A. pennatula</i>		
T6	AF	<i>A. pennatula</i>	<i>P. vulgaris</i>	biológica
T7	MA		<i>P. vulgaris</i>	biológica
T8	MA		<i>P. vulgaris</i>	química

AF: agroforestal MF: monocultivo forestal MA: monocultivo agrícola

La Tabla 4.2 describe detalladamente los fertilizantes y las dosis que se aplicaron.

Tabla 4.2 Fertilización aplicada los tratamientos experimentales en *El Colorín*.

	Fertilización de acacias		Fertilización de <i>P. vulgaris</i> (N-K-P + micro)	
	2005	2006	2005	2006
T1	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	00-100-200 + Bo, Zn, Mo	00-100-200 + Bo, Zn, Mo
T2	Sin fertilización	P, Bo, Zn, Mo		
T3	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	<i>R. etli</i> y micorrizas	<i>R. etli</i> y micorrizas
T4	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	00-100-200 + Bo, Zn, Mo	00-100-200 + Bo, Zn, Mo
T5	Sin fertilización	P, Bo, Zn, Mo		
T6	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	Por asociación con <i>P. vulgaris</i>	<i>R. etli</i> y micorriza	<i>R. etli</i> y micorriza
T7			<i>R. etli</i> y micorrizas	<i>R. etli</i> y micorrizas
T8			00-100-200 + Bo, Zn, Mo	00-100-200 + Bo, Zn, Mo

Dosis: K: 100 kg ha⁻¹ P: 200 kg ha⁻¹ de superfosfato de calcio triple
Bo: 15 kg ha⁻¹, Zn: 25 kg ha⁻¹, Mo: 1 kg ha⁻¹.

Se realizaron análisis del suelo en *El Colorín*, previos al establecimiento del proyecto, y dos años después del establecimiento, junio de 2007¹. Esto permitió realizar una comparación de los cambios en los parámetros de fertilidad mas importantes, debido a los tratamientos experimentales. Los análisis incluyeron la medición de la acidez (pH), el contenido de materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), manganeso (Mg) y calcio (Ca). Los análisis iniciales proporcionaron una referencia promedio de los parámetros de fertilidad del sitio experimental, ya que se basaron en una muestra compuesta del suelo de diferentes zonas del terreno. Los análisis finales fueron específicos de cada tratamiento, pero, considerando que cada tratamiento de acacias tuvo cuatro parcelas de réplica, se tomó una muestra compuesta por tratamiento, que incluyó muestras del suelo de las cuatro réplicas. Como los tratamientos de monocultivo de frijol contaron únicamente con una parcela, las muestras de estos tratamientos fueron específicas de la parcela única.

Adicionalmente, al final del periodo de estudio (en mayo de 2007) se realizaron análisis del tejido vegetal del material foliar para conocer la composición elemental y el potencial para ciclar nutrientes de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*. Estos análisis se realizaron utilizando los siguientes métodos: nitrógeno (N), mediante la digestión con mezcla di-ácida y arrastre de vapor; fósforo (P), mediante fotolorimetría por reducción con molibdeno-vanadato; potasio (K), mediante espectrofotometría de emisión de flama; hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn) mediante espectrofotometría de absorción atómica². Los resultados de este análisis se muestran en el Anexo1 de la tesis.

Los análisis de supervivencia y crecimiento de acacias se basaron en la información generada en la inspección y medición periódica de las plantas de cada parcela, en las que se realizó la contabilidad de *plantas vivas* y *plantas muertas* y el registro de los principales parámetros dimensionales. Esta información se capturó en una base de datos (en Excel 3.0) que facilitó su manejo y análisis. Con el propósito de minimizar la

¹ El procedimiento de toma de muestras del suelo se realizó siguiendo las especificaciones del Laboratorio Central de Suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo: se toman muestras compuestas de suelo (tomadas de huecos cavados a 30 cm de profundidad), mezclando las tomas de 10 puntos del terreno, reducidas a 1 kg por el método de cuarteos.

² Pruebas realizadas en el Laboratorio Central de Suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo.

influencia de factores externos a las parcelas (e.g. ataque de roedores, lixiviación de fertilizantes o interacciones con las parcelas vecinas), el análisis excluyó los datos de las plantas de los bordes de las parcelas.

La introducción de plántulas al campo experimental se realizó al inicio del mes de junio de 2005 (al inicio de temporada de lluvia). A los dos meses de introducción, en agosto de 2005, se realizó la primer inspección y medición de los parámetros dimensionales de acacias; la segunda a los 5 meses de la introducción, en noviembre de 2005; la tercer inspección a los 12 meses de la introducción, en junio de 2006, y en octubre de 2006, a los 16 meses de la introducción, se realizó la última inspección que se reporta en este capítulo.

En el análisis de los datos se utilizaron varias pruebas estadísticas. La prueba Shapiro-Wilk sirvió para probar la normalidad de las distribuciones de frecuencia de los datos de las variables *diámetro de la base (b)* y *Diámetro de la Cobertura Mayor (DCM)*, así como de la estimación de la *biomasa total, leñosa y foliar*. El crecimiento y productividad de las acacias (en kg) se estimó aplicando las ecuaciones alométricas desarrolladas en el Capítulo 3. El análisis de varianza (ANOVA) factorial y la prueba de Tukey de alta diferencia significancia (Tukey HSD, por sus siglas en inglés) se utilizaron para comparar la productividad de biomasa arbórea y de frijol de los tratamientos experimentales a partir de las variables *diámetro de la base (b)*, *Diámetro de la Cobertura Mayor (DCM)* y cosecha del grano de frijol (Zar, 1999).

La productividad de frijol del periodo 2005 se evaluó a partir del registro del peso del grano cosechado en cada parcela en espacios de muestreo de 3x4 m (12 m²). Mediante el análisis estadístico de las muestras se estimó el volumen de la producción por hectárea de cada tratamiento experimental. Debido a la intrusión de ganado bovino en 2006, que comió gran parte del frijol, no fue posible realizar un muestreo confiable de la cosecha; aunque se realizó un muestro selectivo para rescatar los resultados, los datos no fueron consistentes; por esta contingencia se excluyeron del análisis.

Usualmente, para evaluar la eficiencia de la producción en sistemas agroforestales se utiliza el *Índice de Equivalencia del Suelo*, o LER, por sus siglas en inglés (*Land Equivalent Ratio*) (Willey y Heath, 1979; Vandermeer, 1989; García-Barrios L. y Ong, 2004). El índice LER se define por la siguiente ecuación:

$$\text{LER} = (\text{PC}_1)/(\text{PMC}_1) + (\text{PC}_2)/(\text{PMC}_2)$$

Donde PC_1 es la producción neta del cultivo 1 en agroforestería, PMC_1 es la producción del cultivo 1 en monocultivo, PC_2 es la producción neta del cultivo 2 en agroforestería y PMC_2 es la producción del cultivo 2 en monocultivo. Cuando el $\text{LER} > 1$ la combinación simultánea de cultivos es más conveniente, ya que se requeriría mayor superficie de terreno para obtener PC_1 y PC_2 si se produjeran en monocultivo.

4.2 Análisis de fertilidad del suelo

Como se mencionó anteriormente, la evaluación de los cambios en la fertilidad del suelo se realizó comparando los resultados de los análisis iniciales, de junio de 2005, con los resultados de los análisis en junio de 2007. La Tabla 4.3 presenta un resumen de resultados cuantitativos.

Tabla 4.3 Parámetros de fertilidad del suelo al inicio y al final del estudio en *El Colorín*.
Resultados en junio 2007

	Valor promedio en 2005	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
pH	5.11	5.22	5.03	4.9	5.06	5.08	4.8	4.72	4.95
Mat. Org. (%)	3.67	3.5	3.23	3.36	3.5	3.09	3.77	2.96	2.42
N (mg kg^{-1})	52	40.8	44.5	48.2	48.2	44.5	40.8	51.9	48.2
P (mg kg^{-1})	7.07	6.98	6.5	7.57	6.98	6.62	8.28	7.22	10.18
K (mg kg^{-1})	143.5	238	184	216	244	152	196	254	178
Mg (mg kg^{-1})	n.d.	621	728	550	727	593	532	529	738
Ca (mg kg^{-1})	1061	1072	1040	828	1060	967	784	798	974
D.Ap (mg/cm^3)	1.16	1.19	1.22	1.22	1.16	1.22	1.25	1.22	0.98

Acidez

El suelo del campo experimental *El Colorín* mostró ser ácido al inicio del proyecto. Se ha mencionado que cuando suelos de vocación forestal son deforestados, se provocan modificaciones en sus propiedades físico-químicas y morfología, entre las que destaca la acidificación (Vela Morales, 1990). La acidez del suelo puede neutralizarse aplicando calcio como aditivo; sin embargo, en este experimento no se aplicó con la intención de observar la influencia de las acacias sobre la acidez del suelo.

Al final del periodo de análisis el pH del suelo se clasificó en niveles ácidos en todos los tratamientos (Castellanos *et al.*, 2000). Con excepción de los tratamientos fertilizados químicamente (T1, T4 y T8), en los que se aplicó *súper fosfato de calcio triple*, los otros tratamientos (T2, T3, T5, T6 y T7), en los que no se adicionó calcio externo, no mostraron un efecto favorable en el control de la acidez. En los tratamientos biológicos, la acidez pudo intensificarse por la deficiencia inicial de calcio y porque el frijol biofertilizado ejerció mayor demanda de este elemento (especialmente por las micorrizas). En general, se observó que el suelo de los tratamientos con *A. pennatula* mostró mayor acidez que el suelo de los tratamientos con *A. cochliacantha*; la explicación de la influencia de *A. cochliacantha* en el control de la acidez requerirá estudios adicionales.

Marshner (1995) ha mencionado que con alta acidez del suelo (pH bajo) puede inducirse deficiencias de nutrientes (como fósforo y calcio) que afectan al cultivo de frijol, llevándolo a la disminución de nódulos fijadores de nitrógeno. En condiciones favorables, el suelo en el cultivo de frijol debe tener una acidez (pH) entre 6.0 y 7.5 (Castellanos *et al.*, 2000). Bala *et al.* (2002) y Peoples *et al.* (1995) han mencionado que la efectividad en la simbiosis con leguminosas arbóreas está correlacionada altamente con la acidez del suelo, ya que en suelos ácidos hay menor nodulación de *Rhizobia*.

Calcio

Los resultados de los análisis ubicaron a este elemento dentro del rango de disponibilidad baja en todos los tratamientos experimentales (Castellanos *et al.*, 2000). En general, los sistemas fertilizados químicamente promovieron mayor nivel de calcio aprovechable que los sistemas biológicos. El promedio de disponibilidad de calcio en los sistemas fertilizados biológicamente (T3, T6 y T7) fue de 803 mg kg⁻¹, mientras que en los que tuvieron algún aditivo agroquímico (T1, T2, T4, T5 y T8) en promedio fue de 1022 mg kg⁻¹. Una posible explicación a este resultado (hipotética) sería la siguiente: el calcio aportado por el *superfosfato de calcio triple* promovió mayor control de la acidificación del suelo en los tratamientos fertilizados químicamente, pero en los tratamientos fertilizados biológicamente las micorrizas intensificaron la extracción de este elemento; Kass (1995) ha mencionado que las micorrizas promueven el incremento del sistema radicular y la intercepción de nutrimentos, explotando un volumen mayor del suelo.

Se ha mencionado que la deficiencia en Calcio puede ser un factor crítico en la formación de nódulos en las leguminosas (Giller, 2001). En pruebas de laboratorio, Rehman y Nautiyal (2002) observaron mayor supervivencia de *Rhizobium sp.* NBR12505 sesbania en un medio ácido de pH 3 con la presencia de 5% de CaCO₃, sugiriendo que para su crecimiento y supervivencia se requiere Ca, y comentaron que esto podría tener implicaciones significativas en suelos ácidos.

Potasio (K)

Al inicio del proyecto el promedio general de potasio disponible en el terreno fue de 143.5 mg kg⁻¹. Al término del periodo de estudio se observaron rangos de baja a mediana disponibilidad, con una tendencia general de mayor disponibilidad del elemento que al inicio del estudio (Castellanos *et al.*, 2000).

Los sistemas agroforestales químicos (T1 y T4) mostraron mayor disponibilidad de potasio, 238 y 244 mg kg⁻¹, posiblemente como remanente residual de la adición directa de este elemento. Es posible que en los sistemas agroforestales biológicos (T3 y T6) el uso de la micorriza haya promovido mayor extracción de este elemento, quedando finalmente en menor disponibilidad que en los tratamientos con agroquímico: 216 mg kg⁻¹ en T3 y 196 mg kg⁻¹ en T6. En los monocultivos forestales (T2 y T5), en los que no se agregó potasio ni se aplicaron micorrizas, los niveles finales fueron los menores, 184 y 152 mg kg⁻¹, respectivamente. En los monocultivos de frijol se observaron resultados dispares, en el monocultivo fertilizado biológicamente (T7) el potasio fue superior al de todos los tratamientos (254 mg kg⁻¹), mientras que en el monocultivo fertilizado químicamente (T8) fue de 178 mg kg⁻¹, nivel comparable al nivel de los monocultivos forestales. Por otro lado, en el monocultivo de frijol fertilizado químicamente (T8) el potasio quedó disponible en un nivel similar al del 2005, aunque en menor cantidad que el potasio final en los sistemas agroforestales (químicos y biológicos).

En general, se observó que la aplicación de potasio dio como resultado niveles medios de disponibilidad en los sistemas fertilizados químicamente (Castellanos *et al.*, 2000). En los sistemas agroforestales fertilizados biológicamente el nivel de potasio final fue menor que en los sistemas agroforestales químicos, pero mayor que en los monocultivos forestales. En los sistemas biológicos este elemento quedó en niveles cercanos a los que se consideran medios. En general, los sistemas de monocultivo

forestal, sin aditivos químicos ni biológicos, mostraron menor disponibilidad de este elemento.

Materia orgánica (MO)

En terrenos de textura arcillosa, como *El Colorín*, conviene mantener el suelo con niveles altos de MO para mejorar la estructura, drenaje del suelo y aireación del sistema radical de las plantas (FAO, 1997). Aunque al inicio del proyecto la materia orgánica se encontraba en niveles que se consideran altos, al final del periodo de estudio la materia orgánica presentó variaciones que la clasifican en rangos de mediano a alto (Castellanos, 2000). En el suelo de los sistemas con acacias se encontró MO en niveles promedio más altos que en los monocultivos de frijol (3.41%), lo cual puede atribuirse a que las acacias, con la caída de hojarasca, contribuyeron a su mantenimiento. En general, los sistemas agroforestales mostraron niveles mayores de MO (3.53% en promedio) que los monocultivos (3.16% en promedio), lo que puede deberse principalmente al aporte conjunto de las acacias, con la caída de hojarasca, y del frijol, con las raíces y materia que queda después de la cosecha. En los resultados del análisis de MO sobresalieron los sistemas agroforestales de *A. pennatula*, mostrando ligeramente mayor MO (3.63% en promedio) que sus equivalentes con *A. cochliacantha* (3.43% en promedio). En contraste, los monocultivos de frijol mostraron los menores niveles de MO, acentuándose el nivel más bajo en el monocultivo de frijol fertilizado con agroquímico (2.42%).

Nitrógeno

El nivel inicial de nitrógeno inorgánico en *El Colorín*, en 2005, podría considerarse como alto: 52 mg kg⁻¹ (Castellanos, 2000). Al finalizar el periodo de observación, en 2007, el nivel de este elemento fue similar al de 2005 en los tratamientos T3, T4 y T7, pero inferior en los tratamientos T1, T2, T5 y T6. Las diferencias de nitrógeno no mostraron un patrón respuesta evidente ante el tipo de fertilización o ante la especie utilizada. En los tratamientos con acacias el promedio de nitrógeno inorgánico fue 44.5 mg kg⁻¹, mientras que en los tratamientos de monocultivo de frijol el promedio fue más alto, 48.2 mg kg⁻¹. Destacó el sistema de monocultivo con fertilización biológica con el mayor nivel de nitrógeno disponible: 51.9 mg kg⁻¹. En los tratamientos con *A. cochliacantha* el nivel de nitrógeno en el suelo fue más bajo en el sistema agroforestal fertilizado químicamente (T1) que en el sistema de monocultivo forestal (T2) y que en el sistema agroforestal fertilizado biológicamente (T3), la tendencia fue de mayor

disponibilidad de este elemento con menor adición de agroquímico; en contraste, en los tratamientos con *A. pennatula* la tendencia de la disponibilidad de este elemento en el suelo fue mayor con la fertilización química: fue mayor en el sistema agroforestal fertilizado químicamente (T4), seguido por el monocultivo forestal (T5) y con el resultado más bajo el sistema agroforestal fertilizado biológicamente (T6).

La comparación de los tratamientos de monocultivo de frijol con fertilización biológica y química muestra que el aporte de nitrógeno por *Rizobium etli* fue capaz de mantener el nivel de este nutriente similar al del inicio del proyecto (52.69 mg kg⁻¹ en 2005), mientras que con el fertilizante agroquímico el nitrógeno disponible disminuyó finalmente a 48.2 mg kg⁻¹.

Dado que *A. cochliacantha* y *A. pennatula* son especies arbóreas leguminosas, podría esperarse que el nitrógeno disponible en el suelo de los tratamientos con estas especies fuera mayor; sin embargo, los resultados no confirmaron esta hipótesis. Es pertinente considerar que en *El Colorín* la fijación de nitrógeno pudo estar limitada por la fuerte acidez del suelo. Andrade *et al* (2002) observaron que en suelos ácidos la diversidad de *Rhizobia* en nódulos de frijol fue mucho menor que en suelos con niveles de calcio altos. También hay que considerar que al ser muy jóvenes las acacias de este estudio, el control de la acidez y el aporte de nitrógeno mediante el ciclaje de nutrientes fueron muy limitados.

Fósforo (P)

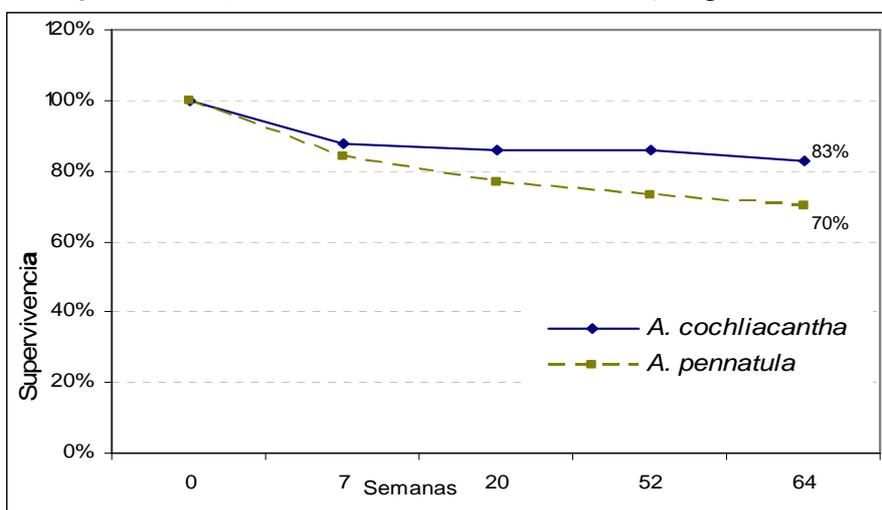
Al final del estudio, la mayoría de los tratamientos experimentales mostró niveles de disponibilidad de este elemento similares al del promedio inicial del proyecto (7.07 mg kg⁻¹ en 2005), considerados en un término medio (Castellanos, 2000). En 2007, el fósforo aprovechable mostró diferencias de disponibilidad entre los tratamientos experimentales, variando en un intervalo de 6.5 a 10.18 mg kg⁻¹. El suelo de los tratamientos agroforestales fertilizados biológicamente (7.57 mg kg⁻¹ en T3 y 8.28 mg kg⁻¹ en T6) mostró mayor disponibilidad de este elemento que en los tratamientos agroforestales fertilizados químicamente (6.98 mg kg⁻¹) y en los monocultivos forestales (6.56 mg kg⁻¹). El monocultivo de frijol fertilizado biológicamente mostró un resultado de fósforo disponible de 7.22 mg kg⁻¹, mientras que en el monocultivo de frijol fertilizado químicamente fue de 10.18 mg kg⁻¹.

El nivel alto de este elemento en los tratamientos agroforestales biológicos puede atribuirse a que las micorrizas promovieron su disponibilidad, de manera que finalmente quedó disponible en mayores cantidades. Aunque en los tratamientos agroforestales químicos (T1 y T4) y en los monocultivos de acacias (T2 y T5) se adicionó este elemento como superfosfato de calcio triple, existe la posibilidad de que debido a la acidez del sitio, así como por la competencia acacias vs frijol por el nutriente, se haya afectado su aprovechamiento y ciclaje, de manera que no quedó disponible en niveles medianos o altos. Por otro lado, el nivel alto de este elemento en el monocultivo de frijol químico (T8) puede deberse a que al no tener extracción adicional por las acacias quedó un remanente mayor en el suelo.

4.3 Supervivencia de acacias

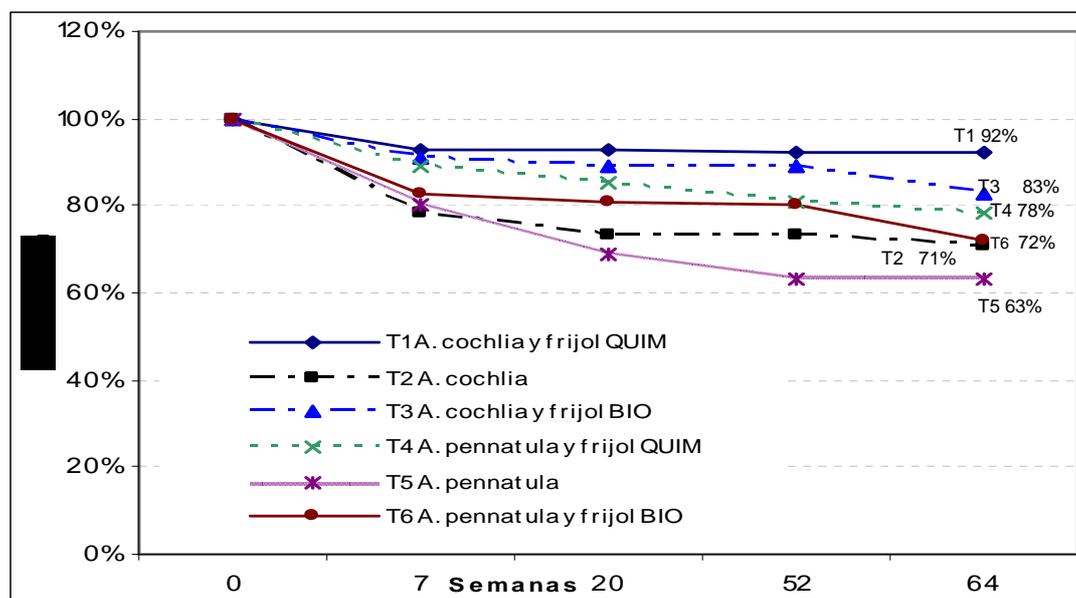
La Figura 4.1 presenta los resultados del análisis de supervivencia de las poblaciones totales de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* a lo largo del estudio. A los 16 meses de observación se constató que la población total de *A. cochliacantha* tuvo mayor supervivencia (83%) que la población de *A. pennatula* (70%).

Figura 4.1 Supervivencia de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*



La Figura 4.2 muestra los resultados y tendencias de supervivencia de los seis tratamientos experimentales con acacias durante los 16 meses (64 semanas) de observación.

Figura 4.2 Supervivencia de acacias en los tratamientos experimentales en *El Colorín*.



Los resultados de supervivencia se resumen numéricamente en la siguiente tabla.

Tabla 4.4 Supervivencia en los tratamientos experimentales en el sitio experimental *El Colorín*.

	% de supervivencia							
	<i>A. cochliacantha</i>	<i>A. pennatula</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Agosto-2005	88%	84%	90%	78%	91%	89%	80%	83%
Nov-2005	86%	77%	93%	71%	89%	85%	69%	81%
Junio-2006	86%	73%	92%	73%	89%	81%	63%	80%
Octubre-2006	83%	70%	92%	71%	83%	78%	63%	72%

Al comparar los resultados se observan las siguientes tendencias generales:

- 1) La mayor mortalidad de acacias se observó durante los primeros dos meses como consecuencia de la introducción de las plántulas al campo, cuando las lluvias fueron erráticas, con un poco de sequía en las semanas siguientes a la introducción. Superada esta etapa la mortalidad se atenuó, quedando sujeta a factores como la herbivoría de roedores y el ataque de insectos.
- 2) *A. cochliacantha* mostró mayor supervivencia promedio que *A. pennatula* a lo largo del estudio, con una diferencia final de 13% en la última inspección (a los 16 meses).

- 3) La mayor supervivencia de acacias la mostraron los sistemas agroforestales; en primer lugar el tratamiento de *A. cochliacantha* asociada con frijol fertilizado químicamente (T1), en segundo lugar el tratamiento de *A. cochliacantha* asociada con frijol fertilizado biológicamente (T3) y en tercer lugar el tratamiento de *A. pennatula* con frijol fertilizado químicamente (T4).
- 4) La menor supervivencia se presentó en los sistemas de acacias en monocultivo (T2 y T5).
- 5) La diferencia entre los sistemas de mayor y menor supervivencia, T1 y T5, se fue ampliando a lo largo del estudio, con una diferencia final de 29%.

Estos resultados confirman las cualidades de resistencia y adaptabilidad que se conocen sobre ambas especies (Vargas-Rodríguez *et al.*, 2005; Heil *et al.*, 2004). En las condiciones climáticas y edafológicas del sitio experimental, se confirmó la resistencia y adaptabilidad de estas especies, tanto en tratamientos de monocultivos como en tratamientos agroforestales con frijol en callejones. Sobresale la supervivencia de las acacias en los tratamientos agroforestales, particularmente de *A. cochliacantha*.

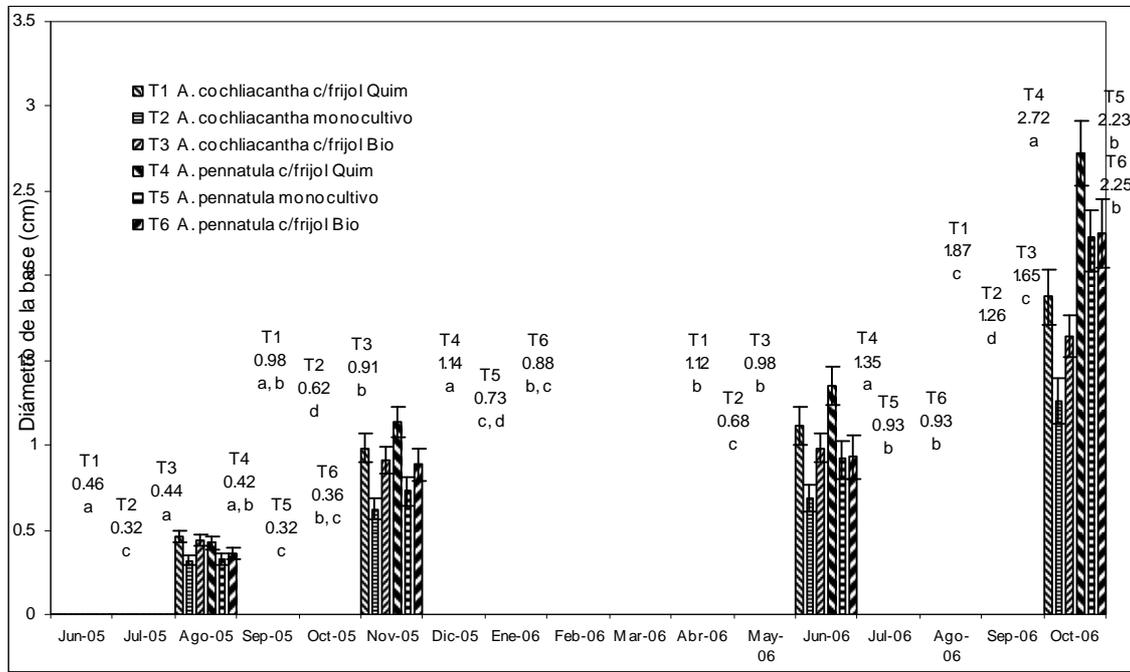
4.4 Crecimiento y producción de biomasa de las acacias.

Crecimiento del diámetro de la base

En el Capítulo 3 se observó que las variables *Área de la Base (AB)* y *Área de la Cobertura (AC)* pueden utilizarse como indicadores de la biomasa aérea *total, leñosa y foliar* de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*. Como el *Área de la Base (AB)* se calcula con base en el parámetro *diámetro de la base (db)*, este puede considerarse también un indicador de la biomasa. La prueba Shapiro-Wilk (SW) ($p > 0.05$) mostró que en los cuatro momentos de medición, a los 2, 5, 12 y 16 meses, la distribución de frecuencias de los datos del *db* fue normal (o muy cercana a normal) en la mayoría de los tratamientos experimentales. En contraste, los datos de las variables *Área de la Base (AB)* y *Área de la Cobertura (AC)*, y las estimaciones de las biomásas *total, leñosa y foliar*, no mostraron consistentemente distribuciones de frecuencia normales (SW,

$p < 0.05$). La Figura 4.3 muestra la evolución de las dimensiones promedio de la variable *diámetro de la base (db)* en los tratamientos experimentales.

Figura 4.3 *Diámetro de la base (db)* promedio en los tratamientos con *A. cochliacantha* y *A. pennatula* a los 2, 5, 12 y 16 meses de introducción al campo.



A los dos meses de introducción los tratamientos con *A. cochliacantha* mostraron ligeramente mayor diámetro de la base que sus equivalentes de *A. pennatula*. La diferencia entre las dos especies pudo deberse a que las plántulas de *A. cochliacantha* se introdujeron con mayor tamaño que las de *A. pennatula*. En ambas especies se notó el efecto de los tratamientos experimentales significativamente ($p < 0.05$): en *A. cochliacantha* los tratamientos agroforestales (T1 y T3) mostraron el mayor desempeño con respecto al monocultivo (T2), en *A. pennatula* los tratamientos agroforestales (T4 y T6) también mostraron mayor desempeño que el monocultivo (T5) aunque la diferencia fue significativa solamente entre T4 y T5 ($p < 0.01$).

A diferencia de la primer medición, a los 5 meses de la introducción, cuando terminó la primer temporada de lluvia, los tratamientos con *A. pennatula* mostraron tendencia de mayores dimensiones del *db* que sus tratamientos equivalentes en *A. cochliacantha*, aunque las diferencias no fueron significativas ($p > 0.05$). En ambas especies destacaron en primer lugar los tratamientos agroforestales con frijol fertilizado

químicamente (T1 y T4), en segundo lugar los tratamientos agroforestales con frijol biofertilizado (T3 y T6) y con el menor desempeño los monocultivos de acacias (T2 y T5). En cada especie se observaron diferencias específicas entre los tratamientos experimentales que la prueba de Tukey constató. En los tratamientos con *A. cochliacantha* el *db* no fue significativamente diferente ($p > 0.05$) entre los tratamientos agroforestal químico y biológico (T1 y T3), pero fue altamente significativa entre los tratamientos agroforestales y el monocultivo (entre T1 y T2 $p < 0.01$; entre T2 y T3 $p < 0.01$). En los tratamientos con *A. pennatula* el *db* del tratamiento agroforestal químico (T4) mostró diferencias altamente significativas con los tratamientos de monocultivo (T5, $p < 0.01$) y agroforestal biológico (T6, $p < 0.01$), aunque el *db* en el tratamiento agroforestal biológico (T6) fue mayor que en el monocultivo (T5) la diferencia no fue significativa ($p = 0.13$).

Después del primer periodo de sequía, a los 12 meses de la introducción al campo, el patrón de dimensiones del *db* mostró algunos cambios de la tendencia observada en las mediciones anteriores. En *A. cochliacantha* volvió a destacar el tratamiento agroforestal químico (T1), en segundo lugar el tratamiento agroforestal biológico (T3) (sin diferencias significativas entre T1 y T3, $p = 0.4$), mientras que el menor desempeño se dio en el monocultivo (T2) (diferencia altamente significativa respecto a los sistemas agroforestales T1 y T3, $p < 0.01$). En *A. pennatula*, el sistema agroforestal químico (T4) mostró significativamente mayor desarrollo del *db* que T5 y T6 ($p < 0.01$ en ambos casos), pero la diferencia entre el monocultivo forestal (T5) y el sistema agroforestal biológico (T6) se minimizó casi totalmente ($p = 1.0$). La reducción de la diferencia entre T5 y T6 pudo deberse a la respuesta de *A. pennatula* a los micronutrientes que se adicionaron al monocultivo (T5) (Bo, Zn y Mo). Este resultado podría sugerir que en términos del desarrollo del *db*, en este sitio experimental *A. pennatula* puede tener un desempeño similar en un monocultivo con micronutrientes que en un sistema agroforestal con frijol biológico. Por otro lado, en *A. cochliacantha* la respuesta a los micronutrientes no se reflejó en el desarrollo del *db*. Esta tendencia tiene que compararse con los resultados del crecimiento de la copa y de la producción de biomasa.

