



Solutions for environment and development  
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas  
agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua

Por

**Jhenny Liliana Salgado Vásquez**

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado  
como requisito parcial para optar por el grado de

*Magister Scientiae* en Agroforestería Tropical

Turrialba, Costa Rica, 2010

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE, y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar por el grado de

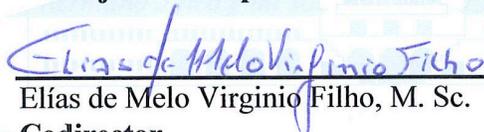
***Magister Scientiae* en Agroforestería Tropical**

**FIRMANTES:**



---

Fernando Casanoves, Ph.D.  
**Consejero Principal**

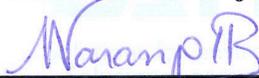


---

Elías de Melo Virginio Filho, M. Sc.  
**Codirector**

---

Jeremy Hagar, Ph.D.  
**Miembro del Comité Consejero**

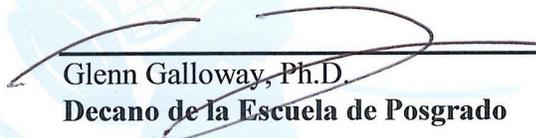


---

María Angélica Naranjo, M. Sc.  
**Miembro del Comité Consejero**

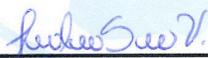
---

Hernán Andrade, Ph.D.  
**Miembro del Comité Consejero**



---

Glenn Galloway, Ph.D.  
**Decano de la Escuela de Posgrado**



---

Jhenny Liliana Salgado Vásquez  
**Candidata**

## DEDICATORIA

*A Dios por guiarme día a día*

*A mis padres Hernando y Felina por ser mi mayor motivo y enseñarme lo bella que  
puede ser la vida*

*A mi hermano Jairo y mi sobrino Jairo Esteban por estar ahí cuando más los necesito*

*Y a toda mi familia Salgado y familia Vásquez porque gracias a su apoyo soy lo que  
soy!*

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por ser el motivo constante para ser cada día mejor, a mis papás Hernando Salgado y Felina Vásquez por darme la vida, por cuidarme y por renunciar a tenerme con ellos y dejarme emprender este viaje lleno de aventuras y de lindas experiencias, gracias de todo corazón!

A mi novio y amigo, a Carlos E. Manchego por ser mi todo, por su apoyo incondicional y por acompañarme todo este tiempo, con toda la paciencia del mundo

Al personal de la escuela de posgrado por permitirme ingresar en esta prestigiosa institución

Al grupo de docentes por ayudarme a mejorar mis conocimientos y por enseñarme cómo enfrentar nuevos retos

Al Dr. Fernando Casanoves por ser más que un asesor y por convertirse en mi guía constante en este proceso y en los que siguen en mi vida, gracias por tu amistad Fer!

A Elías de Melo Virginio Filho, Director del proyecto CAFNET por el tiempo aportado a la codirección de la investigación y por proveer los fondos para su desarrollo.

A mis profesores consejeros Ph. D. Jeremy Haggar, M. Sc. Maria A. Naranjo, Ph. D. Hernán Andrade por acompañarme durante la investigación y por sus aportes

Al personal de campo, en Nicaragua a Elvin, Ledis, Dimas, Alejandro y Aurora, en Turrialba a Beatriz, Luis, Cesar, Alfonso y Mainor por ser mi equipo fundamental en la toma de datos

A la unidad de bioestadística, a Sergio, Eduardo y Karime por sus aportes en mi documento y por su ayuda en momentos de incertidumbre estadística

Al grupo de computo, en especial a Elvia y a Turi por la energía que me dieron para seguir adelante y no decaer

Al personal de la biblioteca Orton, en especial a Javi y a Alex por ser mis consejeros en momentos difíciles

A mis fieles compañeros Diana, Freddy, Angela y especialmente a Patty, por ser mi grupo incondicional y por ser mi familia durante estos años lejos de casa

A mis compañeros de la promoción 2008-2009 por su amistad y sobre todo al grupo de Agroforestería Tropical por darme las mejores experiencias durante estos dos años

Al pequeño grupo de graduados de la promoción 2007 sobrevivientes en CATIE por compartir momentos tan especiales y difíciles de olvidar

Y por último y no menos importantes a todas las personas que de una u otra manera me han apoyado y que cada uno de ellos sabe lo importante que son en mi vida!

Gracias!

# CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
CONTENIDO.....	V
RESUMEN GENERAL.....	IX
SUMMARY.....	XI
ÍNDICE DE CUADROS.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XVI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos del estudio.....	3
1.1.1 <i>Objetivo general</i> .....	3
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.2 Hipótesis del estudio.....	4
2 MARCO CONCEPTUAL.....	5
2.1 Tendencias de mercado del café.....	5
2.2 La producción de café y su relación con el medio ambiente.....	5
2.2.1 <i>Técnicas de producción del café</i> .....	5
2.3 Los sistemas agroforestales (SAF).....	6
2.4 Rentabilidad en los sistemas agroforestales.....	7
2.4.1 <i>Análisis de inversiones en los SAF</i> .....	7
2.5 Los sistemas agroforestales de café como proveedores de servicios ambientales ....	8
2.5.1 <i>La fijación de carbono como un servicio ambiental</i> .....	9
2.5.2 <i>Crecimiento de las especies forestales</i> .....	9
2.5.2.1 Modelos de crecimiento.....	10
2.5.3 <i>Comportamiento de la biomasa en ecosistemas</i> .....	10
2.5.3.1 Metodologías para estimar biomasa.....	11

2.5.4	<i>Contenido de carbono en la biomasa</i> .....	11
2.6	Valoración económica del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono .....	12
2.6.1	<i>Costo de oportunidad</i> .....	13
3	BIBLIOGRAFIA .....	13
4	ARTÍCULO 1: RENTABILIDAD FINANCIERA DE SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ .....	17
4.1	Introducción .....	17
4.2	Objetivos .....	18
4.3	Hipótesis .....	18
4.4	Materiales y métodos .....	18
4.4.1	<i>Ubicación del sitio de estudio</i> .....	18
4.4.2	<i>Suelos y zona de vida</i> .....	19
4.4.2.1	Turrialba .....	19
4.4.2.2	Masatepe .....	20
4.4.2.2.1	Características de las especies de árboles como sombra .....	20
4.4.3	<i>Diseño experimental</i> .....	23
4.4.4	<i>Análisis de inversiones</i> .....	25
4.4.4.1	Estructura de costos e ingresos .....	25
4.4.4.2	Indicadores financieros .....	26
4.4.4.2.1	Valor actual neto (VAN) .....	26
4.4.4.3	Supuestos del modelo .....	27
4.4.4.4	Análisis de sensibilidad .....	28
4.5	Análisis estadístico .....	29
4.6	Resultados y discusión .....	30
4.6.1	<i>Estructura de costos e ingresos</i> .....	30
4.6.2	<i>Estructura de costos</i> .....	30
4.6.2.1	Mano de obra total en SAF .....	30
4.6.2.2	Costos de mano de obra fija .....	32
4.6.2.3	Distribución de Costos totales .....	35
4.6.2.4	Costos totales de operación en SAF .....	38

4.6.3	<i>Estructura de ingresos</i> .....	44
4.6.3.1	Producción de café .....	44
4.6.3.2	Distribución de Ingresos Totales.....	49
4.6.3.3	Ingresos totales en SAF.....	50
4.6.4	<i>Rentabilidad financiera de los SAF</i> .....	51
4.6.4.1	Análisis de sensibilidad.....	55
4.6.5	<i>Escenarios para el café orgánico</i> .....	57
4.7	Conclusiones y recomendaciones .....	60
4.8	Bibliografía .....	61
5	ARTÍCULO 2. FIJACIÓN DE CARBONO EN BIOMASA AÉREA EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ .....	65
5.1	Introducción.....	65
5.2	Objetivo .....	66
5.3	Hipótesis .....	66
5.4	Materiales y métodos.....	66
5.4.1	<i>Ubicación del sitio de estudio</i> .....	66
5.4.2	<i>Suelos y zona de vida</i> .....	67
5.4.2.1	Turrialba.....	67
5.4.2.2	Masatepe .....	68
5.4.2.2.1	Características de las especies de árboles como sombra.....	68
5.4.3	<i>Diseño experimental</i> .....	71
5.4.4	<i>Estimación de la biomasa aérea</i> .....	73
5.4.4.1	Biomasa del componente leñoso .....	73
5.4.4.2	Medición en campo .....	75
5.4.4.3	Cálculo de biomasa por componentes.....	76
5.4.4.4	Cálculo de la biomasa aérea en árboles de asocio.....	76
5.4.4.5	Factor de expansión de biomasa.....	77
5.4.4.6	Construcción de modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea en árboles individuales .....	77
5.4.4.7	Biomasa de las plantas (café).....	78

5.4.5	<i>Estimación de biomasa aérea en el componente arbóreo</i> .....	79
5.4.6	<i>Estimación del carbono en la biomasa aérea por SAF</i> .....	80
5.4.7	<i>Análisis estadístico</i> .....	80
5.5	Resultados y discusión.....	82
5.5.1	<i>Biomasa aérea para las especies de asocio en SAF café</i> .....	82
5.5.2	<i>Factor de expansión de biomasa (FEB)</i> .....	85
5.5.3	<i>Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea en árboles individuales</i> .....	86
5.5.3.1	Biomasa total para <i>Inga laurina</i> .....	87
5.5.3.2	Biomasa total para <i>Simarouba glauca</i> .....	88
5.5.3.3	Biomasa total para <i>Samanea saman</i> .....	89
5.5.3.4	Biomasa total para <i>Tabebuia rosea</i> .....	91
5.5.3.5	Biomasa total para <i>Abarema idiopoda</i> y <i>Terminalia amazonia</i> .....	92
5.5.4	<i>Estimación de biomasa aérea en el componente arbóreo</i> .....	93
5.5.5	<i>Biomasa de las plantas (café)</i> .....	96
5.5.6	<i>Biomasa aérea total</i> .....	97
5.5.7	<i>Carbono almacenado en la biomasa aérea total en SAF</i> .....	100
5.6	Conclusiones y recomendaciones .....	102
5.7	Bibliografía .....	103

## RESUMEN GENERAL

Salgado Vásquez, J. 2010. Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE, 125 p.

Palabras clave: sistemas agroforestales con café, rentabilidad, biomasa, carbono.

Los estudios que se han realizado en sistemas agroforestales buscan cuantificar los servicios ambientales que proporciona el sistema, dejando de lado el beneficio económico de tener una especie arbórea en asocio; pocos de estos estudios han estado dirigidos a nuevas especies en asocio, en particular hay poca información sobre especies nativas como árboles de sombra y su compatibilidad con el café. Por esto, este estudio pretendió evaluar la fijación de carbono y la rentabilidad financiera de los sistemas agroforestales con café tratados bajo manejos convencionales y orgánicos. El trabajo se realizó en dos ensayos establecidos en el año 2000 por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) junto con la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), la Universidad Nacional Agraria (UNA), el Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA), la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto del Café en Costa Rica (ICAFE). El primero de estos ensayos está situado en Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica y el segundo en Masatepe, municipio de Carazo, Nicaragua. En estos ensayos, se establecieron sistemas agroforestales con diferentes especies arbóreas de asocio y manejados bajo niveles de insumos orgánico y convencional (alto convencional, medio convencional, orgánico intensivo y bajo orgánico). Se construyó una estructura de costos e ingresos con la cual se estimó y se evaluó el indicador económico valor actual neto (VAN) para 20 sistemas establecidos en Turrialba y para 14 sistemas en Masatepe. Se evaluó cada una de las variables incluidas en la VAN (costos de mano de obra e insumos, ingresos por producción de café y leña).

Para evaluar la fijación de carbono de los sistemas, se realizó un muestreo destructivo de árboles en asocio con los que se cuantificó la biomasa aérea. Con estos valores se construyeron modelos de biomasa para cada especie establecida (*Inga laurina*, *Samanea saman*, *Tabebuia rosea*, *Simarouba glauca*, *Chloroleucon eurycyclum* (*Abarema idiopoda*), *Terminalia amazonia*) con los que se estimó la biomasa total aérea de cada sistema. Se

realizaron comparaciones entre sistemas considerando los factores evaluados (especie de sombra y nivel de insumo). Se encontró que la biomasa aérea respondió al diámetro a la altura del pecho (dap) de los árboles, como única variable predictora. De los tratamientos observados en Turrialba, la sombra que presentó un alto valor de biomasa fue *Abarema idiopoda* con valores entre 55,3 y 69,6 t ha<sup>-1</sup>, mientras que en Masatepe fue la combinación *Simarouba glauca* y *Tabebuia rosea* (SGTR) presentando valores entre 41,6 y 63,7 t ha<sup>-1</sup>.

En el ensayo de Turrialba, el análisis financiero mostro que la mayoría de los tratamientos bajo manejo alto convencional (pleno sol, *Erythrina poeppigiana*, *Abarema idiopoda* más *Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia*) son los que presentan mayores valores de rentabilidad desde 4165,1 USD ha<sup>-1</sup> hasta 7632,1 USD ha<sup>-1</sup>, cabe resaltar que el análisis de Turrialba no incluye los dos primeros años de la plantación y el análisis fue realizado para cinco años. Aunque los sistemas orgánicos no están en el grupo de alta rentabilidad si presentaron rentabilidades medias. Considerando un sobreprecio del 20% del café orgánico, la mayoría de los sistemas orgánicos se unen al grupo de alta rentabilidad convirtiéndolos en mejores opciones frente a los sistemas convencionales así como por los servicios ambientales que proveen y a que generan más posibilidades de desarrollo y menos dependencia de insumos externos. En el ensayo de Masatepe, se encontraron valores de VAN de 258,3 USD ha<sup>-1</sup> para el sistema medio orgánico y 141,1 USD ha<sup>-1</sup> para el sistema bajo orgánico. En este ensayo, los sistemas convencionales mostraron valores negativos de rentabilidad. Es importante considerar que para el análisis de este ensayo, se consideraron ocho años de manejo de la plantación.

## SUMMARY

Salgado Vásquez, J. 2010. Carbon sequestration and financial profitability of coffee agroforestry in Turrialba, Costa Rica and Masatepe, Nicaragua. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE, 125 p.

Keywords: coffee agroforestry systems, profitability, biomass, carbon.

The majority of studies on agroforestry systems tries to quantify environmental services without considering all the economic benefits of associated plant species, part of the reason is the lack of detailed information about native trees as associated species as well as its compatibility with coffee plants. This study evaluates the carbon fixation and profitability of coffee agroforestry plantations under two management practices: conventional and organic. The study sites were located on Turrialba, Costa Rica and Masatepe, Nicaragua. The institutions that participated were: Tropical Agricultural Research and Higher Education Center (CATIE); Nicaraguan Coffee Producers Union (UNICAFE); the Agrarian National University (UNA); The Nicaraguan Institute of Farming Technology (INTA); The University of Costa Rica (UCR) and the Costa Rican Institute for the Coffee (ICAFE). The tests were established as coffee agroforestry systems associated with different tree species, using either a ‘traditional’ method of production or an ‘organic’ approach. For each field site an economic index VPN was calculated using all financial income and outcome for its whole time period (20 agroforestry systems established in Turrialba; 14 agroforestry systems in Masatepe). The variables analyzed to calculate the VPN were: 1) costs of local manpower, 2) system consumption (i.e. fertilizer, etc), 3) income from coffee production and 4) income resulting from trading wood. Carbon fixation was evaluated on each system by cutting down trees and sampling above ground biomass, the obtained values were used to generate a model for total biomass depending on each tree species (*Inga laurina*, *Samanea saman*, *Tabebuia rosea*, *Simarouba glauca*, *Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda*). Then, all systems were compared, specially considering the level of shade provided and the system consumption (i.e. expenditures).

In order to evaluate the carbon fixation, a destructive sampling method was used, taking down trees and measuring above ground biomass. With these values species-specific

biomass models were developed for the following: *Inga laurina*, *Samanea saman*, *Tabebuia rosea*, *Simarouba glauca*, *Chloroleucon eurycyclum* (*Abarema idiopoda*), *Terminalia amazonia*; once the total aerial biomass of each system was determined, all systems were compared considering shade species and input applications. It was found that aerial biomass was correlated with tree diameter (DBH) as only predictor variable. Among treatments in Turrialba, the shade specie with highest value of biomass was *Abarema idiopoda* (55,3 and 69,6 t ha<sup>-1</sup>). In Masatepe, the treatment with combination of two species, *Simarouba glauca* and *Tabebuia rosea* (SGTR), gave the highest biomass (41,6 y 63,7 t ha<sup>-1</sup>).