Al final de la segunda temporada de lluvia (a los 16 meses), *A. pennatula* mostró nuevamente mayor desarrollo del *db* que *A. cochliacantha* en todos los tratamientos. El análisis factorial mostró diferencias altamente significativas entre las dos especies,

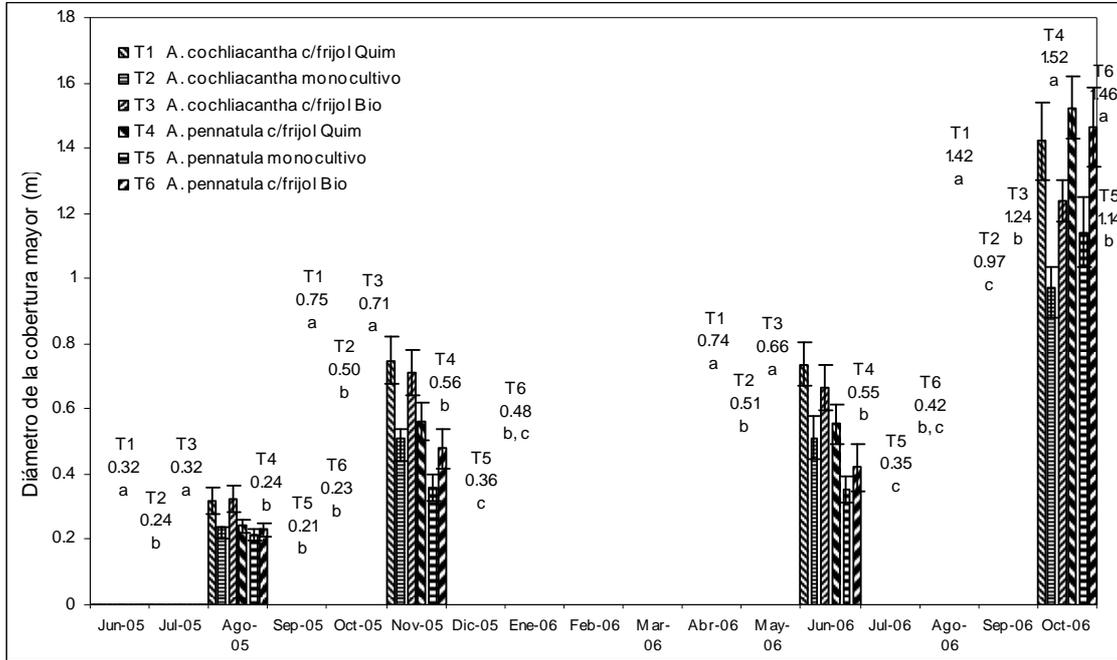
$p < 0.01$. En *A. cochliacantha* el mayor desarrollo del *db* fue en el tratamiento agroforestal químico (T1), seguido por el agroforestal biológico (T3) y con el menor desempeño el monocultivo (T2); solamente fue significativa (altamente) la diferencia de *db* entre T1 y T2, $p < 0.01$). En los tratamientos con *A. pennatula* destacó el tratamiento agroforestal fertilizado químicamente (T4), con *db* significativamente diferente al de T5 y T6 ($p < 0.01$). Nuevamente se observó que el monocultivo (T5) y el tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6) fueron muy similares ($p = 0.99$), posiblemente como efecto de la aplicación de micronutrientes a T5.

En términos del *db*, en *A. cochliacantha* se confirmó que la asociación con el cultivo de frijol en los tratamientos agroforestales (químico y biológico) tuvo una influencia significativa favorable para la acacia (en comparación con el monocultivo). En *A. pennatula* la asociación con el cultivo de frijol solo mostró una influencia favorable para la acacia cuando el frijol se fertilizó químicamente.

Crecimiento de la Cobertura

Como se mostró en el capítulo 3, la variable *Área de la Cobertura (AC)* también es un estimador de la biomasa aérea de ambas especies. El *Área de la Cobertura (AC)* se define por el área de la elipse que forman el *Diámetro de la Cobertura Mayor (DCM)* y el *Diámetro de la Cobertura menor (DCm)*. Al analizar los datos de las mediciones, se observó que los datos de la variable *Área de la Cobertura (AC)* no mostraron distribuciones de frecuencia normales en los tratamientos (SW, $p < 0.05$); sin embargo, en variables más simples, como el *DCM* y *DCm*, los datos mostraron distribuciones de frecuencia normales en la mayoría de los casos, o muy similares a las normales (discriminando en algunos casos datos desviadores “*outliers*”). La Figura 4.4 muestra gráficamente los valores promedio y los intervalos de confianza (al 95%) de la variable *DCM* a lo largo del periodo de estudio.

Figura 4.4 *Diámetro de la Cobertura Mayor* en los tratamientos experimentales (valor promedio e intervalos al 95% de confianza) a los 2, 5, 12 y 16 meses en *El Colorín*. En cada medición, los tratamientos con la misma letra (a, b, c, d) no tienen diferencias significativas.



En *A. cochliacantha* los tratamientos agroforestales (T1 y T3) destacaron con significativamente mayor *DCM* que el monocultivo (T2) en las cuatro mediciones (a los 2, 6, 12 y 16 meses) ($p < 0.05$ en Ago 05 y $p < 0.01$ en Nov. 05, Jun. 06 y Oct. 06). Entre los tratamientos agroforestales hubo una tendencia de mayor desarrollo del *DCM* en tratamiento fertilizado químicamente (T1), aunque la diferencia sobre el tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T3) fue significativa solo hasta la cuarta medición ($p < 0.05$).

En *A. pennatula* también destacaron los tratamientos agroforestales (T4 y T6) en las cuatro mediciones. En la primer medición los tratamientos agroforestales mostraron mayor *DCM* promedio que el monocultivo (T5), aunque no significativamente ($p > 0.05$). En la segunda medición el tratamiento agroforestal químico (T4) mostró diferencia significativa con el monocultivo (T5) ($p < 0.05$), pero no con el tratamiento agroforestal biológico (T6) ($p = 0.48$), y entre el tratamiento agroforestal biológico (T6) y el monocultivo forestal (T5) la diferencia no fue significativa ($p = 0.12$). En la tercer medición destacó en primer término el tratamiento agroforestal químico (T4), en segundo lugar el tratamiento agroforestal biológico (T6) y con el menor desempeño el

monocultivo (T5). A lo largo del estudio el tratamiento agroforestal fertilizado químicamente (T4) mostró mayor desempeño que el tratamiento agroforestal biológico (T6) y el monocultivo (T5), aunque las diferencias solo fueron significativas con el monocultivo (T5) ($p < 0.05$).

En la tercera medición, la mayor parte de los tratamientos (de ambas especies) mostraron un decremento en las dimensiones del *DCM*. Este hecho puede deberse a la naturaleza caducifolia de estas especies, que en la sequía pierden el follaje, junto con pequeñas ramitas, por lo que los promedios de las mediciones muestran pequeños decrementos. Comparando el desarrollo de la variable *DCM* en ambas especies se observó que en la primera, segunda y tercer mediciones, *A. cochliacantha* mostraba mayor *DCM* que *A. pennatula*, pero que en la cuarta medición el promedio del *DCM* en los tratamientos con *A. pennatula* fue mayor que en los tratamientos de *A. cochliacantha*, aunque la diferencia solo fue significativa entre los tratamientos agroforestales biológicos (T6 y T3) ($p < 0.05$).

A diferencia de la variable *db*, en la que a partir de la aplicación de micronutrientes a los monocultivos forestales (a los 12 meses) el tratamiento T5 igualó al tratamiento T6, no sucedió que la variable *DCM* se haya igualado entre los tratamientos T5 y T6. En la última medición, el *DCM* promedio de T6 fue significativamente mayor que el de T5 ($p < 0.05$). En términos de esta variable (*DCM*), se confirmó que la asociación con el cultivo de frijol tuvo una influencia significativa favorable para *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, tanto en los tratamientos agroforestales con fertilización química como en los tratamientos agroforestales fertilizados biológicamente.

- *Producción de biomasa y energía*

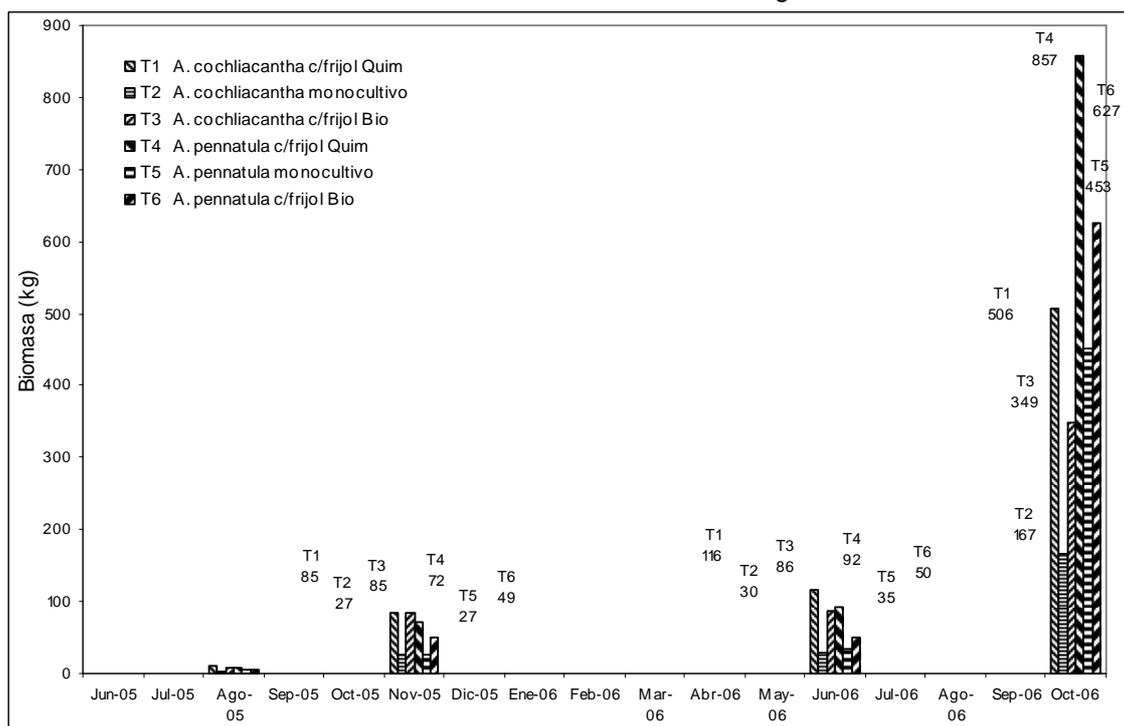
Aplicando las ecuaciones alométricas del capítulo 3 (fórmulas de la tabla 3.2) a los datos de las dimensiones de cada planta se estimó la biomasa aérea de las acacias en los tratamientos experimentales. De forma generalizada, la biomasa estimada de los tratamientos experimentales no tuvo distribuciones de frecuencia normales ($p < 0.05$ en la prueba Shapiro Wilk), aunque en algunos casos fueron muy similares a la distribución normal ($p = 0.045$). Esto puede deberse al hecho de que las ecuaciones alométricas dependen a su vez de parámetros bi-variados, como el área de la

cobertura, y/o de multiplicaciones dos variables en la forma potencial. Aunque en las variables más simples, *diámetro de la base* y *diámetro de la cobertura*, las distribuciones de frecuencia son normales, al pasar los datos por procesos multiplicativos y potenciales los resultados no mantienen de forma general la distribución normal.

Otro factor que afecta el análisis de datos es que conforme aumenta el tamaño de la planta la medición del diámetro de la cobertura se hace cada vez más difícil, lo que contribuye a un error que se amplifica en las estimaciones. Ya que los datos de biomasa estimada no mostraron distribuciones de frecuencia normales, no es adecuado aplicar el análisis de varianza con las pruebas de estadística paramétrica *t-student* o F (Fisher). No obstante este hecho, la comparación de la producción de biomasa entre los tratamientos se basó en la estimación de la biomasa total de las poblaciones. Con el propósito de generalizar el resultado a un mismo número de plantas por tratamiento se extrapoló la estimación de biomasa a 1600 plantas: el total de plantas que con un espaciamiento 2x5 m se establecerían en una hectárea, considerando una supervivencia del 100%. Normalmente, en las plantaciones comerciales se restituyen las plantas muertas en el establecimiento para aprovechar al 100% la superficie del suelo. La Figura 4.5 muestra los resultados extrapolados al 100% de supervivencia, ya que esto representa el total del potencial productivo del terreno. Cuando no se restituyen las plantas muertas es necesario considerar el factor del porcentaje de supervivencia. Como se mostró anteriormente, en *El Colorín*, el factor de supervivencia de *A. cochliacantha* fue 0.83, mientras que el de *A. pennatula* fue 0.7.

Los resultados numéricos se muestran a partir de los 5 meses, ya que a los 2 meses las dimensiones de las plantas estaban fuera del intervalo de estimación de las ecuaciones alométricas. En las tres mediciones se observa en ambas especies que la *biomasa total* fue mayor en los tratamientos agroforestales que en los tratamientos de monocultivo. En *A. cochliacantha*, a los 5 meses la biomasa del tratamiento *agroforestal químico* (T1) y del *agroforestal biológico* (T3) fue muy similar, 85 kg; en cambio, en *A. pennatula* destacó el tratamiento *agroforestal químico* (T4, 72 kg) sobre el *agroforestal biológico* (T6, 49 kg).

Figura 4.5 Biomasa total en los tratamientos con *A. cochliacantha* y *A. pennatula* a los 5, 12 y 16 meses en *El Colorín*. Resultados en kg ha⁻¹.



A los doce meses la biomasa total fue mayor en los tratamientos agroforestales con *A. cochliacantha* (116 kg T1 y 86 kg T3) que en los tratamientos agroforestales con *A. pennatula* (92 kg T4 y 50 kg T6), pero en los monocultivos fue mayor en *A. pennatula* (30 kg T2, 35 kg T5). Al final de la segunda temporada de lluvia, a los 16 meses, la biomasa en los tratamientos con *A. pennatula* fue mucho mayor que en sus equivalentes con *A. cochliacantha*. En ambas especies destacó la producción de biomasa de los tratamientos agroforestales fertilizados químicamente, luego los agroforestales fertilizados biológicamente y con el menor desempeño los monocultivos. La mayor producción se obtuvo en los tratamientos de *A. pennatula* T4 con 857 kg y T6 con 627 kg de biomasa total, mientras el menor desempeño fue de *A. cochliacantha* en monocultivo con 167 kg de biomasa.

La biomasa leñosa y foliar también se estimaron utilizando las ecuaciones alométricas correspondientes del Capítulo 3. Los resultados de las estimaciones no mostraron distribuciones de frecuencia normales (SW, $p > 0.05$). Las Figuras 4.6 y 4.7 muestran la producción de biomasa leñosa y foliar.

Figura 4.6 Biomasa leñosa en los tratamientos con *A. cochliacantha* y *A. pennatula* a los 5, 12 y 16 meses en *El Colorín*. Resultados en kg ha^{-1} .

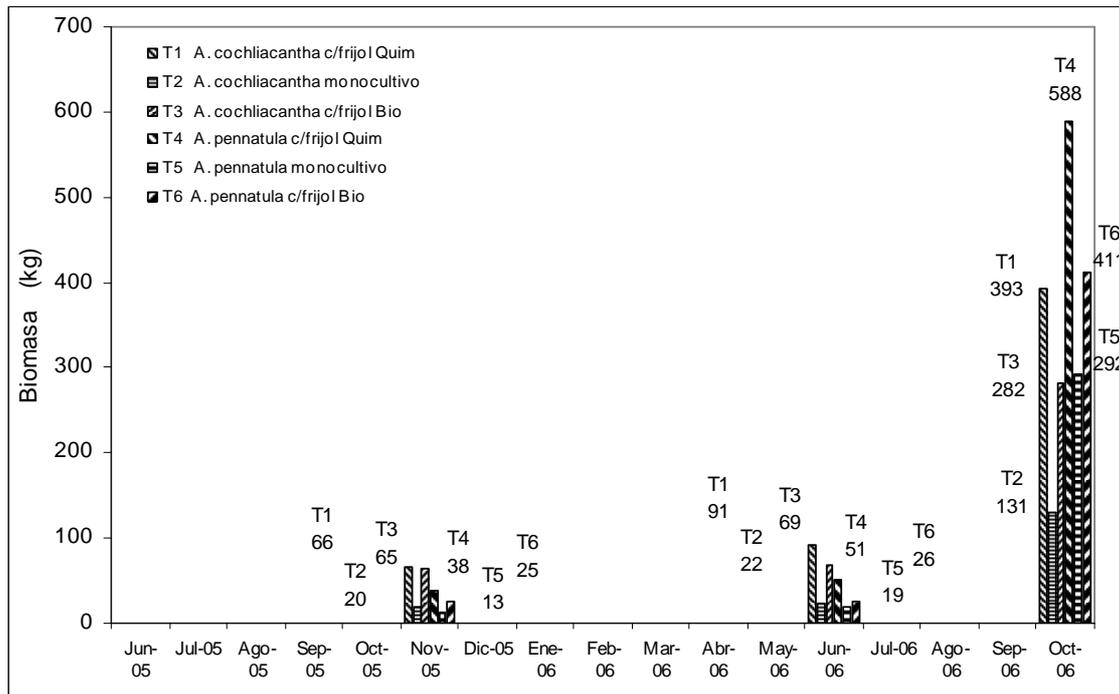
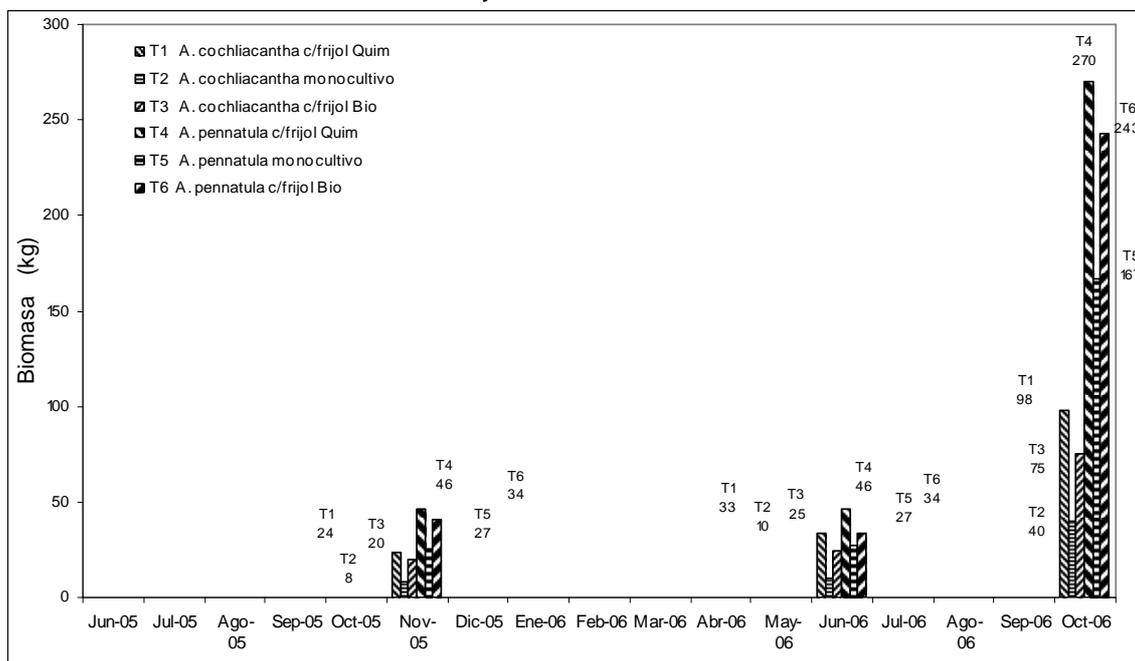


Figura 4.7 Biomasa foliar por hectárea en los tratamientos con *A. cochliacantha* y *A. pennatula* a los 5, 12 y 16 meses en *El Colorín*.



La fracción de *biomasa leñosa* es de mayor importancia energética porque puede utilizarse como leña de uso doméstico o comercial. Se observa que a los 16 meses el incremento de biomasa leñosa por hectárea es considerable, particularmente en los sistemas agroforestales con *A. pennatula*. Al final del periodo de estudio, con *A.*

pennatula el tratamiento agroforestal fertilizado químicamente, T4, mostró por hectárea la mayor cantidad de biomasa leñosa en pie, 588 kg, el doble de la biomasa que la biomasa en pie del monocultivo forestal, T5, con 292 kg, y 1.4 veces mayor que la biomasa del tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente, T6, 411 kg. En *A. cochliacantha* el tratamiento agroforestal fertilizado químicamente acumuló 393 kg de biomasa leñosa en pie, 3 veces más biomasa que el monocultivo forestal, T2, con 131 kg, y 1.4 veces más biomasa que el tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente 282 kg.

A partir de los resultados de estimación de la biomasa leñosa se estimó la energía contenida potencialmente en la biomasa leñosa aérea aplicando la fórmula 3.16 del capítulo 3. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5 por tratamiento experimental (ha^{-1}). A su vez, aplicando la fórmula 3.18 del Capítulo 3 se estimó el carbono de la biomasa aérea (por hectárea) por tratamiento experimental; la Tabla 4.6 muestra los resultados.

Tabla 4.5 Energía estimada de la biomasa leñosa de los árboles en los tratamientos experimentales (MJ ha^{-1}) a los 16 meses en *El Colorín*.

T1	T2	T3	T4	T5	T6
7,085	2,365	5,082	9,980	4,952	6,979

Tabla 4.6 Carbono capturado en biomasa leñosa de los árboles en los tratamientos experimentales (kg ha^{-1}) a los 16 meses en *El Colorín*.

T1	T2	T3	T4	T5	T6
190	64	137	281	139	196

Respecto al efecto de la aplicación de micronutrientes (Bo, Zn, Mo) en los monocultivos forestales a los 12 y 16 meses, especialmente de *A. pennatula*, el monocultivo (T5) igualó al tratamiento agroforestal biológico (T6) en la variable *diámetro de la base (db)*, mas no en la variable *Diámetro de la Cobertura Mayor (DCM)*. En la producción de biomasa se observa que el monocultivo (T5) aumenta su biomasa entre las mediciones de los 5 y los 12 meses, reduciendo la diferencia con el tratamiento agroforestal biológico (T6), mas no la iguala.

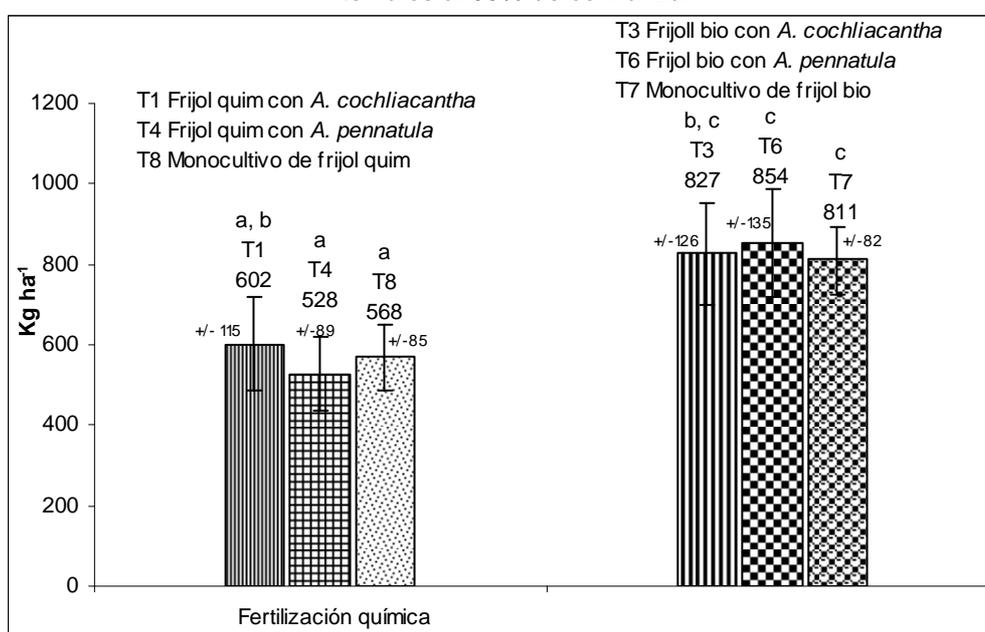
En términos generales, se observó que los tratamientos agroforestales tuvieron mayor desempeño de producción de biomasa, potencial dendroenergético y captura de carbono que los monocultivos forestales, lo cual aporta elementos para afirmar que la

asociación de las acacias con el cultivo de frijol (fertilizado química o biológicamente) favorece la productividad de las acacias.

4.5 Producción de frijol

Para evaluar el rendimiento (productividad) de frijol entre los tratamientos experimentales los resultados se presentan en la misma unidad de superficie productiva, la hectárea. En este entendido, la Figura 4.8 muestra gráficamente y cuantitativamente los resultados de productividad.

Figura 4.8 Productividad en los tratamientos con frijol en *El Colorín*. Temporal del 2005. Intervalos al 95% de confianza.



El análisis de varianza (ANOVA) permitió comparar la productividad de frijol por el factor *tipo de asociación* (monocultivo o agroforestal) y por el factor *tipo de fertilización*, mientras que la prueba de Tukey (HSD) las diferencias específicas entre tratamientos. Al analizar las varianzas por *tipo de asociación* se observó que las asociaciones agroforestales no tuvieron efectos significativos en la productividad de frijol ($p > 0.05$), la presencia de acacias no influyó significativamente en la productividad de frijol; en cambio, por el factor *tipo de fertilización* sí hubo diferencias significativas, en los monocultivos y en los tratamientos agroforestales la fertilización biológica dio rendimientos significativamente mayores que la fertilización química ($p < 0.05$).

La productividad de la mayoría de los tratamientos experimentales fue mayor a la media nacional de este cultivo en temporal, 570 kg ha⁻¹ (SAGARPA, 2007). Solo el tratamiento T4 (frijol químico con *A. pennatula*) dio un rendimiento menor (528 kg ha⁻¹) al de la media nacional, mientras que la productividad de los tratamientos biológicos estuvo por arriba de los 800 kg ha⁻¹.

Considerando que en los tratamientos agroforestales el 70% del terreno lo ocupa el cultivo de frijol y el 30% restante las acacias, en los tratamientos agroforestales la producción neta de frijol por hectárea es menor que la cantidad expresada por la productividad por hectárea. Considerando la superficie real de cultivo, la Tabla 4.7 resume los resultados de producción neta en los tratamientos experimentales.

Tabla 4.7 Producción neta de frijol en los tratamientos experimentales (kg ha⁻¹).

T1	T3	T4	T6	T7	T8
421	579	355	598	811	568
+/- 81	+/- 89	+/- 76	+/-99	+/-82	+/- 85

4.6 Evaluación conjunta de la producción de frijol y biomasa arbórea

Conociendo el rendimiento de las especies en los tratamientos experimentales puede evaluarse la producción conjunta de frijol y biomasa leñosa aplicando el índice LER. La evaluación de la producción de biomasa arbórea solo la realizaremos para los datos de plantas de 16 meses, ya que hasta entonces la biomasa es considerable para su aprovechamiento en autoconsumo o para su comercialización. Sin embargo, el análisis se complica porque la producción de frijol se alteró por la intrusión de ganado en el segundo año de cultivo, lo que impidió utilizar los datos de la cosecha para el análisis. Suponiendo que en el segundo año de cultivo la productividad de frijol se mantuviera igual (o similar) a la del primer temporal, presentamos en la Tabla 4.8 la producción conjunta de de frijol y biomasa leñosa en los tratamientos experimentales.

Tabla 4.8 Producción neta de frijol y biomasa leñosa (kg ha⁻¹).

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	AF quim	<i>A. cochlia</i>	AF bio	AF quim	<i>A. pennat</i>	AF bio	Frijol bio	Frijol quim
Frijol	421	--	579	355	--	598	811	568
Leña	393	131	282	588	292	411	--	--

Con esta información calculamos el Índice de Equivalencia del Suelo (LER) (Willey, 1979; Vandermeer, 1989) de los tratamientos agroforestales como se muestra en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Índice de Equivalencia del Suelo (*LER*) en los tratamientos agroforestales con espaciamiento 2x5 m en los monocultivos.

T1	T3	T4	T6
AF quim	AF bio	AF quim	AF bio
3.7	2.9	2.6	2.1

Si se deseara conocer el índice LER con referencia a monocultivos de acacia más intensivos, se tendría que hacer el cálculo para un espaciamiento de densidad más intensiva, por ejemplo, 2x2.5 m, con la suposición de que los monocultivos producirían el doble de biomasa que en el espaciamiento 2x5 m, produciendo T2, 262 kg, y T5, 584 kg. Los resultados del índice LER bajo esta suposición se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Índice de equivalencia del suelo en los tratamientos agroforestales (*LER*), suponiendo el doble de producción en monocultivos con densidad de espaciamiento (2x2.5 m).

T1	T3	T4	T6
AF quim	AF bio	AF quim	AF bio
2.2	1.8	1.6	1.4

Al ser el $LER > 1$, se muestra que la combinación de cultivos en cualquiera de los tratamientos agroforestales sería más conveniente que los monocultivos intensivos en términos de aprovechamiento del suelo. Si se cultivan *A. cochliacantha* y frijol en monocultivos separados se requeriría 2.2 veces más terreno para obtener la producción del sistema agroforestal fertilizado químicamente (T1) y 1.8 veces más terreno para obtener la producción del tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T3). En el caso de *A. pennatula* el índice LER muestra que se requeriría 1.6 veces más terreno en monocultivos para obtener la producción del tratamiento agroforestal químico (T4) y 1.4 veces más terreno para obtener la producción del tratamiento agroforestal biológico (T6).

El análisis del índice LER permite una evaluación comparativa de los tratamientos en términos de productividad biológica y de espacio utilizado. Para tomar decisiones sobre la conveniencia de uno u otro tratamiento o especie se requiere la evaluación financiera, considerando también los precios de ambos productos, leña y frijol, así como los costos involucrados.

4.7 Conclusiones

- En la primer cosecha de frijol se observó que la influencia de las acacias no tuvo efectos significativos en la productividad de frijol. Sin embargo, la fertilización biológica mostró rendimientos significativamente mayores que la fertilización química.
- *A. cochliacantha* mostró mayor supervivencia en todos los tratamientos experimentales que *A. pennatula*. Este resultado contribuye en calificar a *A. cochliacantha* como una especie de mayor resistencia en la introducción al campo y en su desarrollo. Por otro lado, la asociación de estas acacias (*A. cochliacantha* y *A. pennatula*) con el cultivo de frijol contribuye en mejorar la supervivencia de acacias.
- En términos del *db*, se confirmó que en los tratamientos agroforestales, la asociación con el cultivo de frijol tuvo una influencia significativa favorable para *A. cochliacantha* (en comparación con el monocultivo) (ver la Figura 4.4). En *A. pennatula* la asociación con el cultivo de frijol solo mostró una influencia favorable cuando el frijol se fertilizó químicamente (ver la Figura 4.4). En términos del *DCM*, se confirmó que la asociación con el cultivo de frijol tuvo una influencia significativa favorable para *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, tanto en los tratamientos agroforestales fertilizados químicamente como en los agroforestales fertilizados biológicamente (ver la Figura 4.5). En cuanto a la producción de biomasa, con base en los promedios de producción se observó que la asociación de las acacias con el cultivo de frijol (fertilizado química o biológicamente) favorece la productividad de las acacias.
- Hasta los 12 meses los tratamientos con *A. cochliacantha* mostraron mayor desempeño en la producción de biomasa que sus equivalentes en *A. pennatula*; sin embargo, en la segunda temporada de lluvia el desempeño de *A. pennatula* fue sobresalientemente mayor, destacando los tratamientos agroforestales (con fertilización química y biológica, T4 y T6) con producciones de biomasa leñosa de 598 kg ha⁻¹, T4, y 411 kg ha⁻¹, T6; esto representa una cantidad que puede ser considerable para el abastecimiento de leña para autoconsumo o comercialización.

- En términos energéticos el tratamiento agroforestal de *A. pennatula* con frijol fertilizado químicamente mostró la mayor producción de energía potencialmente aprovechable en la biomasa leñosa, 9980 MJ ha⁻¹.
- En términos de captura de carbono el tratamiento agroforestal de *A. pennatula* con frijol fertilizado químicamente mostró la mayor captura de carbono en la biomasa leñosa, 281 kg ha⁻¹ (a los 16 meses de establecimiento).
- El índice LER indicó que la productividad de *A. cochliacantha* y *A. pennatula* en asociaciones agroforestales con frijol es más conveniente que los monocultivos, logrando mejor aprovechamiento del suelo.

Capítulo 5

Modelos económicos de plantaciones energéticas forestales y agroforestales.

El estudio de la economía de las plantaciones energéticas constituye una de las bases de la sustentabilidad de la bioenergía tradicional y moderna. Aunque la teoría económica de los sistemas agrícolas y forestales ha recorrido un largo camino teórico, la economía de los cultivos y plantaciones energéticas es un área de investigación en construcción que requiere aproximaciones particulares, dependiendo de los cultivos y del contexto socioeconómico de los productores. La propuesta de utilizar sistemas agroforestales como una alternativa de la bioenergía hacia la sustentabilidad implica que el análisis económico debe considerar las características particulares de la agroforestería y desarrollar modelos adecuados para su evaluación económica integral.