In Turrialba, the financial analysis showed that most of the treatments under high conventional management practices (full sunlight, *Erythrina poeppigiana*, *Abarema idiopoda* plus *Erythrina poeppigiana* and *Terminalia amazonia*) were the ones that presented higher profitability, on the range of 4165,1 USD ha<sup>-1</sup> to 7632,1 USD ha<sup>-1</sup>. As side notes, the analysis for Turrialba does not include the first 2 years of plantation and only the last 5 years were used. In the other hand, the organic management approach resulted in medium range profitability. Moreover, if we consider its 20% overprice over normal price, most of the organic systems result with a high profitability, making them better options against conventional systems, also because of the environmental services they provide and less dependency to external inputs. In Masatepe, the values of VPN were 258,3 USD ha<sup>-1</sup> for the medium organic management and 141,1 USD ha<sup>-1</sup> for the low organic management. All conventional systems showed negative values of profitability. In order to asses these all 8 years of plantation management were used.

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de las especies de asocio – Turrialba .....	20
Cuadro 2. Características de las especies de asocio - Masatepe .....	20
Cuadro 3. Niveles de insumos en la comparación de sistemas de producción de café .....	24
Cuadro 4. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Turrialba.....	24
Cuadro 5. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Masatepe .....	25
Cuadro 6. Variaciones de los factores que afectan la rentabilidad de los SAF evaluados.....	28
Cuadro 7. Actividades de manejo consideradas en la estructura de costos e ingresos para los SAF evaluados .....	30
Cuadro 8. Efecto del componente sombra sobre los costos de mano de obra promedio por año en SAF de Turrialba.....	33
Cuadro 9. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos de mano de obra promedio por año en SAF de Turrialba.....	33
Cuadro 10. Efecto de la sombra sobre los costos de mano de obra (USD ha <sup>-1</sup> ) promedio por año en SAF de Masatepe .....	34
Cuadro 11. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos de mano de obra (USD ha <sup>-1</sup> ) promedio por año en SAF de Masatepe.....	35
Cuadro 12. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Turrialba .....	38
Cuadro 13. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Turrialba .....	39
Cuadro 14. Contrastes de tratamientos para el costo total promedio (USD ha <sup>-1</sup> ) en SAF de Turrialba..	40
Cuadro 15. Efecto del componente sombra sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Masatepe .....	41
Cuadro 16. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Masatepe .....	41
Cuadro 17. Contrastes de tratamientos para el costo total promedio (USD ha <sup>-1</sup> ) en SAF de Masatepe	42
Cuadro 18. Costos totales de producción promedio por año (USD fan <sup>-1</sup> ) en SAF de Turrialba .....	43
Cuadro 19. Costos totales de producción promedio por año (USD fan <sup>-1</sup> ) en SAF de Masatepe .....	44
Cuadro 20. Producción acumulada de café (fan ha <sup>-1</sup> ) en sistemas agroforestales con diferentes niveles de sombra y de insumos en Turrialba, Costa Rica.....	45
Cuadro 21. Contrastes de tratamientos para la producción acumulada (USD ha <sup>-1</sup> ) en SAF de Turrialba .....	46
Cuadro 22. Producción acumulada de café (fan ha <sup>-1</sup> ) en sistemas agroforestales con diferentes niveles de sombra en Masatepe, Nicaragua .....	47
Cuadro 23. Producción acumulada de café (fan ha <sup>-1</sup> ) en sistemas agroforestales con diferentes niveles de insumos en Masatepe, Nicaragua.....	48
Cuadro 24. Efecto del nivel de insumo sobre los ingresos totales de operación promedio por año en SAF de Turrialba .....	50
Cuadro 25. Comportamiento del Valor actual neto VAN (USD ha <sup>-1</sup> ) en diferentes combinaciones de sombra y nivel de insumos en SAF de café en Turrialba. ....	52
Cuadro 26. Comportamiento del Valor actual neto VAN (USD ha <sup>-1</sup> ) en diferentes niveles de insumos en SAF de café en Masatepe.....	53
Cuadro 27. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) frente a variaciones del precio de comercialización de café orgánico en SAF de café en Turrialba .....	58
Cuadro 28. Valores de probabilidad para los distintos efectos evaluados sobre el VAN (USD ha <sup>-1</sup> ) considerando sobrepuestos de café orgánico en SAF de café en Masatepe.....	59
Cuadro 29. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) en el componente sombra frente a variaciones del precio de comercialización de café orgánico en SAF de café en Masatepe ...	59

Cuadro 30. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) en el componente Insumo frente a variaciones del precio de comercialización de café orgánico en SAF de café en Masatepe ...	60
Cuadro 31. Características de las especies de asocio – Turrialba .....	68
Cuadro 32. Características de las especies de asocio - Masatepe .....	68
Cuadro 33. Niveles de insumos en la comparación de sistemas de producción de café .....	72
Cuadro 34. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Turrialba.....	72
Cuadro 35. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Masatepe .....	72
Cuadro 34. Modelo alométrico para estimar biomasa en plantas de café .....	79
Cuadro 35. Sistemas agroforestales de café evaluados .....	79
Cuadro 36. Biomasa total y por componente de árboles del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café en Masatepe .....	83
Cuadro 37. Factor de expansión de biomasa promedio para especies utilizadas en cafetales en Masatepe, Nicaragua.....	85
Cuadro 38. Factor de expansión de biomasa promedio para especies utilizadas en cafetales en Turrialba, Costa Rica .....	86
Cuadro 39. Estadísticas descriptivas para las variables utilizadas en la estimación de biomasa aérea en las especies estudiadas .....	87
Cuadro 40. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Inga laurina.....	88
Cuadro 41. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Simarouba glauca ..	89
Cuadro 42. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Samanea saman ....	90
Cuadro 43. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Tabebuia rosea.....	91
Cuadro 44. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Terminalia amazonia y Abarema idiopoda .....	93
Cuadro 45. Modelos para estimación de biomasa de árboles en SAF de café .....	93
Cuadro 46. ANCOVA para la biomasa aérea estimada en el componente arbóreo en SAF de café en Masatepe .....	94
Cuadro 47. Estadística descriptiva de la biomasa aérea de árboles en SAF de café estudiados en Masatepe .....	95
Cuadro 48. ANCOVA para la biomasa aérea estimada en el componente arbóreo en SAF en Turrialba	95
Cuadro 49. Biomasa aérea de árboles en SAF de café estudiados en Turrialba .....	96
Cuadro 50. ANAVA para la biomasa aérea estimada en el componente café en SAF en Masatepe .....	97
Cuadro 51. ANAVA para la biomasa aérea estimada en el componente café en SAF en Turrialba .....	97
Cuadro 52. ANCOVA para la biomasa aérea total estimada en SAF de café en Masatepe.....	98
Cuadro 53. ANCOVA para biomasa aérea total estimada en SAF de café en Turrialba .....	99
Cuadro 54. ANCOVA para el carbono acumulado en la biomasa aérea total en SAF de café en Masatepe .....	100
Cuadro 55. ANCOVA para el carbono acumulado en la biomasa aérea total en SAF de café en Turrialba.....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contribución en proporción a los costos de mano de obra promedio por actividades de manejo en SAF de café en Masatepe.	31
Figura 2. Contribución en proporción a los costos de mano de obra promedio por actividades de manejo en SAF de café en Turrialba.	32
Figura 3. Distribución de los costos de producción promedio por año en SAF de café en Turrialba.	36
Figura 4. Distribución de los costos de producción promedio por año en SAF de café en Masatepe.	37
Figura 5. Producción de café para el periodo 2000-2008 bajo diferentes combinaciones de sombra en SAF en Turrialba.	47
Figura 6. Producción de café para el periodo 2000-2008 bajo diferentes combinaciones de sombra en SAF en Masatepe.	49
Figura 7. Ingresos totales (USD ha <sup>-1</sup> ) promedio por año en SAF de café en Masatepe.	51
Figura 8. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) para los SAF de café evaluados durante el periodo 2000-2008 en Turrialba.	53
Figura 9. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) para los SAF evaluados durante el periodo 2000-2008 en Masatepe.	54
Figura 10. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) frente a variaciones de la tasa de interés para los SAF evaluados en Turrialba.	55
Figura 11. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) frente a variaciones del valor del jornal para los SAF evaluados en Turrialba.	56
Figura 12. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha <sup>-1</sup> ) frente a variaciones del precio del café para los SAF evaluados en Turrialba.	56
Figura 13. Distribución diamétrica de los árboles presentes en los SAF muestreados	74
Figura 14. Aporte de componentes en la biomasa aérea por clase diamétrica para cuatro especies de asocio en cafetales.	84
Figura 15. Distribución del FEB para especies arbóreas utilizadas como sombra en SAF de café.	86
Figura 16. Relación del logaritmo de la biomasa aérea en función del dap para <i>Inga laurina</i> .	88
Figura 17. Relación de la biomasa aérea en función del dap para <i>Simarouba glauca</i> .	89
Figura 18. Relación del logaritmo de la biomasa aérea en función del logaritmo del dap para <i>Samanea saman</i> .	91
Figura 19. Relación del logaritmo de la biomasa aérea en función del logaritmo del dap para <i>Tabebuia rosea</i> .	92
Figura 20. Aporte de biomasa aérea en SAF de café en Masatepe por sombra y por nivel de insumo.	98
Figura 21. Aporte de biomasa aérea por sombra y por nivel de insumo en SAF de café en Turrialba.	99
Figura 22. Carbono acumulado en biomasa aérea por sombra y por nivel de insumo en SAF de café en Masatepe.	101
Figura 23. Carbono acumulado en biomasa aérea por sombra y por nivel de insumo en SAF de café en Turrialba.	102

## **LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS**

ANACAFE: Asociación Nacional del Café de Guatemala

COS: Carbono orgánico en el suelo

dap: Diámetro a la altura del pecho

ICAFE: Instituto del Café en Costa Rica

OIC: Organización Internacional del Café

SAF: Sistema agroforestal

IMA: Incremento medio anual

VAN: Valor Actual Neto

# 1 INTRODUCCIÓN

La producción de café (*Coffea arabica*) es considerada una de las principales actividades agrícolas del mundo, dado que alrededor de 25 millones de personas, en 51 países, dependen económicamente de esta actividad (Castro et ál. 2004). Actualmente, esta producción se encuentra en alrededor de 8.049.780 toneladas a nivel mundial; de la producción total Centroamericana en el año 2008, Costa Rica aportó el 10,2% (1.099.800 t) mientras que Nicaragua aportó el 8,8% (ICAFFE 2009).

Desde principios del siglo XVIII y a través de la historia, el café ha sido pilar fundamental de la sociedad centroamericana y ha sido considerado motor del desarrollo de la economía (ICAFFE 2009). Cuando los precios del café aumentan a nivel mundial, repercute positivamente en la reducción de la pobreza contribuyendo a mejorar el nivel de vida de miles de familias. De la misma forma, cuando los precios caen, este efecto es negativo, como sucedió en la última década durante la sobreoferta de café en el mercado mundial. Esta inestabilidad en los precios ha originado que la mayoría de las familias que utilizaban el monocultivo del café como único sistema de producción agrícola, desarrollaran estrategias de sobrevivencia como el uso de los sistemas agroforestales con el fin de evitar el abandono de sus fincas (Castro et ál. 2004).

Es conocido el gran potencial que tienen los sistemas agroforestales para contribuir al mejoramiento del ambiente y a la sostenibilidad de la producción agrícola y forestal, especialmente en fincas pequeñas (Reiche y Gómez 1993). En este sentido, la alternativa de asociar café con especies forestales ofrece la posibilidad de dar un mayor valor agregado a la tierra y obtener beneficios futuros, al aprovechar los productos y los servicios generados por los árboles (ANACAFÉ 1997). Entre estos beneficios se encuentra el potencial económico del tener un asocio de la especie forestal con la plantación de café y por otra parte la producción de servicios ambientales tal como el mantenimiento de la fertilidad del suelo, la fijación de nitrógeno, la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados (Beer et ál. 2003). Al establecer sistemas agroforestales existe un aumento en la cobertura vegetal, lo que favorece la existencia de gran cantidad de biomasa y beneficia la producción de hojarasca que mantiene la materia orgánica del suelo, por lo cual estos sistemas tienen un gran potencial para fijar y almacenar carbono. De la misma forma

estos sistemas contribuyen a mitigar el cambio climático global al almacenar carbono en la vegetación y en el suelo (Salinas y Hernández 2008).

En Centroamérica, la producción de café se realiza bajo tres sistemas de manejo: el tradicional, el semi-tecnificado y el tecnificado, los cuales se diferencian por la intensidad de uso de agroquímicos. El sistema tecnificado se caracteriza por el uso intensivo de agroquímicos y por la contaminación hídrica que se produce al momento de realizar el beneficiado del grano, generando efectos negativos sobre el medio ambiente. Dicho sistema ha sido cuestionado por diversos sectores (ambientalistas, entidades bancarias, grupos científicos e incluso consumidores finales), ya que el modelo no es viable para caficultores de fincas pequeñas, por sus elevados costos en la compra de insumos (Haggar y De Melo 2001). El sistema de alta tecnología de producción ha logrado rendimientos eficientes para grupos selectos de caficultores, el principal inconveniente, es que sacrifica procesos ecológicos con el objetivo de triplicar o a veces cuadruplicar el rendimiento del café.

Otro de los sistemas de producción que es implementado a menor escala es la caficultura orgánica, que es amigable con el medio ambiente y puede llegar a recibir sobrepagos en el mercado, sin embargo, solo ha sido establecida en un pequeño porcentaje de la población (Haggar y De Melo 2001). El sistema orgánico se diferencia del café tecnificado no solo por la ausencia de insumos químicos sino por el uso de los árboles que proporcionan un aumento en la disponibilidad de nutrientes (Fischersworing y Rosskamp 2001), así como también en el uso de controles biológicos en el caso del manejo de plagas y el uso de mano de obra para el control de malezas (Merlo 2007).

El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) junto con la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), la Universidad Nacional Agraria (UNA), el Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA), la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto del Café en Costa Rica (ICAFE) establecieron en el año 2000 dos ensayos de campo con el fin de identificar las interacciones ecológicas para evaluar la sostenibilidad de los sistemas anteriormente mencionados y para establecer la base del desarrollo de una caficultura sostenible (Haggar y De Melo 2001). El primer ensayo fue establecido en Turrialba, Costa Rica, en el cuál se estudian las interacciones entre variados tipos de sombra y tipos de insumos en diferentes niveles, para el manejo de plagas y el manejo de la nutrición de los cafetos. En este ensayo se establecieron como árboles de asocio con el café las especies

*Terminalia amazonia*, *Abarema Idiopoda* y *Erythrina poeppigiana* que poseen diferentes características físicas y de uso. Según Merlo (2007) no existen estudios sobre estos socios en las fincas en la zona de Turrialba, por lo que es primordial establecer los beneficios tanto económicos como ecológicos de estos sistemas, que permitan generar datos primordiales para la promoción de una caficultura sostenible. Con la misma finalidad se estableció un segundo ensayo en Masatepe, Nicaragua, donde se establecieron como árboles de socio las especies *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, *Samanea saman* e *Inga laurina* en diferentes combinaciones.

Se han realizado estudios en sistemas agroforestales que buscan estimar el carbono fijado como principal servicio ambiental en especies usadas comúnmente como sombras en cafetales (Avila 2000, Suarez 2002, Ruiz 2002). Pocos estudios han estado dirigidos a nuevas especies en socio, por esto es importante determinar los beneficios tanto ambientales como económicos de estos sistemas, es decir, estimar la capacidad de fijar carbono que posee cada sistema agroforestal y su valor económico por el servicio ambiental así como también estimar la rentabilidad de dichos sistemas. De esta forma, determinar así el sistema que produce el máximo beneficio productivo, ecológico y financiero.

## **1.1 Objetivos del estudio**

### ***1.1.1 Objetivo general***

Evaluar la fijación de carbono y la rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- Estimar el efecto del manejo agronómico (convencional y orgánico) en la rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café.
- Cuantificar la fijación de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales con café (bajo manejos convencionales y orgánicos).

## **1.2 Hipótesis del estudio**

- El tipo de manejo agronómico (convencional y orgánico) afecta significativamente la rentabilidad de los sistemas agroforestales con café.
- El tipo de manejo agronómico (convencional y orgánico) afecta significativamente el almacenamiento y fijación de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales con café.

## **2 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.1 Tendencias de mercado del café**

En diferentes estudios, el acceso al mercado, la estabilidad de precios, el acceso al crédito, la asistencia técnica, el fortalecimiento organizacional y la participación en el debate internacional han sido identificados como necesidades principales por parte de los productores cafetaleros, siendo el precio adecuado y estable el aspecto que más preocupa a los productores (Oxfam 2005). Los precios alcanzados en diciembre de 2008 confirmaron la tendencia al descenso que se registra en el mercado del café desde septiembre de 2008. El promedio mensual del precio indicativo compuesto de la Organización Internacional del Café (OIC 2009) fue de 103,07 centavos de dólar estadounidense por libra frente a 107,88 centavos en noviembre, lo que representa un descenso del 4,5%. Por otra parte, las exportaciones efectuadas por todos los países en noviembre fueron de 426 mil toneladas, que corresponde a los once primeros meses del año 2008 (enero a noviembre de 2008) representando un descenso del 1,3% comparado con el mismo período del año anterior (OIC 2009).

### **2.2 La producción de café y su relación con el medio ambiente**

La forma en que se cultiva y procesa el café reviste gran importancia ambiental, tanto a nivel local como internacional. Existen cuatro temas íntimamente relacionados con el sector cafetalero y el medio ambiente: la biodiversidad y la conservación de los ecosistemas forestales, el uso de agroquímicos, la contaminación del agua a causa del procesamiento del café y la calidad del suelo. Tomando en cuenta la extensión de la tierra cafetalera en las diferentes regiones, el efecto ambiental del café es muy importante para el medio ambiente centroamericano (Masera et ál. 1999).

#### ***2.2.1 Técnicas de producción del café***

El café es nativo de regiones tropicales de África y evolucionó como especie leñosa del sub-bosque. Las primeras plantaciones de café fueron, por lo tanto, conducidas bajo condiciones de sombra mediante el asocio con árboles de mayor altura con el fin de simular el hábitat natural del cafeto. Sin embargo, en muchas situaciones las plantaciones de café a plena

exposición solar pueden presentar una productividad superior que aquellas bajo sombra (Beer et ál. 1998). Así, hace más de un siglo que se discute si la sombra favorece o no a las plantaciones de café en las diferentes regiones productoras del mundo. El potencial de producción, la competencia por el agua y los nutrientes, y la incidencia de plagas y enfermedades son aspectos importantes en esa controversia (Beer et ál. 1998).

En sistemas de monocultivo el café requiere por lo general gran cantidad de insumos con el fin de maximizar la producción, lo que además se asocia con la degradación del suelo y la contaminación ambiental. La producción de café a pleno sol exige mayores costos para su manejo, y por lo tanto, el productor está sujeto a más riesgos debido a la alta variabilidad de los costos de producción y a la inestabilidad del precio del café en el mercado internacional (DaMatta y Rodríguez 2007).

Se puede considerar que la ventaja potencial de las plantaciones de café a pleno sol comparada con las plantaciones arborizadas o bajo sombra, en términos de producción, puede depender de: a) las condiciones edafológicas y climáticas óptimas o más apropiadas para la caficultura; y b) la degradación del ambiente, especialmente vía erosión del suelo y residuos de pesticidas, que pueden reducir seriamente la productividad y la calidad del ambiente (Beer et ál. 1998).

### **2.3 Los sistemas agroforestales (SAF)**

En Centroamérica en los últimos años, se han venido implementando los sistemas agroforestales dado que tienen un gran potencial para contribuir a la sostenibilidad de la producción agrícola y forestal y al mejoramiento del ambiente (Reiche y Gómez 1993). Según Somarriba (1990), los sistemas agroforestales se definen como formas de cultivo múltiple que satisfacen tres condiciones básicas: 1) existen al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente, 2) al menos uno de los componentes es una leñosa perenne, y 3) al menos uno de los componentes es una planta manejada con fines agrícolas (incluyendo pastos).

Los sistemas agroforestales pretenden optimizar el uso de recursos (renovables) e incrementar la producción por unidad de superficie, y son considerados una alternativa de sostenibilidad ecológica y económicamente viable (ANACAFÉ 1998).

## **2.4 Rentabilidad en los sistemas agroforestales**

En el caso de los SAF de café, la especie leñosa en asocio con el cultivo de café puede generar ingresos adicionales al obtener beneficios futuros. El aprovechamiento de la madera o de los productos no maderables, y los servicios ambientales generados por el SAF de café son algunos de estos beneficios (ANACAFÉ 1997).

Dado que las fincas cafetaleras son empresas cuyo objetivo final es producir eficientemente y generar utilidades, de forma amigable con el medio ambiente que aseguren la sostenibilidad de la actividad, es necesario generar criterios financieros que contribuyan a determinar las opciones que generan mayor rentabilidad. La rentabilidad financiera es definida como el retorno a la inversión, es decir, muestra la capacidad que tiene un sistema productivo de generar beneficios económicos en relación a los costos de implementación y sostenimiento del sistema.

### ***2.4.1 Análisis de inversiones en los SAF***

Un análisis de inversiones examina los costos y beneficios a precios de mercado a lo largo de la vida de un proyecto en particular y determina sus relaciones en términos de indicadores financieros que toman en cuenta los largos plazos de inversión en los cuales se dan cambios en el valor del dinero (Zea 2003). Además, proporciona información sobre cuando se necesitaran los fondos y cuando se espera recibir los ingresos (análisis *ex-ante*), o muestra cuando se ejecutaron las actividades productivas y el flujo real de costos e ingresos, durante el periodo de análisis y el balance final (análisis *ex-post*) (Gómez y Quirós 2001).

El análisis de inversiones de largo plazo ayuda a determinar la sostenibilidad de proyectos de naturaleza forestal y agroforestal, partiendo de la base que estos son sostenibles sí generan utilidades mínimas que motivan a los inversionistas a establecer y adoptar los sistemas de producción por un tiempo indefinido; con lo cual se generan indicadores que pueden ser comparables con el costo de oportunidad de la tierra y con el rendimiento de otras actividades productivas accesibles a la zona (Zea 2003). Además, ayuda a identificar sistemas de manejo que pueden ser rentables o no, a partir de los cuales se puede promocionar su implementación o buscar alternativas rentables de manejo con mejores oportunidades de mercado.

En el mismo sentido, el análisis de inversiones indica al inversionista la factibilidad de implementar un sistema productivo teniendo en cuenta que un proyecto agroforestal tiene un horizonte de tiempo significativo, por tanto, el procedimiento de interés influye directamente sobre la rentabilidad. Por otro lado, existe la necesidad de cuantificar los impactos económicos de los usos alternativos del suelo con la finalidad de establecer las mejores alternativas económicas para el inversionista y garantizar la sostenibilidad del sistema productivo seleccionado (costo de oportunidad) (Gómez y Quirós 2001).

## **2.5 Los sistemas agroforestales de café como proveedores de servicios ambientales**

Los sistemas agroforestales (SAF) tienen un gran potencial para contribuir al mejoramiento del ambiente y a la sostenibilidad de la producción agrícola y forestal. Según Beer et ál. (2003), las principales funciones de servicios ambientales provistos por estos sistemas son:

- Mantenimiento de la fertilidad del suelo/reducción de la erosión mediante insumo de materia orgánica al suelo, fijación de nitrógeno y reciclado de nutrientes.
- Conservación del agua (en cantidad y calidad) por vía de mayor infiltración y escurrimiento de superficie reducido que podría contaminar los cursos de agua.
- Captura del carbono, haciendo hincapié en el potencial de los sistemas silvopastoriles.
- Conservación de la diversidad biológica en los paisajes fragmentados.

Los SAF en diversos grados, según el manejo pueden mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos. De hecho, la agroforestería incentiva prácticas sostenibles que utilizan insumos orgánicos de la finca que mejoran la calidad de los suelos y contribuyen a un mejor desarrollo de la planta, aumento de la materia orgánica y el ciclaje de nutrientes, lo que a su vez contribuye a almacenar bancos de carbono que son estables por décadas o siglos (Mena 2008).

Los ecosistemas arbóreos (bosques, SAF, etc.) retienen el carbono en la biomasa vegetal, en la materia orgánica en descomposición y en el suelo por lo que desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono. El carbono es intercambiado de manera natural entre

los ecosistemas y la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión.

### ***2.5.1 La fijación de carbono como un servicio ambiental***

Las reservas de carbono en varias partes del mundo enseñan que cantidades significativas pueden ser removidas de la atmósfera en los próximos 50 años si los sistemas agroforestales son implementados a escala global (Albrecht y Kandji 2003).

En los sistemas agroforestales, la fijación de carbono es un proceso dinámico y se puede dividir en fases: cuando se establecen muchos sistemas probablemente son fuentes de gases de efecto invernadero (pérdida de carbono y nitrógeno de la vegetación y del suelo). Luego sigue una fase rápida de acumulación y período de maduración cuando el carbono es almacenado en los troncos, raíces y en el suelo, y al final del periodo de rotación, cuando los árboles son cosechados y en la tierra se vuelve a cultivar (sistemas secuenciales), parte del carbono será lanzado de nuevo a la atmósfera (Mena 2008). Por lo tanto, un secuestro efectivo de carbono solo puede ser considerado si hay un balance positivo después de varias décadas al compararlas con una reserva de carbono inicial (Albrecht y Kandji 2003).

El almacenamiento de carbono depende de la especie arbórea y la densidad de siembra, la materia orgánica presente en el suelo, la edad de los componentes, el tipo de suelo, las características del sitio (factores climáticos) y el manejo silvicultural al que se vea sometido el SAF (Segura 1999, Dzib 2003). Para el caso de los SAF es conocido que el componente arbóreo provee la mayor cantidad de biomasa dentro del sistema (Dzib 2003), por ello es necesario realizar una estimación de la biomasa aérea y en función a ella estimar la cantidad de carbono que puede almacenar el sistema. Lo anterior, con el objetivo de estimar un pago por el servicio ambiental que genera el SAF considerando el secuestro de carbono como el principal servicio ambiental derivado en el sistema.

### ***2.5.2 Crecimiento de las especies forestales***

El crecimiento de un árbol es considerado como el aumento de tamaño en el tiempo expresándose en términos del diámetro, altura, área basal o volumen y es producto de los procesos de anabolismo (síntesis) y catabolismo. El primer proceso captura la energía

necesaria para producir tejidos y para cumplir con las funciones del organismo. El segundo mantiene los tejidos y en este proceso consume y libera parte de la energía mediante la respiración (Louman et ál. 2001).

El crecimiento diamétrico (sin incluir la corteza), es el incremento que presenta el árbol cuando se acumulan capas de xilema alrededor del eje central del mismo. Este puede ser continuo o periódico dependiendo del ambiente climático y la genética de la especie. A la magnitud del crecimiento se denomina incremento. Todo crecimiento implica un estado inicial mensurable y cambios en el ese estado con respecto al tiempo. De allí se puede hablar del incremento corriente anual (incremento del último año de medición, ICA) y el incremento medio anual (incremento promedio por año desde el año cero, IMA). Dicho crecimiento está determinado por factores internos y externos. Los internos son principalmente genéticos y fisiológicos; los externos son fundamentalmente climáticos, edáficos y de competencia con los demás árboles o cultivos asociados (Louman et ál. 2001).

#### **2.5.2.1 Modelos de crecimiento**

Un modelo de crecimiento, es una representación de una realidad a través de funciones, ecuaciones o gráficas. Se consideran herramientas prácticas en la transformación de datos empíricos y conocimientos silviculturales, en información clave para realizar análisis financieros y programar el manejo de los sistemas forestales.

Al modelar el crecimiento de un árbol, representamos el desarrollo de ciertas variables (diámetro, altura, área basal, volumen) en función de los factores que influyen en estas (edad, densidad de árboles, condición inicial del sistema, especie, clima, entre otros). Además, mediante las curvas de crecimiento podemos observar la gráfica de tamaños acumulados y representar la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el período de observación (Louman et ál. 2001).

#### **2.5.3 *Comportamiento de la biomasa en ecosistemas***

La biomasa de una comunidad de plantas se define como su masa seca total, considerándose dentro de esta, a la biomasa aérea como el compartimiento más importante en los proyectos de captura de carbono, tanto en peso como en su tasa de cambio. Su acumulación se produce cuando la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado en el proceso de fotosíntesis, es

exactamente igual a la cantidad de energía liberada durante la respiración (punto de compensación de la luz) y va hasta un límite en el cual un aumento en la intensidad de la luz, no ocasiona un aumento en la tasa fotosintética (punto de saturación lumínica). Ambos puntos dependen de la especie, el tipo de follaje del árbol, condiciones ambientales, nivel de nutrientes disponibles y potencial hídrico (Brown 1997).

### **2.5.3.1 Metodologías para estimar biomasa.**

Según Segura y Kanninen (2002), para estimar la biomasa sobre el suelo se pueden emplear dos métodos: los métodos directos (destructivos) y los métodos indirectos, que generalmente se aplican cuando los árboles son de grandes dimensiones. En los dos casos, los valores obtenidos se extrapolan a una hectárea. Los métodos destructivos incluyen mediciones en campo, cosecha y toma de muestras de la totalidad de la vegetación, teniendo en cuenta algunos criterios de evaluación. Aunque este método es más costoso y requiere de mayor tiempo, arroja resultados de alta confiabilidad, en comparación con el segundo método. Entre los métodos indirectos para estimar biomasa, se encuentra el uso de modelos de biomasa específicos para cada especie, donde los valores de inventarios forestales como diámetro (dap) y altura, se transforman a términos de biomasa con la ayuda de modelos generales.

Andrade e Ibrahim (2003) aconsejan emplear modelos específicos para cada especie y que hayan sido construidos bajo condiciones similares a las del lugar donde se quieran aplicar, principalmente en términos de tamaño de árboles y densidad arbórea. Dentro de los estudios de biomasa, los sistemas radiculares representan la biomasa bajo el suelo y se consideran como otro sumidero de carbono. Esta medición de raíces representa un trabajo más amplio y arroja por lo general, niveles moderados de precisión, debido a la amplia variabilidad en la distribución de las raíces en el suelo (Andrade e Ibrahim 2003). Por esta razón, algunos autores recomiendan utilizar valores reportados en literatura para bosques tropicales, donde el porcentaje de biomasa radicular puede encontrarse en un rango entre 11 y 54%, aportando en promedio 18% de la biomasa total (Sierra et ál. 2003).

### **2.5.4 Contenido de carbono en la biomasa**

En los ecosistemas forestales y agroforestales, el carbono se acumula en cuatro componentes: biomasa arriba del suelo (árboles y vegetación herbácea), biomasa abajo del

suelo (sistema radicular), hojarasca y material vegetal en descomposición y por último el suelo (Segura y Kanninen 2002). La estimación del almacenamiento de carbono se realiza a partir de los inventarios de la biomasa total del ecosistema, considerando todos sus componentes (componente leñoso, raíces, hojarasca y suelo). Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5 de la biomasa total en peso seco (IPCC 1996).

## **2.6 Valoración económica del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono**

Los servicios ambientales de fijación de carbono plantean diferencias en términos de su valoración. En el caso de fijación neta de carbono, se valora la acción de remover partículas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que están actualmente en la atmósfera y su valor se estima a través del costo de mitigación de remover esas partículas. Para el servicio de almacenamiento de carbono se considera un precio por evitar que esas toneladas de carbono pasen o se liberen a la atmósfera, es decir, se paga por evitar el cambio de uso de suelo y sus emisiones potenciales o por revertir usos de suelo que fijan poca cantidad.

Los sistemas agroforestales producen bienes y servicios ambientales que generalmente no son considerados como bienes privados y no son valorados dentro de un mercado, por esta razón existen métodos de valoración económica que permiten determinar el valor en términos económicos que la sociedad le da a un servicio ambiental y calcular los beneficios y costos de los efectos dados por un determinado uso. Estos métodos se clasifican en métodos de valoración económica directos e indirectos. Los métodos de valoración contingente, costo de viaje y métodos de valoración hipotética, son considerados métodos indirectos ya que no utilizan precios de mercado sino consideran la voluntad de pago por el bien o servicio. Los métodos directos utilizan precios de mercado, tales como cambio en la productividad, costo de reemplazo, costo de sustitución, costo efectividad, costo de oportunidad y costos preventivos (Segura 1999).