Este capítulo presenta el desarrollo teórico de un modelo económico de plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas. El capítulo revisa la teoría que da sustento a la economía forestal y presenta un modelo de valoración económica que incluye a los sistemas agroforestales y agrícolas, extendiéndolo al manejo con podas y a la captura de carbono. El modelo consiste de una función de utilidad que combina funciones de crecimiento biológico con variables económicas, precios de los productos y costos de producción. La solución del modelo se plantea bajo el criterio de maximización de utilidades; sin embargo, resolverlo no es una tarea sencilla, ya que no siempre se cuenta con la información necesaria, o porque las funciones de productividad biológica no son necesariamente continuas o diferenciables. Además de los métodos analíticos, otros métodos pueden ser útiles en la solución de los modelos, como la programación dinámica y la simulación biofísica. La combinación de métodos analíticos y modelos de simulación biofísica puede llevar al conocimiento de las dinámicas de las interacciones para poder predecir cosechas, realizar análisis económicos y financieros, y establecer estrategias de manejo sustentables para llegar mejor toma de decisiones.

Los objetivos de este capítulo son los siguientes:

1. Mostrar una revisión de la teoría económica forestal en los aspectos que involucran la toma de decisión del tiempo de cosecha óptimo.
2. Desarrollar un modelo de análisis económico para plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas, describiendo las variables críticas en la toma de decisiones.
3. Ampliar el modelo para el manejo agroforestal con podas, caracterizando las variables críticas para el manejo sustentable.
4. Exponer los métodos para resolver el modelo y proponer un meta-modelo que permita llegar a toma de decisiones en un marco integrado de sustentabilidad.

5.1 Economía de sistemas forestales

Dinámica del crecimiento forestal

La economía de los sistemas forestales y agroforestales se basa en modelos que combinan funciones de productividad biológica con los análisis económico y financiero de las inversiones (Campbell, 1999). Las funciones de productividad de los sistemas biológicos se basan frecuentemente en modelos teóricos, normalmente del tipo sigmoideal (con forma de S), que ofrecen la visualización gráfica del desarrollo de individuos y poblaciones biológicas, facilitando su interpretación. Algunos de modelos más conocidos son el logístico, el Gompertz¹ y el Bertalanffy-Richards (Ajit *et al.*, 1999; Campbell, 1999; Lei y Zhang, 2004). Posiblemente, el más utilizado para representar el crecimiento forestal es el Bertalanffy-Richards (conocido también como el modelo Chapman-Richards).

El modelo Bertalanffy-Richards relaciona la tasa de crecimiento $dy(t)/dt$ con la biomasa actual “ y ” mediante una función potencial, como lo muestra la siguiente expresión (Lei y Zhang, 2004):

$$dy(t)/dt = \eta y^m - r y = \frac{k \alpha^v}{v} \cdot y^m - \frac{k}{v} \cdot y \quad (5.1)$$

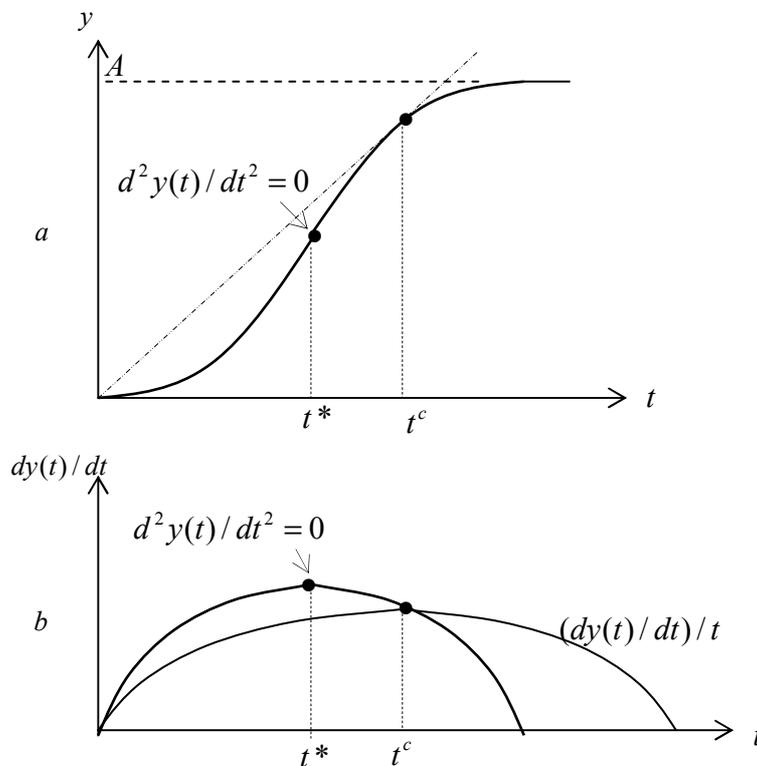
¹ Inicialmente, en 1825 el modelo de Gompertz describió el decaimiento exponencial de la población humana con la edad (Srivastava *et al.*, 1999).

Donde los parámetros η , m y r representan combinaciones de parámetros alométricos y biológicos más complejos: k, α y v . Dependiendo de las condiciones bajo las que se establecen estos parámetros la solución de la ecuación puede tomar distintos patrones. Lei y Zhang (2004) han expuesto que dependiendo del parámetro “ m ” (parámetro alométrico en sistemas forestales) el patrón clásico sigmoideal representa solo un caso, pero existen otros patrones posibles del modelo, como el cóncavo. La solución clásica de esta ecuación se conoce comúnmente como el *modelo del crecimiento biológico*, y corresponde a las condiciones en las que $m < 1$ y $r > 0$ (Lei y Zhang, 2004), que se expresa de la siguiente forma:

$$y = A \cdot (Be^{kt} - 1)^{1/(1-m)} \quad (5.2)$$

La representación gráfica del modelo es una sigmoideal como la que muestra la Figura 5.1a, en la que A es la asíntota superior (cuando $t \rightarrow \infty$) y t^* es el punto de inflexión. La tasa de crecimiento es máxima (cuando $d^2 y(t) / dt^2 = 0$).

Figura 5.1 Modelo de crecimiento sigmoideal



La rotación óptima

Una de las cuestiones más estudiadas en economía forestal ha sido el análisis para determinar el tiempo óptimo de cosecha. Este tema ha sido ampliamente revisado en la literatura de economía forestal (Samuelson 1976; Kempler, 1996; Ricker y Daly, 1998; Campbell, 1999), pudiendo abordarse desde la perspectiva de máximo aprovechamiento de la producción biológica o desde la perspectiva del la maximización del beneficio monetario.

Ferreira-Batista *et al.* (1995) mencionan que desde el punto de vista biológico la regla de decisión indica que conviene mantener una plantación en pie mientras el incremento anual (IA) de biomasa sea mayor que el incremento medio anual (IMA), lo que en términos de intervalos diferenciales de tiempo ($\Delta t \rightarrow 0$) se expresa así: $dy(t)/dt > (dy(t)/dt)/t$. La regla indica cortar cuando la tasa de incremento de biomasa se iguale con el incremento medio (Campbell, 1999). Bajo este criterio, el tiempo óptimo de cosecha forestal, t^c , es cuando se intersecta la curva de la tasa de incremento de biomasa con la curva del incremento medio: $dy(t)/dt = (dy(t)/dt)/t$ (figura 5.2b). Este punto coincide en el tiempo con el punto tangencial de una línea recta que parte del origen y toca a la curva sigmoideal (Figura 5.2 a y b).

Desde el punto de vista económico, Campbell (1999) explica que la regla de decisión indica mantener la plantación en pie mientras el beneficio marginal de su crecimiento biológico sea mayor que el costo de oportunidad marginal de su rendimiento en una inversión alternativa. Usualmente se toma como referencia del costo de oportunidad el rendimiento que se obtendría por realizar el corte y colocar el dinero en el banco. Campbell (1999) expone que el valor monetario de la biomasa en pie de una plantación, $V(t)$, puede representarse como lo muestra la siguiente expresión:

$$V(t) = p \cdot y(t) - c \quad (5.3)$$

Donde p es precio de la madera, $y(t)$ es la biomasa en pie (en función del tiempo) y c son los costos de corte y manejo. Cuando el sistema forestal involucra una sola rotación, la regla de decisión del tiempo óptimo de corte se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{dV(t)}{dt} = r \cdot V(t) \quad (5.4)$$

Donde $V(t)/dt$ es el *beneficio marginal* de mantener la biomasa en pie y el lado derecho de la ecuación representa el *costo de oportunidad marginal* de la inversión alternativa con una tasa de rendimiento r . Si se considera que el suelo se dedica al uso forestal a perpetuidad, el ciclo de corte óptimo (o rotación óptima) se conoce como el *ciclo de Faustmann*², representado por la siguiente expresión (Campbell, 1999):

$$\frac{dV(t)}{dt} = r \cdot V(t) + r \cdot \left\{ V(t) / \left[(1+r)^t - 1 \right] \right\} \quad (5.5)$$

Donde el lado derecho de la ecuación representa el *costo de oportunidad marginal*, que consiste de los intereses perdidos por no cortar el lote e invertir en el banco el valor la biomasa en pie (o en la mejor opción de retorno) más el valor del terreno en el uso forestal a perpetuidad.

Otro método para encontrar el tiempo de rotación óptima lo ofrece el criterio de maximización de utilidades. Como las plantaciones forestales frecuentemente muestran un comportamiento de crecimiento logístico-sigmoidal (Evans y Thurnbull, 2004), se asume que la función de utilidad sigue un patrón de rendimientos decrecientes, como una función cóncava doblemente diferenciable. El método permite el análisis para la decisión de variables como la fracción óptima del suelo que se debe dedicar a los árboles, k , y a los alimentos $(1-k)$, y el análisis del riesgo por la incertidumbre en los precios (Shively, 2002). De forma muy general, el método consiste en resolver la ecuación para maximizar las utilidades, manteniendo como incógnita la variable de interés.

² En 1849, Martin Faustmann expuso en “*On the determination of the value wick forest land and immature stands pose for forestry*” la fórmula y el método que llevan su nombre para estimar el valor del suelo en uso forestal y el ciclo óptimo de cosecha (Samuelson, 1976).

5.2 Modelo de valoración económica de plantaciones energéticas

Para un propietario que busca optimizar sus recursos económicos (patrimonio, fuerza de trabajo, dinero y otros), maximizando sus beneficios, la decisión de inversión en una plantación energética (forestal o agroforestal) ocurrirá cuando el *Valor Presente Neto* (VPN) del flujo de beneficios de la plantación sea mayor que el VPN del *uso alternativo* disponible: la agricultura en monocultivo o la ganadería. El análisis de la decisión utiliza el *Valor Esperado del Suelo* (VES), en lugar del VPN, cuando se considera un horizonte de tiempo infinito. La fórmula del VES se basa en el *modelo de Faustman*. Algunos de los beneficios de los sistemas forestales y agroforestales son los productos agrícolas y arbóreos, la captura de carbono, la infiltración de agua, el mejoramiento de suelos y el mantenimiento de la biodiversidad. Al cuantificar monetariamente el mayor número de beneficios pueden analizarse más objetivamente las alternativas productivas. En este estudio se propone un modelo de evaluación económica de diferentes sistemas productivos que incluye costos y beneficios de la producción de leña para la energía y la producción de alimentos (cultivo anual).

Modelo general

Con base en Cacho y Wise (2002 y 2003) y Cacho y Hean (2004) se presenta un modelo de valoración de sistemas forestales, agrícolas y agroforestales, para evaluar la economía de plantaciones energéticas, incluyendo los beneficios por la captura de carbono, ilustrando las diferencias con los sistemas de monocultivo forestal y agrícola. El modelo se amplía para incluir variables necesarias para el análisis económico del manejo con podas. El modelo se basa en la maximización de la *función de utilidad* del sistema productivo, que puede representarse por el *Valor Presente Neto* (VPN) o por el *Valor Esperado del Suelo* (VES). El VPN y el VES calculan el valor de un flujo de utilidades (ingresos menos costos, I-C) a lo largo de la vida de un proyecto y los expresan en valores monetarios del presente. El valor del dinero a través del tiempo se representa por la tasa de descuento r . Para descontar el valor de una utilidad futura al Valor Presente se aplica el factor δ^{-t} , igual a $(1 - r)^{-t}$. El análisis con el *Valor Esperado del Suelo* (VES) considera un horizonte de tiempo infinito, aplicando el factor ϕ^{-1} , igual a $[(1 - r)^t - 1]^{-1}$ (Sharma, 1993; Bertomeu, 2006).

Iniciaremos la exposición del modelo considerando como superficie de análisis un terreno homogéneo, de área A , igual a una hectárea (ha), sin bosque. El modelo se realiza en un solo periodo de rotación, T , y no en un horizonte de tiempo infinito

porque a nivel de proyecto no puede garantizarse el uso del suelo a perpetuidad (por ello se utiliza el VPN y no el VES). Expondremos primero la valoración de una plantación de monocultivo forestal y en seguida la valoración del monocultivo agrícola y del sistema agroforestal.

Adaptando el modelo general para sistemas agroforestales de Cacho *et al.* (2002), el VPN de un monocultivo forestal puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$VPN^F(T) = \sum_{t=1}^T f_t^M(s_t, x_t^F) \cdot \delta^{-t} - c_E^F \quad (5.6)$$

Donde f_t^M representa la función de utilidades (ingresos menos costos) obtenidos por la venta de la cosecha de madera en el año t ; x_t^F es un vector de técnicas de manejo forestal (e.g. fertilización, irrigación, espaciamiento y control de plagas, entre otras) y c_E^F son los costos de establecimiento al inicio del ciclo de la plantación. El factor δ se aplica para descontar al presente el valor del flujo monetario a lo largo del ciclo de cosecha o rotación, T . El estado del sitio, s_t , en el año t , puede definirse como un vector de factores edafológicos y climáticos, que puede incluir la profundidad del suelo, el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, salinidad y acidez, precipitación anual, radiación solar y temperatura (entre otros)³. La función de utilidad (por hectárea) en el año t , se representa por f_t^M mediante la siguiente expresión:

$$f_t^M = p_t^f y_t^{fM} - c_t^f \quad (5.7)$$

Donde, en el año t , p_t^f es el precio del producto forestal (madera, leña u otros), y_t^{fM} es la productividad forestal en monocultivo (que a su vez es función de s_t y x_t^F) y c_t^f son los costos del monocultivo forestal.

³ Para fines prácticos, Bin (1994) (citado por Shively *et al.*, 2004) ha clasificado el estado del sitio en un índice numérico.

Así mismo, una simplificación del modelo general de Cacho *et al.* (2002) expresa la función de beneficios descontados al presente del monocultivo agrícola, VPN^A , como se muestra en la siguiente expresión:

$$VPN^A(T) = \sum_{t=1}^T a_t^M(s_t, x_t^{aM}) \cdot \delta^{-t} - c_i \quad (5.8)$$

Donde, para el año t , a_t^M representa la función de utilidades anuales (ingresos menos costos) derivadas de la agricultura en monocultivo, c_i son los costos de inversión iniciales, s_t es un indicador del estado del sitio (un vector de factores edafológicos y climáticos), x_t^{aM} es un vector de técnicas de manejo agrícola en monocultivo (e.g. labranza, fertilización, irrigación y control de plagas, entre otras) y el factor δ , igual a $1 - r$ para una tasa de descuento r , se aplica para descontar al presente el valor del flujo monetario a lo largo del ciclo de cosecha T . Las utilidades por hectárea en el año t , a_t^M , pueden expresarse en términos de los ingresos y los costos, como se muestra a continuación:

$$a_t^M = p_t^a y_t^{aM} - c_t^a \quad (5.9)$$

Donde en el año t , p_t^a es el precio del cultivo agrícola, y_t^{aM} es la productividad en monocultivo y c_t^a son los costos de producción.

En los sistemas agroforestales el área plantada con árboles ocupa una fracción k de la superficie, mientras que el área plantada con el cultivo agrícola ocupa una fracción $1-k$ del terreno. Cacho *et al.* (2002) han desarrollado explícitamente la función de utilidad de un sistema agroforestal para un ciclo de cosecha forestal T , como lo muestra la ecuación 10.

$$VPN^{AF}(k, T) = (1-k) \sum_{t=1}^T a_t^{AF}(s_t, k, x_t^{AF}) \cdot \delta^{-t} + k \sum_{t=1}^T f_t^{AF}(s_t, k, x_t^{AF}) \cdot \delta^{-t} - \sum_{t=1}^T c_t^{AF}(k, x_t^{AF}) \cdot \delta^{-t} - kc_E^{AF} \quad (5.10)$$

con $0 \leq k \leq 1$

Donde, para el año t , a_t^{AF} representa los ingresos anuales por la producción agrícola en el sistema agroforestal, f_t^{AF} representa los ingresos anuales por la producción de árboles en el sistema agroforestal, s_t es un indicador del estado del sitio (vector de factores edafológicos y climáticos), x_t^{AF} es un vector de técnicas de manejo agroforestales (e.g. régimen de cosecha, labranza, fertilización, irrigación y control de plagas, entre otras), que de forma simplificada puede expresarse en función del régimen de cosecha (hr) y de los métodos de fertilización (fr), así $x(hr, fr)$, c_t^{AF} son los costos anuales de producción y c_E^{AF} son los costos de establecimiento del sistema agroforestal. El factor δ se aplica para descontar al presente el flujo monetario a lo largo del ciclo de producción, con δ igual a $1 - r$ para una tasa de descuento r .

De acuerdo a Cacho *et al.* (2002), en los sistemas agroforestales las utilidades anuales (año t) dependen de los ingresos generados por el cultivo de alimentos, a_t^{AF} , de los ingresos derivados de los productos de los árboles, f_t^{AF} , y de los costos anuales de producción, c_t^{AF} , los cuales se derivan de muchas actividades que comparten gastos entre el cultivo de alimentos y el cultivo de los árboles. Las utilidades anuales pueden expresarse como se muestra a continuación:

$$af_t = (1 - k) \cdot a_t^{AF} + k \cdot f_t^{AF} - c_t^{AF} \quad (5.11)$$

Que de forma más explícita puede expresarse así:

$$af_t = (1 - k) \cdot p_t^a y_t^{aAF} + k \cdot p_t^f y_t^{fAF} - c_t^{AF} \quad (5.12)$$

Donde, para el año de cosecha t , k es la fracción del terreno que ocupan los árboles, y_t^{aAF} es la productividad agrícola del sistema agroforestal, y_t^{fAF} es la productividad biológica de los árboles en el sistema agroforestal, p_t^a y p_t^f son los precios de los productos agrícolas y arbóreos, y c_t^{AF} son los costos anuales del sistema agroforestal.

Cacho *et al.* (2002) mencionan que las productividades de los cultivos de alimentos en monocultivo y agroforestería, y_t^{aM} y y_t^{aAF} , son funciones de la productividad promedio

esperada, así como del estado del sitio y de las técnicas de manejo empleadas, como se expresa a continuación:

$$y_t^{aM} = \bar{y}^{aM} Q_t^{aM}(s_t, x^{aM}) \quad (\text{en el monocultivo}) \quad (5.13)$$

$$y_t^{aAF} = \bar{y}^{aAF} Q_t^{aAF}(s_t, x^{aAF}) \quad (\text{en el sistema agroforestal}) \quad (5.14)$$

Donde \bar{y}^{aM} y \bar{y}^{aAF} son las productividades promedio esperadas del cultivo agrícola en el monocultivo y en el sistema agroforestal, mientras que Q_t^{aM} y Q_t^{aAF} son funciones de productividad del sitio que dependen del estado del suelo, s_t , y de las técnicas de manejo empleadas (x^{aM} las agrícolas y x^{aAF} las agroforestales).

También, Cacho *et al.* (2002) mencionan que la productividad de los árboles en el monocultivo forestal, y_t^{fM} , y en el sistema agroforestal, y_t^{fAF} , depende de la producción de biomasa, b_t^f , de la especie arbórea utilizada, en el año t , y de una función de productividad del sitio (Q_t^f). La productividad del monocultivo forestal puede expresarse así:

$$y_t^{fM} = b_t^{fM} Q_t^{fM}(s_t, x_t^{fM}) \quad (5.15)$$

Mientras que la productividad de los árboles en el sistema agroforestal como:

$$y_t^{fAF} = b_t^{fAF} Q_t^{fAF}(s_t, x_t^{fAF}) \quad (5.16)$$

Donde, para el año t , las funciones de productividad del sitio, Q_t^{fM} y Q_t^{fAF} , están en función del estado del sitio, s_t , y de las técnicas de manejo empleadas, expresadas por los vectores x_t^{fM} , para el monocultivo, y x_t^{fAF} para el sistema agroforestal.

Manejo de la cosecha mediante podas

A continuación se propone una extensión del modelo para incluir variables de manejo de cosecha por podas anuales. Cada cosecha realiza un aprovechamiento que

representa una fracción d del incremento anual de biomasa, Δy_i^{fM} o Δy_i^{fAF} , de manera que la biomasa podada se representa por $d \cdot \Delta y_i$. Desde el punto de vista ambiental, el manejo sustentable una plantación energética debiera procurar el mantenimiento (o mejoramiento) de la fertilidad del suelo, al mismo tiempo que incrementar el almacenamiento de carbono. Una estrategia que busque el mantenimiento del suelo retiraría de la plantación una fracción de la biomasa de la poda, l , para su venta como leña (u otros usos), mientras que una fracción $(1-l)$ debiera mantenerse en el sitio como cobertura del suelo, como insumo para mejorar el ciclaje de nutrientes y la captura de carbono. Algunos autores (Mugwe *et al.*, 2004; Kumar *et al.*, 1998) recomiendan que la magnitud de la fracción l (que se retira) depende de la productividad de la especie en el sitio y de la estrategia de conservación del suelo que se defina. En el monocultivo forestal la cosecha de biomasa leñosa por hectárea en el año t puede expresarse como:

$$\bar{y}_i^f = l \cdot d \cdot \Delta y_i^{fM} \quad (5.17)$$

O también, expresando explícitamente Δy_i^{fM} , como se muestra a continuación:

$$\bar{y}_i^f = l \cdot d \cdot \Delta b_i^{fM} Q_i^f(\cdot) \quad (5.18)$$

En el sistema agroforestal la cosecha de biomasa leñosa (por hectárea) depende a su vez de la fracción del suelo que se dedica a los árboles. La siguiente expresión lo representa para el año de cosecha t :

$$\bar{y}_i^{fAF} = k \cdot l \cdot d \cdot \Delta y_i^{fAF} \quad (5.19)$$

O bien, mostrando explícitamente Δy_i^{fAF} se representa como:

$$\bar{y}_i^{fAF} = k \cdot l \cdot d \cdot \Delta b_i^{fAF} Q_i^{fAF} \quad (5.20)$$

Complementariamente, la fracción de biomasa de la poda que puede utilizarse como cobertura del suelo (por hectárea) se representa por la expresión (21) para el monocultivo forestal, como se muestra enseguida:

$$cobersuelo_i^{fM} = (1-l) \cdot d \cdot \Delta y_i^{fM} \quad (5.21)$$

Para el sistema agroforestal la biomasa de la poda que puede utilizarse como cobertura del suelo involucra a la fracción del suelo con árboles, como lo muestra la siguiente expresión.

$$cobersuelo_t^{AF} = k \cdot (1 - l) \cdot d \cdot \Delta y_t^{fAF} \quad (5.22)$$

La fracción de biomasa que se utiliza como cobertura del suelo (*cobersuelo*), además de ser un parámetro de manejo importante, puede considerarse también como un parámetro financiero, ya que por su contenido de nutrientes puede sustituir fertilizantes sintéticos, disminuyendo consecuentemente los costos de producción; sin embargo, la eficiencia de la incorporación de nutrientes al suelo tiene que medirse para estimar su impacto económico.

Modelo económico con pago por captura de carbono

En las plantaciones energéticas la captura de carbono se constituye por el carbono almacenado en el suelo y por el carbono de la biomasa que no se retira en las cosechas, incluyendo una fracción aérea y otra bajo tierra, en las raíces de los árboles. El método de valuación económica de captura de carbono (C) considera el pago “ideal” de este servicio, en el que los ingresos por captura se reciben al final de cada año, considerando que el propietario participa en un *Mecanismo de Desarrollo Limpio* (CDM), recibiendo los pagos con base en *Certificados de Reducción de Emisiones* (CERs) (Cacho *et al.*, 2003).

Cacho *et al.* (2003) han planteado el modelo económico para un sistema agroforestal ampliado para incluir la captura de carbono. La función de utilidad incluye beneficios por la actividad agrícola a_t^{AF} , por los árboles f_t^{AF} y por la captura de carbono V_C . El modelo se representa con la siguiente expresión:

$$V(T, k, x) = [1 - k] \cdot \sum_{t=0}^T a_t^{AF} (\cdot) \delta^{-t} + k \cdot \sum_{t=0}^T f_t^{AF} (\cdot) \delta^{-t} + V_C(T, k, x) - c_t^{AF} \quad (5.23)$$

Donde el último término, V_C , representa el valor del pago por captura de carbono, que de forma más amplia puede expresarse así:

(5.24)

$$V_C(T, k, x) = k \cdot \sum_{t=0}^T \Delta b_t^C(k, x) \cdot p_t^C \cdot \delta^{-t} \\ + \sum_{t=0}^T \Delta s_t^C(k, x) \cdot p_t^C \cdot \delta^{-t} - \sum_{t=0}^T c_M$$

Donde Δb_t^C y Δs_t^C son los cambios anuales de C en la biomasa de los árboles y en el suelo, p_t^C es el precio del carbono (C) en el mercado y c_M los costos anuales de monitoreo de captura de C. Los cambios de C en la biomasa (Δb_t^C) y en el suelo (Δs_t^C) son funciones de la fracción del terreno dedicada a los árboles, k , y de las técnicas de manejo empleadas en el sitio, x .

La biomasa de los árboles puede dedicarse por completo a la captura de carbono; sin embargo, en condiciones de alta productividad de biomasa, una fracción del incremento anual puede aprovecharse como leña de uso energético. Cabe la posibilidad de que la biomasa de uso energético también genere ingresos por bonos de carbono, ya que puede sustituir combustibles fósiles por biomasa producida sustentablemente, en un ciclo en emisiones neutrales de carbono (Marland y Schlamadinger, 1997).

Solución del modelo

Resolver el modelo económico tiene como objetivo dar respuesta a algunas de las cuestiones más importantes del análisis, como maximizar el *Valor Presente Neto* (VPN) o el *Valor Esperado del Suelo* (VES) en términos de una variable de interés; determinar *el tiempo óptimo de rotación* (T), determinar la fracción óptima del suelo, k , que se dedica a los árboles y al cultivo anual ($1-k$), decidir la estrategia e intensidad del régimen de cosecha o de fertilización (hr, fr), o analizar el riesgo de la inversión por la incertidumbre y las fluctuaciones de los precios. La solución del modelo puede abordarse aplicando diferentes métodos; algunos son los siguientes: (1) los métodos de optimización analítica complementados con funciones de producción empírico-experimentales, (2) los algoritmos de programación dinámica para resolver iterativamente las ecuaciones en términos de las variables de interés y (3) los modelos de simulación biofísica. A su vez, estos métodos pueden complementarse con el análisis económico-financiero. En lo siguiente presentamos una descripción de estos

métodos y proponemos un meta-modelo de integración para la toma de decisiones y re-diseño de experimentos en un marco integrado de sustentabilidad.

5.3 Modelos de optimización analíticos y funciones empíricas

Los métodos de optimización analítica buscan resolver el modelo encontrando los puntos críticos por métodos matemáticos de solución de ecuaciones diferenciales. Cacho (2001) ha presentado la derivación de primer orden de una versión de la ecuación 10 con respecto a los cambios en el área ocupada por los árboles (k), para un ciclo de cosecha T . Wise y Cacho (2005) mencionan que una limitante importante de los métodos analíticos es que no se pueden aplicar cuando las funciones de producción no son continuas ni diferenciables, o cuando tienen derivadas muy complejas que las hacen difíciles de resolver. También mencionan que en la solución analítica se asume que las variables de estado del suelo se mantienen constantes, lo que no sucede en la realidad; recomiendan utilizar métodos de programación dinámica y simulación biofísica. Sin embargo, los métodos de programación y simulación a su vez son difíciles de manejar, por lo que las soluciones analíticas y empíricas siguen siendo de utilidad práctica. A continuación exponemos algunos de los modelos empíricos para estimar los parámetros de productividad biológica del modelo económico.

Funciones de producción empírico-experimentales

Los modelos empíricos que describen el crecimiento de los árboles se basan frecuentemente en funciones del tipo exponencial o polinomial. Verjwist y Telenius (1999) mencionan que derivar experimentalmente dichas funciones puede ser una tarea muy difícil y compleja, en términos de tiempo y trabajo, con resultados de grandes variaciones entre especies y ecosistemas. Aunque los modelos basados en funciones polinomiales ofrecen frecuentemente alta correlación con los datos experimentales, tienen la desventaja de carecer de interpretación biológica o forestal, ya que sus parámetros no tienen significado (Lei y Zhang, 2004); en cambio, los modelos empíricos basados en el modelo Bertalanffy-Richards permiten analizar, predecir y decidir cuestiones de interés económico (Gamponia y Mendelsohn, 1987).

Un modelo empírico sencillo, utilizado de forma general por dar buen ajuste con los datos experimentales es el que derivaron Gamponia y Mendelsohn (1987). El modelo representa el volumen de biomasa forestal en el tiempo (en m³ por hectárea) mediante una ecuación con forma sigmoideal. La expresión de la ecuación se muestra a continuación:

$$Q(t) = e^{\gamma - \eta/t} \quad (5.25)$$

Donde $Q(t)$ es el volumen de biomasa del árbol, en m³ · ha⁻¹, e es la base del logaritmo natural ($e=2.71282\dots$), t es el tiempo (en meses), mientras que γ y η son parámetros que caracterizan la función sigmoideal de crecimiento.

Analizando la representación gráfica de esta función con diferentes valores de γ y η se observa que en términos generales γ es un indicador del límite superior de crecimiento y η un indicador del tiempo (o velocidad) con que se llega al límite de crecimiento; valores altos de γ indican un límite de crecimiento alto, mientras que el indicador η es inverso al tiempo, valores menores de η indican crecimiento más rápido. Los valores de γ como η pueden depender o influirse por factores biológicos, ambientales o silvícolas, como la genética de la especie, las condiciones ambientales del sitio (e.g. fertilidad del suelo, precipitación pluvial y disponibilidad de agua, radiación solar, temperatura y perfil del suelo, entre otras) o las técnicas de manejo (espaciamiento, competencia con otras especies, fertilización, irrigación y control de plagas, entre otras); sin embargo, aunque todos esos factores pueden influir en los parámetros de la función de producción $Q(t)$, el modelo Gamponia y Mendelsohn caracteriza empíricamente el crecimiento sigmoideal en función de los parámetros γ y η , únicamente; estos pueden estimarse mediante la regresión lineal de datos experimentales (obtenidos de pruebas destructivas o de la cosecha), transformados a su logaritmo natural, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\ln(Q(t)) = \gamma - \eta/t \quad (5.26)$$

Las funciones que se han derivado con este procedimiento han permitido el análisis económico de plantaciones de pino (Gamponia y Mendelsohn, 1987) y de especies tropicales como *Leucaena* (Stone, 1993).

Funciones de producción biológica del manejo con podas

Algunas especies tienen la capacidad de rebrotar anualmente y producir biomasa (leña, forraje u otros productos) en cantidades de interés económico bajo el régimen de poda. Desde el punto de vista económico, Evans y Thurnbull (2004) comentan que la poda se debe realizar si el beneficio anual (o periódico) del corte es mayor que los costos que implica.

Para el sistema de manejo con podas se puede aplicar el criterio de decisión de la comparación de beneficios marginales: la poda se lleva a cabo cuando la especie tiene la capacidad de rebrotar y retornar a un punto con una tasa de productividad tal que el *beneficio marginal* de mantener la plantación en pie sea mayor que el *costo de oportunidad* por cortar completamente el árbol y utilizarlo en la inversión alternativa (con tasa de interés r), lo que puede representarse de la siguiente forma:

$$\frac{dV(t)}{dt} > r \cdot V(t) \quad (5.27)$$

Evaluar analíticamente este principio requiere conocer la función de producción biológica bajo este régimen de manejo a través del tiempo, aunque esto sea muy costoso en tiempo y esfuerzo. En un estudio alométrico experimental con *Acacia saligna*, en Kenia, Droppelman y Berliner (2000) sugirieron que los coeficientes de las ecuaciones alométricas de la especie sin podar pueden utilizarse para estimar el rebrote de biomasa de árboles podados. Otro aspecto que presenta dificultades experimentales y analíticas es al que se refieren Castelán-Estrada *et al.* (2001), que concluyeron que es necesario probar si los parámetros de las ecuaciones son estables a lo largo del tiempo. Lo que sugiere que los parámetros alométricos deben estudiarse a lo largo del ciclo productivo.

Teóricamente, el modelo Bertalanffy-Richards puede servir como una guía para identificar el punto de mayor productividad biológica (el punto de inflexión) para definirlo como el punto de poda; sin embargo, en los sistemas agroforestales la productividad puede seguir dinámicas de productividad diferentes al modelo Bertalanffy-Richards. En Kenya, Peter y Lehman (2000) observaron que las podas redujeron el desarrollo de las raíces de las acacias en sistemas agroforestales, lo que provocó una disminución en su capacidad para nutrirse con fósforo, distorsionando consecuentemente su patrón de crecimiento; además, observaron que las podas

favorecieron a los cultivos anuales al disminuir la competencia con las acacias, pero aumentaron las posibilidades de pérdida de nutrientes por lixiviación.