### **2.6.1 Costo de oportunidad**

Según el Banco Mundial (1994), el costo de oportunidad es entendido como el beneficio al que se renuncia al utilizar un recurso escaso para una finalidad, en lugar de usarlo en otra actividad de mayor rentabilidad. Este recurso usualmente se encuentra sin precio o fuera del mercado, por lo tanto su costo de oportunidad puede aproximarse utilizando el ingreso dejado de percibir por otros usos del recurso (Suarez 2002). Este costo permite generar compensaciones a los productores que cambian de sistemas rentables pero que no son amigables con el medio ambiente a sistemas menos rentables con mayor producción de servicios ambientales, considerando en este caso, la fijación de carbono como el principal servicio ambiental derivado de los sistemas agroforestales.

## **3 BIBLIOGRAFIA**

- Albrecht, A.; Kandji, S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99 (1-3): 15-27. Consultado en línea. Disponible en: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6T3Y8KFGC7&\\_user=10&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=4929bca92e9feaecc64afd4e239d05b](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6T3Y8KFGC7&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=4929bca92e9feaecc64afd4e239d05b)
- ANACAFÉ (Asociación nacional de café en Guatemala). 1997. Importancia de la sombra en el cafetal. *Agroforestería en las Américas* 4(13): p.25-27.
- ANACAFÉ (Asociación nacional de café en Guatemala). 1998. Manual de Caficultura. 318p.
- Andrade, H. e Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de Carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10(39-40): p.109-116.
- Avila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 99 p.
- Banco Mundial. 1994. Glosario anotado de términos basados en el análisis Económico de Proyectos Agrícolas. Baltimore, US, John Hopkins University Press. 134 p.

- Beer, J.; Muschler, D.; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*. 38: 139-164.
- Beer, J.; Harvey, C.A.; Ibrahim, I.; Harmand, J.; Somarriba, E.; Jiménez, F. 2003. Funciones de servicio de los sistemas de agroforestería. XII congreso Forestal Mundial, Quebec, Canadá. 9 p. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS20-S.HTM>
- Brown, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. Roma: FAO, Montes 134, 1997. 55 p. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W4095E/W4095E00.htm>
- Castro, F; Montes, E; Raine, M. 2004. Centroamérica la crisis cafetalera: efectos y estrategias para hacerle frente. San José, CR, Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 23. 128 p.
- DaMatta, F; Rodriguez, N. 2007. Sustainable production of coffee in agroforestry systems in the Neotropics: an agronomic and ecophysiological approach. *Agronomy colomb* 25(1):113-123.
- Dzib Castillo, B. 2003. Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 124 p.
- Fischersworing, B.; y Roskamp, R. 2001. Guía para la caficultura ecológica. GTZ Alemania. 153p.
- Gómez, M. y Quirós, D. 2001. *In*: Louman, B.; Quirós, D.; Nilsson, M. 2001. Eds. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Serie técnica. Manual técnico no. 46. CATIE.265p.
- Haggar, J; De Melo Virginio Filho, E. 2001. Calidad, ecología y diversificación. Boletín unidad de comunicación. CATIE.
- ICAFFE (Instituto del café de Costa Rica). 2009. Cifras mundiales USDA-FAS. Consultado en línea. Disponible en: [http://www.icafe.go.cr/sector\\_cafetalero/estadsticas/Cifras%20mundiales%20USDA-FAS.xls](http://www.icafe.go.cr/sector_cafetalero/estadsticas/Cifras%20mundiales%20USDA-FAS.xls)

- IPCC (Intergovernmental Panel of Climatic Change). 1996. Report of the twelfth session of the intergovernment panel on climatic change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Ciudad de México.
- Louman, B.; Valerio, J.; Jiménez W. 2001. In: Louman, B.; Quirós, D.; Nilsson, M. 2001. Eds. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Serie técnica. Manual técnico no. 46. CATIE.p. 68-69.
- Masera, O; Astier, M; López-Ridaura, S. 1999. Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales: El marco de evaluación MESMIS. MX, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada. 109 p.
- Mena, V. 2008. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 88 p.
- Merlo, M. 2007. Comportamiento productivo del (*Coffea arabica* var. caturra), el poró (*Erythrina poeppigiana*), el amarillón (*Terminalia amazonia*) y el cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) en sistemas agroforestales bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 92p.
- Organización Internacional del Café (OIC). 2009. Informe sobre el mercado del café diciembre del 2008. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.ico.org/>
- Oxfam (Comité Oxford de ayuda contra el hambre). 2005. La crisis del café continua: evaluación de la situación y recomendaciones de políticas para reducir la pobreza en el sector cafetalero. EUA, 9 p.
- Reiche, C; Gómez, M. 1993. Costos de establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Costa Rica. In Semana científica CATIE (8-10 dic 1993). Memorias Ed. Rodolfo Salazar. Turrialba. CR. (2). p.79-81.

- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguas, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 111p.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 120 p.
- Segura, M. y Kanninen, M. 2002. Inventarios para estimar Carbono en ecosistemas forestales tropicales. *In*. Orozco, L. y Brumér, C. Eds. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba: CATIE. p.202-222.
- Sierra, C.; Del Valle, J.; Orrego, S. 2003. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. *In*: Orrego S, S.A.; Valle A, J.I. del; Moreno H, F.H.; eds. Medición de la captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. p.169-188.
- Salinas, Z; Hernández, P. 2008. Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. CATIE, Turrialba (Costa Rica). 220p.
- Somarriba, E. 1990. ¿Qué es agroforestería? Boletín informativo sobre recursos naturales renovables. El chasqui (24) CATIE. p.1-10.
- Suarez, D. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café de la Comarca Yassica Sur, Matagalpa Nicaragua. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 117 p.
- Zea, Y. 2003. Análisis económico del manejo forestal sostenible: Implicaciones de la aplicación del monitoreo ecológico en la rentabilidad del manejo en bosques con alto valor de conservación bajo certificación, Región Autónoma del Atlántico Norte, Nicaragua. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 97 p.

## 4 ARTÍCULO 1: RENTABILIDAD FINANCIERA DE SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ

### 4.1 Introducción

El cultivo del café juega un papel muy importante debido a que un gran número de productores con amplia tradición en el cultivo dependen económicamente de esta actividad (Castro et ál. 2004). Con la inestabilidad de precios sufrida en años anteriores se provocó que muchos de ellos hayan abandonado o eliminado sus cafetales con el fin de encontrar opciones más rentables. Es por esto que en los últimos años, en Centroamérica se ha venido reduciendo el área dedicada a la caficultura, es tal el caso de Costa Rica que en el año 2001, el área correspondiente a sistemas de producción de café fue estimada en 113.386 ha, mientras que en el año 2007, el ICAFE reportó aproximadamente 90.000 ha dedicadas a esta actividad productiva, mostrando una tasa promedio de eliminación de 3898 ha año<sup>-1</sup> (De Melo 2009).

Los sistemas agroforestales fueron empleados como estrategia para optimizar el uso de recursos y es conocido que estos sistemas generan servicios ambientales que mejoran la conservación de los recursos naturales aparte del beneficio económico producido por el cultivo en asocio. En el caso de los sistemas agroforestales con café, además del ingreso por la venta de café, se presentan ingresos adicionales por la explotación de los productos de los árboles utilizados como sombra tales como frutos, madera o el uso de leña como carbón vegetal (Beer et ál. 1998),

El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) junto con la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), la Universidad Nacional Agraria (UNA), el Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA), la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto del Café en Costa Rica (ICAFE) establecieron en el año 2000 dos ensayos de campo con el fin de identificar las interacciones ecológicas para evaluar la sostenibilidad de los sistemas anteriormente mencionados y para establecer la base del desarrollo de una caficultura sostenible (Hagggar y De Melo 2001). El primer ensayo fue establecido en Turrialba, Costa Rica, en el cuál se estudian las interacciones entre variados tipos de sombra y tipos de insumos en diferentes niveles, para el manejo de plagas y el manejo de la nutrición de los cafetos. En este ensayo se establecieron como árboles de asocio con el café las especies *Terminalia amazonia*, *Chloroleucon eurycyclum* (*Abarema Idiopoda*) y *Erythrina*

*poepiggiana*, que poseen diferentes características físicas y de uso. Con la misma finalidad se estableció un segundo ensayo en Masatepe, Nicaragua, donde se establecieron como árboles de asocio las especies *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, *Samanea saman* e *Inga laurina* en diferentes combinaciones.

Se han realizado diferentes estudios que buscaban cuantificar o estimar la producción de servicios ambientales en sistemas agroforestales pero dichos estudios han dejado de lado su importancia económica, es por esto que en este estudio se busca establecer los beneficios económicos de estos sistemas, para con esta información, generar datos primordiales para la promoción de una caficultura sostenible.

## **4.2 Objetivos**

- Estimar y comparar la rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café bajo manejos convencionales y orgánicos.
- Estimar los costos de mano de obra y de uso de agroquímicos bajo los distintos sistemas.
- Realizar comparaciones de rendimiento financiero bajo distintos escenarios considerando sobreprecio en la producción orgánica.

## **4.3 Hipótesis**

El tipo de manejo agronómico (convencional y orgánico) afecta significativamente la rentabilidad de los sistemas agroforestales con café.

## **4.4 Materiales y métodos**

### ***4.4.1 Ubicación del sitio de estudio***

La investigación se realizó en dos ensayos establecidos con una visión a largo plazo (20 años), para evaluar las interacciones agroecológicas en diferentes sistemas agroforestales en café. El primer ensayo fue establecido en un área de 9,2 ha de la finca experimental del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicado en el cantón de

Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica. El sitio del ensayo está localizado en el sector Bonilla 2, con las siguientes coordenadas 9° 53' 44'' N, 83° 40' 7'' O, con una elevación de 685 m y precipitación aproximada de 2600 mm año<sup>-1</sup>.

El segundo ensayo se estableció en el área del Centro de Capacitación y Servicio Regional del Pacífico de Nicaragua (Jardín Botánico) de la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), con coordenadas geográficas de 11° 54' N y 86° 09' O a una altitud de 685 m, con precipitación anual de 1400 mm, y temperatura promedio de 24 °C y una humedad relativa de 70-80% (Herrera 2001). Este experimento consiste en tres repeticiones, las dos primeras fueron establecidas en el año 2000 en la zona anteriormente descrita y la tercera repetición fue establecida en el año 2001 en áreas del Centro Experimental de Campo Azules (CECA), propiedad del Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA) con coordenadas geográficas 12° 19' N y 86° 04' O, a una altitud de 455 m; ambos sitios están ubicados en el Municipio de Masatepe, Departamento de Masaya, Nicaragua.

#### **4.4.2 Suelos y zona de vida**

Los suelos del ensayo de Turrialba se caracterizan como aluviales mixtos, Ultisol e Inceptisol (Merlo 2007), presentan problemas de drenaje y se clasifican como *Typic Endoaquults* y *Typic Endoaquepts*. En Masatepe, los suelos son predominantemente Andisoles clasificándose como *Humic Durustand* y *Humic Haplustand*, con presencia de una capa de material volcánica cementada (conocida como tapeltate) a profundidades que varían de 15 cm a 1 m (Soto et ál. 2006). Según la clasificación de Holdrige, el ensayo en Turrialba se encuentra en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano (bmh-P), mientras que el ensayo en Masatepe se encuentra en Bosque Húmedo Premontano (bh-P).

##### **4.4.2.1 Turrialba**

Se establecieron como árboles de asocio para el café las especies *Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda* (también conocida como *Chloroleucon eurycyclum*) y *Erythrina poeppigiana*, que poseen diferentes características de copa y uso (Cuadro 1). El ensayo consiste en lotes de café caturra plantado a 2 × 1 m, con las especies de sombra plantadas a 6 × 4 m. Los tratamientos de sombra incluyen café a pleno sol y diferentes combinaciones de árboles para formar un gradiente de fenología y forma de dosel.

*Cuadro 1. Características de las especies de asocio – Turrialba*

<i>Especies</i>	<i>Fenología</i>	<i>Forma dosel</i>	<i>Fijador-N</i>	<i>Uso</i>
<i>Terminalia amazonia</i>	Perennefolia	Alto estrecho	No	Madera
<i>Abarema Idiopoda</i>	Perennefolia	Alto abierto	Sí	Madera
<i>Erythrina poeppigiana</i>	Perennefolia	Bajo estrecho	Sí	Servicio

#### 4.4.2.2 Masatepe

Se establecieron las especies *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, *Inga laurina* y *Samanea saman*, que son diferentes en sus características fenológicas, de copa y uso (Cuadro 2). Los árboles fueron plantados a  $4 \times 3,75$  m, luego raleados el 50% de la densidad inicial a los 5-6 años. Además se realizaron podas anuales de formación y para regulación de sombra. Al igual que en Turrialba, los tratamientos de sombra incluyen café a pleno sol y diferentes combinaciones de árboles para formar un gradiente de fenología y forma de dosel.

*Cuadro 2. Características de las especies de asocio - Masatepe*

<i>Especies</i>	<i>Fenología</i>	<i>Forma dosel</i>	<i>Fijador-N</i>	<i>Uso</i>
<i>Simarouba glauca</i>	Perennifolia	Alto estrecho	no	Madera
<i>Tabebuia rosea</i>	Caducifolia	Alto estrecho	no	Madera
<i>Samanea saman</i>	Caducifolia	Alto abierto	sí	Madera
<i>Inga laurina</i>	Perennifolia	Bajo abierto	sí	Servicio

##### 4.4.2.2.1 Características de las especies de árboles como sombra.

En los experimentos se establecieron diferentes especies de árboles de tipos leguminosos y maderables, que se describen a continuación:

***Inga laurina* (Sw.) Willd. (Guaba, guabillo y cuanjiniquil); Familia: Leguminosae Mimosoideae.** La especie *Inga* sp. es apta y ampliamente usada en sistemas de finca donde se requieren árboles de sombra. Este árbol se usa principalmente como sombra para café, pero también en diversos SAF debido a su fácil germinación por semillas, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos, incluyendo los ácidos, producción de mantillo de lenta descomposición, lo que mejora el control de malezas, la liberación lenta de nutrientes y la conservación de la humedad del suelo. También tiene la posibilidad de ser combinada con otras especies para mejorar y conservar la diversidad de

especies. También se usa en lugares con estaciones marcadas de hasta seis meses secos, típicos en la zona del Pacífico Centroamericano (Cordero et ál. 2003).

***Simarouba glauca* DC (acetuno, aceituno, negrito): Familia: Simaroubaceae.** Es un árbol de mediano a grande, que alcanza 25-27 m de altura y un dap de 40-50 cm, a menudo con un fuste cilíndrico limpio hasta los primeros 9 m, de copa estrecha, corteza fisurada y de color pardo amarillento a grisáceo. Crece rápido y se adapta a una gran variedad de ambientes. Es un árbol del dosel medio que es usado principalmente en restauración ecológica y plantaciones de enriquecimiento del bosque natural, así como también como sombra para café en Nicaragua y El Salvador (Cordero et ál. 2003). Estos autores indican que el crecimiento anual en plantaciones establecidas en Mateare, Managua, Nicaragua (bosque seco), los incrementos medios anuales (IMA) en dap han sido de 1,2 a 2,0 cm y en altura de 0,8 a 1,8 m. En ensayos en Honduras y Guatemala los resultados de crecimiento fueron bajos, pues el IMA fue de 0,3 m en altura, en un sitio de clima similar al del ensayo de Nicaragua, sugiriendo que se debe prestar atención en la plantación y manejo para obtener el potencial que esta especie puede ofrecer (Cordero et ál. 2003).

***Tabebuia rosea* (Bertol.) DC (roble sabanero, macuelizo, falso roble) Familia: Bignoniaceae.** Se caracteriza por ser un árbol caducifolio de porte mediano a grande, hasta 28-37 m de altura, con 50-100 cm de dap. El árbol tiene una copa ancha, que puede ser cónica o irregular con follaje abierto, liviano. La corteza es gris oscura, escamosa con fisuras verticales. Se emplea en plantaciones y ensayos de enriquecimiento, bajo sistemas silvopastoriles, linderos, como sombra ornamental o sombra para café, en proyectos de restauración ecológica en zonas secas, es fuente de alimento y albergue de animales (Cordero et ál. 2003).

Según Cordero et ál. (2003), en parcelas de 3 a 5 años de edad en un rango de sitios en América Central (bosque seco, bosque seco premontano y bosque lluvioso), el promedio de crecimiento varió entre: 0,8 y 2,6 cm año<sup>-1</sup> en dap, 0,7-2,2 m año<sup>-1</sup> en altura. La madera es muy fácil de secar, y se parece en fortaleza a la de teca (densidad 0,48-0,57 g cm<sup>-3</sup>). Cabe resaltar que esta especie no ha sido usada muy comúnmente en plantaciones puras debido a la tendencia del fuste a bifurcar en los primeros años.

***Samanea saman* (Jacq.) Merrill (genízaro, cenizaro, guachapali, carrito negro)**

**Familia: Leguminosae Mimosoideae.** Árbol muy grande desde 25-30 m de altura y hasta 45-50 m, con un tronco corto de hasta 2-3 m de dap. De copa grande y redondeada, tienen la capacidad de fijar nitrógeno, crecen a campo abierto por lo que provee sombra a una amplia área. Posee corteza rugosa y de color pardo grisácea, con líneas verticales. Su madera es resistente y bastante ligera (0,42-0,64 g cm<sup>-3</sup>) (Cordero et ál. 2003).

Estos árboles normalmente se encuentran en fincas como individuos grandes aislados en potreros, donde se mantienen por la sombra de su enorme copa, el forraje de las vainas y con el tiempo la madera de aserrío, además es ideal para árbol de sombra, ya que sus folíolos parecidos al helecho, se cierran por la noche, lo que permite que el agua pase a través hasta la cubierta herbácea a sus pies. Sin embargo, al extenderse tanto, la especie no es apta para plantaciones o pequeñas plantaciones para leña. Debido a su extenso sistema radical se debe tener cuidado de no plantar esta especie donde sus raíces puedan competir con cultivos anuales (Cordero et ál. 2003).

***Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Excell (roble coral, amarillón, canxún, naranjo)**

**Familia: Combretaceae.** Se caracteriza por ser un árbol grande de hasta 50 m de altura (típicamente 20-35 m) y 1.5 m de dap. Los árboles maduros tienen gambas grandes, con fustes limpios y cilíndricos a alturas de hasta 20 m. Cordero et ál. (2003) reportan datos de gravedad específica entre 0,58-0,79. Posee una corteza delgada, de color café grisáceo, con fisuras verticales; hojas pequeñas (2-4,5 cm de largo) simples que se concentran en las puntas de las ramas. El fruto es alado (sámara), café-dorado cuando está maduro, de 1,5-2 cm de ancho, con dos alas grandes y tres de menor tamaño. Cada fruto contiene una semilla amarillenta, pequeña. Esta especie ha generado mucho interés por su gran potencial de crecimiento, adaptabilidad a condiciones difíciles, como colinas y planicies costeras, suelos rojos o amarillos, lateríticos profundos, derivados de materiales aluviales o ígneos (Cordero et ál. 2003).

***Abarema idiopoda* (Blake) Barneby & Grimes (cashá, cachá, dormilón) Familia:**

**Leguminosae Mimosoideae.** Conocida también como *Chloroleucon eurycyclum*, es un árbol de hasta 25 m de altura y 80 cm de dap. La forma de la copa es alta y abierta. Cordero et ál. (2003) reportan un crecimiento medio a los tres años fue de 7,3 cm de dap, 6,0 m altura cuando se ensayó a plena luz en plantaciones experimentales de la Estación Biológica La

Selva en Heredia, Costa Rica. Bajo sombra, el crecimiento fue de 5,3 cm de dap, 5,2 m altura. Se ha reportado como usada para sombra en cultivos de café en Costa Rica, especialmente en el pacífico sur. La forma de la copa es alta y abierta y se puede combinar bien en estos sistemas con árboles de copas altas o bajas y compactas o abiertas. Es considerada buena para reforestación pues agarra bien y tiene buena supervivencia, aunque produce ramas muy pequeñas. Requiere de poda de formación en ejemplares jóvenes debido a sus ramificaciones irregulares o mal formadas (Romero 2006) por lo que es importante la selección de los mejores ejemplares si se pueden justificar económicamente (Cordero et ál. 2003).

#### ***4.4.3 Diseño experimental***

El experimento fue conducido bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones y arreglo en parcelas divididas. En la parcela principal se establecieron los sistemas de producción formados por la asociación árbol-café (más pleno sol) y como subparcela el nivel de insumos. Los sistemas de producción están presentes en los tres bloques; sin embargo, los tratamientos de insumos no están en todas las parcelas principales, por lo que el diseño de tratamientos para efecto de esta investigación es un factorial incompleto en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones.

En los tratamientos, dados por la combinación de sombra y de manejo, establecidos en Turrialba y Masatepe, se han identificado cuatro niveles de insumos para el manejo de la fertilidad y plagas formado por manejos orgánicos y convencionales de niveles de uso intensivo y moderado (Cuadro 3). Si bien los niveles de insumos son los mismos en Turrialba y Masatepe, los tratamientos de asocio son generados con distintas especies (Cuadro 4 y Cuadro 5). Es importante considerar que los niveles de insumo se van adecuando a las necesidades del cultivo y por recomendaciones técnicas y practicas actuales de cada zona.

*Cuadro 3. Niveles de insumos en la comparación de sistemas de producción de café*

	Alto Convencional AC	Medio Convencional MC	Medio Orgánico MO	Bajo Orgánico BO
Tipos de enmiendas del suelo	Fertilizantes químicos	Fertilizantes químicos	Pulpa de café, gallinaza y piedra mineral molida	Pulpa de café
Nivel de enmiendas del suelo	Mucho mayor a los nutrientes sacados en la cosecha	Mayor a los nutrientes sacados en la cosecha	Mayor a los nutrientes sacados en la cosecha	Retorno de pulpa sacada en la cosecha
Manejo de enfermedades	Uso calendarizado de fungicidas comerciales	Uso infrecuente de fungicidas comerciales	Aplicaciones foliares de botánicos y biológicos	No
Manejo de plagas insectiles	Prácticas manuales y uso frecuente de insecticida comerciales	Prácticas manuales y uso ocasional de insecticidas comerciales	Aplicaciones foliares de botánicos y biológicos y prácticas manuales	Pepena post-cosecha
Manejo de malas hierbas	Suelo desnudo con herbicidas	Manejo selectivo con prácticas manuales y herbicidas en la calle y carril limpio	Manejo selectivo con prácticas manuales en la calle y carril limpio	2-4 desmalezados manuales

*Cuadro 4. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Turrialba*

Parcela principal	Subparcela			
	AC	MC	MO	BO
<i>Erythrina poeppigiana</i> (E)	x	x	x	x
<i>Terminalia amazonia</i> (T)	x	x	x	x
<i>Abarema idiopoda</i> (C)		x	x	
<i>T. Amazonia</i> - <i>A. idiopoda</i> (CT)		x	x	
<i>T. Amazonia</i> - <i>E. poeppigiana</i> (ET)		x	x	
<i>A. idiopoda</i> - <i>E. poeppigiana</i> (CE)	x	x	x	x
Pleno sol (PS)	x	x		

Cuadro 5. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Masatepe

Parcela principal	Subparcela			
	AC	MC	MO	BO
<i>Simarouba glauca</i> - <i>Tabebuia rosea</i> (SGTR)	x	x	x	x
<i>Tabebuia rosea</i> - <i>Samanea saman</i> (SSTR)		x	x	
<i>Simarouba glauca</i> - <i>Inga laurina</i> (ILSG)		x	x	
<i>Inga laurina</i> - <i>Samanea saman</i> (SSIL)	x	x	x	x
Pleno sol (PS)	x	x		

#### 4.4.4 Análisis de inversiones

En este estudio se realizó un análisis *ex-post* para estimar la rentabilidad de cada SAF. Para la realización del análisis de inversiones y la construcción del indicador financiero Valor Actual Neto (VAN), se generó las estructuras de costos e ingresos de los sistemas evaluados. Esta estructura se construyó con base en la información recolectada en campo, es decir, considera los costos e ingresos en los cuales ha incurrido el proyecto. En el caso del ensayo establecido en Masatepe, el análisis se realizó para el periodo 2000-2008 mientras que en el caso de Turrialba se analizó el periodo 2003-2008.

##### 4.4.4.1 Estructura de costos e ingresos

La mano de obra, precios de insumos, servicios y productos que describen las actividades de manejo de los diferentes sistemas evaluados (mantenimiento, cosecha, manejo de sanidad y renovación) forman parte de estas estructuras. Los ingresos que se consideran como las entradas al sistema, se perciben por la venta de bienes y servicios, en el caso de los SAF, producto de la cosecha del cultivo principal (café), la venta de madera y productos generados por los raleos (postes). Para la primera etapa de este estudio, en el análisis financiero no se valoran los servicios ambientales producidos por el SAF.

En cada SAF evaluado se consideró como ingreso principal el relacionado con la venta de café y como secundario el generado por el aprovechamiento forestal. Con la suma de estos valores se construyó el ingreso total. En el caso del ingreso por comercialización del café se calculó en función al número de fanegas cosechadas en cada sistema por el precio de venta comercial por fanega. Para Turrialba se considero que una fanega equivale aproximadamente a 258 kg de cerezas de café y en el caso de Masatepe, una fanega equivale a 153 kg (336 lb) de café cereza. En el caso del ingreso por venta de leña y postes, se consideraron los

aprovechamientos realizados a pesar de la baja edad de los árboles. Estos raleos han sido comercializados generando ingresos adicionales al SAF.

Por tratarse de un área experimental la cantidad de mano de obra requerida por cada uno de los sistemas esta sobreestimada, por esto se usó como criterio de estandarización el número de jornales promedio por año del sistema convencional reportado por el ICAFE (com. pers.). La cantidad promedio de jornales por año para el sistema convencional reportado por el ICAFE es de 50, mientras que en el ensayo de Turrialba se reportó un promedio de 178 jornales para el mismo sistema; por este motivo el número de jornales usado por cada sistema se multiplicó por 0,28, asumiendo que la sobreestimación de la mano de obra fue similar en todos los sistemas de Turrialba y Masatepe. De la misma forma, los costos de mano de obra pagados por CATIE superaron en un 50% los costos manejados por el ICAFE. Para corregir la sobreestimación en los costos de mano de obra de Turrialba se multiplicó por 0,66, en el caso de Masatepe, los valores de jornal eran similares a los valores de mercado por lo que no fueron corregidos.

#### **4.4.4.2 Indicadores financieros**

Para el análisis de inversiones es necesario recurrir a los indicadores financieros que se basan en la relación de los costos y los beneficios actualizados, debido a los plazos largos de los análisis en los cuáles se experimenta cambios importantes en el valor del dinero a través del tiempo; estos cambios implican la actualización del flujo de costos e ingresos. La actualización de este flujo consiste en poner en valor presente todos los valores futuros de costos y beneficios del periodo de análisis. El indicador más utilizado es el valor actual neto (VAN).

##### **4.4.4.2.1 Valor actual neto (VAN)**

Calcula el valor actual neto de la inversión a partir de la tasa de interés ( $i$ ) y los pagos futuros (valores negativos) e ingresos (valores positivos), es decir, la sumatoria de los beneficios actualizados ( $B_n$ ) menos los costos actualizados ( $C_n$ ) (Gómez y Quirós 2001). Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum \frac{B_n - C_n}{(1+i)^n}$$

Los valores incluidos en el flujo de caja no tienen que ser constantes, conserva la condición de que tanto la tasa de interés como la periodicidad son constantes; es decir, todo el flujo de caja descuenta a la misma tasa y los valores incluidos en él ocurren a intervalos iguales. El valor actual neto es un indicador sobre la conveniencia económica de la inversión, involucra la subjetividad del inversionista, que debe seleccionar la tasa de interés para descontar el flujo de caja. El resultado del cálculo está expresado en unidades monetarias y su significado puede interpretarse de la siguiente manera:

- $VAN > 0$ , indica que la inversión analizada arroja rentabilidad superior a la exigida por el inversionista, descontando la inversión, luego es conveniente llevar a cabo el proyecto.
- $VAN = 0$ , indica que la inversión arroja rentabilidad igual a la exigida por el inversionista, por ende, la ejecución del proyecto es opcional.
- $VAN < 0$ , no significa que la inversión estudiada genere pérdidas, únicamente la rentabilidad es inferior a la exigida por el inversionista y para él, particularmente, no es conveniente la inversión.

Para realizar la valoración de la inversión y tomando como base la estructura de costos e ingresos, se utilizó el indicador dinámico VAN con el fin de estimar la rentabilidad de cada sistema usando como tasa de descuento la tasa de interés del mercado y analizando los resultados bajo los criterios del indicador económico.

#### **4.4.4.3 Supuestos del modelo**

Para estimar la rentabilidad de los sistemas agroforestales analizados, se consideraron algunos supuestos, dado que no se puede predecir con exactitud los cambios del mercado que permiten variaciones en los precios de los insumos y de los productos ofertados, así como también las variaciones en el mercado de capital (tasas de descuento). Por ende, se asumió que:

- Los costos de los insumos, costos de la mano de obra y precios de venta de café y madera son conocidos durante el periodo de análisis. Estos valores son tomados de la base de datos del proyecto Ensayo de Sistemas.

- El mercado es perfecto dado que la tasa de descuento es conocida y se mantiene durante el periodo de análisis.
- Los rendimientos de producción son conocidos y asumen consideración de riesgos por enfermedades, cambios en el tiempo (sequía, vientos, inundaciones, entre otros) y riesgos de inversión.

#### 4.4.4.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza bajo la condición *ceteris paribus*. En esta condición de análisis sólo se varía uno de los factores, mientras los demás permanecen constantes. El objetivo de este análisis es determinar los efectos a largo plazo sobre la rentabilidad de las inversiones e identificar el factor que causa mayores efectos, tanto negativos como positivos, en la competitividad de los sistemas agroforestales estudiados como el uso de la tierra. Al analizar los cambios de escenarios, se permite hacer una evaluación crítica a las actividades de manejo, presentando alternativas para el inversionista (Zea 2003). De la misma forma, este análisis explora los cambios en los valores de los parámetros principales que influyen en la rentabilidad como el precio de insumos, tasas de interés, mano de obra, entre otros, generando escenarios de análisis más o menos optimistas que otros (Maginnis et ál. 1998).

Una vez definido el flujo de caja y calculado el VAN, se efectuó el análisis de sensibilidad. Este análisis responde a variaciones de los factores que afectan la rentabilidad de los sistemas evaluados tales como la tasa de interés, los costos de mano de obra y los precios de venta de los productos del sistema, para este caso se utilizaron los valores descritos en el Cuadro 6. Con estos resultados se generan las pautas para determinar la susceptibilidad económica de la actividad productiva evaluada ante variaciones reales de precios y costos.

*Cuadro 6. Variaciones de los factores que afectan la rentabilidad de los SAF evaluados*

<b>Variables</b>	<b>Disminución</b>	<b>Base</b>	<b>Aumento</b>
Tasa de interés (%)	8,74 (-2,76%)	11,50	17,34 (+5,84%)
Precio de mano de obra (USD/jornal)	(-10%)	Valor anual	(+10%)
Precio de café (USD fan <sup>-1</sup> )	(-5%)	Valor anual	(+5%)

Para la tasa de interés, como valor mínimo se utilizó la tasa pasiva a plazo fijo (10 años) y como valor máximo la tasa activa (crédito) para el sector agropecuario en moneda extranjera (Banco Central de Costa Rica 2009). En el caso del precio de mano de obra, se utilizó como base el valor del jornal reportado en la base del Ensayo de Sistemas y para la sensibilización se utilizó un aumento y disminución del 10% sobre el valor para todos los años. En el caso del precio del café se asumió para la sensibilización un 5% sobre el valor de venta para todos los años.