Kumar *et al.* (1998) han discutido las implicaciones en el balance de nutrientes cuando la biomasa de la poda se retira o se mantiene en el sitio; compararon 9 especies arbóreas, analizando parámetros alométricos y la eficiencia del aprovechamiento de nutrientes en plantaciones de leña y sistemas silvopastorales; aunque no definieron funciones de productividad de biomasa en el tiempo, sus ecuaciones permiten cuantificar la cosecha de biomasa con base en parámetros dimensionales. De su estudio muestra que el manejo con podas requiere conocer la dinámica de la producción de biomasa de la especie bajo este tipo de aprovechamiento. Por ello, se deduce que para diseñar analíticamente estrategias de cosecha (y mantenimiento del suelo), es necesario definir las funciones de productividad y_i^{FM} y y_i^{FAF} .

En un estudio de un sistema forestal de pinos, a partir de métodos empírico-experimentales y de métodos analíticos, Fight *et al.* (1987) respondieron cuestiones del efecto del manejo con podas en el análisis financiero de plantaciones forestales: el tiempo óptimo para la poda, el intervalo entre la poda y el corte, y la influencia de los precios sobre la estrategia de cosecha con poda. De este estudio se deduce que el manejo silvícola adecuado mediante podas requiere del conocimiento de la respuesta de la especie ante este régimen de aprovechamiento.

Captura y cambios de carbono en el sistema

En cuanto a la captura de carbono, ésta se constituye por dos reservas de almacenamiento principales: una en la biomasa aérea y otra en la biomasa bajo tierra (en las raíces y en el suelo). Comúnmente se estima únicamente el contenido de C en la parte aérea de los árboles, ya que puede derivarse mediante los estudios alométricos. Los cambios del contenido de carbono en el suelo pueden identificarse mediante análisis periódicos muestras del suelo a diferentes profundidades (Kumar *et al.*, 1998). La medición física del carbono capturado en las raíces de los árboles puede ser una tarea muy laboriosa y cara porque requiere recuperar las raíces desde las profundidades del suelo. Aunque se han descrito métodos para medir la biomasa de las raíces (Lasco y Sales, 2003), se prefiere utilizar aproximaciones teóricas, como la propuesta por Cairns *et al.* (1997), que adaptada por Sales *et al.* (2005) se aplicó a especies tropicales en Filipinas. La ecuación adaptada (Sales *et al.*, 2005) se presenta en función de la biomasa aérea, como lo muestra la siguiente expresión:

$$Biomasa_raíces(t/ha) = e^{-1.0587+0.8836*\ln(biomasa_aérea)} \quad (5.28)$$

Por otro lado, Enquist y Niklas (2002) proporcionan también una ecuación que relaciona la biomasa aérea con la biomasa bajo tierra, como se expresa a continuación:

$$M_r = (M_a / 3.88)^{(1/1.02)} \quad (5.29)$$

En la que M_r es la biomasa de las raíces y M_a la biomasa aérea.

A partir de estas relaciones y de las ecuaciones alométricas de la biomasa aérea, en su forma estabilizada para el ciclo de cosecha con podas, puede estimarse el incremento de biomasa de las raíces. Si se conoce el contenido de carbono en la biomasa de la especie puede derivarse consecuentemente la captura de carbono en las raíces.

5.4 Programación dinámica y simulación biofísica.

Métodos de programación dinámica

Seguiremos a Cacho y Hean (2004) en la exposición de la solución del problema de optimización mediante la programación dinámica. El problema consiste en la maximización de la ecuación 6 para el sistema forestal y de la ecuación 10 para el sistema agroforestal. La programación dinámica permite resolver el problema para un periodo de tiempo definido, como un ciclo de cosecha, T , o para un horizonte de tiempo infinito ($n = \infty$). El problema de optimización se denota como sigue:

$$\max_{k_n, x_n, T_n} V = \sum_{n=1}^{\infty} VPN(s_n, k_n, x_n, T_n) \quad (5.30)$$

Se maximiza el VPN del sistema sujeto a las restricciones del sistema y a las condiciones de las variables críticas. El sistema tiene variables de estado que pueden cambiar en cada iteración; por ejemplo, cuando se considera al suelo, s_t , sus estados se representan por la ecuación:

$$s_{t+1} = s_t + \Delta s_t(s_t, x) \quad (5.31)$$

Así se expresa que el siguiente estado del suelo depende del estado actual y de las técnicas de manejo x .

Cacho y Hean (2004) consideran la solución de maximización del VPN (ecuación 30) como un problema de sistemas complejos con un número infinito de estados que en algunos casos puede simplificarse mediante el método de optimización de *Bellman*, permitiendo la solución mediante programación dinámica recursiva.

Modelos de simulación biofísica

Resolver el modelo de optimización por métodos numéricos puede requerir mucha información. Algunos de los datos de los parámetros biofísicos pueden estar disponibles en bases de datos históricas de otros proyectos, especialmente cuando se trata de las especies de uso más frecuente (e.g. *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Eucaliptus camaldulensis*); sin embargo, cuando se emplean nuevas especies, particularmente en sistemas agroforestales, los datos requieren ser específicos del sitio y de las especies de interés. Las interacciones entre árboles, cultivos, suelo, clima y personas son tan complejas que no puede garantizarse que los resultados de un sitio puedan replicarse directamente en otro (DFID-FRP, 2003). Jagtap y Ong (1997) consideraron que es muy difícil hacer recomendaciones predictivas sobre el tipo adecuado de combinación árbol-cultivo para un sitio específico y para los objetivos particulares de un campesino. Se ha observado que los procesos e interacciones en los sistemas agroforestales son tan complejos que solamente los modelos computacionales pueden ofrecer su representación y análisis integrados en el tiempo y en el espacio, facilitando la extrapolación de resultados a nuevas combinaciones de suelo, clima, especies y sistemas de manejo (DFID-FRP, 2003).

Entre los modelos de simulación biofísica computarizada más reconocidos se puede mencionar a SCUAF (Young *et al.*, 1998) (“Soil Changes Under Agroforestry”), HyPAR (Mobbs *et al.*, 1998) y WaNuLCAS (van Noordwijk y Lusiana, 1998) (“Water Nutrients and Light Capture in Agroforestry Systems”), que son útiles como herramientas para análisis de sistemas agrícolas, forestales y agroforestales. Estos modelos cuentan con módulos de cálculo que han incorporado muchas ecuaciones biofísicas para simular

dinámicamente las interacciones de los sistemas productivos, permitiendo el análisis y la predicción de la productividad futura, así como el análisis de las interacciones en el suelo. SCUAF ofrece la predicción de cosechas con base en el modelado del efecto de la adición de materia orgánica sobre los cambios en la erosión del suelo, el contenido de nitrógeno y el agua; sin embargo, no incluye el análisis de la competencia árbol-cultivo por agua y nutrientes, y ofrece una representación simplista de la luz. HyPAR analiza, calcula y predice la intercepción de luz y agua en función de la copa del árbol y del incremento anual de biomasa, así como la luz y agua disponibles para el cultivo entre los árboles, con la intención de predecir el crecimiento y las cosechas potenciales. WaNuLCAS se basa en ambiente de modelado STELLA, permitiendo al usuario modificaciones de los parámetros biofísicos y de la estructura del modelo; cuenta con módulos para representar dinámicamente las interacciones de agua, luz, nitrógeno, fósforo y carbono, entre otros elementos, en sistemas agroforestales simultáneos o secuenciales; se basa en las ciencias que estudian las interacciones planta-cultivo, sobre y bajo el suelo, como la fisiología vegetal y la edafología, permitiendo la investigación de las interacciones en el corto y la predicción de tendencias de cosecha en el largo plazo. Los resultados de predicción de cosechas que arrojan estos modelos pueden proveer información importante para resolver los problemas de optimización del modelo económico, permitiendo la evaluación financiera de la inversión en plantaciones energéticas.

Sin embargo, cuando se trabaja con nuevas especies y condiciones de frontera, se requiere calibrar estos programas, o adaptarlos, con muchos datos biofísicos y con ecuaciones que modelen las interacciones entre los elementos. Los usuarios de HyPAR y WaNuLCAS han identificado algunos impedimentos para su aplicación (DFID-FRP, 2003), entre los que destacan:

- 1) Es muy difícil que los usuarios nuevos cuenten con los datos y la capacitación para poder calibrar entre 30 y 60 parámetros del suelo, clima y combinaciones de especies; normalmente no tienen acceso a la información adecuada (bases de datos y bancos de información) o no se sienten cómodos con las suposiciones que hay que adoptar.
- 2) El soporte a los usuarios de estos programas puede existir, pero no puede garantizarse habiendo tan pocos usuarios a nivel mundial.
- 3) Aunque estos programas son muy completos, tienen simplificaciones que hacen que excluyan algunos procesos biofísicos en las escalas de tiempo y espacio.

La complejidad y falta de información para calibrar los parámetros de estos modelos ha sido la principal causa para que investigadores de países en desarrollo no los hayan utilizado; por ello, varios organismos internacionales (DFID, CGIAR, ICRAF, CATIE y EMBRAPA, entre otros)⁴ colaboraron para realizar un proyecto de soporte a la difusión de los modelos HyPAR y WaNuLCAS con el objetivo de: *“incrementar el entendimiento de investigadores, capacitadores y oficiales de difusión, sobre diferentes escenarios de manejo predictivo de decisiones de campesinos con base en el conocimiento de los efectos de la luz, agua y nutrientes en las cosechas de árboles y cultivos en sistemas agroforestales”* (DFID-FRP, 2003).

Contando con la información y capacitación adecuada, estos programas pueden ser herramientas importantes en la predicción de cosechas, definición de tiempos de rotación, asignación superficies para los árboles y los cultivos, y en general, para optimizar el manejo de las variables críticas de los sistemas. Los resultados cuantitativos de las variables de producción pueden ser utilizados para resolver el modelo económico y para realizar análisis financieros.

5.5 Integración del modelo económico en un marco de la sustentabilidad

La evaluación de la sustentabilidad de sistemas productivos es un tema de investigación relativamente joven que ha tomado conocimientos y herramientas de muchas ciencias, desarrollando nuevos conceptos y metodologías. De acuerdo a la metodología MESMIS (Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo integrando Indicadores de Sustentabilidad) (Masera *et al.*, 1999), la evaluación de la sustentabilidad de proyectos sistemas de manejo es válida para casos determinados por la geografía y por contextos sociales y políticos específicos en escalas espaciales y temporales definidas; también, MESMIS especifica que hay siete atributos que caracterizan la sustentabilidad de un sistema de manejo: (1) alta productividad, (2) confiabilidad, (3) estabilidad, (4) adaptabilidad, (5) resiliencia, (6) distribución equitativa de los beneficios y (7) autogestión. Estos atributos pueden considerarse desde cada una de las tres dimensiones de la sustentabilidad, (a) ambiental, (b) económica y (c)

⁴ DFID (Department for International Development, UK), CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research), ICRAF (World Agroforestry Center), CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).

social, para identificar variables críticas, establecer indicadores y posteriormente evaluar de forma integrada el sistema de manejo.

En la dimensión ambiental, el impacto que un proyecto puede tener en la naturaleza puede evaluarse mediante el *Análisis de Impacto del Ciclo de Vida* (AICV) (ISO-14042, 2000). Esta es una metodología que identifica las variables críticas de impacto y establece indicadores para su evaluación, como el flujo de materiales y energía en el sistema, la eutrofización, la acidificación del suelo y las emisiones a la atmósfera (entre otras) (Antón Vallejo, 2004). Es una prioridad en las plantaciones energéticas que el balance energético sea positivo y de alta eficiencia. Los casos de estudio de balance energético y Análisis de Impacto Ciclo de Vida de sistemas forestales y agroforestales aun son muy escasos.

Otra herramienta útil en la evaluación de la sustentabilidad ambiental es el programa CO2FIX (Shelhaas *et al.*, 2004), que modela la dinámica del potencial de captura de carbono de proyectos forestales y agroforestales, con la posibilidad de generar y evaluar diferentes escenarios, reales o hipotéticos. El programa tiene la capacidad de analizar varios niveles de captura de carbono, incluyendo la biomasa forestal, en el suelo y en los productos; a su vez, estima el balance total de carbono de sistemas de manejo alternativos en bosques templados y tropicales (Masera *et al.*, 2003). El programa utiliza, entre otros datos, las tasas de incremento anual de biomasa, usualmente disponibles en tablas de censos forestales o en registros históricos de proyectos; sin embargo, con especies nuevas es necesario generar empíricamente los datos que requiere el programa, o bien, proponer escenarios hipotéticos.

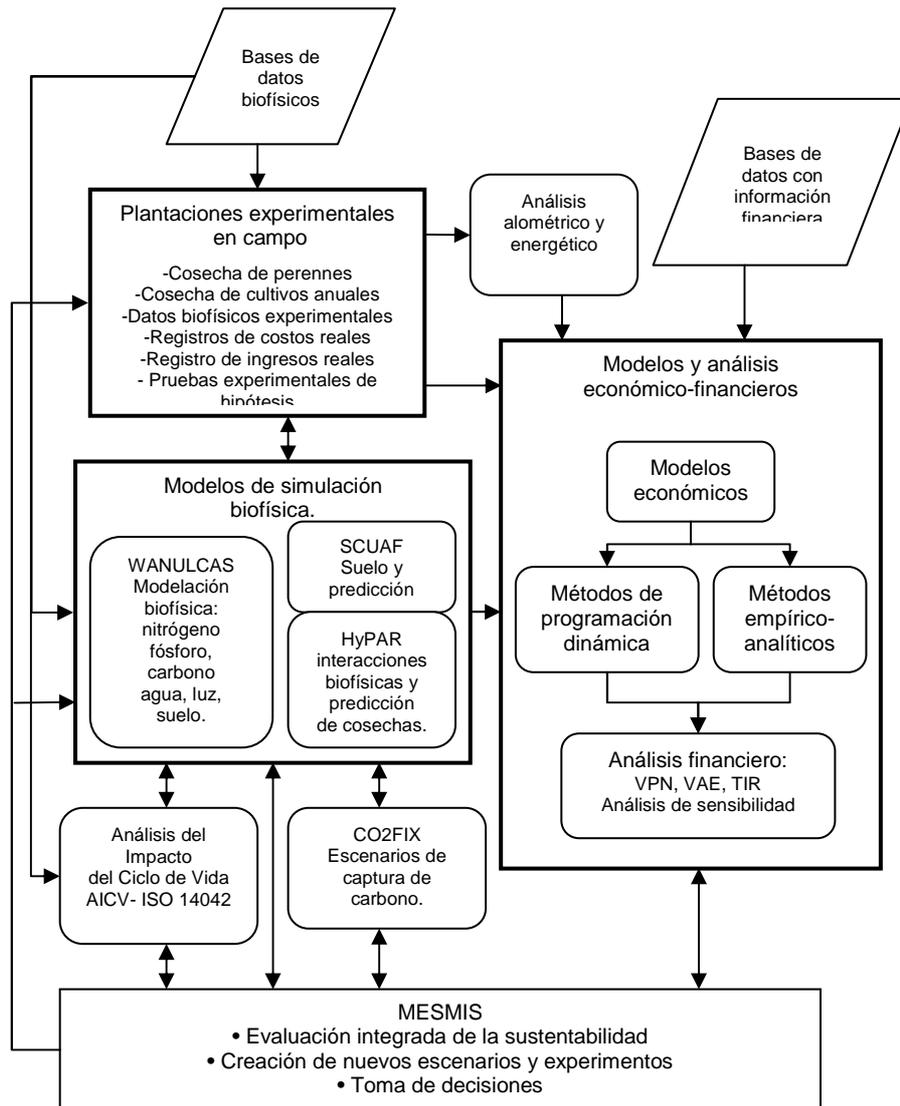
Como se expuso anteriormente, el modelo económico de este capítulo combina funciones de productividad biológica con parámetros económicos, expresando de esta forma la dependencia del ámbito económico en la productividad biológica del sistema. Atributos biofísico-ambientales como alta productividad, estabilidad, adaptabilidad y resiliencia, son factores críticos para maximizar los beneficios económicos. Por ello, el manejo adecuado de las interacciones entre árboles, cultivos, suelo, agua, atmósfera y los humanos, tiene como objetivo principal lograr simultáneamente dichos atributos en un sistema de manejo forestal, agroforestal o agrícola. Se hace evidente la importancia de contar con modelos de simulación biofísica para el manejo sustentable de proyectos con este tipo de sistemas de manejo.

Cuando se desea incluir la valoración económica de impactos que se extienden más allá del terreno del proyecto, estos suelen considerarse como externalidades ambientales (positivas o negativas). Algunos ejemplos de externalidades negativas son la lixiviación de fertilizantes sintéticos que no fueron asimilados por las plantas y la emisión de partículas a la atmósfera por la erosión del suelo o por el exceso de fertilizantes; algunas externalidades positivas pueden ser los servicios ambientales por captura de carbono, la infiltración de agua y la preservación de la biodiversidad. El análisis de externalidades consiste en la solución del modelo –maximizar el *Valor Presente Neto* (VPN) o el *Valor Esperado del Suelo* (VES) – incluyendo (internalizando) variables ambientales que se extienden más allá de los límites físicos del terreno, como lo mostraron Cacho y Hean (2004) para la erosión del suelo.

Integración de análisis hacia la evaluación de sustentabilidad de las plantaciones energéticas

La Figura 5.2 muestra un meta-modelo que integra la interacción de varios modelos y sistemas, incluyendo las plantaciones experimentales en campo, los modelos de simulación biofísica (con programas computarizados como WANULCAS, SCUAF y HyPAR), modelos económicos y programas de análisis económico-financiero, bases de datos (biofísicas y financieras), métodos y programas de evaluación de impactos ambientales y captura de carbono. El modelo propone que con la información generada por los componentes, se llegue a una evaluación integrada de sustentabilidad de las plantaciones energéticas mediante el marco MESMIS.

Figura 5.2 Meta-modelo de análisis de plantaciones energéticas, forestales y agroforestales.



Las plantaciones experimentales en campo proporcionan información real sobre los volúmenes de cosecha y registros de gastos e ingresos. La estimación de biomasa y el potencial energéticos se analizan mediante modelos alométricos y análisis energéticos. Los modelos de simulación biofísica permiten realizar pruebas de hipótesis que serían muy difíciles y costosas en campo, ofrecen escenarios de predicción de cosechas y permiten el análisis de condiciones límite. Los modelos de análisis económicos y financieros reciben información de bases de datos (precios y costos de mercado); en los campos experimentales se genera información sobre cosechas y finanzas reales; en los modelos de simulación biofísica se generan datos de predicción de cosechas para diferentes escenarios de condiciones biofísicas. La programación dinámica, los métodos analíticos y los programas de análisis financiero

permiten resolver el modelo económico para maximizar los beneficios. El análisis del ciclo de vida y el programa CO2FIX son importantes para evaluar los impactos ambientales. Finalmente, el marco metodológico MESMIS permite la evaluación integral de la sustentabilidad para llegar a mejor toma de decisiones, proponer nuevos escenarios y diseños para la simulación biofísica y/o la experimentación en campo.

Planteamiento del modelo al caso: *El Colorín*

En los capítulos anteriores (2, 3, y 4) se presentaron varios análisis que mostraron (hasta los 18 meses de crecimiento) resultados alométricos, energéticos y de la productividad de los ocho tratamientos experimentales establecidos en *El Colorín*. Los resultados presentados anteriormente pueden utilizarse para avanzar hacia un análisis financiero preliminar. Del metamodelo de la Figura 5.2, el proyecto en *El Colorín* ha seguido la ruta que incluye las Plantaciones experimentales en campo y los análisis alométricos y energéticos, para continuar hacia los modelos de análisis económico-financieros. La principal limitante se identifica en el corto tiempo de análisis del proyecto, 18 meses, por lo que no fue posible derivar la función de productividad de las especies arbóreas a lo largo del ciclo productivo. Sin embargo, los métodos analíticos pueden permitir la proyección de la información de los 18 meses de crecimiento, para proponer escenarios de análisis hipotéticos.

5.6 Conclusiones

- Con base en el criterio de decisión de la comparación de costos y beneficios marginales, se presentó un modelo para analizar la toma de decisiones en el manejo de cosecha de leña forestal por podas. Se mostró la necesidad de contar con modelos predictivos de la productividad de biomasa bajo este régimen y se destacó la necesidad de basar estos modelos en pruebas experimentales alométricas de largo plazo.
- Se extendió el modelo de Cacho *et al.* (2002) para expresar de forma más detallada la valoración económica de sistemas agroforestales y monocultivos agrícolas y forestales, expresando en detalle las variables involucradas y las variables críticas para la toma de decisiones con el principio de maximización de beneficios.
- El modelo se extendió para mostrar el análisis de externalidades económicas, incluyendo variables que indicadores de cambios ambientales como efecto de un proyecto. Se mostró el caso para incluir la internalización de los beneficios por la captura de carbono.
- Se expusieron alternativas para resolver el modelo mediante métodos empírico-analíticos, programación dinámica y modelos de simulación biofísica. Sin embargo, se hicieron notar las limitaciones de estos métodos, ya que en muchos casos las funciones bioeconómicas no son continuas ni derivables (en primer o segundo orden). Así mismo, se mostraron las ventajas de utilizar métodos de programación dinámica y/o métodos de simulación biofísica para la solución óptima del modelo, aunque en muchas ocasiones estas soluciones tampoco son viables si no se cuenta con toda la información necesaria para calibrar los parámetros del modelo.
- Se propuso que los diferentes aspectos del modelo pueden ser integrados en un meta-modelo que incluye bases de datos, campos experimentales, análisis alométricos y energéticos, métodos de evaluación del impacto ambiental (AICV-ISO 14042 y CO2FIX), programas de análisis financiero y un marco integrado de evaluación de la sustentabilidad.

Capítulo 6

Construcción de escenarios de producción y análisis financiero de plantaciones energéticas forestales y agroforestales.

Este capítulo muestra el desarrollo teórico para proponer un modelo analítico de construcción de escenarios futuros de producción de biomasa leñosa de plantaciones energéticas, y muestra un ejercicio de análisis financiero comparativo, exploratorio, de algunos de los tratamientos experimentales del sitio *El Colorín*. Este caso de estudio puede considerarse como un análisis exploratorio, ya que se basa en la información preliminar de la producción (16 meses), en una referencia externa de la producción futura (con base en la referencia de la biomasa de una muestra de individuos de *A. pennatula*, de aproximadamente 10 años de crecimiento, que crecieron naturalmente en el bosque secundario del territorio de Cuentepec) y en suposiciones sobre las técnicas de manejo silvícola (fijando el tiempo de rotación forestal en 10 años). Se simplificó número de tratamientos experimentales bajo análisis, considerando únicamente los tratamientos con las especies *A. pennatula* (tepame) y *Phaseolus vulgaris* (frijol flor de mayo), que incluyen un monocultivo forestal (T5), un tratamiento agroforestal fertilizado químicamente (T4), un tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6) y dos monocultivos agrícolas de frijol, uno fertilizado biológicamente (T7) y uno fertilizado químicamente (T8).

El análisis financiero evalúa el desempeño de la inversión utilizando indicadores como el Valor Presente Neto y el análisis de sensibilidad para evaluar la rentabilidad de las inversiones ante variaciones en la *tasa de descuento*, los precios de la leña y del frijol, y en los subsidios PROARBOL y PROCAMPO.

Los objetivos particulares del capítulo son los siguientes:

- 1) Presentar un método analítico que permita construir escenarios de producción futura de los tratamientos experimentales.
- 2) Presentar la estructura del flujo financiero de los tratamientos experimentales con *A. pennatula* en *El Colorín*.
- 3) Realizar el análisis de sensibilidad para la tasa de descuento, los precios de la leña y del frijol, así como de los subsidios PROCAMPO y PROARBOL.
- 4) Comparar la conveniencia de los sistemas experimentales con base en los resultados del análisis financiero.

6.1 Método analítico de construcción de escenarios de producción

El método analítico de construcción de escenarios de producción se basa en el modelo de Gamponia y Mendelsohn (1987), presentado en el Capítulo 5, que expresa el volumen de biomasa forestal en el tiempo (en m³/ha) mediante la ecuación¹:

$$Q(t) = e^{\gamma - \eta/t} \quad (6.1)$$

Si se desea expresar la biomasa en kg/ha, en vez de m³/ha, es necesario multiplicar $e^{\gamma - \eta/t}$ por la densidad de la madera de la especie, ρ . Consecuentemente, la función de producción de biomasa (en kg/ha) se representaría de la siguiente manera:

$$Q(t) = \rho \cdot e^{\gamma - \eta/t} \quad (6.2)$$

Para comparar dos tratamientos productivos, la función de producción (en kg/ha) de un tratamiento de referencia puede identificarse como $Q^0(t)$ y la de un tratamiento alternativo como $Q^1(t)$. Expresadas en función del tiempo y de los parámetros γ y η pueden expresarse como se muestra a continuación:

$$Q^0(t) = \rho \cdot e^{\gamma^0 - \eta^0/t} \quad (6.3)$$

$$Q^1(t) = \rho \cdot e^{\gamma^1 - \eta^1/t} \quad (6.4)$$

Tomando como referencia una medición realizada en el tiempo dado $t = \bar{t}$, y un aumento de tiempo x , la comparación de la biomasa en el tratamiento de referencia en el tiempo $t = \bar{t} + x$ respecto a su biomasa en el tiempo $t = \bar{t}$ puede representarse como lo muestra la siguiente expresión:

$$\frac{Q^0(\bar{t} + x)}{Q^0(\bar{t})} = \exp\left(\gamma^0 - \frac{\eta^0}{\bar{t} + x} - \gamma^0 + \frac{\eta^0}{\bar{t}}\right) = \exp\left(\frac{\eta^0}{\bar{t}} - \frac{\eta^0}{\bar{t} + x}\right) \quad (6.5)$$

¹ Del Capítulo 5: los parámetros γ y η caracterizan la función de producción en el tiempo; γ es un indicador del límite de crecimiento de la sigmoideal y η un indicador del tiempo o "velocidad" con que la función llega a su límite de crecimiento. Un valor alto del parámetro γ indica un límite de crecimiento alto; en cambio, valores altos del parámetro η indican crecimiento lento y valores menores indican rapidez para llegar al límite superior.

Que simplificando se expresa de la siguiente forma,

$$\frac{Q^0(\bar{t} + x)}{Q^0(\bar{t})} = \frac{x\eta^0}{\bar{t}(\bar{t} + x)} \quad (6.6)$$

Así mismo, para el tratamiento alternativo, con biomasa Q^1 , la comparación de la biomasa en $t = \bar{t} + x$ respecto a la biomasa en $t = \bar{t}$ se representa así:

$$\frac{Q^1(\bar{t} + x)}{Q^1(\bar{t})} = \frac{x\eta^1}{\bar{t}(\bar{t} + x)} \quad (6.7)$$

Como se observa, el parámetro γ se elimina en el proceso de simplificación, mostrando que en un tratamiento la comparación de la biomasa en el tiempo $t = \bar{t} + x$ respecto a la biomasa en el tiempo $t = \bar{t}$ depende únicamente del parámetro η y del aumento de tiempo x .

El cociente de las ecuaciones (6.6) y (6.7) compara en el tiempo la biomasa del tratamiento alternativo con respecto a la biomasa del tratamiento de referencia, como lo muestra la siguiente expresión:

$$\frac{\frac{Q^1(\bar{t} + x)}{Q^1(\bar{t})}}{\frac{Q^0(\bar{t} + x)}{Q^0(\bar{t})}} = \frac{\exp\left[\frac{x\eta^1}{\bar{t}(\bar{t} + x)}\right]}{\exp\left[\frac{x\eta^0}{\bar{t}(\bar{t} + x)}\right]} = \exp\left[\frac{x(\eta^1 - \eta^0)}{\bar{t}(\bar{t} + x)}\right] \quad (6.8)$$

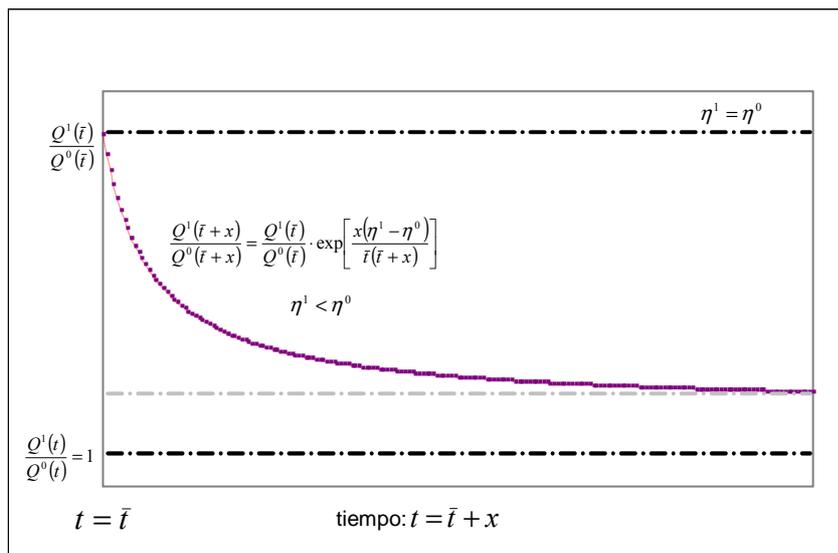
Que a su vez puede re-ordenarse para expresar en el tiempo la comparación de la biomasa de los dos tratamientos, $Q^1(t)/Q^0(t)$, de la siguiente forma:

$$\frac{Q^1(\bar{t} + x)}{Q^0(\bar{t} + x)} = \frac{Q^1(\bar{t})}{Q^0(\bar{t})} \cdot \exp\left[\frac{x(\eta^1 - \eta^0)}{\bar{t}(\bar{t} + x)}\right] \quad (6.9)$$

Esta ecuación muestra que conforme avanza el tiempo en x unidades a partir del tiempo $t = \bar{t}$, la comparación de la biomasa, $Q^1(t)/Q^0(t)$, es una función del cociente $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$ en el tiempo $t = \bar{t}$, multiplicada por un exponencial que depende del aumento en el tiempo x y de la diferencia entre los parámetros η^1 y η^0 . Esta ecuación puede ser de utilidad para predecir la biomasa del tratamiento alternativo $Q^1(\bar{t} + x)$ si se conoce la biomasa del tratamiento de referencia $Q^0(t)$ en $t = \bar{t} + x$, la biomasa de ambos tratamientos en el tiempo $t = \bar{t}$, $Q^1(\bar{t})$ y $Q^0(\bar{t})$, y los parámetros η^1 y η^0 . De la ecuación se deduce que cuando $\eta^1 = \eta^0$ el cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ se mantiene constante en el valor de $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$, condición se presentaría únicamente si la velocidad de crecimiento de las plantas en el tratamiento alternativo fuera igual que en el tratamiento de referencia.

Si se elige como tratamiento de referencia, Q^0 , el de menor productividad de biomasa, y como tratamiento alternativo el de crecimiento más rápido, Q^1 , la diferencia $\eta^1 - \eta^0 < 0$. De la ecuación 6.9 se deduce que el cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ se representa por una función con la forma de una curva exponencial decreciente que parte de un valor inicial $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$ en el eje vertical, disminuyendo conforme avanza el tiempo x hasta un límite inferior asintótico. La Figura 6.1 muestra la gráfica de la función decreciente del cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$.

Figura 6.1 Gráfica de la función $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$, con $\eta^1 < \eta^0$.



Cuando la diferencia entre η^1 y η^0 es pequeña, el cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ tiende hacia un límite asintótico cercano al valor $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$, pero conforme aumenta la diferencia entre η^1 y η^0 (con $\eta^1 - \eta^0 < 0$), el límite asintótico se separa del valor inicial hacia un límite inferior. Dependiendo del valor inicial $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$ y de la diferencia $\eta^1 - \eta^0$, el límite asintótico del cociente $Q^1(t)/Q^0(t)$ puede variar desde 1, cuando $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t}) = 1$, hasta el valor $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$, cuando $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t}) > 1$ y $\eta^1 - \eta^0 = 0$. La “velocidad” con que disminuye la función exponencial depende de la magnitud de la diferencia $\eta^1 - \eta^0$.

Cuando el tratamiento de referencia $Q^0(t)$ ha sido estudiado previamente, pueden conocerse sus parámetros γ^0 y η^0 , así como la cosecha en el tiempo de corte $Q^0(t + x)$. Por otro lado, el tratamiento alternativo puede ser un tratamiento nuevo, del que se desconocen los parámetros γ^1 y η^1 en el tiempo de corte y se desea predecir su biomasa a partir de los datos que se conocen en el tiempo $t = \bar{t}$, como $Q^1(\bar{t})$. En este caso, la ecuación 6.9 podría utilizarse para construir escenarios hipotéticos del tratamiento alternativo, proponiendo valores del cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ en rangos entre 1 y el valor del cociente $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$, de donde se puede despejar el valor de η^1 para cada escenario. Para cada valor que se obtiene de η^1 , y de sus valores correspondientes de $Q^1(\bar{t} + x)$, se despeja γ^1 y consecuentemente puede graficarse la función $Q^1(t)$.