#### 4.5 Análisis estadístico

Inicialmente se utilizó estadística descriptiva para cada una de las variables incluidas en la estructura de costos. Luego, el análisis estadístico se realizó mediante la utilización de modelos lineales generales y mixtos para evaluar la producción de café, los costos de manejo, los ingresos netos y por último la rentabilidad estimada a partir del VAN por sistemas y tipos de manejo. El modelo de análisis fue el correspondiente a un diseño de parcelas divididas repetido en bloques, donde las parcelas principales representan los tipos de sistemas (completamente aleatorizadas dentro de cada bloque) y en las subparcelas se asignaron los manejos (no todos los manejos se encuentran dentro de los sistemas):

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + B_j + S_i B_j + M_k + S_i M_k + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

$Y_{ijk}$  : Variable respuesta

$\mu$  : Media general

$S_i$  : Efecto del i-ésimo sistema

$B_j$  : Efecto del j-ésimo bloque

$S_i B_j$  : Error A

$M_k$  : Efecto del k-ésimo manejo

$S_i M_k$  : Interacción de i-ésimo sistema y el k-ésimo manejo

$\varepsilon_{ijk}$  : Término de error aleatorio independiente supuestamente distribuido normal con media cero y varianza constante

Se modeló la estructura de varianzas y covarianzas para cada tratamiento. Para comparar los tratamientos evaluados se utilizó la prueba de comparación de medias LSD de Fisher con un  $\alpha=0,05$ .

## 4.6 Resultados y discusión

### 4.6.1 Estructura de costos e ingresos

La estimación del indicador económico VAN para el periodo evaluado fue calculado con los datos registrados por el proyecto. En Masatepe se consideró el periodo 2000-2008 mientras en Turrialba solo se evaluó el periodo 2003-2008. Con estos datos se construyó la estructura de costos e ingresos en la que se especificaron los costos de cada actividad de manejo (Cuadro 7). En cuanto a los ingresos, se consideró como ingreso principal la comercialización del café y como ingreso secundario la producción de madera, que por la edad de los árboles solo han sido comercializados en su mayoría como leña y algunos postes.

*Cuadro 7. Actividades de manejo consideradas en la estructura de costos e ingresos para los SAF evaluados*

Masatepe	Turrialba
Fertilización	Fertilización
Árboles	Árboles
Tejido (Café)	Tejido (Café)
Sombra temporal	Vivero
Control hierbas	Control hierbas
Plagas y enfermedades	Control de insectos y enfermedades
	Mantenimiento

### 4.6.2 Estructura de costos

#### 4.6.2.1 Mano de obra total en SAF

En Masatepe, la mayor proporción de mano de obra contratada es empleada en el manejo de hierbas, seguido del manejo de tejido (café). Para el manejo de hierbas, los mayores valores (Figura 1) corresponden en su mayoría a los niveles de insumo AC y MC, en contraste

con los SAF que utilizan enmiendas orgánicas (MO y BO). En el caso de la fertilización se encuentran mayores proporciones para el nivel de insumos MO. Para el manejo de sombra temporal y de plagas los valores no son diferentes en los SAF analizados, pero en el caso de manejo de árboles se muestran mayores proporciones para los SAF que están en combinación con *Inga laurina* (ILSG y SSIL) dado que a esta especie se le realizan podas anuales de formación

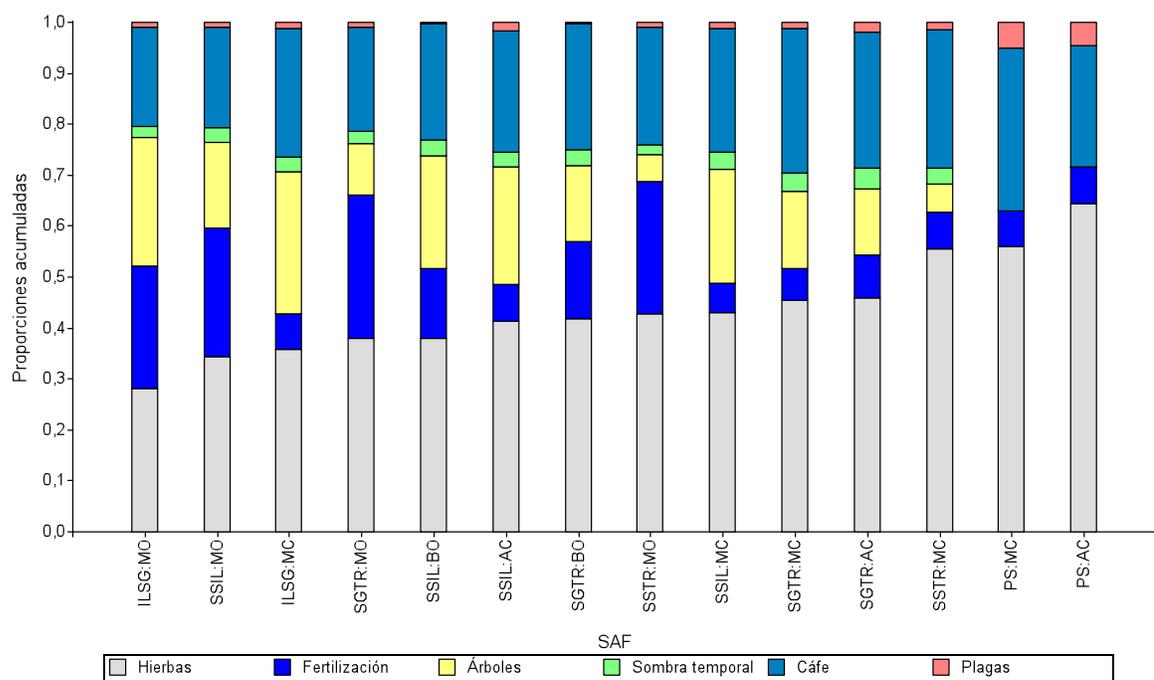


Figura 1. Contribución en proporción a los costos de mano de obra promedio por actividades de manejo en SAF de café en Masatepe.

Al igual que Masatepe, en Turrialba la mayor proporción de mano de obra contratada es empleada en el manejo de hierbas seguido del manejo de tejido (café). Para el manejo de hierbas, los mayores valores (Figura 2) corresponden en su mayoría a los niveles de insumo que utilizan enmiendas orgánicas (MO y BO), en contraste con los SAF que utilizan insumos químicos (AC y MC). En el caso de la fertilización se encuentran mayores proporciones para el nivel de insumos MO. Para el manejo de vivero y mantenimiento general, los valores no son diferentes pero en el caso de manejo de árboles se muestran mayores proporciones para los SAF que están en combinación con *Erythrina poeppigiana* (E, ET y CE), dado que a esta especie se le realizan podas anuales de formación y en algunos años una poda directamente sobre el fuste a una altura de aproximadamente 1 m. En el caso de manejo de plagas se

encuentran valores mayores para el PS en los dos manejos establecidos en el ensayo (AC y MC).

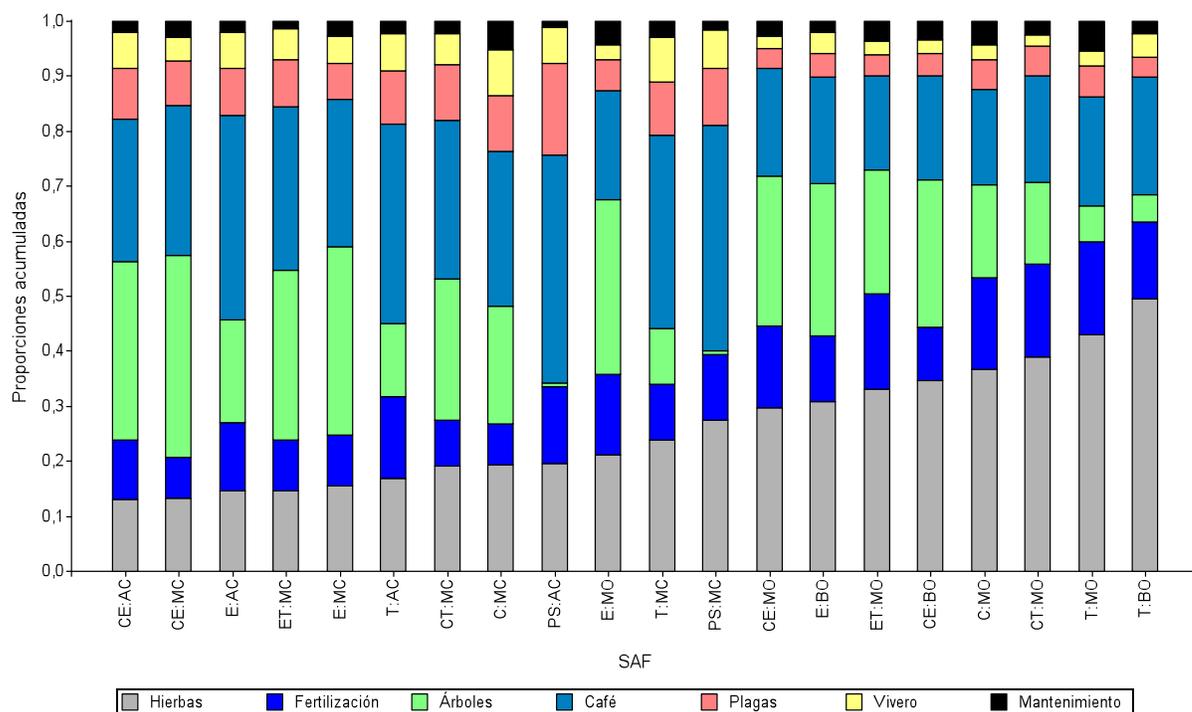


Figura 2. Contribución en proporción a los costos de mano de obra promedio por actividades de manejo en SAF de café en Turrialba.

#### 4.6.2.2 Costos de mano de obra fija

En el caso de la mano de obra fija (que no considera la mano de obra utilizada en la cosecha), la interacción entre sombra y nivel de insumo no fue significativa ( $p=0,7878$ ) para el análisis del ensayo de Turrialba. Para el factor sombra se encontraron diferencias significativas ( $p<0,0001$ ) al igual que para el factor nivel de insumo ( $p<0,0001$ ). Los costos promedios (USD ha<sup>-1</sup>) por cada SAF (Cuadro 8) muestran que la sombra que presenta los mayores costos corresponden a C que a su vez no es diferente de CT y E. Estos tratamientos reportan valores desde 650,3 USD ha<sup>-1</sup> hasta 759,8 USD ha<sup>-1</sup>. Para el factor nivel de insumo, basado en la prueba de medias se concluye que los tratamientos orgánicos presentan mayores medias que los convencionales y el tratamiento que presenta la mayor media es el MO con un valor de 815,5 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en contraste con el AC con un valor de 442 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Lo anterior coincide con lo encontrado por Lyngbaek et ál. (1999) en un estudio realizado en Costa Rica, donde se comparó el uso de mano de obra de fincas orgánicas y convencionales. Estos autores reportan que el manejo orgánico demandó 40% más de mano de

obra que el manejo convencional, sin considerar la mano de obra para la cosecha. De la misma forma, Duarte (2005) reporta que los sistemas orgánicos en fincas pequeñas, poseen mayores costos de producción debido al alto costo destinado a la mano de obra, dado que el manejo del control de malezas (Hierbas) se realiza de forma manual en los sistemas orgánicos, mientras que en el manejo convencional, se utilizan herbicidas para esta actividad.

*Cuadro 8. Efecto del componente sombra sobre los costos de mano de obra promedio por año en SAF de Turrialba*

<b>Sombra</b>	<b>Mano de obra (USD ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>E.E.</b>	
C	759,82	57,47	A
CT	689,68	40,68	A B
E	650,34	32,11	A B
T	605,38	35,35	B
CE	574,48	27,33	B
ET	556,12	48,87	B
PS	347,61	17,42	C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ); E.E. = Error estándar

*Cuadro 9. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos de mano de obra promedio por año en SAF de Turrialba*

<b>Insumo</b>	<b>Mano de obra (USD ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>E.E.</b>	
MO	815,51	26,75	A
BO	707,97	36,08	B
MC	463,16	21,69	C
AC	442,03	24,09	C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ); E.E. = Error estándar

El control de las hierbas en los sistemas orgánicos busca mantener una cobertura de suelo de hierbas benéficas; estas a medida que crecen requieren de espacio, luz, humedad y nutrientes reduciendo la disponibilidad de recursos para el crecimiento de las malezas, es decir, generan competencia actuando como asfixiantes de las malezas. Esta cobertura sirve como hábitat de insectos benéficos que ayudan en el manejo de las plagas, Schroth et ál. (2004) comentan que usar una buena cobertura dentro del sistema de café es considerada una

estrategia óptima para el manejo de plagas dado que la mayoría de estas interactúan con la planta de café o con los árboles de asocio y al aumentar la diversidad de plantas disminuye el efecto que pueda causar sobre ellas.

Dos Santos et ál. (2008), en un estudio realizado en las mismas parcelas de este estudio y donde se evaluaron los cambios en la cobertura del suelo durante los años 2002 y 2005 reportan que los menores porcentajes de cobertura de suelo fueron encontrados en los tratamientos con nivel de insumo AC y en esta intensidad de manejo los tratamientos bajo sombra no fueron diferentes del pleno sol, lo que demuestra que con una alta aplicación de herbicida no garantiza una buena cobertura de suelo. Los mayores porcentajes de cobertura del suelo fueron reportados para los tratamientos que utilizan enmiendas orgánicas tales como BO y MO.

Por la presencia de arboles en asocio con el café, las hojas esparcidas en el suelo se acumulan bajo las plantas de café y albergan insectos que se alimentan de nematodos causantes de la perforación de los granos de café. Por tanto, no se necesitan nematicidas tóxicos en este tipo de cafetales (Cuellar et ál. 1999).

El ensayo de Masatepe, obtuvo resultados diferentes al ensayo de Turrialba, la interacción entre sombra y nivel de insumo no fue significativa ( $p=0,8730$ ) al igual que no se reportan diferencias para los factores sombra ( $p=0,2422$ ) y nivel de insumo ( $p=0,4003$ ). Los costos promedios para las sombras oscilan entre 125,3 y 180 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y para los insumos 144,2 y 159, 1 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cuadro 10 y Cuadro 11). Se puede observar que en el ensayo de Masatepe se presentaron costos de mano de obra bajos en comparación a Turrialba, lo anterior puede ser debido a la disponibilidad de mano de obra en la zona causando bajos costos por jornal.

*Cuadro 10. Efecto de la sombra sobre los costos de mano de obra (USD ha<sup>-1</sup>) promedio por año en SAF de Masatepe*

Sombra	Mano de obra	E.E.
PS	180,06	26,02
SSTR	155,37	20,75
SGTR	152,36	16,44
SSIL	148,70	17,15
ILSG	125,31	15,59

*Cuadro 11. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos de mano de obra (USD ha<sup>-1</sup>) promedio por año en SAF de Masatepe*

<b>Insumo</b>	<b>Mano de obra</b>	<b>E.E.</b>
MO	159,17	15,77
AC	159,09	19,36
BO	145,26	20,63
MC	144,24	15,70

Cabe mencionar que el manejo dado a los sistemas orgánicos permite que se incentive la abundancia de organismos de suelo, estudios hechos por Porras (2006) y De Aquino et ál. (2008) muestran que la población de lombrices es mayor en sistemas orgánicos, mejorando así la calidad del suelo en comparación a los SAF que utilizan insumos químicos y aquellos sistemas que están expuestos a pleno sol. En cuanto a calidad de suelo, George (2006) evaluó un índice de calidad de suelo aditivo para fincas orgánicas y convencionales y reportó que las fincas bajo manejo orgánico son más propensas a mantener las funciones del ecosistema ya que mejoran la producción biológica del suelo en comparación a las fincas bajo manejo convencional y a pleno sol.

Otro beneficio ecológico que proporcionan los sistemas de café bajo sombra y orgánicos es que sirven como hábitat para las aves (migrantes o nativas) generando importantes efectos para la conservación de la biodiversidad lo que lo convierte en una buena estrategia de conservación (Schroth 2004). La presencia de aves también genera un beneficio hacia el SAF dado que es menos necesario el uso de plaguicidas ya que las aves en el dosel de sombra sirven como control biológico (Florian 2005).

#### **4.6.2.3 Distribución de Costos totales**

Para cada SAF se consideraron como costos de operación, los costos de mano de obra y los costos de insumos utilizados en cada actividad de manejo. En el caso de la mano de obra se diferenció entre los jornales utilizados para el manejo agronómico de cada subparcela (costo fijo) y los jornales usados para la cosecha de café (costo variable).

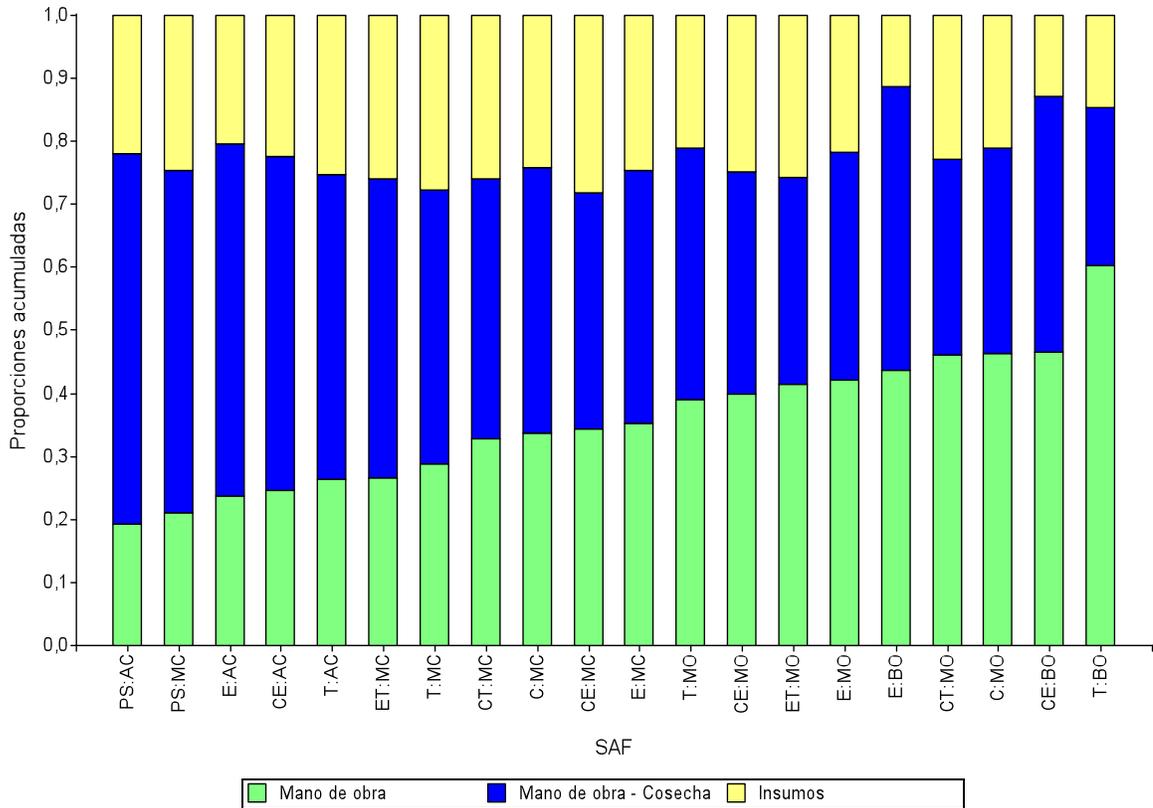


Figura 3. Distribución de los costos de producción promedio por año en SAF de café en Turrialba.

En el ensayo de Turrialba (Figura 3) se encontró que la mano de obra es el factor determinante en los costos de operación reportando un uso promedio del 78% de los costos totales. Este valor considera tanto la mano de obra fija como variable (dada por la cosecha). Analizando la mano de obra fija promedio por año se observa que los SAF que utilizan enmiendas orgánicas (MO y BO) emplean valores promedios de 39-60% de los costos totales mientras que los SAF con insumos químicos solo reportan valores de 19-35%. En el caso de insumos, todos los sistemas utilizan desde el 11 al 28% del total de los costos, presentando los valores más bajos el nivel de insumo BO. En cuanto a la mano de obra variable (cosecha), los SAF con niveles de insumo AC-MC presentan valores de 41-59% incluyendo a E-BO y CE-BO, comparados con los demás tratamientos.

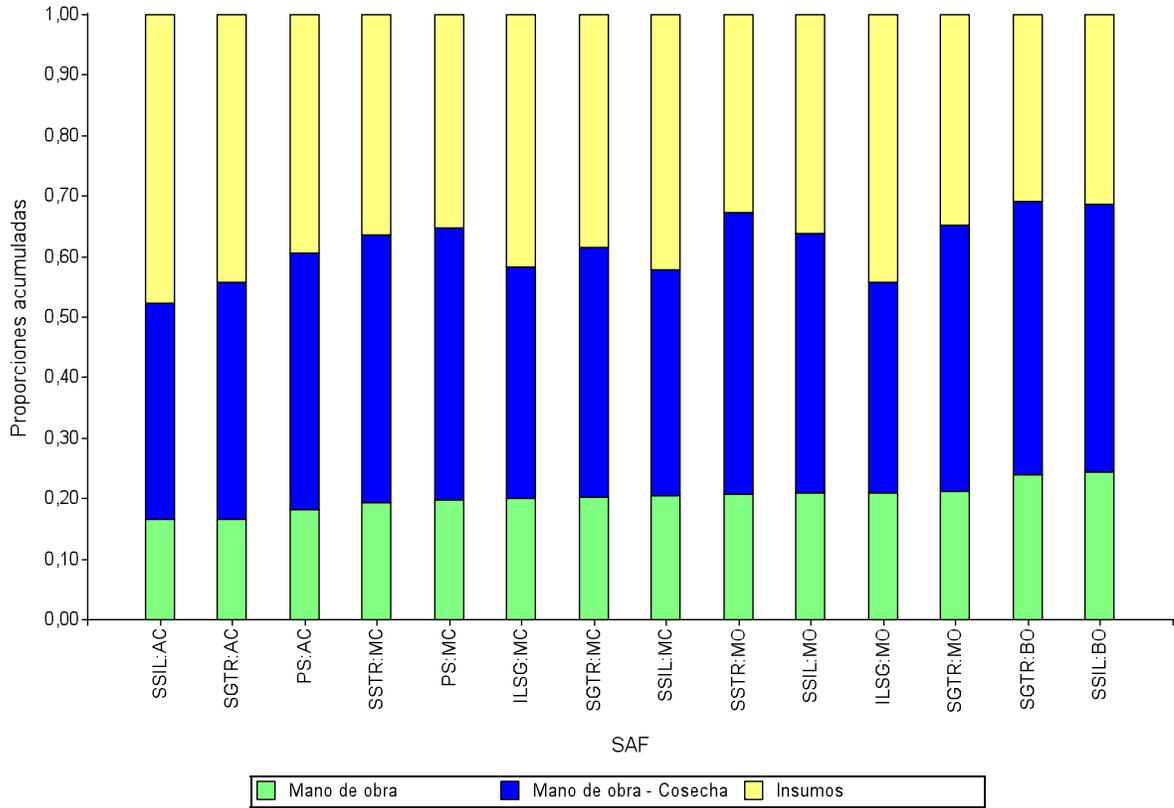


Figura 4. Distribución de los costos de producción promedio por año en SAF de café en Masatepe.

En el ensayo de Masatepe se reportó que la mano de obra (incluyendo fija y variable) presentó proporciones más altas respecto a los insumos y en promedio emplea un 65% de los costos totales. En el caso de los insumos, los SAF que utilizan enmiendas orgánicas (MO y BO) emplean valores promedios de 26-33% de los costos totales mientras que los SAF con insumos químicos reportan valores de 33-45% (Figura 4). Estos valores son cercanos a los reportados por Da Silva y Pereira (2001) que realizaron un estudio sobre los costos de la producción convencional y encontraron que el costo relacionado a la compra de insumos puede alcanzar valores de 9 a 31% del costo total de producción, dependiendo de la productividad del sistema analizado.

La mano de obra fija promedio por año oscila entre 20-36% de los costos totales, los valores más altos corresponden a los insumos orgánicos y a las parcelas que están en asocio con IL. En cuanto a la mano de obra variable (cosecha), los SAF estudiados presentan valores entre 35-47% de los costos totales.

#### 4.6.2.4 Costos totales de operación en SAF

En el ensayo de Turrialba, el análisis concluye que la interacción entre sombra y nivel de insumo no fue significativa ( $p=0,8431$ ) por lo que se analizó cada factor de forma independiente. Para el factor sombra no se encontraron diferencias significativas ( $p=0,2580$ ) mientras que para el factor insumo sí ( $p<0,0001$ ). Los costos totales promedio por tipo de sombra oscilaron entre 1601,2 y 1859,17 USD ha<sup>-1</sup>. En cuanto al nivel de insumo (Cuadro 13) muestran que los niveles que presentan menores costos son los correspondientes a los bajos niveles de aplicación, sin existir diferencias entre enmiendas orgánicas e insumos químicos. Esto confirma lo encontrado por Sosa et ál. (2004) quienes reportaron que los costos de producción son levemente mayores en fincas orgánicas que en fincas convencionales. En este caso no se presentaron diferencias entre MO y AC, con valores de 1911,8 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 1837,6 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> respectivamente.

*Cuadro 12. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Turrialba*

Sombra	Costo total (USD ha <sup>-1</sup> )	E.E.
C	1859,17	114,58
E	1809,45	73,50
PS	1731,17	147,64
CT	1714,64	108,91
ET	1612,73	84,36
T	1603,90	75,44
CE	1601,24	62,45

E.E. = Error estándar

*Cuadro 13. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Turrialba*

<b>Insumo</b>	<b>Costo total (USD ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>E.E.</b>	
MO	1911,81	57,91	A
AC	1837,62	77,63	A
MC	1533,65	56,87	B
BO	1445,63	80,79	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ); E.E. = Error estándar

Los contrastes realizados (Cuadro 14) para Turrialba, muestran que entre las sombras solo existen diferencias entre el C frente al promedio de los demás sistemas sin PS, al igual que el E frente al promedio de CE, CT y ET. En cuanto al insumo, se encontraron diferencias para algunas de las sombras analizadas (C, E y CE) para los niveles MO y BO. También se encontraron diferencias en E y CE en cuanto a niveles de insumo convencional (AC, MC).

Cuadro 14. Contrastes de tratamientos para el costo total promedio (USD ha<sup>-1</sup>) en SAF de Turrialba

Contraste	SAF	p-valor
1	PS vs. demás	0,3486
2	PS_AC vs. PS_MC	0,9051
3	C vs. demás sin PS	<b>0,0015</b>
4	C_MC vs. C_MO	<b>0,0001</b>
5	T vs. demás sin C, PS	0,1767
6	T orgánicos vs. T convencionales	0,0606
7	T_AC vs. T_MC	0,0810
8	T_MO vs. T_BO	<b>&lt;0,0001</b>
9	E vs. CE,CT y ET	<b>0,0018</b>
10	E orgánicos vs. E convencionales	0,8119
11	E_AC vs. E_MC	<b>0,0062</b>
12	E_MO vs. E_BO	<b>0,0047</b>
13	CE vs. (CT y ET)	0,1679
14	CE orgánicos vs. CE convencionales	0,8371
15	CE_AC vs. CE_MC	<b>0,0001</b>
16	CE_MO vs. CE_BO	<b>0,0010</b>
17	CT vs. ET	0,0985
18	CT_MC vs. CT_MO	<b>&lt;0,0001</b>
19	ET_MC vs. ET_MO	<b>0,0453</b>
Total		<b>&lt;0,0001</b>

En el ensayo de Masatepe, el análisis muestra que no hay interacción significativa ( $p=0,9286$ ) entre sombra y nivel de insumo. Para el factor sombra no se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0937$ ) mientras que el factor insumo si mostro un efecto significativo ( $p=0,0444$ ) sobre los costos totales. Los costos promedios (USD ha<sup>-1</sup>) para las sombras por cada SAF (Cuadro 15) muestran que los niveles de insumo que presentan mayores costos son alto convencional (AC) y el orgánico intensivo (MO) con 929,3 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 760,3 USD ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> respectivamente. Al igual que en Turrialba, este resultado confirma lo encontrado por Sosa et ál. (2004), quienes reportaron que los costos de producción son levemente mayores en fincas orgánicas que en fincas convencionales y cabe mencionar que en este estudio las diferencias no fueron significativas.

*Cuadro 15. Efecto del componente sombra sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Masatepe*

<b>Sombra</b>	<b>Costo total (USD ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>E.E.</b>
PS	955,49	125,14
SSTR	772,27	95,64
SGTR	754,54	75,89
SSIL	732,04	79,23
ILSG	607,98	69,05

*Cuadro 16. Efecto del componente nivel de insumo sobre los costos totales de operación promedio por año en SAF de Masatepe*

<b>Insumo</b>	<b>Costo total (USD ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>E.E.</b>		
AC	929,31	90,51	A	
MO	760,33	71,77	A	B
MC	717,03	72,11		B
BO	601,73	95,66		B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ); E.E. = Error estándar

Por medio de los contrastes (Cuadro 17) se obtuvo diferencias entre PS y los demás sistemas analizados así como también se reportan diferencias significativas entre las sombras ILSG y SSTR. En el caso de los insumos, se reportan diferencias entre los insumos MC y MO para las sombras ILSG y SSTR.

Cuadro 17. Contrastes de tratamientos para el costo total promedio (USD ha<sup>-1</sup>) en SAF de Masatepe

Contraste	SAF	p-valor
1	PS vs. demás	<b>0,0003</b>
2	PS_AC vs. PS_MC	<b>0,0028</b>
3	SGTR vs. demás sin PS	0,3105
4	SGTR orgánicos vs. SGTR convencionales	0,0797
5	SGTR_AC vs. SGTR_MC	0,2494
6	SGTR_MO vs. SGTR_BO	0,1341
7	SSIL vs. ILSG y SSTR	0,2661
8	SSIL orgánicos vs. SSIL convencionales	0,4171
9	SSIL_AC vs. SSIL_MC	0,2951
10	SSIL_MO vs. SSIL_BO	0,0548
11	ILSG vs. SSTR	<b>&lt;0,0001</b>
12	ILSG_MC vs. ILSG_MO	<b>0,0008</b>
13	SSTR_MC vs. SSTR_MO	<b>0,0001</b>
Total		<b>&lt;0,0001</b>

Con los costos totales promedio por año se estimaron los costos de producción por fanega para cada uno de los sistemas. En el caso de Turrialba se presentaron costos desde 36,7 USD fan<sup>-1</sup> correspondientes al tratamiento en pleno sol en nivel de insumo alto convencional (PS-AC) hasta 80,1 USD fan<sup>-1</sup> que corresponde al tratamiento Abarema idiopoda y Terminalia amazonia bajo manejo orgánico intensivo (CT-MO) (Cuadro 18). Los tratamientos que obtuvieron los mayores costos de producción son los pertenecientes a los sistemas orgánicos y el que presenta el menor valor de estos sistemas orgánicos es el *Erythrina* en nivel bajo orgánico (E-BO) con un costo de producción de 52,39 USD fan<sup>-1</sup>.

Cuadro 18. Costos totales de producción promedio por año (USD fan<sup>-1</sup>) en SAF de Turrialba

Sombra	Insumo	Costo Producción (USD fan <sup>-1</sup> )	D.E.
CT	MO	80,11	7,81
C	MO	71,00	3,77
T	BO	69,76	20,27
ET	MO	69,07	2,44
CE	MO	63,10	3,48
E	MO	62,89	5,16
CE	BO	57,82	14,82
T	MO	57,72	11,38
CE	MC	55,01	6,31
E	BO	52,39	7,39
E	MC	52,11	7,74
C	MC	50,68	6,11
CT	MC	50,37	7,57
T	MC	49,93	8,89
PS	MC	42,36	15,11
T	AC	41,40	4,98
ET	MC	40,89	3,72
CE	AC	39,04	5,68
E	AC	37,84	2,11
PS	AC	36,68	5,43

En el caso de Masatepe se encontraron costos de producción promedio por año entre 19,43 USD fan<sup>-1</sup> hasta 27,59 USD fan<sup>-1</sup>, estos valores corresponden a los tratamientos Samanea saman y Tabebuia rosea en manejo orgánico intensivo (SSTR-MO) y Samanea saman e Inga laurina bajo manejo alto convencional (SSIL-AC) respectivamente. Cabe resaltar que en este caso los costos de producción son menos variables en comparación con los encontrados para el ensayo de Turrialba (Cuadro 19).