6.2 Escenarios de producción de *A. pennatula* en el sitio experimental *El Colorín*.

La construcción de escenarios de producción de *El Colorín* inició con la elección del tratamiento T5 (monocultivo de *A. pennatula*) como el tratamiento de referencia (con biomasa $Q^0(t)$ y parámetros γ^0 y η^0), ya que es el tratamiento con menor productividad de biomasa en el tiempo $\bar{t} = 16$, y porque al utilizar el mínimo de insumos de manejo es el más similar a las condiciones de crecimiento natural. Análogamente, se seleccionaron

como tratamientos alternativos $Q^1(t)$ a los tratamientos T4 y T6. En el Capítulo 4 se reportó la producción de biomasa promedio de los tratamientos T4, T5 y T6 en el tiempo $\bar{t} = 16$ meses, de donde se obtuvieron los datos para conocer las relaciones $Q^1(16)/Q^0(16)$ entre los tratamientos, como se muestra a continuación:

$$Q^{T5}(\bar{t} = 16) = Q^0(\bar{t} = 16) = 0.292 \text{ (ton/ha)} \quad (6.10)$$

$$Q^{T4}(\bar{t} = 16) = 0.588 \text{ (ton/ha)} \approx 2 \cdot Q^0(\bar{t} = 16) \quad (6.11)$$

$$Q^{T6}(\bar{t} = 16) = 0.411 \text{ (ton/ha)} \approx 1.4 \cdot Q^0(\bar{t} = 16) \quad (6.12)$$

Observando que en $\bar{t} = 16$ meses hubo diferentes niveles de producción, se deduce que la velocidad de crecimiento de los tratamientos experimentales es diferente entre ellos: $\eta^{T4} \neq \eta^{T5} \neq \eta^{T6}$. Entonces, de la ecuación 6.9 se deduce que el cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ tenderá a un límite asintótico inferior para cada tratamiento alternativo, T4 y T6, respecto al tratamiento de referencia, T5, como se mostró en la Figura 6.1.

El caso de estudio de *El Colorín* presenta un problema adicional para la predicción de biomasa porque no se conoce la función de producción de biomasa (en el tiempo) del tratamiento de referencia $Q^0(t)$, T5, ni las de los tratamientos alternativos, $Q^1(t)$, de T4 y T6. No puede aplicarse directamente la ecuación 6.9 para predecir la biomasa del tratamiento alternativo, $Q^1(\bar{t} + x)$, porque no se conoce la biomasa del tratamiento de referencia $Q^0(\bar{t} + x)$ al final del ciclo de rotación, en $\bar{t} + x = 120$, ni se cuenta con el valor de los parámetros η^1 y η^0 . A los 16 meses de crecimiento, en el caso *El Colorín* se cuenta únicamente con los valores de $Q^0(\bar{t})$ y $Q^1(\bar{t})$ en $\bar{t} = 16$.

Para contar con una referencia de la biomasa del tratamiento de referencia $Q^0(t)$, en $t = \bar{t} + x = 120$, se tomó como referencia externa una muestra de 9 árboles de *A. pennatula* que crecieron naturalmente en el bosque secundario. La ecuación alométrica del Capítulo 3 para la biomasa leñosa de *A. pennatula* sirvió como método para estimar la biomasa de esta muestra. Los individuos de la muestra fueron seleccionados por tener una edad aproximada de 10 años, de acuerdo a la selección que hicieron campesinos conocedores del territorio de Cuentepec. El resultado promedio de las estimaciones alométricas se

extrapoló a una población de 1160 árboles por hectárea, de acuerdo al espaciamiento 2x5 m del diseño experimental de *El Colorín*; la estimación dio un valor aproximado $Q^0(\bar{t} + x = 120) \approx 36$ ton/ha. Con los valores de $Q^0(\bar{t} + x = 120)$ y $Q^0(\bar{t} = 16)$ se planteó un sistema de dos ecuaciones lineales², aplicando el logaritmo natural a la ecuación 3, que al resolver dio los valores $\gamma^0 = 4.68$ y $\eta^0 = 88.87$. Así, la función de producción de biomasa, $Q^0(t)$, del tratamiento de referencia (T5) se expresa así:

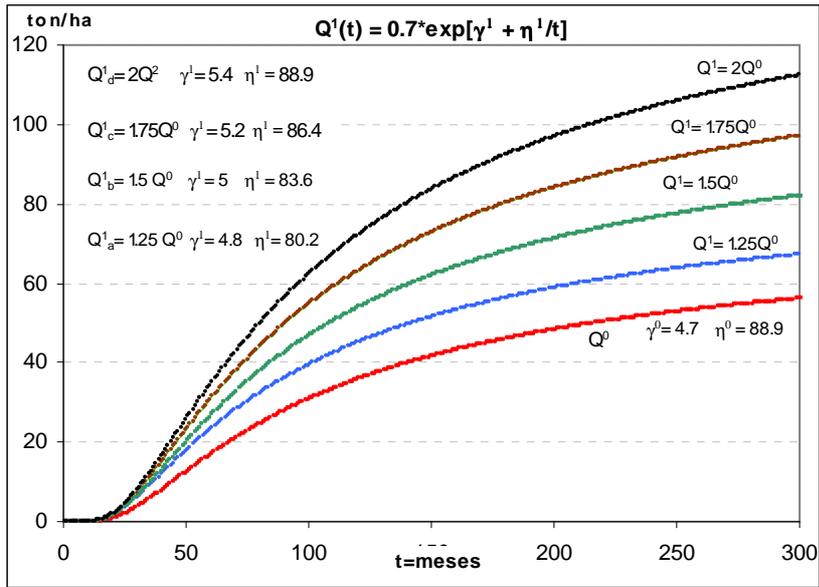
$$Q^0(t) = 0.7 \cdot \exp[4.68 - 88.87/t] \quad (6.13)$$

A partir de la ecuación 6.9 se propusieron varios escenarios de $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ para despejar η^1 . Ya que el cociente $Q^1(\bar{t} + x)/Q^0(\bar{t} + x)$ puede tomar únicamente valores de >1 al valor de $Q^1(\bar{t})/Q^0(\bar{t})$ (en $\bar{t} = 16$) (ecuaciones 6.11 y 6.12). Para el tratamiento T4 se propusieron valores del cociente $Q^1(120)/Q^0(120)$ entre 1 y 2 (ecuación 6.11), y valores entre 1 y 1.4 para el tratamiento T6 (ecuación 6.12).

A continuación, para cada valor propuesto de $Q^1(120)/Q^0(120)$ se despejó η^1 de la ecuación 6.9; posteriormente, de la ecuación 6.4 se despejó el valor de γ^1 para cada valor obtenido de η^1 y de su correspondiente $Q^1(t=120)$. Ya con los valores de γ^1 y η^1 , se procedió a graficar las funciones de producción de biomasa $Q^1(t)$ para cada escenario de T4 y T6 y a compararlas con la gráfica de la función $Q^0(t)$ del tratamiento de referencia (T5). Finalmente, para cada tratamiento se eligió la función de producción del escenario intermedio entre los posibles. La Figura 6.2 muestra gráficamente la función de producción Q^0 del tratamiento de referencia y las funciones Q^1 de cuatro escenarios de producción del tratamiento T4. El escenario Q^1_d muestra la cota superior de la banda de posibles escenarios de producción, cuando $\eta^1 = \eta^0$, pero se sabe que no es un escenario posible. En $\bar{t} + x = 120$ se proponen los siguientes escenarios de producción de T4: $Q^1_a = 1.25Q^0$, $Q^1_b = 1.5Q^0$, $Q^1_c = 1.75Q^0$ y $Q^1_d = 2Q^0$.

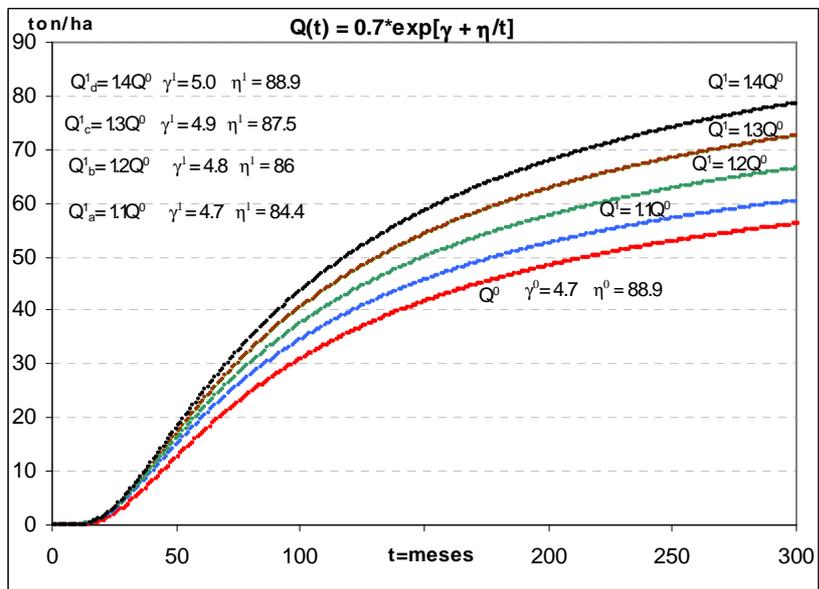
² Ecuación 1: $\frac{\ln(0.292)}{0.7} = \gamma^0 - \eta^0 / 16$. Ecuación 2: $\frac{\ln(36)}{0.7} = \gamma^0 - \eta^0 / 120$.

Figura 6.2 Escenarios de la función de producción $Q^1(t)$ del tratamiento T4



Así mismo, la Figura 6.3 muestra las gráficas de Q^0 y de los escenarios alternativos del tratamiento T6. Q^1_d ilustra la cota superior. En $\bar{t} + x = 120$ se proponen los siguientes escenarios de producción de T6: $Q^1_a = 1.1Q^0$, $Q^1_b = 1.2Q^0$, $Q^1_c = 1.3Q^0$ y $Q^1_d = 1.4Q^0$.

Figura 6.3 Escenarios de la función de producción $Q^1(t)$ del tratamiento T6



A partir de contar con los escenarios de posibles niveles de producción de los tratamientos T4 y T6, con una cota superior y una cota inferior para cada tratamiento, se eligió el escenario de productividad intermedia, Q^1_b , de cada tratamiento alternativo (T4 y T6) con

el fin de realizar un ejercicio de análisis financiero. De esta manera, la función de producción de biomasa, Q_b^1 , del tratamiento T4 se expresa como se muestra a continuación:

$$Q_{T4}(t) = 0.7 \cdot \exp[5 - 83.6/t] \quad (6.14)$$

La función de producción de biomasa, Q_b^1 , del tratamiento T6 se expresa así:

$$Q_{T6}(t) = 0.7 \cdot \exp[4.8 - 86/t] \quad (6.15)$$

Utilizando estas ecuaciones puede estimarse predictivamente (de forma exploratoria) la producción de biomasa en el tiempo de corte $t = 120$ meses (10 años). En el tratamiento T4 el cálculo de la estimación da el resultado $Q_b^1(120) \approx 52$ ton/ha y en el tratamiento T6, $Q_b^1(120) \approx 41.5$ ton ha.

6.3 Análisis financiero de los tratamientos con *A. pennatula* y *P. vulgaris* en El Colorín

6.3.1 Construcción del flujo de efectivo de los tratamientos en El Colorín

- Ingresos

El análisis financiero de este caso de estudio se basa en la información disponible de los ingresos posibles por la venta de frijol y leña, y por los subsidios PROCAMPO y PROARBOL. No se consideraron los ingresos por captura de carbono porque la medición y monitoreo de este servicio ambiental es una labor muy costosa, y porque la gestión del pago por captura de carbono es un proceso que implica costos de transacción que difícilmente cubriría un pequeño o mediano campesino. Como una convención, para realizar este caso de estudio ilustrativo, se eligió un tiempo de rotación de 10 años para los tres tratamientos (como se explicará más adelante). El análisis se realiza considerando que pesos de 2006 a valor constante.

Precio y venta de leña:

En el año 2006 se vendió en Cuentepec la carga de 40 leños, de aproximadamente 50 kg, en \$70 pesos, lo que equivale a un precio por tonelada de \$1400. La mayor parte de la leña que se vende en Cuentepec la venden leñadores de Ahuatenco y Ajuchitlán, poblados del municipio de Ocuilan, Estado de México, que colindan con Cuentepec. El precio de \$1400/ton cubre los costos de trabajo por el corte y traslado a Cuentepec, dejando un margen de ganancia para el leñador. Ya que en México no existen mercados regulados de leña producida sustentablemente, el productor de plantaciones dendroenergéticas tendría que comerciar y competir en los mercados de leña locales. El caso de estudio de análisis financiero que se presenta a continuación toma como referencia el precio local de la leña en Cuentepec. La Tabla 6.1 muestra un resumen de los escenarios de producción de biomasa leñosa que se expusieron en la sección anterior de este capítulo.

Tabla 6.1 Escenarios de producción de leña (kg ha^{-1}) en los tratamientos experimentales con acacias.

T4 ton/ha	T5 ton/ha	T6 ton/ha
52	36	41.5

Venta de frijol:

En cuanto al cultivo de frijol, este estudio financiero se basa en la suposición de que la producción de frijol de los tratamientos experimentales se mantiene constante durante el ciclo de rotación. Se tomó como referencia la producción de la cosecha de frijol del año 2005 en *El Colorín* (reportada en el Capítulo 4). La Tabla 6.2 resume los resultados.

Tabla 6.2 Producción de frijol en los tratamientos experimentales (kg ha^{-1})

T4 Agroforestal c/ Fert. química	T6 Agroforestal c/ Fert. biológica	T7 Monocultivo c/ Fert. biológica	T8 Monocultivo c/ Fert. química
355	598	811	568

En el año 2005 y 2006, el precio de venta del productor en Cuentepec fue de 10.5 pesos por kg. Aunque este precio es una referencia local, ha estado influido por a las fluctuaciones de los precios de los alimentos en los mercados nacionales e internacionales, especialmente en 2008, cuando los precios de los alimentos alcanzaron valores muy altos.

No obstante esto, en este estudio se considera constante el precio del frijol a lo largo del periodo de análisis.

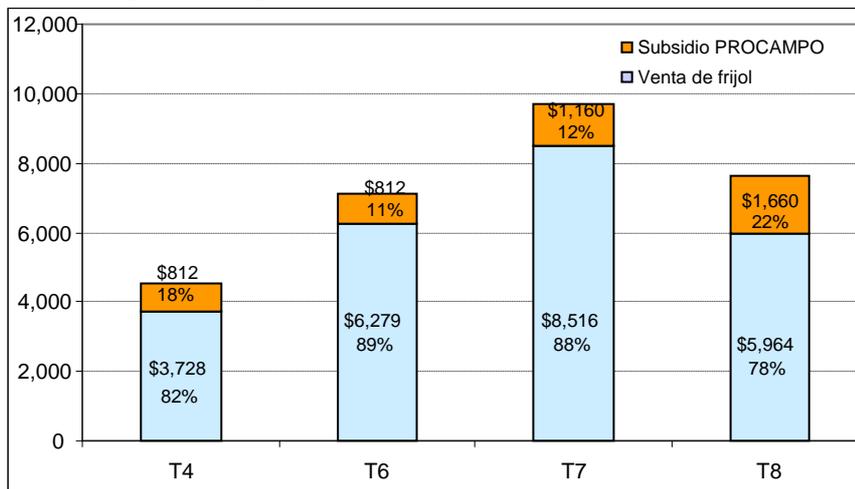
Subsidios:

El programa PROCAMPO otorga un subsidio anual a los agricultores registrados en su padrón que consiste de \$1,060 pesos por hectárea (SAGARPA, 2006). En los tratamientos agroforestales se otorgaría el pago de PROCAMPO en proporción a la superficie del terreno dedicada al cultivo de alimentos; si en los sistemas agroforestales de *El Colorín* se dedica una fracción de 70% al cultivo de frijol, el pago de PROCAMPO será de \$812 pesos anuales a los tratamientos T4 y T6 (agroforestales) y \$1,060 a los tratamientos T7 y T8 (monocultivos agrícolas).

Resumen de ingresos:

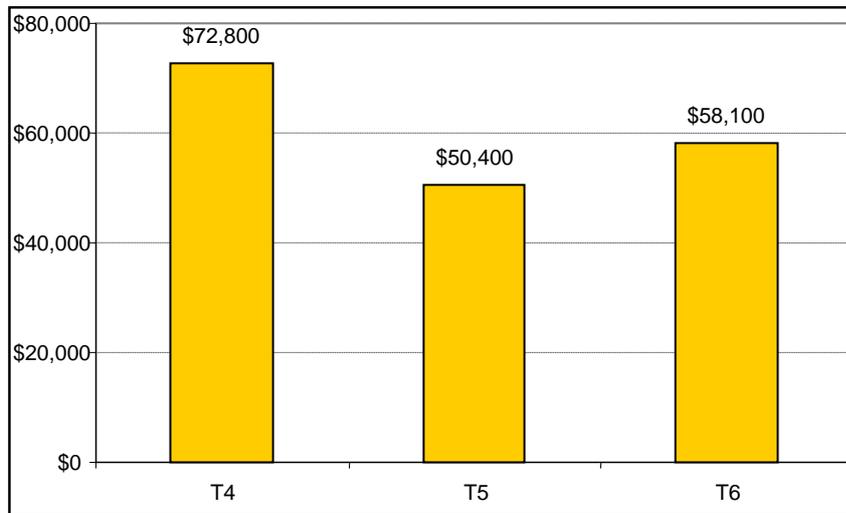
Los ingresos anuales por el cultivo de frijol consisten del monto generado por la venta de la cosecha de frijol y por el dinero recibido por el subsidio PROCAMPO. La Figura 6.4 muestra gráficamente la comparación de los ingresos anuales generados por el cultivo de frijol en los tratamientos T4, T6, T7 y T8.

Figura 6.4 Ingresos anuales por el cultivo de frijol (pesos).



Por otro lado, los ingresos por la venta de leña se reciben hasta el final del ciclo de rotación, a los 10 años. De acuerdo con los escenarios de producción propuestos anteriormente, la Figura 6.5 muestra gráficamente la comparación de los ingresos por la venta de leña al final del ciclo de rotación entre los tratamientos T4, T5 y T6.

Figura 6.5 Ingresos de los tratamientos por la cosecha de leña al final del ciclo de rotación (pesos).



La Tabla A2.1 del Anexo 2 muestra el resumen de los ingresos de los tratamientos experimentales a lo largo del ciclo de rotación. Hay que notar que el tratamiento T5 solo tiene ingresos en el año de corte forestal, mientras que los monocultivos agrícolas tienen ingresos constantes a lo largo del periodo de análisis (T7 y T8) y los tratamientos agroforestales tienen ingresos anuales por el cultivo de frijol más el ingreso por la biomasa leñosa al final del ciclo de rotación.

- Costos

Costos de inversión de sistemas forestales y agroforestales

Los costos de inversión de las plantaciones forestales y agroforestales se componen por: la preparación del sitio, la adquisición de plántulas y su introducción al campo, y por los equipos y herramientas necesarios para establecer y operar las plantaciones. En este estudio no se incluye el costo del terreno porque se considera que el propietario es un ejidatario o comunero de Cuentepec que recibió o heredó tierras como beneficiario de la reforma agraria, como es el caso de muchos pequeños y medianos campesinos en México.

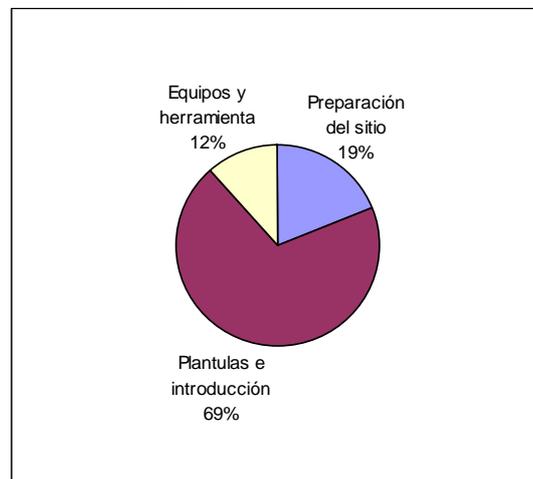
El programa PROARBOL (CONAFOR, 2008) otorga un subsidio para el establecimiento de plantaciones de aprovechamiento comercial y plantaciones agroforestales. El subsidio consiste de 155 smdf (salarios mínimos del distrito federal) para las plantaciones agroforestales y 160 smdf para monocultivos forestales (clasificados por CONAFOR como

plantaciones comerciales).³ En adición, el programa PROARBOL otorga apoyo para pagar la asesoría de técnicos en la preparación del proyecto; sin embargo, este concepto no se incluye en el flujo de efectivo de este caso de estudio porque es un costo de transacción que se cubre con el propio apoyo del programa PROARBOL.

Con base en el registro de costos de *El Colorín*, la Tabla A2.2 del Anexo 2 presenta un resumen de costos de inversión y establecimiento de las plantaciones energéticas forestales y agroforestales de este estudio. El resumen se expresa en pesos por hectárea anuales. En 2006, el precio base del jornal de mano de obra fue de 120 pesos por día. Antes de aplicar el subsidio PROARBOL los costos totales de inversión suman \$13,560, en los tres tratamientos (T4, T5 y T6), pero al aplicar el subsidio los gastos de inversión del monocultivo forestal suman \$5,773 y los gastos de inversión de los tratamientos agroforestales suman \$6,016 pesos.

La Figura 6.6 muestra el porcentaje de participación de los distintos rubros en el total de costos de inversión antes de aplicar el subsidio PROARBOL. La adquisición de plántulas representa el mayor costo de inversión, \$5,800 pesos, un 42% del total.

Figura 6.6 Participación porcentual de los costos de establecimiento (tratamientos T4, T5 y T6, antes de aplicar el subsidio PROARBOL).



Total de costos de inversión: \$13,560

Al aplicar el subsidio del programa PROARBOL se reducen 56% los costos de inversión de los tratamientos agroforestales y 57% los del monocultivo forestal. El apoyo del programa

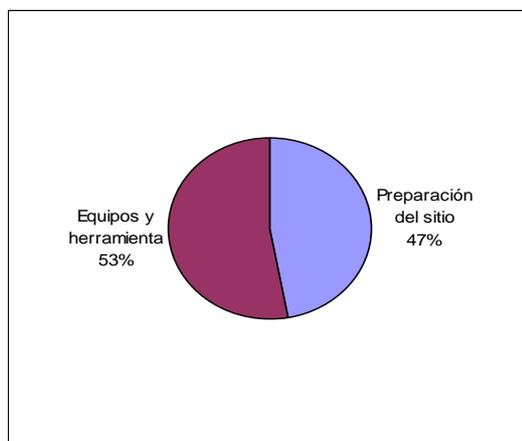
³ Considerando que en 2006 el salario mínimo en el Distrito Federal fue \$48.67 pesos (CNSM, 2006), el subsidio PROARBOL en 2006 sería de \$7,544 pesos para plantaciones agroforestales y \$7,787 pesos para monocultivos forestales (plantaciones comerciales).

PROARBOL representa más de la mitad de los costos de inversión del establecimiento; esto puede representar un apoyo decisivo para invertir en este tipo de plantaciones, aunque para campesinos que practican agricultura de subsistencia, el monto de inversión que no cubre CONAFOR aun puede representar un obstáculo para la inversión.

Costos de inversión de los monocultivos agrícolas

Los costos de inversión de los monocultivos agrícolas consisten básicamente de la preparación del sitio y la adquisición de las herramientas necesarias para manejarlos, sumando aproximadamente \$3,180 pesos. Tampoco se incluye el costo de la tierra porque se considera que el propietario es un comunero o ejidatario de Cuentepec que la heredó o que la recibió de la reforma agraria⁴. La Tabla A2.3 del Anexo 2 muestra un desglose de los costos de inversión de los sistemas agrícolas, en total suman \$3,180 pesos en estos tratamientos. La Figura 6.7 muestra la distribución de los costos de establecimiento en estos sistemas productivos.

Figura 6.7 Distribución de costos de establecimiento en los tratamientos agrícolas (T7 y T8).



Total en los tratamientos agrícolas (T7 y T8): \$3,180

Costos anuales

Los costos anuales se constituyen por los gastos recurrentes desde el primer año hasta el final del ciclo de rotación; estos incluyen gastos incurridos en la siembra, cosecha y

⁴ Como se mencionó en el Capítulo 2, con la reforma al Artículo 27 de la Constitución Mexicana, es posible comprar y vender tierra en el régimen de tenencia ejidal. Nuevas inversiones productivas se realizan a partir de la compra-venta de la tierra. Sin embargo, este caso de estudio realiza el análisis considerando que el propietario ya posee la tierra.

mantenimiento de las plantaciones energéticas y cultivos de alimentos. Los resúmenes de costos anuales de los tratamientos experimentales se muestran en las Tablas A2.4, A2.5, A2.6, A2.7 y A2.8 del Anexo 2. Debido al costo de la fertilización química, los tratamientos T4 y T8 son los más costosos del primero al noveno año (\$5,490 y \$6,060, respectivamente); en cambio, la fertilización biológica del frijol (tratamientos T6 y T7) disminuye los costos anuales a \$4,150 (en T6) y a \$4,390 (en T7).

- Flujo de efectivo

Como se mencionó anteriormente, el flujo de efectivo constituye el resumen de ingresos y egresos a lo largo del periodo de análisis. El flujo de efectivo de los tratamientos experimentales en *El Colorín* se presenta en la Tabla 6.3 a continuación (y también en la Tabla A2.9 del Anexo 2).

Tabla 6.3 Flujo de efectivo de los tratamientos experimentales de *El Colorín*

	Inversión	Año 1	Año 2	Año 3		Año 10
T4						
Ingresos		\$4,540	\$4,540	\$4,540	. . . . .	\$77,340
Costos	-\$6,016	-\$5,490	-\$5,490	-\$5,490	. . . . .	-\$7,890
Balance	-\$6,016	-\$951	-\$951	-\$951	. . . . .	\$69,450
T5						
Ingresos		\$0	\$0	\$0	. . . . .	\$50,400
Costos	-\$5,773	-\$1,500	-\$1,500	-\$1,500	. . . . .	-\$3,420
Balance	-\$5,773	-\$1,500	-\$1,500	-\$1,500	. . . . .	\$46,980
T6						
Ingresos		\$7,091	\$7,091	\$7,091	. . . . .	\$65,191
Costos	-\$6,016	-\$4,150	-\$4,150	-\$4,150	. . . . .	-\$6,310
Balance	-\$6,016	\$2,491	\$2,941	2,941	. . . . .	\$58,881
T7						
Ingresos		\$9,676	\$9,676	\$9,676	. . . . .	\$9,676
Costos	-\$3,180	-\$4,390	-\$4,390	-\$4,390	. . . . .	-\$4,390
Balance	-\$3,180	\$5,286	\$5,286	\$5,286	. . . . .	\$5,286
T8						
Ingresos		\$7,124	\$7,124	\$7,124	. . . . .	\$7,124
Costos	-\$3,180	-\$6,060	-\$6,060	-\$6,060	. . . . .	-\$6,060
Balance	-\$3,180	\$1,064	\$1,064	\$1,064	. . . . .	\$1,064

Como puede observarse, el tratamiento agroforestal con frijol fertilizado químicamente (T4) muestra balance negativo del primero al noveno año, pero en el año de corte forestal genera balance positivo: \$69,450 pesos. El monocultivo forestal (T5) también muestra balance negativo del primero al noveno año, pero en el año de corte su balance asciende a

\$46,980 pesos. En cambio, el tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6) muestra balance anual positivo a lo largo del ciclo de rotación, \$2,491, con un aumento considerable en el año de corte forestal, a \$58,286. Anualmente, el monocultivo de frijol fertilizado biológicamente (T7) genera ingresos altos, un monto de \$5,286, pero en contraste, el monocultivo de frijol fertilizado químicamente (T8) genera \$1,064 pesos anuales.

6.3.2 Elección de la tasa de descuento

Tasa de descuento

El análisis financiero de una inversión requiere definir la tasa de descuento, r , aplicable al proyecto en particular. Puede decirse que en un proyecto de inversión la *tasa de descuento* (o de interés) representa el valor del dinero a través del tiempo, o que representa el costo de oportunidad por utilizar el dinero (Coss Bu, 2008). Una forma de elegir la *tasa de descuento* es tomar como referencia la *tasa de retorno mínima atractiva* (TREMA), ya que ésta indica el mínimo rendimiento deseable de un proyecto (Coss Bu, 2008). Con este criterio, la TREMA se elige con referencia a la tasa de retorno de la inversión alternativa disponible más rentable. Otro criterio para elegir la *tasa de descuento* es tomar como referencia el costo del dinero de financiamiento del proyecto: la *tasa de interés* del crédito que lo financia (Coss Bu, 2008).

Para caso de estudio de *El Colorín*, una referencia de *tasa de descuento* puede tomarse de la *tasa de interés bancario* que aplica Financiera Rural a proyectos de tipo agroecológico⁵: $r = 15\%$ (Financiera Rural, 2008). Las plantaciones energéticas del campo *El Colorín* podrían beneficiarse del financiamiento si el inversionista califica para recibirlo. El crédito de Financiera Rural se otorga a inversionistas y agricultores de tipo comercial que tienen capacidad para pagar las amortizaciones del financiamiento. Sin embargo, ya que la mayoría de los campesinos de Cuentepec practican agricultura de subsistencia, su capital de inversión y capacidad de pago son muy bajos, por lo que no son sujetos del financiamiento de Financiera Rural. Para definir la *tasa de descuento* aplicable al agricultor de subsistencia es necesario considerar otros aspectos, que más adelante se abordarán.

⁵ En México, Financiera Rural es la institución de crédito gubernamental que ofrece crédito a proyectos agroecológicos y de desarrollo rural.

El análisis financiero de este estudio se realiza en primer término utilizando como *tasa de descuento* la *tasa de interés* que aplica Financiera Rural, $r = 15\%$; esta es una tasa de descuento oficial, adecuada para la evaluación financiera desde el punto de vista de un productor de agricultura comercial. Posteriormente se hará una discusión de la tasa de descuento de la agricultura de subsistencia, se presentará un escenario de análisis y se mostrarán resultados comparativos entre la agricultura comercial y la agricultura de subsistencia.

6.3.3 Programa computarizado de análisis financiero

Se desarrolló un programa de análisis financiero computarizado con el propósito de procesar rápida y eficazmente cálculos del VPN, y el análisis de sensibilidad de los tratamientos experimentales, así como para facilitar su comparación de forma numérica y gráfica. El programa se desarrolló en Excel 3.0. Su diseño y estructura se adecuan a las características del flujo financiero de plantaciones forestales, agroforestales y agrícolas.

El programa permite al usuario capturar datos de diferentes fuentes: mediciones físicas de campo experimental, datos de simulaciones biofísicas o de escenarios hipotéticos. El programa se organiza en diferentes módulos que corresponden a hojas de Excel: (1) variables generales del análisis (mano de obra, fracción del suelo con cultivo agrícola y con árboles, precio de la leña, precio del frijol, monto de los subsidio), (2) captura de costos de inversión, (3) captura de costos anuales, (4) captura de volúmenes de producción, (5) cálculo de los ingresos, (6) flujo de efectivo, (7) calculo de los indicadores financieros y (8) análisis de sensibilidad. El programa organiza los costos e ingresos en hojas de captura con estructuras similares, permitiendo la comparación de los resultados entre los tratamientos experimentales; así mismo, permite la comparación de los resultados de los tratamientos en cada paso de procesamiento de datos. Los resultados se presentan en resúmenes numéricos y gráficos que facilitan la evaluación de las alternativas. La Figura A2.1 del Anexo 2 muestra el diagrama de flujo del programa.

6.3.4 Resultados del análisis financiero para el inversionista comercial ($r=15\%$)

El VPN es un indicador útil en la comparación de las alternativas productivas porque los tiempos de cosecha y producción son diferentes entre los tratamientos. Por un lado, en las plantaciones forestales se requiere evaluar en el momento presente de inversión el valor de la cosecha futura, al final del ciclo de rotación; por otro lado, los cultivos de alimentos se realizan en ciclos anuales, pero el análisis financiero requiere evaluarlos en el momento presente de la inversión para poder compararlos con las alternativas forestales. Como se mencionó en el capítulo 5, no se considera un horizonte de tiempo infinito de uso del suelo, ya que no puede garantizarse el uso del suelo a perpetuidad; a nivel de proyecto resulta práctico considerar como unidad de análisis el ciclo de rotación forestal. Autores como Verjwist y Telenius (1999) y Weih (2004), señalan que un tiempo de rotación frecuente en plantaciones energéticas de rotación rápida es de 10 años⁶. Con el propósito de realizar este ejercicio de análisis financiero comparativo entre los tres tratamientos, se decidió realizar el análisis con el mismo tiempo de rotación en los tres tratamientos: 10 años.

Valor Presente Neto

La Tabla 6.4 presenta los resultados del cálculo de los indicadores VPN y VAE para el campesino y silvicultor comercial, con una tasa de descuento del 15%.

Tabla 6.4 Valor Presente Neto (VPN) de los tratamientos experimentales.
Tasa de descuento $r=15\%$.

	T4	T5	T6	T7	T8
VPN	\$6,615	-\$1,317	\$22,572	\$23,347	\$2,160

En estos resultados destacan los tratamientos T6 y T7 con los valores más altos de VPN. La alta rentabilidad de estos tratamientos se explica por el efecto de la fertilización biológica del frijol en *El Colorín*: con bajos costos tiene un aumento significativo en la productividad. El tratamiento T7 (frijol fertilizado biológicamente) ofrece mayores ingresos anuales, pero el tratamiento T6 (agroforestal con frijol fertilizado biológicamente), además de generar ingresos anuales mayores que los de T8 (frijol fertilizado químicamente), genera ingresos al final del ciclo de rotación que contribuyen a que su VPN sea equiparable al de T7; el tratamiento T6, además de diversificar los ingresos del propietario ofrece la posibilidad de mejorar las condiciones ambientales del terreno (e.g.

⁶ Christersson y Verma (2006) hacen una revisión de varios casos con diferentes tiempos de rotación, según las especies utilizadas.

mantenimiento de la fertilidad del suelo, captación e infiltración del agua, mantenimiento de la biodiversidad). Estos resultados muestran que la biofertilización de frijol con el consorcio de *Rhizobium etli* y micorrizas arbusculares es una opción financieramente viable.

En contraste, el VPN del monocultivo forestal (T5) tiene valor negativo, pérdidas, mostrando que no es una alternativa conveniente. Por su parte, el tratamiento agroforestal fertilizado químicamente, T4, muestra mejor desempeño que el del monocultivo forestal, T5, y el del monocultivo de frijol fertilizado químicamente, T8; sin embargo, debido a los costos de la fertilización química del frijol, T4 tiene un desempeño financiero muy por abajo que el de los tratamientos fertilizados biológicamente (T6 y T7). Finalmente, el monocultivo de frijol fertilizado químicamente, T8, aunque arroja resultados positivos de VPN y VAE, ofrece rendimientos de inversión muy bajos, por lo que puede considerarse como una alternativa poco conveniente.

Análisis de sensibilidad

Las Figuras 6.8 y 6.9 presentan gráficamente los resultados del análisis de sensibilidad del VPN ante cambios en el precio de la leña y del frijol de -100% a +100%.

Figura 6.8 Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio de la leña ($r = 15\%$)

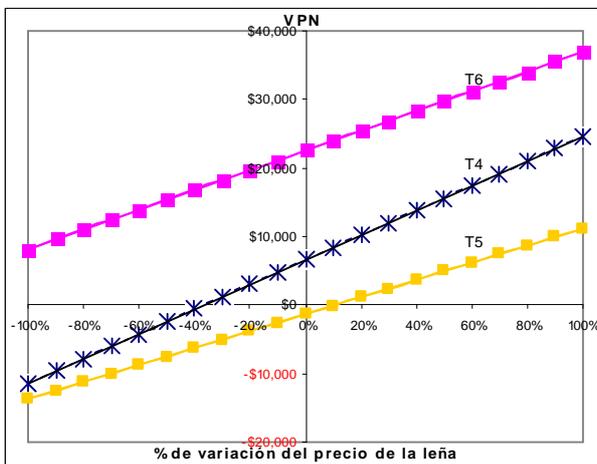
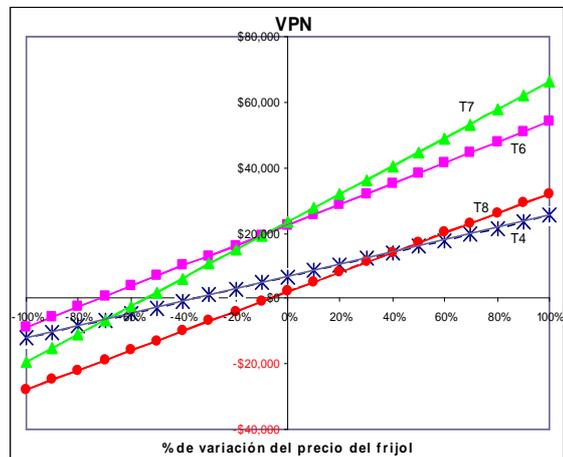


Figura 6.9 Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio del frijol ($r = 15\%$)



El tratamiento T6 mantiene resultados positivos del VPN al variar el precio de la leña de -100% a +100%. En este tratamiento, la alta productividad de frijol mantiene un nivel de ingresos elevado si el precio de la leña disminuye mucho. El tratamiento T4 ofrece valores positivos del VPN a partir de un precio de la leña de -36% (respecto al de referencia). El tratamiento T5 ofrece valores positivos del VPN a partir de un aumento del 10% en el precio de la leña.

Los tratamientos T7 y T8 son los más sensibles al precio del frijol, las pendientes de sus rectas de sensibilidad son más pronunciadas ante las variaciones del precio. Conforme aumenta el precio del frijol los valores del VPN del tratamiento T7 son más altos, pero cuando el precio disminuye -7%, y a niveles aun inferiores, el tratamiento T6 es la opción más rentable; esto se debe a que el tratamiento T6 también genera ingresos por la venta de leña, es menos sensible a la disminución del precio del frijol. Una analogía similar puede hacerse entre los tratamientos T4 y T8; el tratamiento T8 es más sensible a los cambios en el precio del frijol, a partir de un aumento de precio del 40% T8 ofrece valores de VPN mayores que T4; así mismo, ante disminuciones del precio del frijol, el tratamiento T4 ofrece valores de VPN mayores que los de T8.

A continuación, las Figuras 6.10 y 6.11, presentan gráficamente los resultados del análisis de sensibilidad del VPN ante cambios en los subsidios PROARBOL y PROCAMPO.

Figura 6.10 Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROCAMPO ($r = 15\%$)

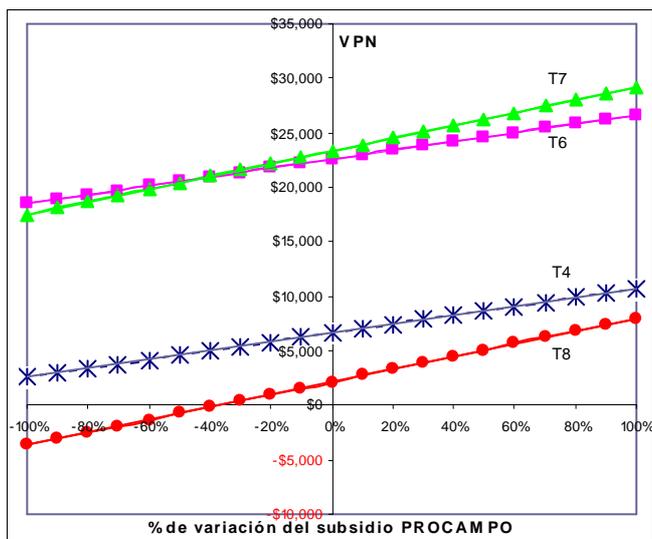
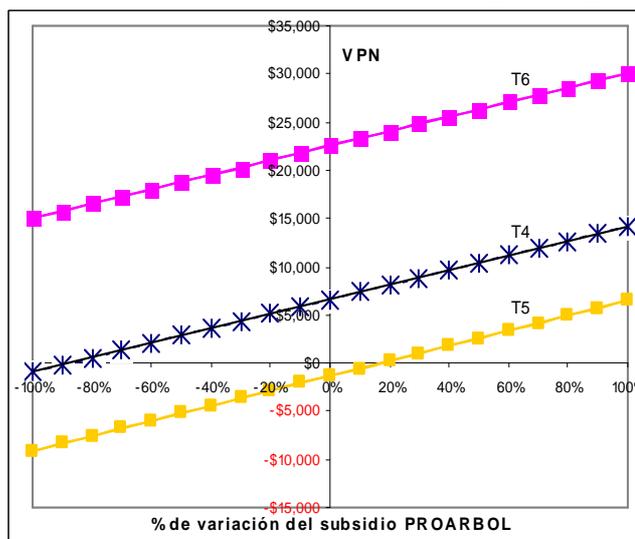


Figura 6.11 Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROARBOL ($r = 15\%$)

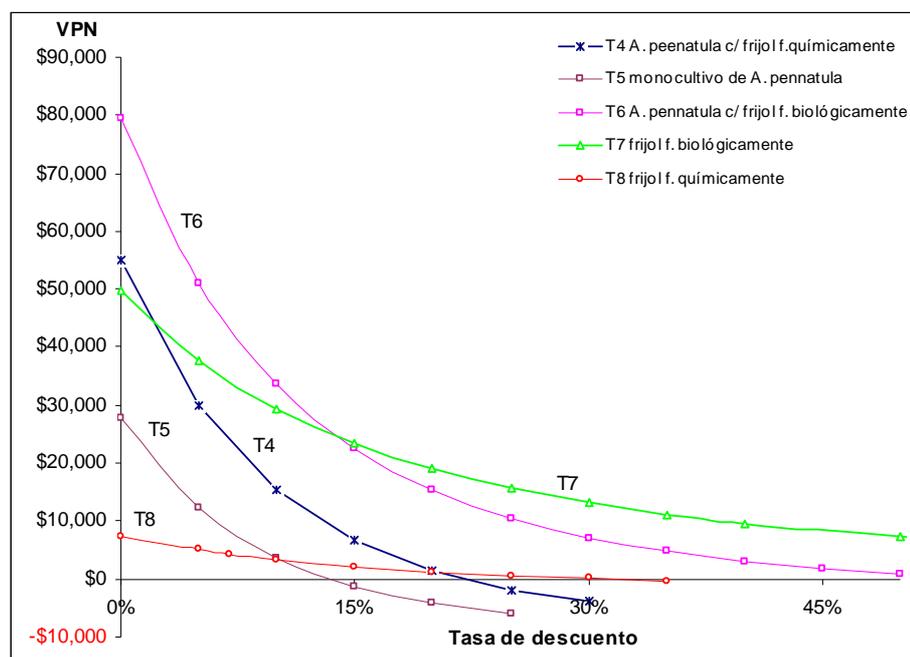


La Figura 6.1 muestra que los tratamientos T7, T6 y T4 ofrecen ganancias (VPN positivo) aún sin el subsidio PROCAMPO. Los tratamientos T7 y T6 destacan con los valores mayores del VPN ante variaciones en el subsidio PROCAMPO. La viabilidad del tratamiento T8 depende en gran medida de este subsidio, con una disminución del subsidio de -38%, y con niveles de subsidio inferiores, da como resultado valores negativos del VPN (pérdidas).

En cuanto al subsidio PROARBOL, el tratamiento T6 ofrece los mayores valores del VPN ante cualquier variación en este subsidio, incluso si este se retira por completo. El tratamiento T4 también ofrece VPN positivo ante diferentes variaciones del nivel del subsidio, aun con una disminución de 97% del subsidio. El tratamiento T5 ofrece pérdidas aplicando el nivel actual de subsidio PROARBOL; sería rentable a partir de un aumento de 17% de este subsidio. Los tratamientos T4 y T6 ofrecen valores positivos de VPN aun con grandes disminuciones en el subsidio PROARBOL, ya que los ingresos por la venta de frijol de estos tratamientos contribuyen a mantener positivo el VPN. El tratamiento agroforestal con frijol fertilizado biológicamente, T6, destaca como el más rentable e independiente del subsidio PROARBOL.

A continuación se muestra el análisis de sensibilidad del VPN de los tratamientos experimentales ante cambios en la *tasa de descuento*. Este análisis permite comparar la rentabilidad de las diferentes alternativas conforme aumenta o disminuye el *costo del dinero* que se invierte en el proyecto. La Figura 6.12 ilustra gráficamente los resultados.

Figura 6.12 Análisis de sensibilidad del VPN ante variaciones en la *tasa de descuento*, r .



Esta figura muestra que en el tratamiento forestal, T5, y en los agroforestales, T4 y T6, el VPN aumenta rápidamente conforme disminuye la *tasa de descuento*, r , en cambio, en los tratamientos agrícolas, T7 y T8, el VPN disminuye suavemente conforme aumenta *tasa de descuento*. Esto se debe al efecto de la *tasa de descuento* en el VPN de cada alternativa (el efecto de *descontar* en el tiempo). Como la inversión inicial es mayor en los

tratamientos T4, T5 y T6, y los ingresos por la venta de leña se reciben hasta el final del ciclo de rotación, *tasas de descuento* altas disminuyen la viabilidad financiera de estos tratamientos como alternativas de inversión. En cambio, el efecto de la *tasa de descuento* es menor en los tratamientos agrícolas (T7 y T8) porque los ingresos se reciben anualmente y porque el nivel de inversión inicial es menor. Los resultados de este análisis muestran que en los proyectos forestales y agroforestales conviene utilizar financiamiento con *tasas de descuento* bajas.

En el caso de estudio *El Colorín*, la gráfica muestra que con una *tasa de descuento* $r < 15\%$ el tratamiento T6 es el más rentable, pero con $r > 15\%$ es más rentable el tratamiento T7. Así mismo, se observa que con *tasas de descuento* bajas los tratamientos T4 y T5 son más rentables que el tratamiento T8. El tratamiento T8 ofrece ganancias (VPN) muy bajas con *tasas de descuento* bajas y altas.

6.3.5 Análisis financiero de plantaciones energéticas en la economía de subsistencia

Volke y Sepúlveda, (1987) han mencionado que en la agricultura de subsistencia los campesinos no pueden salir de su condición de pobreza porque carecen de capital para el desarrollo de su actividad agropecuaria, porque los niveles de producción de su actividad son muy bajos, lo que les impide acumular capital, y porque están sujetos a relaciones de intercambio (comercio y negociación) desiguales.

Esta sección explorará el análisis financiero del caso de estudio *El Colorín* para la agricultura de subsistencia. Con base en el flujo de efectivo que se mostró anteriormente, puede observarse que las plantaciones energéticas con sistemas forestales y agroforestales implican gastos de inversión y operación que difícilmente cubriría un campesino que practica la agricultura de subsistencia. Sin embargo, el análisis financiero que se presenta tiene el objetivo de explorar las implicaciones de posibles medidas de financiamiento que consideren a las plantaciones energéticas como alternativas de transición de la economía de subsistencia a la comercial.

Elección de la tasa de descuento

En el análisis de la agricultura comercial se contó con la referencia de la *tasa de interés* de Financiera Rural, $r=15\%$ (Financiera Rural, 2008). En contraste, en la economía de subsistencia la referencia del *valor del dinero* en el tiempo no debiera ser la *tasa de interés*

del crédito bancario, ya que los pequeños campesinos no tienen acceso al crédito bancario; sería más relevante tomar como referencia del *valor del dinero* el rendimiento que ofrecen las actividades productivas de la economía de subsistencia: cultivo de maíz, cacahuate o pastoreo de ganado en campo abierto. Sin embargo, sería muy difícil estimar con precisión la *tasa de descuento* de estas actividades de la economía de subsistencia porque en muchos casos involucran estrategias y criterios de decisión de aspectos no monetarios: las decisiones de producción están ligadas a las necesidades de consumo, la liquidez monetaria se sustituye con trabajo familiar que incluye a niños, mujeres y ancianos (entre otros).

Varios autores (Shively, 1998; Predo, 2003; y Bertomeu, 2006) han realizado análisis exploratorios de proyectos productivos (agrícolas, forestales y agroforestales) probando diferentes *tasas de descuento*: $r=5%$, $r=10%$, $r=15%$, $r=20%$ y $r=25%$, en el contexto de la economía de subsistencia, con tasas preferenciales bajas (5% y 10%), y de la economía comercial, con tasas de interés más altas (de 10 a 25%). Este caso de estudio presenta un análisis exploratorio del desempeño financiero de las plantaciones energéticas utilizando una *tasa de descuento* $r=5%$ para la economía de subsistencia. Se utiliza el mismo flujo de efectivo que en el de la agricultura comercial porque de esta manera se incluye el costo de oportunidad del trabajo familiar.

Valor Presente Neto

A continuación, la Tabla 6.5 presenta los resultados del cálculo del VPN con una tasa de descuento $r = 5%$.

Tabla 6.5 Valor Presente Neto (VPN) de los tratamientos experimentales, $r = 5%$.

	T4	T5	T6	T7	T8
VPN	\$29,864	\$12,407	\$51,036	\$37,633	\$5,036

El efecto de la *tasa de descuento* baja es notorio en el VPN de todos los tratamientos; es mayor en comparación con el VPN de la agricultura comercial ($r=5%$). El aumento del VPN es mayor en los tratamientos agroforestales (T4 y T6) y en el monocultivo forestal (T5), ya que al requerir mayor inversión inicial y tener un tiempo de corte a los 10 años, el efecto del “*descuento*” del valor del dinero en el tiempo tiene mayor impacto. Destacan los valores más altos de VPN en los tratamientos con frijol fertilizado biológicamente (T6 y T7), pero en este caso T6 (agroforestal con frijol fertilizado biológicamente) es el de mayor VPN. A su vez, el tratamiento T4 (agroforestal con frijol fertilizado químicamente) es mucho más

rentable que el monocultivo forestal (T5) y que el monocultivo agrícola fertilizado químicamente (T8). A diferencia del análisis con $r=15\%$, el tratamiento T5 no ofrece pérdidas, sus ganancias son incluso mayores que las del monocultivo agrícola fertilizado químicamente (T8).

Estos resultados muestran que con una *tasa de descuento* baja, más adecuada a las condiciones de los campesinos de agricultura de subsistencia, cualquiera de los sistemas alternativos de producción (T4, T5, T6 y T7) es más rentable que el monocultivo agrícola fertilizado químicamente (T8), que se practica usualmente en Cuentepec.

Análisis de sensibilidad

A continuación se presentan las gráficas que sintetizan los resultados del análisis de sensibilidad de los tratamientos experimentales, con una *tasa de descuento* $r=5\%$.

Figura 6.13 Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio de la leña ($r=5\%$)

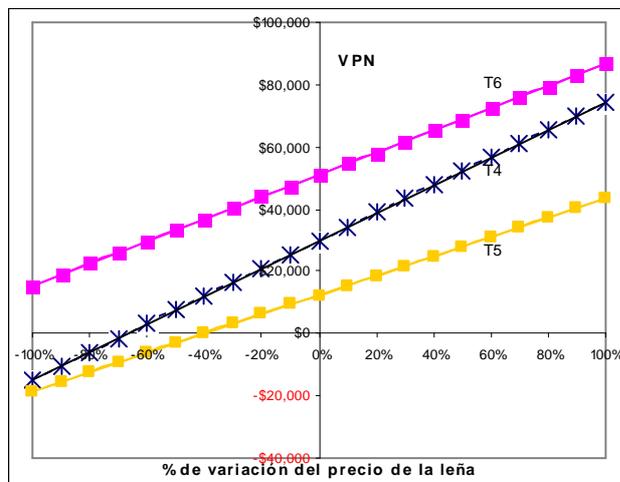
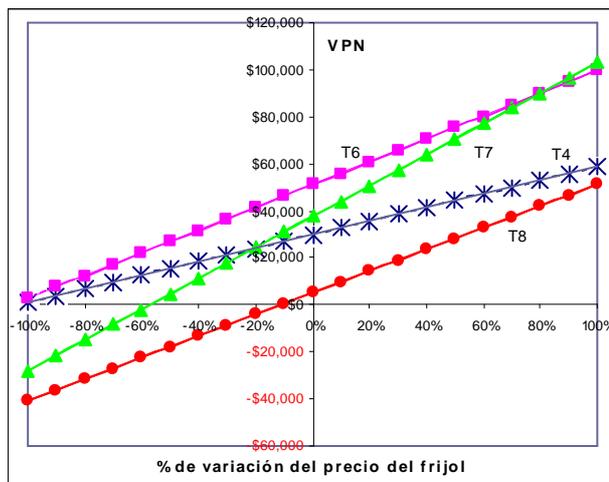


Figura 6.14 Sensibilidad del VPN ante cambios en el precio del frijol ($r=5\%$)



En la figura 6.13 muestra la sensibilidad del VPN ante variaciones en el precio de la leña. Se observa que al variar el precio de la leña, el VPN varía en niveles más altos en todos los tratamientos que cuando $r=15\%$. El tratamiento T6 muestra los mayores valores de VPN; este es positivo aun cuando el precio de la leña disminuye 100%; en los tratamientos T4 y T5 el VNP es positivo hasta llegar a disminuciones del 60% y 40% en el precio de la leña, respectivamente.

En la Figura 6.14 se muestra la sensibilidad del VNP ante variaciones en el precio del frijol. El tratamiento T6 muestra los valores mayores de VPN ante variaciones del precio de frijol

de -100% a +80%. Los tratamientos agroforestales, T6 y T4, muestran menor sensibilidad ante las variaciones del precio del frijol, el VPN es positivo incluso si el precio del frijol disminuye al 100%. Los monocultivos agrícolas, T7 y T8, muestran mayor sensibilidad a variaciones en el precio del frijol; T8 muestra valores positivos del VPN con aumentos en el precio del frijol.

A continuación la Figura 6.15 muestra la sensibilidad del VPN ante variaciones en el subsidio PROCAMPO y la Figura 6.16 la sensibilidad del VPN ante variaciones en el subsidio PROARBOL. En la Figura 6.15 se observa que los tratamientos T6, T7 y T4 ofrecen valores positivos de VPN ante variaciones de -100 a +100% en el subsidio PROCAMPO, con T6 como el tratamiento de mejor desempeño y en segundo lugar T7. El tratamiento T8 muestra que depende en gran medida del subsidio PROCAMPO, pues con una disminución del 50% muestra valores negativos del VPN. En la Figura 6.16 se observa que los tres tratamientos mantienen valores de VPN positivos ante variaciones de -100% a +100% del subsidio PROARBOL, aunque el tratamiento T6 ofrece valores considerablemente mayores y en segundo lugar el tratamiento T4.

Figura 6.15 Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROCAMPO ($r = 5\%$)

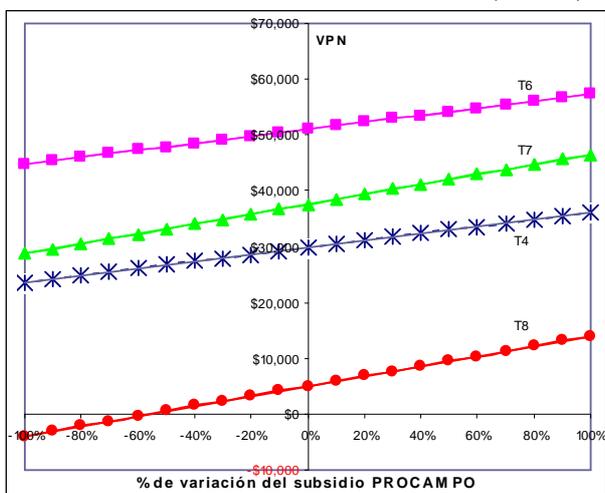
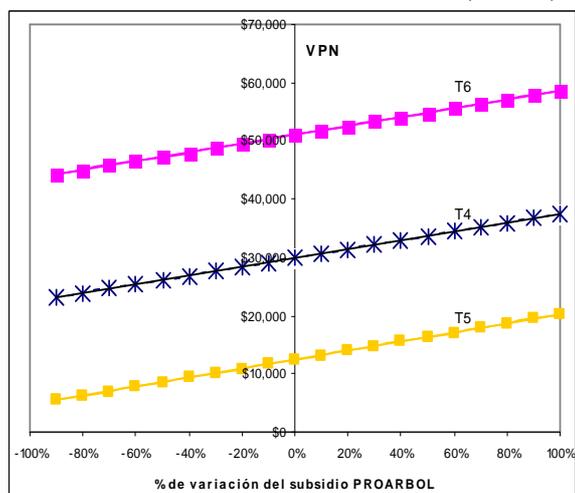


Figura 6.16 Sensibilidad del VPN ante cambios en el subsidio PROARBOL ($r = 5\%$)



En general, los tratamientos agroforestales mostraron menor sensibilidad a las variaciones de los precios y los subsidios; esto se debe en gran medida porque al producir leña y alimentos diversifican las fuentes de los ingresos. A su vez, la fertilización biológica del frijol mostró ser una medida que permite mejorar la sensibilidad del VPN ante variaciones negativas de los precios y subsidios.

6.4 Conclusiones

- Este capítulo presentó un método analítico de construcción de escenarios de producción futura. El método permite proponer escenarios de producción de un tratamiento alternativo $Q^1(t)$ respecto a un tratamiento de referencia $Q^0(t)$, deduciendo los parámetros γ y η . Se requiere conocer $Q^1(t)/Q^0(t)$ en el tiempo $t = \bar{t}$ y una referencia de la producción futura de $Q^0(t)$ en el tiempo $t = \bar{t} + x$. Con base en este método se dedujeron varios escenarios de producción ($Q^1(t)$), en el tiempo $t = \bar{t} + x$, para los tratamientos T4 y T6, tomando como referencia ($Q^0(t)$) al tratamiento T5, de los se eligieron los escenarios de producción intermedia para cada tratamiento alternativo.
- De acuerdo a los escenarios de producción propuestos, el VPN de varios de los tratamientos experimentales de *El Colorín* indica rendimientos financieros convenientes, tanto en la agricultura y silvicultura comerciales (*tasa de descuento* de 15%) como en la economía de subsistencia (con una *tasa de descuento* de 5%). En particular, destacaron con los mayores valores de VPN los tratamientos con frijol fertilizado biológicamente: agroforestal biofertilizado (T6) y monocultivo de frijol biofertilizado (T7).
- El análisis de sensibilidad del VPN ante variaciones en la *tasa de descuento* mostró que los sistemas forestales y agroforestales son más sensibles al efecto del *descuento del valor del dinero*. En estos tratamientos (forestales y agroforestales), *tasa de descuento* bajas inducen mayor rentabilidad. Programas de gubernamentales de apoyo a este tipo de proyectos deben ofrecer *tasas de descuento* bajas.
- El análisis de sensibilidad mostró que los tratamientos con frijol fertilizado biológicamente (T6 y T7) son los menos sensibles ante variaciones en el subsidio PROCAMPO, pero ante variaciones en el subsidio PROARBOL los tratamientos agroforestales, T4 y T6, son los menos sensibles. Así mismo, los tratamientos agroforestales, T4 y T6, mostraron ser menos sensibles ante variaciones en el precio del frijol y de la leña que los monocultivos; al diversificar la producción (en leña y frijol) los ingresos mantienen el VPN en niveles positivos.
- Este capítulo ha hecho una contribución exploratoria para mostrar que los sistemas agroforestales de *Acacia pennatula* y frijol fertilizado biológicamente constituyen alternativas productivas que ofrecen la posibilidad de producir leña y frijol con beneficios financieros mayores que los del sistema de cultivo tradicional de frijol fertilizado químicamente y que el monocultivo forestal de *Acacia pennatula*.

Conclusiones

El estudio del patrón de consumo de los combustibles domésticos (leña, olote y gas LP) permitió concluir que el uso de la leña en Cuentepec es una tradición cultural y una estrategia para maximizar los recursos económicos familiares en Cuentepec. El 100% de las familias utiliza la leña en la cocción de alimentos, el 96% de la población utiliza olote como combustible complementario y el 86% de la población son usuarios mixtos de leña, gas LP y olote. El análisis mostró que el consumo *per capita* promedio de leña (por adulto estándar) es de 1 kg al día, similar al de otros poblados en regiones cálidas del país. Así mismo, se constató que el implemento de mayor uso para la combustión de leña y olote es el fogón en forma de herradura (*tlecuil*, en náhuatl). El abastecimiento para la población de Cuentepec, de aproximadamente 3,120 habitantes, representa una carga importante para el medio ambiente y para las familias (en trabajo familiar y en gasto monetario de quienes lo compran en el mercado local). El estudio arrojó que en 2005, el 68% de las familias se abastecía de leña mediante la recolección de libre acceso, un 22% combinaba el autoabastecimiento con la compra y un 10% se abastecía únicamente comprándola a leñadores.

Los análisis de regresión, en función de las variables *Área de la base (AB)* y *Área de la Cobertura (AC)*, mostraron que los coeficientes de correlación fueron más altos para la estimación de la *biomasa total* y la *biomasa leñosa* en regresiones múltiples de ambas variables (AB y AC): en *A. cochliacantha* se obtuvo $R^2=0.94$ y en *A. pennatula* se obtuvo $R^2=0.89$. Las regresiones para estimar la *biomasa foliar* mostraron coeficientes de correlación mayores en función una sola variable: $R^2=0.88$ en *A. cochliacantha* (en función de AB), y $R^2=0.83$ para *A. pennatula* (en función de AC). Las ecuaciones alométricas se generaron de forma general por especie; la prueba *t de student* con variables *dummy* permitió concluir que en este experimento los coeficientes de las variables *dummy* que identificaron a los tratamientos experimentales no tuvieron significancia estadística ($p>0.05$), por lo que se rechazó la hipótesis de su influencia en las ecuaciones alométricas.

El análisis energético de la madera de *A. cochliacantha* mostró que esta especie tiene valores de *densidad real* entre 0.7 y 1.0 (g cm^{-3}), por lo que puede considerarse como una

especie de densidad alta, dura. Cuando es juvenil tiene un poder calorífico de 18.04 MJ kg⁻¹ y cuando es adulta puede llegar a valores de 20.4 MJ kg⁻¹. En el análisis elemental permitió conocer que la madera de esta especie se constituye aproximadamente por un 48% de carbono (en su fase juvenil). *A. cochliacantha* puede considerarse como una especie arbórea con buenas características energéticas, lo que se confirma por la preferencia de los(as) usuarias de leña en Cuentepec.

La madera de *A. pennatula* mostró valores de *densidad real* entre 0.77 y 0.87 (g cm⁻³), por lo que puede considerarse como una especie de densidad intermedia. En muestras tomadas de la región de Cuentepec, y sus alrededores, se observó que tiene un poder calorífico de 16.97 MJ kg⁻¹, cuando es juvenil, y 17.89 MJ kg⁻¹ cuando es adulta. El análisis elemental permitió conocer que la madera de esta especie se constituye por un 47% de carbono (en su fase juvenil). Esta especie puede considerarse como una especie de contenido energético relativamente más bajo que el de *A. cochliacantha*, aunque en la práctica también es una especie apreciada por los leñadores y los usuarios de leña de Cuentepec.

Los resultados de los análisis alométricos, energéticos y de contenido elemental se integraron en ecuaciones para estimar la energía y el carbono contenidos potencialmente en la biomasa aérea de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*, obteniéndose ecuaciones que pueden ser herramientas importantes en estudios de balance energético y de estimación de captura de carbono (ecuaciones 3.7 a 3.24).

En *El Colorín*, los tratamientos agroforestales mostraron mayor supervivencia en ambas especies de acacia: en primer lugar, los tratamientos agroforestales con *A. cochliacantha* (T1: 92%, T3: 83%), y en segundo lugar los tratamientos agroforestales con *A. pennatula* (T4: 78% y T6: 72%); en cada especie fue mayor la supervivencia de los tratamientos agroforestales con frijol fertilizado químicamente (T1 y T4); los monocultivos forestales mostraron la menor supervivencia (T2: 71% y T5: 63%). La población total de *A. cochliacantha* mostró mayor supervivencia promedio (83%) que la de *A. pennatula* (70%).

En cuanto al crecimiento de las acacias, el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tuckey HSD mostraron las diferencias entre los tratamientos, con base en el análisis de

las variables dimensionales *diámetro de la base*, *db*, y *diámetro de la cobertura mayor*, *DCM*. Se observó que en los tratamientos agroforestales de *A. cochliacantha* (T1 y T3) la asociación con el cultivo de frijol fue favorable para la acacia, pues el *db* fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que en el monocultivo forestal (T2) (ver la Figura 4.4). En *A. pennatula* la asociación con el cultivo de frijol solo mostró una influencia favorable (en la variable *db*) cuando el frijol se fertilizó químicamente ($p < 0.05$) (ver la Figura 4.4). Por otro lado, cuando el análisis se hizo utilizando la variable *DCM*, se observó que en los tratamientos agroforestales (T1 y T3 en *A. cochliacantha*, y T4 y T6 en *A. pennatula*) la asociación con el cultivo de frijol fue significativamente favorable para las acacias ($p < 0.05$); el *DCM* fue significativamente menor en los monocultivos forestales (T2 y T5) (ver la Figura 4.5).

La biomasa aérea de las acacias de los tratamientos experimentales se estimó aplicando las fórmulas alométricas presentadas en el Capítulo 3. Durante los primeros 12 meses de crecimiento, los tratamientos con *A. cochliacantha* (T1 116 kg ha⁻¹, T2 30 kg ha⁻¹ y T3 86 kg ha⁻¹) mostraron mayor desempeño en la producción de biomasa que sus equivalentes en *A. pennatula* (T4 92 kg ha⁻¹, T5 35 kg ha⁻¹ y T6 50 kg ha⁻¹), destacando en cada especie los tratamientos agroforestales (T1 y T3, T4 y T6). Sin embargo, como efecto de segunda temporada de lluvias, la biomasa aérea de los tratamientos con *A. pennatula* fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que la de *A. cochliacantha* a los 16 meses: con la mayor productividad destacaron los tratamientos agroforestales de *A. pennatula* (T4 y T6), con producciones de biomasa leñosa de 598 kg ha⁻¹, T4, y 411 kg ha⁻¹, T6, que en términos energéticos representan aproximadamente 9,980 MJ ha⁻¹ y 6,979 MJ ha⁻¹, y en términos de captura de carbono representa 281 kg ha⁻¹ y 196 kg ha⁻¹.

En cuanto al estudio de la economía de los sistemas forestales y agroforestales, se presentó un modelo de valoración económica de plantaciones energéticas forestales, agroforestales y agrícolas (ver las ecuaciones 5.6, 5.8 y 5.10). Este modelo se amplió para incluir el análisis con el manejo con podas (ver las ecuaciones 5.17 a 5.22) y con pago por captura de carbono (ver las ecuaciones 5.23 y 5.24). También se mostró que la solución del modelo puede abordarse mediante la programación dinámica y mediante modelos de simulación biofísica, destacando las principales ventajas y las limitantes de cada método.

Dado que la solución de los modelos de valoración económica de las plantaciones energéticas se plantea como un problema de investigación complejo, se propuso un meta-modelo de análisis que ofrece una visión general que permite adecuar estrategias de análisis para conducir la investigación hacia un marco integrado de sustentabilidad (ver la Figura 5.2). El meta-modelo muestra la interacción de diferentes componentes: bases de datos, campos experimentales, análisis alométricos y energéticos, métodos de evaluación del impacto ambiental y programas de análisis financiero, cuya información se integra en un marco de sustentabilidad para el manejo, rediseño y toma de decisiones.

El método de construcción de escenarios de producción futura que se presentó en esta tesis se aplicó a los tratamientos de *A. pennatula* (T4, T5 y T6), tomando como tratamiento de referencia a T5 (monocultivo forestal) y como tratamientos alternativos a T4 y T6 (tratamientos agroforestales). El método arrojó los siguientes escenarios de producción: T4 \approx 52 ton/ha, T5 \approx 36 ton/ha, T6 \approx 41 ton/ha.

Con base en estos escenarios de producción se realizó el análisis financiero exploratorio de la viabilidad de los tratamientos con *A. pennatula* y frijol, para la agricultura comercial, con $r=15\%$, y para la agricultura de subsistencia, con $r=5\%$. Los resultados mostraron que los tratamientos agroforestales con frijol fertilizado biológicamente (T6) y monocultivo de frijol fertilizado biológicamente (T7), constituyen alternativas productivas que ofrecen beneficios financieros (VPN) mayores que en el sistema de cultivo tradicional de frijol (fertilizado químicamente) y que en el monocultivo forestal de *Acacia pennatula* (ver las Tablas 6.4 y 6.5).

El desempeño financiero de los tratamientos con frijol fertilizado biológicamente fue sobresalientemente mayor. Con una tasa de descuento $r=15\%$, el VPN del tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6) fue \$22,571 y el del monocultivo de frijol fertilizado biológicamente (T7) fue \$23,347, mientras que el VPN del monocultivo de frijol fertilizado químicamente (T8) fue \$2,160. Con una tasa de descuento de $r=5\%$, el VPN del tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6) fue \$51,036, el del monocultivo de frijol biofertilizado \$37,633 y del monocultivo de frijol fertilizado químicamente \$5,036. La diferencia del desempeño financiero entre los tratamientos de frijol fertilizados biológicamente y los fertilizados químicamente, se debe a la alta productividad de frijol y a

los bajos costos de los sistemas biofertilizados. Sin embargo, ya que estos resultados son exploratorios, es necesario realizar mayor investigación para precisar los resultados.

El análisis de sensibilidad del VPN ante variaciones en la *tasa de descuento* (ver la Figura 6.12) permitió observar que los tratamientos biofertilizados (T6 y T7) ofrecen mayores valores de VPN con diferentes *tasas de descuento*. Este análisis mostró que tasas de descuento bajas inducen mayor rentabilidad en los tratamientos forestales y agroforestales. Particularmente, con una *tasa de descuento* menor a $r=15\%$, el tratamiento agroforestal con frijol biofertilizado es el más rentable. Este resultado sugiere que los programas gubernamentales de apoyo a este tipo de proyectos deben ofrecer tasas de descuento bajas.

Diferentes análisis de sensibilidad mostraron que los tratamientos agroforestales y los tratamientos biofertilizados ofrecen valores de VPN con menor sensibilidad (menor pendiente), en niveles positivos, ante variaciones en los precios y subsidios. Ante variaciones en el precio del frijol y de la leña, el VPN de los tratamientos biofertilizados fue menos sensible que el de los fertilizados químicamente y el de los monocultivos (ver las figuras 6.8, 6.9, 6.13 y 6.14). Ante variaciones en el subsidio PROCAMPO, los tratamientos de frijol fertilizado biológicamente (T6 y T7) fueron los de menor sensibilidad (ver las figuras 6.10 y 6.15). Ante variaciones en el subsidio PROARBOL, los tratamientos menos sensibles fueron los agroforestales (T4 y T6) (ver las figuras 6.11 y 6.16).

Esta tesis permite reconocer la complejidad de las plantaciones energéticas, y en particular de los sistemas agroforestales (SAFs), destacando que aún queda mucha investigación por realizar para manejarlos sustentablemente: es necesario domesticar más especies con potencial productivo, involucrar mayor participación de los campesinos, ampliar el conocimiento de modelos teóricos y experimentales, desarrollar biofertilizantes para diversas condiciones ambientales y profundizar en el conocimiento y aplicación de los modelos de simulación computarizada. Así mismo, es necesario ampliar la base de casos de estudio a la diversidad de climas y condiciones ambientales de los países en desarrollo, profundizando en el desarrollo de herramientas cuantitativas, la evaluación económico-financiera en contextos específicos y el manejo de los análisis en un marco integrado de sustentabilidad.

Referencias bibliográficas

- Abdula, R.D, 2005. *Agroforestry-Energy link in greenhouse gas (GHG) mitigation: A CGE analysis of bioenergy's role as GHG offset*. School of Economics and Commercial Law. University of Gothenburg. EAERE 2005. European Association of Environmental and Resource Economists. 14th Annual Conference, Bremen, Germany.
- Acosta-Mireles, M; J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez, J.D. Etchevers-Barra; 2002. *Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México*. *Agrociencia* 36: 725-736. 2002.
- Aguilar, O.M., O. Riva and E. Peltzer, 2004. *Analysis of Rhizobium etli and of its symbiosis with Phaseolus vulgaris supports coevolution in host diversificación*. *Proc Natl Acad Sci USA* 101(37): 13548–13553.
- Albrecht A. and S.T. Kandji, 2003. *Carbon sequestration in tropical agroforestry systems*. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99: 15-27.
- Andersson, G., A. Asikainen, R. Björheden, P.W. hall, J.B. Hudson, R. Jirjis, D.J. Mead; J. Nurmi, and F. Weetman, 2002. *“Production of forestry energy”*. Chapter 3 in *Bioenergy from Sustainable Forestry*. J. Richardson et al Eds. Kluwer academic publishers. Netherlands.
- Andrade D.S., P.J. Murphy and K.E. Giller, 2002. *The Diversity of Phaseolus-Nodulating Rhizobial Populations is Altered by Liming of Acid Soils Plated with Phaseolus vulgaris L. in Brasil*. *Applied Environmental Microbiology*, Vol. 68, No. 8 p. 4025-4034.
- Andreoli, C. and S.P. de Souza, 2007. *Sugarcane: The Best Alternative for Converting Solar and Fossil Energy into Ethanol*. *Economy & Energy*. No. 59. Presented at the AgriEnergy International Conference, 11 - 13 December, 2006, Londrina, PR, Brazil.
- Antón Vallejo, M.A., 2004. *Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 05-11-2008, <http://www.tdx.cat/TDX-0420104-100039> (05/11/2008).
- Azar, C., and E.D. Larson, 2000. *“Bioenergy and land-use competition in Northeast Brazil”*. *Energy from sustainable development*. Vol. IV No. 3.
- Bala, A., P.J. Murphy A.O. Osunde and K.E Giller, 2002. *Nodulation of tree legumes and the ecology of their native rhizobial populations in tropical soils*. *Applied Soil Ecology* V.2 (3) pp- 211-223.
- Batt, B.P. and J.M.S. Tomar, 2002. *Firewood properties of some Indian mountain tree and shrub species*. *Biomass and Bioenergy* 2002 (23): 257-260.
- Bertomeu, M., 2005. *Small-Scale farm forestry: an adoptable option for small farmers in the Phillipines?*. 2nd National Agroforestry Congress: International

Consultation Workshop on Smallholder Agroforestry Options for Degraded Soils (SAFODS). World Agroforestry Center. ICRAF.

- Bertomeu, M, 2006. *Financial Evaluation of Smallholder Timber-based Agroforestry Systems in Claveria, Northern Mindanao, the Phillipines*. ICRAF. Small-scale Forest Economics, Management and Policy, 5(1): 57-82, 2006.
- Biofuelwatch (2007). *Agrocombustibles: una revisión crítica de 9 puntos clave*. Publicado por Biofuelwatch, Carbon Trade Watch/TNI, Corporate Europe Observatory, Econexus, Ecoropa, Grupo de reflexión rural, Munlochy Vigil, NOAH (Friends of the Earth, Rettet Den Regenwald, Watch Indonesia).
- Blackstone, N.W.; 2000. *Allometry and relative growth: pattern and process in evolutionary studies*. Syst. Zool. 36(1): 76-78.
- Bolan, N.S., 1991. *A critical review of the role of mycorrhizae fungi in the uptake of phosphorus by plants*. Plant and Soil 134: 189-207.
- Banaticla, M.R., R.F. Sales and R. D. Lasco, 2004. *Biomass equations for tropical tree plantations using secondary data from the Phillipines*. ACIAR Smallholder Forestry Project ASEM 200/008. Proceedings of the End-of-Project Workshop p. 113-128.
- Brazier, J.D.; Frankin, G.L., 1967. *An appraisal of the wood characteristics and potential uses of some Nicaraguan timber*. Princes Risborough, UK. Forest Products Res. Lab. Wood Structure Section.
- Brown, C., 2000a. "World view of plantation grown wood". Food and agriculture organization of the united nations (FAO). XXI IUFRO World Conference. August, 2000. Kuala Lumpur, Malasya.
- Brown, C., 2000b. *The global outlook of future wood supply from forest Plantations*. FAO. Forest Policy and Planning Division. Rome.
- Brown, S. 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a premier*. (FAO Forestry paper–134). Chapter 3: Methods for estimating biomass density from existing data.
- Budowsky G. and R. Russo, 1997. *Nitrogen fixing trees and nitrogen fixation in sustainable agriculture: research and challenges*. Soil Biol. Biochem. Vol. 29 No.5 pp- 767-770.
- Burdman, S.; Sarig, S.; Kigel, J. y Okon, Y. *Field inoculation of common bean (*P. vulgaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*) with Azospirillum brasilense strain Cd*. Symbiosis 21. 1996: 41-48.
- Burley, J., 1987. *Exploitation of the potencial of multipurpose trees in agroforestry*". Chapter 16 in: *In Agroforestry: a decade of development*. H.A. Stepler and P.K.R. Nair (Eds.). ICRAF, Nairobi.
- Cairns M.A., S. Brown, E.H. Helmer and G.A. Baumgardner, 1997. *Root biomass allocation in the world's upland forest*. Oecologia Vol. 111 N°1 pp. 1-11.
- Cacho, O, 2001. *An analysis of externalities in agroforestry systems in the presence of land degradation*. Ecological Economics. Vol. 39, 1 pp. 131-143.

- Cacho O., R. Hean and R. Wise, 2003. *Carbon-accounting methods and reforestation incentives*. The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics 47 (2) 153-179.
- Cacho O. y R. Hean, 2004. *Dynamic optimization for evaluating externalities in agroforestry systems: An example from Australia*. En J.R.R. Alavalapati & D.E. Mercer, Valuing Agroforestry Systems, 139-163. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Camacaro, S., J.C. Garrido y W. Machado, 2004. *Fijación de nitrógeno por Leucaena leucocephala, Gliricidia sepium y Albizia lebek y su transferencia a las gramíneas asociadas*. Zootecnia Trop. v.22 no.1, p. 49-70.
- Camargo Ricalde, S.L., S.S. Dhillon and R. Grether, 2002. *Community structure of of endemic Mimosa species and environmental heterogeneity in a semi-arid Mexican valley*. Journal of Vegetation Science 13 (5) pp. 697-704.
- Campbell, H., 1999. *Forestry Economics: Principles and Practice*. Discussion Paper No 265, Department of Economics, The University of Queensland.
- Carranza Montano M.A., L.R. Sánchez Velásquez, M.R. Pineda López, R. Cuevas Guzmán, 2003. *Calidad y potencial forrajero de especies del bosque tropical caducifolia de la Sierra de Manantlán, México*. Agrociencia Vol. 37(2) pp. 203-210.
- Carrere, R. and Lohmann, L., 1996. *Pulping the south. Industrial tree plantations in the world paper economy*. Zed Books Ltd. London, UK.
- Castelán-Estrada, M., P. Vivini and J.P. Gaudillère, 2001. *Allometric Relationships to Estimate Seasonal Above-ground Vegetative and Reproductive Biomass of Vitis vinifera L.* Anals of Botany 89: 401-408.
- Castellanos, J.Z., J. X. Uvalle y A. Aguilar, 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelo y aguas*. INCAPA, México. 226 p.
- Cassman, K. and S. Wood (Eds), 2005. *Chapter 26: Cultivated Systems*. In *Ecosystems and Human Well being: Current State & Trends*. Millenium Ecosystem Assessment. Global Assessment Reports. Island Press.
- CEEES, 2008. *Situación mundial del maíz*. Comité Ciudadano de Estadística Económica de Sinaloa.
<http://www.cee.es.com.mx/publico/eventos/uploadfiles//EstudiosEconomicos/Situación%20Mundial%20Maiz.pdf> (18/02/2009)
- Cervantes, V., J. Carabias and C. Vásquez-Yañez, 1996. *Seed germination of woody legumes from deciduous tropical forest of southern Mexico*. Forest Ecology and Management 82: 171-184.
- Chidumayo, E.N., 1988. *Estimating fuelwood production and yield in regrowth dry miombo woodland in Zambia*. Forest Ecology and Management 24 59-66.
- Christersson L and Verma K.S 2006. *Short- rotation forestry- a complement to "conventional" forestry*. Unasylva, 57(1): 34-39.

- Ciesla, W.M., 2001. *Protecting Plantations from Pests and Disease*. FAO Forestry Department. D.J. Mead (Ed.). Working Paper FP/10. Rome, Italy.
- Clark, D.A, S. Brown, DW. Klicklighter, J. Q. Chambers, J.R. Thomlinson and J. Ni, 2001. "Measuring net primary production in forests: concepts and field methods". *Ecological applications* 11(2), p. 356-370.
- CNSM, 2005. *Boletín de medios*. Comisión Nacional de Salario Mínimos. Diciembre de 2005.
- CONAFOR, 2008. *Reglas de operación del programa PROARBOL*. Comisión Nacional Forestal. www.conafor.gob.mx (11/11/2008).
- Cook, P., W.F. Hyde and G. Köhlin (2001). *A woodfuel crises: where and for whom?*. Workshop on Sida-supported CIFOR project: Fuelwood-Crisis or Balance? Marstrand, Sweden. June, 2001.
- Coss Bu, R., 2008. *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*. Ed. Limusa. México. Pp. 19-84.
- Coughenour, M.B; J.E. Ellis y R.G. Popp 1990. *Morphometric relationships and development patterns of Acacia tortilis and Acacia reficiens in Southern Turkana, Kenya*. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 117 8-17.
- Coutolenc Brenis E., J.A. Cruz Rodríguez, E. Cedillo Portugal y M.A. Musálem, 2005. *Uso local y potencial de de las especies arbóreas en Camarón de Tejeda, Veracruz*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del ambiente* Vol. 11 (1): 45-50.
- Cossalter C. and C. Pye-Smith, 2003. *Fast Wood Forestry: myths and realities*. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Culp, A. W. Jr. 1979. *Principles of energy conversion*. Chapter 2. New York: McGraw-Hill, 1979.
- Culshaw, D. and B. Stokes, 1995. *Mechanisation of short rotation forestry*. Vol. 9 No. 1. pp. 127-140.
- Current, D., N. Lehrer, M. Reinikainen and D. Becker, 2007. *Agroforestry in the Farm Bill and Beyond*. Center for Integrated Natural Resources Management (CINRAM).
- Dallas, E. J., 2000. *Applied Multivariate Methods for Data Analyst*. International Thompson Publishing.
- Danso, S.K.A., G.D. Bowen and N. Sanginga, 1992. *Biological nitrogen fixation in trees in agro-ecosystems*. *Plant and Soil* 141: 177-196.
- D'Aubeterre, R., J. Principal, J. García, 2002. *Efecto de diferentes métodos de escarificación sobre la germinación de tres especies del género Prosopis*. *Revista Científica* Vol. XII-Suplemento 2, 575-577.

- De Costa, W.A.J.M and P. Surentheran, 2005. *Tree-crop interactions in hedgerow intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka: 2. Soil and Plant Nutrients*. Agroforestry Forum 63: 211-218.
- Del Amo, S. 2002. *La leña: el energético rural en tres microregiones de México*. Silvia del Amo Cord. Editorial Plaza y Valdés, PROAFT, A.C. y Consejo Nacional Para la Enseñanza de la Biología. México D.F.
- DFID-FRP, 2003. *Support for an Agroforestry Model User Group (SAMUG), Final Technical Report*. DFID-Forestry Research Programme, Project R7936/ZF0149.
- Drechsel, P and W. Zech (1989). *Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review*. Plant and Soil 131: 29-46.
- Drechsel, P., B. Glaser and W. Zech (1991). *Effect of four multipurpose tree species on soil amelioration during tree fallow in central Togo*. Agroforestry Systems 16: 193-202.
- Drechsel, P. and W. Zech, 1992. *Foliar nutrient levels of broad leaved tropical trees: A tabular review*. Plants and soil 131: 29-46
- Droppelmann, K.J., P.R. Berliner, 2000. *Biometric relationships and growth of pruned and non-pruned Acacia saligna under runoff irrigation in northern Kenia*. Forest ecology and management Vol. 126 N°3 pp. 349 -359.
- Eriksson, H.M.; J.P. Hall and Helynen, 2002. *Rationale for forest energy production*. Chapter 1 in *Bioenergy from Sustainable Forestry*. Richardson et al (eds.). Kluwer academic press. Netherlands.
- European Union (EU) (2006). *An EU Strategy for biofuels*. Commission of the European Communities. COM (2006) 34 final.
- Evans E. and Turnbull J.W., 2004. *Dynamics of stand growth*. Chapter 15 in *Plantation Forestry in the Tropics*. Evans E. and Turnbull J.W. (Eds). Oxford University Press.pp. 252-260.
- Evans E. and Turnbull J.W., 2004. *High pruning*. Chapter 17 in *Plantation Forestry in the Tropics*. Evans E. and Turnbull J.W. (Eds). Oxford University Press.pp. 276-282.
- FAO, 1996. *Informe de la Cumbre Mundial Sobre la Alimentación*. Food and Agriculture Organization (UNO). WFS 96/REP.
- FAO, 2004. *Unified Bioenergy Terminology (UBET)*. FAO Forestry Department. Wood energy Program. Rome, Italy.
- Ferreira-Batista J., L.C.E. Rodríguez, H.T. Zarate do Couto, 1995. *Medición y administración de pequeñas plantaciones*. Universidad de São Paulo. Departamento de Ciencias Forestales. Paracicaba.
- Fight, R.D., Cahill J.M., Fahey T.D., Snellgrove T.A., 1987. *Financial analysis of pruning coast Douglas-fir*. Res. Pap. PNW-RP-390. Portland, OR. Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Research Station. 17 p.

- Financiera Rural, 2008. Financiera Rural. www.financierarural.gob.mx
- Fritsche, U. R., K. Hünecke, A. Herman, F. Schulze, K. Wiegmann, K. Wiegmann and M. Adolphe (2006). *Sustainability Standards for Bioenergy*. WWF Germany, Frankfurt am Main.
- FSC, 1996. *Perspectivas sobre Plantaciones*. Forest Stewardship Council. International Center. Bonn, Alemania.
- FSC, 2006. *The FSC plantations review policy working group final report*. Forest Stewardship Council. International Center. Bonn, Germany.
- Gamponia V. and R. Mendelsohn, 1987. *The economic efficiency of forest taxes*. Forest Science, Vol. 33. N°2. pp. 367-378.
- García-Barrios, L. and C.K. Ong, 2004. *Ecological interactions, management lessons and design tools in tropical agroforestry systems*. Agroforestry Systems 62: 221-236.
- García-Barrios, R., R. Vázquez-Perales y V. Díaz-Hinojosa, 2005. *Valoración económica del impacto del programa de Fogones Eficientes de leña en unidades familiares en la Reserva de la Biósfera de la Sierra de Huautla, Morelos*. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM-UNAM). Informe presentado al CONACYT.
- Garrity, D.P., 2004. *Agroforestry and the achievement of the Millennium development Goals*. Agroforestry Systems 61: 5-17.
- Giller, K.E. and K.J. Wilson, 1991. *Nitrogen fixation in tropical cropping systems* (English). CAB International, Wallingford (United Kingdom), 1991, 313 p.
- Giller, K.E., 2001. *Nitrogen fixation in tropical cropping systems*. 2nd. Ed. CAB International. Wallingford 423p.
- Ginoga, K., O. Cacho, Erwidodo, M. Lugina and D. Djaenudin, 07. *Economic performance of common agroforestry systems in southern Sumatra: implications for carbon sequestration services*. Working paper CC03. ACIAR project ASEM 1999/093.
- Godsey, L.D., 2008. *Economic Budgeting for Agroforestry Practices*. Centre for Agroforestry, University of Missouri-Columbia. AF1006-2008.
- Graham R.L, W. Lieu and B.C. English, 1995. *The Environmental Benefits of Cellulosic Energy Crops at Landscape Scale*. Biofuels System Division, US Department of Energy. <http://bioenergy.ornl/papers/misc/cellcrop.html>
- Gutiérrez-Zamora M. y E. Martínez-Romero, 2001. *Natural endophytic association between Rhizobium etli and maize (Zea maiz)*. J. Biotech. 91: 117-126.
- Gutteridge R.C. and H.M. Shelton, 1994. *The use of legume trees in cropping and grazing systems*. Chapter 1 in *Forage Tree Legumes in Tropical Agriculture*. Gutteridge and Shelton (Eds.). Department of Agriculture, The University of Queensland, Australia.

- Hammond, A. and E. Matthews, 1999. *Critical consumption trends and implications. Degrading Earth's Ecosystems*. World Resources Institute. 72 p.
- Harker, A.P., Sandals, A. and Burley, J. (1982). *Calorific values for wood and bark and a bibliography for fuelwood*. Report of the Tropical Products Institute, London, UK, G162.
- Haverkort, A., P. Bindraban and H. Bos, (Eds). 2007. *Food, Fuel or Forest? Opportunities, threats, knowledge and gaps of feedstock production for bio-energy*. Proceedings of the seminar held at Wageningen, The Netherlands.
- Heil, M., S. Greiner, H. Meinberg, R. Krüger, J.L. Noyer, G. Heulb, K.E. Linsenmair and W. Boland, 2004. *Evolutionary change from induced to constitutive expresion of an indirect plant resistance*. Nature Publishing Group. Nature Vol. 430, 205-208.
- Högberg P and M Kyanström, 1982. *Nitrogen fixation by the woody legume Leucaena leucocephala in Tanzania*. Plant and Soil 66: 21-28.
- Hooda, N. and V.R.S. Rawat, 2006. *Role of Bio-Energy plantations for carbon-di-oxide mitigation with special reference to India*. In Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Spring Netherlands. Vol. 11 No.2.
- Hooda, N., M. Gera, K. Andrasko, J. Sathaye, M.K. Gupta, H.B. Vasistha, M. Chandran, and S.S. Rassaily (2006). *Community and Farm Forestry Climate Mitigation Projects: Case Studies from Uttaranchal, India*. International Energy Studies. LBNL-61460.
- Hose, J.I., 2004. *Allometry of savanna trees*. PhD thesis in preparation.
- House, J.I, Archer S.R., Breshears, D. and Sholes R.J., 2003. *Issues in savanna theory and modeling*. Journal of Biogeography, 30, 1763-1777.
- Huang, R-S., W.K. Smith and R.S. Yost, 1985. *Influence of vesicular-arbuscular mycorrhiza on growth, water relations, and leaf orientation in Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit*. New Phytol. 99: 229-243.
- Hulscher, W.S., 1997. *Energy and Environment Basics*. Regional wood energy development program in ASIA GCP/RAS/154/NET. FAO-UN, Bangkok.
- Hyde, W.F. and G. Köhlin, 2000. *Social Forestry Reconsidered*. Silva Fenica 34(3) 285-313.
- IAEA, 2006. International Atomic Energy Agency. *Brazil: a country profile on sustainable energy development*. STI/PUB/1247. Viena, Austria.
- IEA, 2002. *Short rotation crops for energy systems. Bioenergy Task 30*. International Energy Agency. <http://www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=30> 07/11/2009
- IEA, 2006. *World Energy Outlook. Chapter 15*. International Energy Agency.
- INAFED, 2005. *Perfil sociodemográfico. Grupos Étnicos*. En: *Enciclopedia de los Municipios de México, Estado de Morelos*. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.

<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/morelos/soci.htm>
(25/08/2008)

- INEGI, 2000. Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE) 2000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).
- ISO-14042, 2000. *Environmental Management –Life cycle assessment – Life cycle impact assessment. International Organization for Standardization ISO.* International Standard 14045. Geneva.
- Jagtap, S. and C. Ong, 1997. *Perspectives on issues, needs and opportunities for agroforestry models.* Agroforestry Forum 8 (2): 2-4.
- Jama, B., F. Kwesiga and A. Niang, 2004. *Agroforestry innovations for soil fertility management in sub-Saharan Africa: Prospects and challenges ahead*'. Chapter 6 in Garrity D. et al (eds.) *World Agroforestry into the Future.* Nairobi. World Agroforestry Centre.
- Jiménez Ferrer, G.; H. Pérez López, L. Soto Pinto, J. Nahed Toral, L. Hernández López, and J. Carmona de la Torre; 2007. *Livestock, Nutritive value and local knowledge of fodder trees in fragment landscapes in Chiapas, México.* Interciencia Vol. 32 No. 4: 274-280.
- Joergensen, U., and E.F. Kristensen, 1996. *European energy crops overview – Country report for Denmark.* Report from FIAS, 83 p.
- Joergensen, U. and H. Oestegard, 2003. *Biomass production in new sustainable multipurpose cropping systems.* In: *New and emerging Bioenergy technologies.* Edited by Hans Larsen et al. Risoe Energy Report 2. Risoe National Laboratory, Denmark.
- Joergensen, U., T. Dagaard, E. S. Kristensen, 2005. *Biomass energy in organic farming – the potential role of short rotation coppice.* Biomass and Bioenergy 28, 237-248.
- Johansson, B., P. Boerjsson, K. Erikson, L.J. Nilsson, P. Svenningsson, 2002. *The Use of biomass for energy in Sweden – Critical factors and lessons learned.* Lund University. Department of Technology and Society. Report No. 32. Lund, Sweden.
- Jolicoeur, P., 1963. *The multivariate generalization of the allometry equation.* Biometrics 19:497-499.
- Joseph, S., 1990. *Community Forestry Field Manual 1. Guidelines for planning, monitoring and evaluating cookstove programs.* FAO-UNO. Rome 1990.
- Kang, B.T., 1992. *Introduction to alley farming.* Unit 1 in The AFNETA alley farming training manual – Volume 1: Course in alley farming. Alley Farming Network for Tropical Africa - Ibadan 1992.
- Karim, A.B., P.S. Savil, E.R. Rhodes, 1991. *The effect of young Leucaena leucocephala (Lam) De Wit hedges on the growth and yield of maize, sweet potato and cowpea in an agroforestry system in Sierra Leone.* Agroforestry Systems 16: 203-211.

- Kartha, S. and E.D. Larson, 2000. *Bioenergy premier: modernized biomass energy for sustainable development*. United Nations development Program. The Government of Norway.
- Kass, D.C.L., R. Sylvester-bradley and P. Nygren, 1997. *The role of nitrogen fixation and nutriment supply in some agroforestry systems of the Americas*. *Soil Biochem.* Vol. 29, No. 5/6 pp. 775-785, 1997.
- Kellison, R.C., 1967. *A geographic variation study of yellow-poplar (Liriodendron tulipifera L.) within North Carolina*. North Carolina State University School of Forestry, Technical Report 33. Raleigh. 41 p.
- Kass, D.L., 1996. *Fertilidad de suelos*. EUNED. San José Costa Rica. 272 p.
- Kempler, WD, 1997. *Forest resource economics and finance*. McGraw-Hill, NY. 551p.
- Kerr, A., 2002. *Promises and problems of agroforestry*. Esys 290: Earth Systems Master's Seminar. Stanford University.
- Ketchum, J.S. and R. Rose, 2003. *Preventing establishment of exotic shrubs (Cystisus cooperies L. (Link) and Cystisus striatus (Hill) with soil active herbicides*. *New Forest*, 25: 83-92.
- Klooster, D. and O. Masera, 2000. *Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development*. *Global Environmental Change* 10, 259-272.
- Knauf, G., J. Mainer, N. Skuce, A. sugrue, 2006. *The challenge of sustainable bioenergy: Balancing climate protection, biodiversity and development policy; a discussion paper*. CURES. Citizens United for Renewable Energy and Sustainability. <http://www.cures-network.org/press.html> 21/07/2008.
- Krieger, D.J. (2001). *The economic value of forest ecosystems services: a review*. The wilderness society. Washington D.C.
- Kumar, B.M., S.J. George, V. Jamaludheen, and T.K. Suresh, 1998. *Comparison of biomass production, tree allometry and nutrient use efficiency of multipurpose trees grown in woodlot and silvopastoral experiments in Kerala, India*. *Forest Ecology and Management* 112: 145-163.
- Kung'u , J. B., 2004. *Effect of Vesicular-arbuscular Mycorriza (vam) Innoculation on growth performance of Senna spectabilis*. Chapter 31 in *Managing Nutrient Cycles to Sustain Soil Fertility in Sub-Saharan Africa*. André Bationo Ed. AfNer-CIAT. Nairobi, Kenya.
- Lal, R. (2006). *Land area for establishing biofuel plantations*. *Energy for Sustainable Development*, Vol. X no. 2, pp. 67-69.
- Landsberg, J., S. Prince, P. Jarvis, R. McMurtrie, R. Luxmoore and B. Medlyn, 1997. *Energy conversion and use in forestry: an analysis of forest production in terms of radiation utilization efficiency*. In H.L. Gholz, K. Nakane & H. Shimoda, eds. *The use of remote sensing in the modeling of forest productivity*. London, UK, Kluwer Academic Publishers.

- Lanzini, P., 2007). *Food crops vs Fuel crops: perspectives and policy options*. Ambiente Diritto.it. Rivista giuridica. No. 197 del 19/07/2006.
- Larson, E., L. Rodriguez, and T. Rexende de Azevedo (1994) Farm forestry in Brazil. Paper prepared for Bio-Resources '94, Bangalore, India.
- Larson E., and S. Kartha, 2000. *Expanding roles for modernized biomass energy*. Energy for sustainable development, IV(3): 85-89.
- Lasco R.D. and R.F. Sales, 2003. *Estimating carbon storage and sequestration of Philippine Forest Ecosystems*. Smallholder Forestry Research Paper Series N^o1.
- Leach G. and Gowen M., 1987, *Household Energy Handbook*, World Bank Technical Paper No. 67, World Bank. Washington D.C.
- Leakey, R.R.B. and A.M.N Izac, 1996. *Linkages between domestication and commercialization of non-timber forest products: implications for agroforestry*. In Domestication and commercialization of non-timber products in agroforestry systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Leakey, R.R.B., Z. Tchoundjeu, K. Schreckenber, S. Shackleton, and C.C. Shackleton, 2005. *Agroforestry Tree Products (AFTOs); Targeting Poverty Reduction and Enhanced Livelihoods*. International Journal of Agricultural Sustainability. Vol. 3, No.1. pp 1-23.
- Lei, Y.C, and S.Y. Zhang, 2004. *Features and Partial Derivatives of Bertalanffy-Richards Growth Model in Forestry*. Nonlinear analysis: Modelling and Control, 2004. Vol. 9. N^o1. 65-73.
- Little, T. M.; F.J. Hills; 1976. *Métodos estadísticos para la investigación en agricultura*. Editorial Trillas.
- Lopez-Merlin, D, L. Soto-Pinto, G. Jiménez-Ferrer, S. Hernandez Daumás, 2003. *Relaciones alométricas para la producción de biomasa forrajera y leña de Acacia pennatula y Guazuma ulmifolia en dos comunidades del norte de Chiapas, México*. Interciencia V. 28 No. 6. 334-339.
- Macedo, I.C., M.R.L.V. Leal and J.E.A.R. da Silva, 2004. *Assessment of Greenhouse Gas Emissions in the Production and Use of Fuel Ethanol in Brazil*. Secretariat of the Environment of the State of São Paulo, Brazil (2004).
- Macedo, I.C., 2006. Task 6 en *Potenciales y Viabilidad del Uso del Bioetanol y Biodiesel en México*. Secretaría de Energía – GTZ - Banco Interamericano. Proyectos ME-T1007, ATN/DO-9735-ME y PN 04.2148.7-001.00
- María Ramírez, A., 2007. *El Proceso de análisis jerárquico con base en funciones de producción para planear la siembra de maíz de temporal*. Tesis doctoral. Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Edafología.
- Marland, G. and B. Schlamadinger, 1997. *Forest for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis*. Biomass and bioenergy. Vol. 13. N^o6. pp. 389-397.

- Marschner, H., 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd Ed. London Academic Press.
- Martínez-García, F. y J. López-Blanco, 2005. *Caracterización de las unidades ambientales mediante la aplicación del enfoque geomorfológico morfogenético*. Boletín del Instituto de Investigaciones Geográficas 58. pp. 34-53.
- Martínez-Yrizar, A., J. Sarukhan, A. Pérez-Jiménez and L. Cervantes, 1992. *Above ground phytomass of a tropical deciduous forest of the coast of Jalisco, Mexico*. Journal of Tropical Ecology 8:87-96.
- Martínez-Yrizar A.; J. Sarukhán, A. Pérez-Jiménez, E. Rincón; J.M. Maass; A. Solís-Magallanes; L. Cervantes; 1992. *Phytomass in a Mexican tropical deciduous forest*. Journal of tropical ecology; 8:87 96.
- Marshner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher plants*. London, Academic Press. London 889 p.
- Masera, O. R., 1995. *Socioeconomic and environmental implications of fuelwood dynamics and fuel switching in rural Mexico*. PhD. thesis. University of California at Berkeley.
- Masera O., Navia J., Arias T. and E. Rigelhaupt, 1997. *Dendroenergía para el desarrollo rural: Patrones de Consumo de Leña en Tres Micro-Regiones de México*. Proyecto FAO/MEX/TPC/4553(A).
- Masera, O., M. Astier y S. López-Ridaura, 1999. *Marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad MESMIS*. Mundiprensa – GIRA – UNAM. México.
- Masera O.R., J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G.J. Nabuurs, A. Pussinen, B.H.J. de Jon, G.M.J. Mohren, 2003. *Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach*. Ecological modeling Vol. 164 N°2-3 pp. 177-199.
- Masera, O. (Coordinador), 2006. *La bioenergía en México: Un catalizador del desarrollo sustentable*. Comisión Nacional Forestal. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). Mundi-Prensa.
- Mead, D.J., 2001. *Plantations and wood energy*. FAO-Forestry department. Working paper FP/5 FAO Rome.
- Mead, D.J. and D. Pimentel, 2006. *Use of energy analysis in silvicultural decision-making*. Biomass and Bioenergy 30 pp. 357-362.
- Mercer D.E. and S.K. Pattanayak, 2003. *Agroforestry adoption by small farmers*. In: Sillis, E.O., K.L. Abt (eds.). *Forest in a Market Economy*. Kluwer Academic Publishers. P. 283-299.
- McDonald, P.M. and O.T. Helgerson, 1990. *Mulches aid in regenerating California and Oregon forest: past, present and future*. Gen. Tech Rep. PEW-123 Berkeley, CA. U.S. Department of Agriculture.

- McKendry, P. ,2002. *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*. Bioresource Technology, 83, pp. 37-46.
- Monroy Rivera, C., y Návar Chaidez, J., 2004. *Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de Hevea brasiliensis Muell. Arg. en Veracruz, México*. Madera y Bosques 10(2), 2004:29-43.
- Morillo, A., O. Sequera, e R. Ramirez, 2007. *Roca fosfórica acidulada como fuente de fósforo en un suelo ácido con o sin encalado*. Bioagro Vol.19, no.3, p.161-168.
- Mugwe, J., Mugendi, D., Okoba B., Tuwei, P. and O'Neill, M., 2004. Chapter 20: *Soil Conservation and Fertility Improvement Using Leguminous Shrubs in Central Highlands of Kenya: NARFP Case Study*. In Bationo, A. (ed.), 2004, *Managing Nutrient Cycles to Sustain soil Fertility in Sub-Saharan Africa*. Academy Science Publishers. Nairobi-Kenya. Pp. 277-296.
- Návar, J.; J. Nájera; E. Jurado; 2002. *Biomass estimation equations in the Tamaulipan thornscrub of north-eastern Mexico*. Journal of Arid Environments (2002) 52: 167-179.
- Newell, R. (2007). *Biocombustibles: impacto en las cadenas alimentarias*. Conferencia presentada en el seminario: retos para el desarrollo de los biocombustibles en México. Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. Mayo de 2007.
- Ngome Ajebesone, F. E., 2006. *The contribution of nitrogen fixation by field-grown common beans (Phaseolus vulgaris L.) to N balances in agricultural production systems of Kakamega District, Kenya*. Master Thesis. Institute of Crop Science and Resource Conservation. Universität Bonn.
- Nieto, H; E. Somarriba; M. Gómez; 2001. *Contribución de Acacia pennatula (Carbón) a la productividad agroforestal sostenible de la Reserva Natural Miraflor-Moropotente, Estelí, Nicaragua*. Agroforestería en las Américas 8(30): 21-23.
- NPL, 2008. *Kaye & Laby: Tables of Physical & Chemical Constants*. National physical Laboratory. http://www.kayelaby.npl.co.uk/chemistry/3_11/3_11_4.html (12/09/2008).
- OFI-CATIE, 2008. Hoja de especies. http://herbaria.plants.ox.ac.uk/adcd/downloads/capitulos_especies_y_anexos/acacia_pennatula.pdf (14/05/2008)
- Okello, B.D., T.G. O'Connor, and T.P. Young, 2001. *Growth, Biomass estimates, and charcoal production of Acacia drepanolobium in Laikipia, Kenya*. Forest Ecology and Management, 142: 143-153.
- Olivares Pascual, J. (2007). *Fijación Biológica de Nitrógeno*. Estación biológica del Zaidín. CSIC, Granada. <http://www.eez.csic.es/~olivares/ciencia/fijacion/index.html> (19/04/2008)
- Ong C.K. and Leakey R.R., 1999. *Why tree-crop interactions in agroforestry appear at odds with tree-grass interactions in savannahs?* Agroforestry Systems 45: 109-129.

- Ortega Rivas C. y R. Ochoa Bautista, 2003. *El frijol mexicano y el nuevo siglo*. Revista Claridades Agropecuarias. México, D.F.
- Oxfam International, 2007. *Amenaza biocombustible. Por qué el objetivo de consumo de biocombustibles de la UE puede ser negativo para las personas pobres*. Nota informativa de Oxfam, noviembre de 2007.
- Oyenkwelu, J.C. 2003. *Above ground biomass production and biomass equations for even-aged Gmelina arborea (ROXB) plantations in south-western Nigeria*. Biomass and Bienergy 26 (2004) 39-46.
- Pandey, D.N., 2007. "Multifunctional agroforestry systems in India". Current Science 92(4): 455-463.
- Parresol, B., 1999. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparisons. Forest Science Vol. 45, No. 4. 573-593.
- Patzek, T.W., 2004. *Thermodynamics of the corn-ethanol biofuel cycle*. Critical Reviews in Plant Sciences, 23(6) 519-567.
- Pattanayak, S. and E. Mercer, 1996. *Valuing soil conservation benefits of agroforestry practices*. Southeastern Center for Forest Economic Research, Research Triangle Park, FPEI Working Paper No. 52, 21 p.
- Paz Salinas, M.F., 2005. *Informe Técnico del Censo de Viviendas en Cuentepec*. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. CRIM-UNAM. Cuernavaca, Morelos.
- PEMEX, 2007. *Anuario estadístico 2007*. Petróleos Mexicanos. México, D.F.
- Peña L., and A. Séguin, 2001. *Recent advances and the genetic transformation of trees*. Trends in biotechnology, vol 19 no. 12, p. 500-506.
- Peoples, M.B., J.K. Ladha and D.F. Herridge, 1995. *Biological nitrogen-fixation for sustainable agriculture production*. Plant and Soil 174: 83-101.
- Perlack 2005. *Biomass as feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply*. US Department of Energy. US Department of Agriculture.
- Peter I. and Lehmann J., 2000. *Pruning effects on root distribution and nutrient dynamics in an acacia hedgerow planting in northern Kenya*. Agroforestry Systems Vol. 50. N°. 1. pp. 59-75.
- Pinto Ruiz, R., C.A. Sandoval Castro y L. Ramírez Avilés, 2002. *In vitro gas production of foliage and fruits of forage trees with and without added PEG*. Proceedings of the British Society of Animal Science, 137.
- Pinto Ruiz, R., C.A. Sandoval Castro and L. Ramírez Avilés; 2002. *In vitro digestibility and estimated energy value of foliage and fruits of forage trees when incubated with and without polyethylene glycol (PEG)*.
- Pindyck R. S.; D. Rubinfeld, 2001. *Econometría: Modelos y pronósticos*. Cuarta Edición. McGraw –Hill.

- Place, F., M. Adato, P. Hebinck, and M. Omosa, 2005. *The Impact of Agroforestry-Based Soil Fertility Replenishment Practices on the Poor in Western Kenya*. IFPRI Publications. Research Report No. 142.
- Predo, C.D., 2003. *What motivates farmers? Tree Growing and land Use Decisions in the Grassland of Claveria, Philippines*. Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA-IDRC-SIDA-CIDA). Research Report No. 2003-RR7.
- Quintanar-Isaías, A. and M. Velázquez-Núñez; 2004. *Secondary stem anatomy and uses of four drought-deciduous species of a tropical dry forest in México*. *Revista de Biología Tropical*. Vol. 53 (1-2): 29-48.
- Ramachandra, T.V. and G. Kamakshi, 2005. *Bioresource potential of Karnataka [Talukwise Inventory with Management Options]*. Energy & Wetlands Research Group. The Ministry of Environment and Forest Government of India. Bangalore, India.
- Rao, M.; P.K. Nair and C. Ong, 1997. *Biophysical interactions in tropical agroforestry systems*. *Agroforestry Systems*, 38: 3-50.
- Rehman, A. and C.S. Nautiyal, 2002. *Effect of drought on the growth and survival of the stress tolerant bacterium Rhizobium sp NBR 15505 sesbania and its drought-sensitive transposon Tn5 mutant*. *Current Microbiology* 45: 368-377.
- Rico Arce, M.L., 2001. *El género Acacia (Leguminosae, Mimosoidae) en el Estado de Oaxaca, México*. Herbarium Royal Botanic Gardens, UK. *Anales Jard. Bot. Madrid* 58(2): 251-302.
- Ricker M., Daly D.C., 1998. *Manejo del bosque tropical: aspectos económicos*. Capítulo 5 en Ricker M., Daly D.C., *Botánica económica en bosques tropicales. Principios y métodos para su estudio y aprovechamiento*. México, Diana, pp. 198-261.
- Román Miranda, M.L., 2001. *Evaluación de cinco especies nativas como fuente de alimento para rumiantes en el trópico seco*. Universidad de Colima. Tesis doctoral en Ciencias Pecuarias.
- Roskoski J.P., J. Montano, C. Van Kessel and G. Castilleja, 1982. *Nitrogen fixation by tropical woody legumes: potential source of soil enrichment*. In Graham PH ed. *Biological nitrogen fixation technology for tropical agriculture*, pp. 447-454. CIAT.
- Ruiz-Hernández, D., 2006. *Optimización y programación matemática*. Universidad de Navarra. Apuntes del curso de optimización y programación matemática. <http://www.econ.upf.es/~diruiz/Optimizacion.html> (05/08/2008).
- Russell, D. and S. Franzel, 2005. *Trees of prosperity: Agroforestry, markets and the African small holder*. *Agroforestry Systems*, Vol. 61 p. 345-355.
- Ryan, P.A.; 1998. *The use of legume trees for fuelwood production*. Chapter 5 in *Forage Tree Legumes in Tropical Agriculture*. Eds. Gutteridge, R. C. y Shelton H.M. Tropical Grassland Society in Australia.

- Sagar, A.D., and S. Kartha, 2007. *Bioenergy and sustainable development. reCOMEND6. Community of Energy, Environment and Development.*
- SAGARPA, 2006. *Programa de apoyo directo al campo: PROCAMPO.* www.sagarpa.gob.mx (11/09/2009).
- SAGARPA, 2007. Acciones para la competitividad en maíz y frijol. Documento de trabajo. Reuniones regionales SAGARPA-FIRCO. Marzo 28 de 2007.
- Saha, B.C., 2003. *Hemicellulose bioconversion.* Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, Vol. 30 No. 5 pp. 279-291.
- Sales R.F., Lasco R.D. and Banaticla M.R.N., 2005. *Carbon storage and sequestration potential of smallholder tree farms in on Leyte Island, The Philippines.* In: Harrison S., Herbohn J., Mangaoang E. and Vanclay J. (Eds). ACIAR Smallholder Forestry Project. ASEM 200/008. Proceedings from the end-of project workshop, Ormoc City, Philippines, 19-21 August, 2004.
- Samuelson, P.A., 1976. *Economics of forestry in an evolving society.* Economic Enquiry 15, 466-492.
- Sánchez, P.A., 1995. *Science in agroforestry.* Agroforestry systems, 30: 5-55.
- Sathaye, J.A., W.R. Makundi, K. Andrasko, R. Boer, N.H. Ravindranath, P. Sudha, S. Rao, R. Lasco, F. Pulhin, O. Masera, A. Ceron, J. Ordoñez, X. Zhang and S. Zuomin, 2001. *Carbon mitigation potential and costs of forestry options in Brazil, China, India, Indonesia, Mexico, The Philipines and Tanzania.* Mitigation and adaptation strategies for Global Change 6: 185-211.
- Schelhaas, M.J., PW. Van Esch, T.A. Groen, B.H.J de Jong, M. Kaininen, J. Liski, O. Masera, G.M.J. Mohren, G.J. Nabuurs, T. Palosuo, L. Pedroni, A. Vallejo and T. Vilén, 2004. *CO2FIX V 3.1 A modeling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems.* Alterra-rapport 1068, ISSN 1566-7197.
- Schroeder, P.E., R.K. Dixon and J.K. Winjum, 1993. *Forest management and agroforestry to sequester and conserve atmospheric carbon dioxide.* Unasylva No. 173. Vol 44- 1993/2. FAO-UNO.
- SCMCC, 2003). *Farm Forestry Strategy for NSW.* State Catchment Management Co-ordinating Committee. Natural Heritage Trust. State of New South Wales. NSW Agriculture. Australia.
- Seastedt, T.R. and A.K. Knapp, 1993. *Consequences of nonequilibrium resource availability across multiple time scales: the transient maxima hypothesis.* Am. Nat. 1993. Vol. 141, pp. 621-633.
- Segovia, I., J.P. Young and E. Martínez-Romero, 1992. *Reclassification of American Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli I strain as Rhizobium etli sp. nov.* Int. J. Syst. Bacteriol. 43, 374-377.
- SEMARNAP, 1996. NOM-012-RECNAT-1996. Norma Oficial Mexicana, que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento de leña para uso doméstico. Diario Oficial de la Nación, 26 de junio de 1996.

- SENER, 2006. Balance Nacional de Energía 2006. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Dirección General de Información y Estudios Energéticos. Secretaría de Energía.
- Sharma, R.A., 1993. *Agroforestry vs. forestry for the rural poor: a socio-economic evaluation*. *Agroforestry Systems* (22) p. 131-143.
- Shavanas, A. and B Mohan Kumar. *Fuelwood characteristics in homegardens in Kerala, India*. *Agroforestry Systems* 2003; 58: 11-24.
- Sheng, C. and J.L.T. Azevedo; 2004. *Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data*. *Biomass and Bioenergy*. 28(5): 499-507.
- Shiferaw, B., M.C.S. Bantilan and R. Serraj, 2004. *Harnessing the Potentials of BNF for Poor Farmers: Technological, Policy and Institutional Constraints and Research Needs*. In R. Serraj (ed.) *Symbiotic nitrogen Fixation; prospects for enhanced application in tropical agriculture*. Oxford & IBH publishing Co. New Delhi.
- Shively, G.E., 1998. *Economic policies and the environment: the case of tree planting on low-income farms in the Philippines*. *Environment and Development Economics* 3 (1998): 82-104.
- Shively, G.E., C.A. Zelek, D.J. Midmore and T.M. Nissen, 2004. *Carbon sequestration in a tropical landscape: an economic model to measure its incremental cost*. *Agroforestry Systems* 60: 189-197.
- Simpson, G.G., A. Roe and R.C. Lewontin, 1960 *Quantitative zoology*. New York, Harcourt, Brace and World, Inc., 440 p. Rev. ed.
- Sirén, G., 1982. *Silviculture for energy*. *Unasylva* – No. 138 –In the forest of the EEC. – Vol 34 – 1982.
- Sizer, N. S. Bass and J. Mayers, 2005 (Coordinating lead authors). *Wood, Fuelwood and Non-wood Forest Products*. Chapter 8 in *Ecosystems and Human Well-being: Policy Responses*. Findings of the Responses Working Group (Millenium Ecosystems Assessment Series).
- Sjöström E. (Editor), 1993. *Wood Chemistry Fundamentals and Applications*. Tappi Press. Second ed. 293 pp.
- Srivastava A.P.N., V.K. Gupta and K.R. Solanki, 1999. *Sigmoid function in Tree Growth Modelling: Limitation of Constant Estimation and Simulation Approach as an Alternative*. *Indian J. Agroforestry* Vol. 1 N° 2: 135-140.
- Steppler, H.A., 1987. *ICRAF and a decade of agroforestry development*. In *Agroforestry: a decade of development*. Edited by H.A. Steppler and P.K.R. Nair. ICRAF, Nairobi.
- Stewart J.L. and R. Salazar, 1992. *A review of measurement options for multipurpose trees*. *Agroforestry systems* 19: 173-183.

- Stone, S.W., S.C. Kyle and J.M. Conrad, 1993. *Application of the Faustman principle to a short-rotation tree species: an analytical tool for economist, with reference to Kenya and Leucaena*. *Agroforestry Systems* 21: 79-90.
- Sung, Y. and Cheng J., 2002. *Hydrolysis of lignocelulosic materials for ethanol production: a review*. *Bioresource technology* 83 pp. 1-11.
- Trossero M.A., L. Horta Nogueira, T. Etherington y R. Flood, 2001. *"Unified Wood Energy terminology"*. Departamento de Montes. Food and Agriculture Organization-UNO. Roma, Italia.
- Tucker, R. 1999. *Essential Plant Nutrients: their presence in North Carolina Soils and Role in Plant Nutrition*. NCDA & CS Agronomic division. October, 1999. North Carolina, U.S.
- Thurnbull, J. W., 2004. *Plantation Forestry in the Tropics*. Oxford University Press.
- UNCTAD, 2008. *Addressing the Global Food Crisis: key trade, investment and commodity policies in ensuring sustainable food security and alleviating poverty*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). UNCTAD/OSG/2008/1. Rome, 3-5 June, 2008.
- UNO, 1996. *Renewable sources of energy with special emphasis on biomass: progress and policies*. Report of the Secretary-General. United nations Organization. E/C.13/1996/1.
- Vandermeer, J., 1989. *Ecology of intercropping*. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 248 pp.
- Van Gelder, H.A.; L. Poorter; F.J. Streck; 2006. Wood mechanics allometry and life: history variation in a tropical rein forest tree community. *New Phytologist* 171: 367-678.
- Van Kessel, C., J.P. Roskoski, T. Wood and J. Montano, 1983. $^{15}\text{N}_2$ Fixation an H_2 Evolution by six Species of Tropical Leguminous Trees. *Plant Physiol.* 72, 909-910.
- Van Noordwijk, M. and B. Lusiana, 1999. *WaNuLCAS, a model for water, nutrient and light capture in agroforestry systems*. *Agroforestry Systems* 43:217-242(26).
- Van Noordwijk, M., B. Lusiana, and N. Khasanah, 2004. *WaNuLCAS version 3.1, Background on a model on water, nutrient and light capture in agroforestry systems*. International Center for Research in Agroforestry (ICRAF). Bogor, Indonesia.
- Venn, T.J., Beard, R.M. and Harrison, S.R., 2001. *Modelling stand yield of non-traditional timber species under sparse data*, in S.R. Harrison and J.L. Herbohn (eds), *Socio-Economic Evaluation of the Potential for Australian Tree Species in the Philippines*, ACIAR Monograph 75, ACIAR, Canberra, pp. 55-77.
- Vela Morales, M., 1992. *Incidencias del manejo tradicional sobre físicas, químicas y biológicas de un Vertic trophumult en ambiente bioclimático de las selvas nubladas*. *Agronomía Tropical* 42 (1-2): 5-25.

- Verwijst T. and B. Telenius, 1999. *Biomass estimation in short rotation forestry*. Forest Ecology and Management 151: 137-146.
- Verwijst, T., 2003. *Short Rotation Crops in the World*. Short Rotation Crops for Bioenergy: New Zealand, 2003.
- Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger, and D.G. Tilman, 1997. *Human alteration of the global nitrogen cycle: causes and consequences*. Ecological Society in America, Num. 1, pp. 1-16.
- Volke H. V., e I. Sepúlveda G. 1987. *Agricultura de subsistencia y desarrollo rural*. Primera edición. Editorial Trillas. México. D.F.
- von Braun, J. and R.K. Pachauri, 2006. *The promises and Challenges of Biofuels for the Poor in Developing Countries*. International Food Policy Research Institute. IFPRI 2005-2006 Annual Report Essay.
- Wang, ET, y J. Martínez-Romero. *Taxonomía de Rhizobium*. Capítulo 12 en: *Microbios en Línea*. <http://www.microbiologia.org.mx/microbiosenlinea/> 16/01/2008.
- Weih, 2004. *Intensive short rotation forestry in boreal climates: present and future perspectives*. Canadian Journal of Forestry Research, Vol. 34 (7), pp. 1369-1378 (10).
- Wenzel, W., 2004. *Fertilizer Rising*. Farm Industry News. http://farmindustrynews.com/mag/farming_fertilizer_rising/ (08/04/2007)
- Wiesenthal, T., A. Mourelatou, J.E. Petersen and P. Taylor, 2006. "How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?". European Environment Agency. EEA Report No. 7/ 2006. 54 p.
- Willey R.W. and S.B. Heath, 1979. *The quantitative relation between plant population and crop yield*. Adv. Agron 21: 281-321.
- Wise R. and O.J. Cacho, 2002. *Tree crop interactions...* Working paper CC11, ACIAR Project ASEM 2002/066. www.une.edu.au/carbon/wpapers.php
- Wise R. and O. Cacho, 2005. *Dynamic optimization of land-use systems in the presence of carbon payments*. Contributed Paper to the 49th Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economics Society. February 8-11th, NSW. Australia.
- Wise R. and O.J. Cacho, 2008. *Bioeconomic meta-modelling of Indonesian agroforests as carbon sinks*. Australian Agriculture and Resource Economic Society 52nd Annual Conference. February 5-8, Canberra, Australia.
- Wyman, C.E. (2007). "What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol". Trends in biotechnology Vol. 25 No. 4, 153-157.
- World Rainforest Movement (WRN), 1999. *Pulpwood plantations: a growing problem*. WRM.

- Xoconostle Cázares, B. y R. Ruiz Medrano, 2002. *Impacto de la biotecnología agrícola en cultivos: el caso de las micorrizas*. Avance y Perspectiva. Revista del CINVESTAV. p. 263-266.
- Young, A., K.J. Menz, P. Muraya and C. Smith, 1998. *SCUAF Version 4: a model to estimate soil changes under agriculture, agroforestry and forestry*. ACIAR. Canberra, Australia.
- Young T.P. and Francombe C., 1991. *Growth and yield estimates in natural stands of Ieshwa (Tarconanthus camphoratus)*. Forest Ecology and Management 41 309-321.
- Zahran, S.H., 1999. *Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen fixation under severe conditions in Arid Climate*. Microbiology and Molecular biology reviews. p. 968-989.
- Zar, J. H., 1999. *Biostatistical Analysis*. Fourth Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- Zobel D.J. and J.P. van Buijtenen, 1989. *Wood variations: Its Causes and Control*. Springer-Verlag. New York, 363 pp.

ANEXO 1

Resultados del análisis químico de tejido vegetal de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*.

Los resultados que presentamos muestran una aproximación preliminar del contenido de nutrientes del material foliar de *A. cochliacantha* y *A. pennatula*¹. Los análisis incluyeron tres muestras de *A. cochliacantha* y tres muestras de *A. pennatula* a los 24 meses de edad en el campo experimental. La Tabla A4.1 muestra una síntesis de los resultados del contenido elemental del tejido vegetal foliar de *A. cochliacantha* y la tabla A4.2 del tejido vegetal foliar de *A. pennatula*.

Tabla A1.1 Análisis elemental del tejido vegetal del material foliar de *A. cochliacantha* en el sitio *El Colorín* (n=3).

	% N	% P	% K	% Ca	% Mg	Fe mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
Promedio	2.02	0.30	1.02	3.19	1.03	244.28	11.43	17.97	51.05
Min	1.37	0.27	0.88	1.72	0.81	159.75	2.63	12.01	45.73
Max	2.94	0.34	1.12	4.02	1.33	369.55	24.55	24.39	60.28

Tabla A1.2 Análisis elemental del tejido vegetal del material foliar de *A. pennatula* en el sitio *El Colorín*. (n=3).

	% N	% P	% K	% Ca	% Mg	Fe mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
Promedio	1.89	0.33	0.98	2.06	0.45	192.24	2.49	13.20	41.52
Min	1.37	0.25	0.88	0.95	0.41	107.25	2.18	11.66	36.05
Max	2.55	0.42	1.14	3.45	0.53	264.50	2.93	14.59	51.25

El material foliar de *A. cochliacantha* tiene un contenido porcentual promedio de nitrógeno cercano al 2%, un 0.3% de fósforo, casi un 1% de potasio y cerca del 3.19% en calcio. El contenido de nutrientes en *A. pennatula* es de 1.89% en nitrógeno, 0.33 en fósforo, 0.98% en potasio y de 2% en calcio. En términos porcentuales es ligeramente más alto el contenido de nutrientes en el material foliar de *A. cochliacantha* que en el de *A. pennatula*.

¹ Por limitaciones de recursos el número de muestras fue muy limitado.

Anexo 2

Tabla A2.1 Ingresos en los tratamientos experimentales

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
T4										
Leña	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$72,800
Frijol	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728	\$3,728
Procampo	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812
Total	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$4,540	\$77,340
T5										
Leña	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$50,400
Total		\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$50,400
T6										
Leña	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$58,100
Frijol	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279	\$6,279
Procampo	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812	\$812
Total	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$7,091	\$65,191
T7										
Frijol	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516	\$8,516
Procampo	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160
Total	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676	\$9,676
T8										
Frijol	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964	\$5,964
Procampo	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160	\$1,160
Total	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124	\$7,124

Tabla A2.2 Costos de inversión de los tratamientos forestal (T5) y agroforestales (T4 y T6).

	Monocultivo forestal (T5)			Sist. Agroforestales (T4 y T6)		
	Jornales	Mano de obra	Materiales y servicios	Jornales	Mano de obra	Materiales y servicios
Preparación del sitio						
Cavar huecos para árboles	3	\$360	\$400	3	\$360	\$400
Cerca, trazos y señalización	7	\$840	\$1,000	7	\$840	\$1,000
Subtotal:			\$2,600			\$2,600
Plantación de árboles						
Compra de 1160 plántulas			\$5,800			\$5,800
Reposición de 348 plántulas			\$1,740			\$1,740
Traslado al sitio	3	\$360	\$500	3	\$360	\$500
Introducción al campo	8	\$960		8	\$960	
Subtotal:			\$9,360			\$9,360
Equipos y herramientas						
Desmalezadora			\$700			\$700
Palas, picos, machetes y otras herramientas.			\$900			\$900
Cavadoras manuales			\$400			\$400
Subtotal:			\$1,600			\$1,600
Subtotal:			\$13,560			\$13,560
Subsidio PROARBOL			-\$7,787			-\$7,544
TOTAL:			\$5,773			\$6,016

Tabla A2.3 Costos de establecimiento de los tratamientos agrícolas (T7 y T8) en *El Colorín*.

	Jornales	Mano de obra	Materiales y servicios
Preparación del sitio			
Limpieza del terreno	4	\$480	\$600
Cerca, trazos y señalización	5	\$600	\$1,000
Equipos y herramientas			
Herramienta			\$500
Total			\$3,180

Tabla A2.4 Costos anuales del monocultivo forestal (T5).

	Jornales	Año 1		Año 2		Año 10	
		Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios
Fertilización c/ micro-nutrientes	2	\$240	\$900	\$240	\$900	\$240	\$900
Desmalezar	3	\$360		\$360		\$360	
Corte total de árboles	20					\$1,200	\$720
Subtotales		\$600	\$900	\$600	\$900	\$1,800	\$1,620
Subtotal anual		\$1,500		\$1,500		\$3,420	

Tabla A2.5 Costos anuales del tratamiento agroforestal fertilizado químicamente (T4).

	Jornales	Año 1		Año 2		Final del ciclo de rotación (año 10)	
		Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios
Barbecho			\$700	\$700			\$700
Surcado			\$320	\$320			\$320
Introducción de semilla	4	\$480		\$480		\$480	
Fertilización frijol c/ agroquímico	4	\$480	\$1,330	\$480	\$1,330	\$480	\$1,330
Control de malezas	3	\$360		\$360		\$360	
Control de plagas	2	\$240	\$180	\$240	\$180	\$240	\$180
Escarda			\$320	\$320			\$320
Corte total de árboles	20					\$1,680	\$720
Cosecha de frijol	5	\$600		\$600		\$600	
Limpieza de frijol	4	\$480		\$480		\$480	
Subtotales		\$2,640	\$2,850	\$2,640	\$2,850	\$4,320	\$3,570
Total anual			\$5,490	\$5,490		\$7,890	

Tabla A2.6 Costos anuales del tratamiento agroforestal fertilizado biológicamente (T6).

	Jornales	Año 1		Año 2		Final del ciclo de rotación (año 10)	
		Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios
Barbecho			\$700	\$700			\$700
Surcado			\$320	\$320			\$320
Introducción de semilla	4	\$480		\$480		\$480	
Fertilización biológica del frijol	2	\$240	\$230	\$240	\$230	\$240	\$230
Control de malezas	3	\$360		\$360		\$360	
Control de plagas	2	\$240	\$180	\$240	\$180	\$240	\$180
Escarda ²			\$320	\$320			\$320
Corte total de árboles	10					\$1,440	\$720
Cosecha de frijol	5	\$600		\$600		\$600	
Limpieza de frijol	4	\$480		\$480		\$480	
Subtotales		\$2,400	\$1,750	\$2,400	\$1,750	\$3,840	\$2,470
Total anual			\$4,150	\$4,150		\$6,310	

² Escarda es el paso de la yunta entre los surcos para poner tierra sobre las matas del cultivo de frijol.

Tabla A2.7 Costos anuales del tratamiento agrícola fertilizado biológicamente (T7).

	Jornales	Año 1		Año 2		Final del ciclo de rotación (año 10)	
		Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios
Barbecho			\$700		\$700		\$700
Surcado			\$320		\$320		\$320
Introducción de semilla	4	\$480		\$480		\$480	
Fertilización biológica	4	\$480	\$230	\$480	\$230	\$480	\$230
Control de malezas	3	\$360		\$360		\$360	
Control de plagas	2	\$240	\$180	\$240	\$180	\$240	\$180
Escarda			\$320		\$320		\$320
Cosecha de frijol	5	\$600		\$600		\$600	
Limpieza de frijol	4	\$480		\$480		\$480	
Subtotales:		\$2,640	\$1,750	\$2,640	\$1,750	\$2,640	\$1,750
Total:			\$4,390		\$4,390		\$4,390

Tabla A2.8 Costos anuales del monocultivo agrícola fertilizado químicamente (T8).

	Jornales	Año 1		Año 2		Final del ciclo de rotación (año 10)	
		Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios	Mano de obra	Materiales y servicios
Barbecho			\$700		\$700		\$700
Surcado			\$320		\$320		\$320
Introducción de semilla	4	\$480		\$480		\$480	
Fertilización química (T8)**	4	\$480	\$1,900	\$480	\$1,900	\$480	\$1,900
Control de malezas	3	\$360		\$360		\$360	
Control de plagas	2	\$240	\$180	\$240	\$180	\$240	\$180
Escarda			\$320		\$320		\$320
Cosecha de frijol	5	\$600		\$600		\$600	
Limpieza de frijol	4	\$480		\$480		\$480	
Subtotales:		\$2,640	\$3,420	\$2,640	\$3,420	\$2,640	\$3,420
Total:			\$6,060		\$6,060		\$6,060

Tabla A2.9 Flujo de efectivo de los tratamientos experimentales de *El Colorín*

	Establecimiento	Año 1	Año 2	Año 3		Año 10
T4					. . . . .
Ingresos		\$4,540	\$4,540	\$4,540	. . . . .	\$77,340
Costos	-\$6,016	-\$5,490	-\$5,490	-\$5,490	. . . . .	-\$7,890
Balance	-\$6,016	-\$951	-\$951	-\$951	. . . . .	\$69,450
T5					. . . . .
Ingresos		\$0	\$0	\$0	. . . . .	\$50,400
Costos	-\$5,773	-\$1,500	-\$1,500	-\$1,500	. . . . .	-\$3,420
Balance	-\$5,773	-\$1,500	-\$1,500	-\$1,500	. . . . .	\$46,980
T6					. . . . .
Ingresos		\$7,091	\$7,091	\$7,091	. . . . .	\$65,191
Costos	-\$6,016	-\$4,150	-\$4,150	-\$4,150	. . . . .	-\$6,310
Balance	-\$6,016	\$2,491	\$2,941	2,941	. . . . .	\$58,881
T7					. . . . .
Ingresos		\$9,676	\$9,676	\$9,676	. . . . .	\$9,676
Costos	-\$3,180	-\$4,390	-\$4,390	-\$4,390	. . . . .	-\$4,390
Balance	-\$5,680	\$5,286	\$5,286	\$5,286	. . . . .	\$5,286
T8					. . . . .
Ingresos		\$7,124	\$7,124	\$7,124	. . . . .	\$7,124
Costos	-\$3,180	-\$6,060	-\$6,060	-\$6,060	. . . . .	-\$6,060
Balance	-\$5,680	\$1,064	\$1,064	\$1,064	. . . . .	\$1,064

Figura A2.1 Diagrama de flujo del análisis financiero de plantaciones energéticas