Cuadro 19. Costos totales de producción promedio por año (USD fan<sup>-1</sup>) en SAF de Masatepe

Sombra	Insumo	Costo Producción (USD fan <sup>-1</sup> )	D.E.
SSIL	AC	27,59	4,41
SSIL	MC	25,04	4,12
ILSG	MO	24,97	2,53
SGTR	BO	24,05	8,49
PS	AC	23,25	3,17
ILSG	MC	23,24	1,48
SSIL	MO	22,94	2,39
SGTR	AC	22,91	3,67
SSIL	BO	22,34	6,00
SGTR	MC	22,20	4,90
SSTR	MC	21,83	3,82
PS	MC	21,66	2,14
SGTR	MO	21,19	2,94
SSTR	MO	19,43	1,62

### 4.6.3 Estructura de ingresos

#### 4.6.3.1 Producción de café

En el ensayo de Turrialba, se encontró que la interacción entre sombra y nivel de insumo es significativa ( $p=0,0407$ ). Los SAF que han tenido mejores valores de producción acumulada son aquellos cuyo nivel de insumo corresponde al nivel intensivo de aplicación, sea de origen orgánico (MO) o químico (AC) (Cuadro 20). De estos tratamientos se destaca el E\_AC (*Erythrina* con manejo alto convencional) que presenta un valor acumulado de 263,6 fan ha<sup>-1</sup> para un periodo de 5 años de producción (52,7 fan ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

De los valores analizados se pueden observar tres grupos, el primero que presenta los mayores rendimientos formado por los sistemas manejados bajo niveles de insumos convencionales (E-AC, PS-AC, CE-AC, PS-MC) mostrando producciones promedio desde 42,4 hasta 52,72 fan ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y cabe resaltar que la mayoría de estos sistemas no presentaron diferencias con el segundo grupo. Este segundo grupo está formado en su mayoría por sistemas bajo manejos convencionales y se rescata la presencia de algunos sistemas orgánicos

(T-MO, E-MO, E-BO) con producciones de 37,09 fan ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, 32,04 y 31,72 respectivamente.

*Cuadro 20. Producción acumulada de café (fan ha<sup>-1</sup>) en sistemas agroforestales con diferentes niveles de sombra y de insumos en Turrialba, Costa Rica*

SAF	Producción acumulada (fan ha <sup>-1</sup> )	Producción promedio (fan ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	E.E.			
E_AC	263,59	52,72	16,05	A		
PS_AC	262,30	52,46	53,09	A	B	
CE_AC	235,89	47,18	17,99	A	B	
PS_MC	212,01	42,40	53,09	A	B	C
T_AC	201,61	40,32	20,43		B	C
ET_MC	187,28	37,46	10,27		B	C
T_MO	185,47	37,09	20,43		B	C
E_MO	162,44	32,49	16,05		B	C
C_MC	162,00	32,40	7,25		B	C
E_BO	158,60	31,72	16,05		B	C
E_MC	155,28	31,06	16,05		B	C
CT_MC	153,64	30,73	14,70		B	C
C_MO	146,85	29,37	7,25			C
T_MC	145,84	29,17	20,43			C
CE_MO	139,80	27,96	17,99			C
CE_BO	130,38	26,08	17,99			C
CE_MC	129,31	25,86	17,99			C
ET_MO	123,25	24,65	10,27			C
CT_MO	120,46	24,09	14,70			C
T_BO	98,72	19,74	24,98			C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ); E.E. = Error estándar

En Turrialba, los contrastes realizados (Cuadro 21) permiten evidenciar que el PS mostró diferencias significativas frente al promedio de los demás tratamientos evaluados. También se reportan diferencias entre los niveles orgánicos establecidos en *Terminalia amazonia* (T). En cuanto a *Erythrina poeppigiana* (E) se encontraron diferencias entre los tipos de insumos (convencional y orgánico) y entre los niveles convencionales (AC y MC). Cabe notar que esas diferencias se mantienen para la sombra CE. La producción orgánica

mostro diferencias de la convencional bajo las sombras que están en asocio con *Erythrina* (E, CE y ET) presentando los mayores valores los tratamientos convencionales.

*Cuadro 21. Contrastes de tratamientos para la producción acumulada (USD ha<sup>-1</sup>) en SAF de Turrialba*

Contraste	SAF	p-valor
1	PS vs. demás	<b>0,0026</b>
2	PS_AC vs. PS_MC	0,9253
3	C vs. demás sin PS	0,2459
4	C_MC vs. C_MO	0,1189
5	T vs. demás sin C, PS	0,6427
6	T orgánicos vs. T convencionales	0,1485
7	T_AC vs. T_MC	0,0589
8	T_MO vs. T_BO	<b>0,0101</b>
9	E vs. CE,CT y ET	<b>0,0017</b>
10	E orgánicos vs. E convencionales	<b>0,0038</b>
11	E_AC vs. E_MC	<b>&lt;0,0001</b>
12	E_MO vs. E_BO	0,8643
13	CE vs. (CT y ET)	0,2488
14	CE orgánicos vs. CE convencionales	<b>0,0112</b>
15	CE_AC vs. CE_MC	<b>0,0001</b>
16	CE_MO vs. CE_BO	0,7098
17	CT vs. ET	0,1493
18	CT_MC vs. CT_MO	0,1130
19	ET_MC vs. ET_MO	<b>0,0001</b>
Total		<b>&lt;0,0001</b>

Lo anterior coincide con Salazar (2005) en un estudio económico en Costa Rica, que determinó que el café orgánico fue en promedio 23% menor que la producción obtenida de manera convencional. De la misma forma Sosa et ál. (2004) consideran que las diferencias entre producción orgánica y convencional se deben principalmente al uso de agroquímicos para controlar los problemas de fertilidad en el suelo así como incidencia de enfermedades y plagas. Estos últimos autores reportan diferencias en producción hasta del 40% considerando las altas producciones para el sistema convencional.

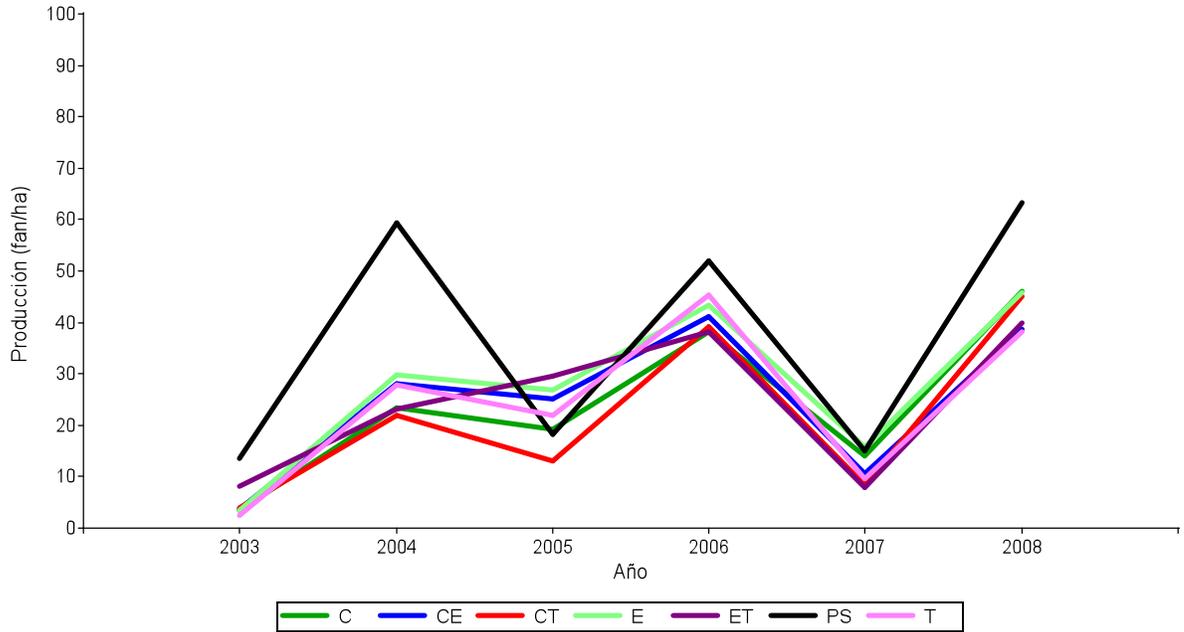


Figura 5. Producción de café para el periodo 2000-2008 bajo diferentes combinaciones de sombra en SAF en Turrialba.

Para los SAF analizados en el ensayo de Masatepe, la interacción entre sombra y nivel de insumo no fue significativa ( $p=0,2410$ ). Para el factor sombra se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0067$ ) y al comparar los valores promedios se encontró que la combinación ILSG (*Inga laurina* y *Simarouba glauca*) presentó la producción acumulada más baja con una media de  $177,6 \text{ fan ha}^{-1}$  en contraste con  $303,78 \text{ fan ha}^{-1}$  correspondiente a PS (Pleno sol) (Cuadro 22). De la prueba de medias se concluye que no existen diferencias entre la producción bajo PS y la producción bajo las sombras SSTR y SGTR.

Cuadro 22. Producción acumulada de café ( $\text{fan ha}^{-1}$ ) en sistemas agroforestales con diferentes niveles de sombra en Masatepe, Nicaragua

Sombra	Medias	E.E.		
PS	303,78	39,26	A	
SSTR	269,96	33,55	A	
SGTR	244,84	34,20	A	B
SSIL	213,23	31,83		B C
ILSG	177,60	33,27		C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

*Cuadro 23. Producción acumulada de café (fan ha<sup>-1</sup>) en sistemas agroforestales con diferentes niveles de insumos en Masatepe, Nicaragua*

<b>Insumo</b>	<b>Medias</b>	<b>E.E.</b>	
AC	269,41	33,72	A
MO	252,69	31,89	A B
MC	223,09	31,88	B C
BO	200,25	34,22	C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Para el factor nivel de insumo (Cuadro 23) se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0064$ ) con valores desde 200,25 fan ha<sup>-1</sup> (BO) hasta 269,41 fan ha<sup>-1</sup> correspondientes al nivel de insumos AC. Aunque generalmente los rendimientos son más bajos en producción orgánica que en convencional, por lo menos durante los 10 primeros años de producción (Bacon s/f), es de notar que no se presentaron diferencias significativas entre el AC y el MO que presentó una media de 252,69 fan ha<sup>-1</sup>. Esto concuerda con lo encontrado por Rasul y Thapa (2004), que luego de 12 años de producción orgánica y convencional no encontraron diferencias en producción y estabilidad de la producción.

Si bien es cierto que el cultivo de café en prácticas a pleno sol o a bajas densidades de sombra y con un uso intensivo de agroquímicos genera buenos rendimientos, no hay que dejar de lado el agotamiento que sufre la planta de café a través de su tiempo de vida, dado que reduce las posibilidades de sostener la producción a medida que aumentan los años de la plantación. Schroth et ál. (2004) reportan que la plantación de café manejada en sistemas bajo sombra necesita renovación de los 15-20 años en comparación con los sistemas a pleno sol que requieren hacerlo desde los 12-15. De esta forma, los sistemas bajo sombra pueden ser más estables o tener cambios menos fuertes en producción anual (Figura 5 y Figura 6) en comparación a los sistemas de café a pleno sol.

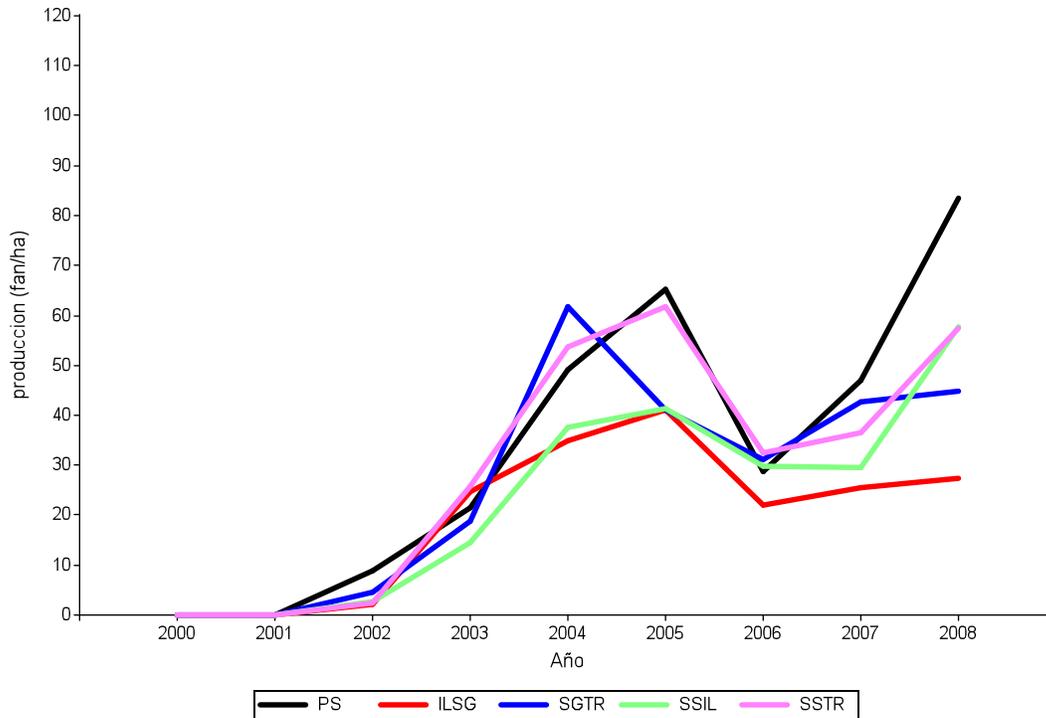


Figura 6. Producción de café para el periodo 2000-2008 bajo diferentes combinaciones de sombra en SAF en Masatepe.

#### 4.6.3.2 Distribución de Ingresos Totales

Se determinó la proporción de aporte en ingresos por cada sistema para lo cual, en el ensayo de Turrialba se encontró que la venta de café es el factor determinante en el ingreso total reportando valores entre 93-100% de aporte, mientras que el aprovechamiento de leña y postes solo aporta valores entre 1-7% del total.

Al igual que en los demás años, el año 2008 (año en el que se realizó raleo programado) el ingreso por producción es el factor determinante en el ingreso total a excepción del SAF T-BO que presentó un valor de aporte del 41%. En este sistema la competencia entre árbol y planta de café ha sido fuerte y los árboles fueron los ganadores, generando producciones bajas de café. Caso diferente sucede con el ingreso por leña, ya que para este año algunos de los sistemas que están bajo manejo MO y BO tales como C, CE, CT y T, son los que presentan valores promedio por año de aporte entre 3-7%. Como caso particular el SAF T-BO presenta un valor del 59%, alto en comparación a los otros sistemas evaluados, explicado también por la baja producción con respecto a los demás sistemas.

En el caso de Masatepe, se encontró que el ingreso por producción de café es el factor determinante en el ingreso total reportando valores entre 94-100% de aporte, mientras que el

aprovechamiento de leña y postes solo aporta valores entre 1-6% del total. Al igual que en los demás años, el año 2008 el ingreso por producción de café es el factor determinante en el ingreso con valores de 65-100% de aporte. En el caso del ingreso por leña, se presentaron valores desde 33-35% de aporte en los ingresos en los SAF evaluados a excepción de los SGTR-AC y SSTR-MC donde no se realizó aprovechamiento para ese año.

#### 4.6.3.3 Ingresos totales en SAF

En el ensayo de Turrialba, el análisis concluye que la interacción entre sombra y nivel de insumo no fue significativa ( $p=0,5209$ ) por lo que se analizó cada factor de forma individual. Para el factor sombra no se encontraron diferencias significativas ( $p=0,1753$ ) mientras que para el factor nivel de insumo si ( $p=0,0001$ ). El ingreso promedio por año (Cuadro 24) evidencia que el nivel de insumo que presenta mayor ingreso es el correspondiente al nivel alto de aplicación químico con un valor de 3413,18 USD ha<sup>-1</sup>. En cuanto a los demás niveles de insumos no existieron diferencias entre ellos y reportan valores que oscilan entre 1893 y 2250,7 USD ha<sup>-1</sup>.

*Cuadro 24. Efecto del nivel de insumo sobre los ingresos totales de operación promedio por año en SAF de Turrialba*

Insumo	Ingreso total (USD ha <sup>-1</sup> ) <sup>b)</sup>	E.E.	
AC	3413,18	218,53	A
MC	2250,71	160,09	B
MO	2217,06	163,17	B
BO	1893,02	228,47	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

En el ensayo de Masatepe, el análisis concluye que la interacción entre sombra y nivel de insumo no fue significativa ( $p=0,9806$ ) por lo que se analizó cada factor de forma individual. Para el factor Sombra no se encontraron diferencias significativas ( $p=0,1838$ ) igual que para el factor nivel de insumo ( $p=0,5683$ ). El ingreso promedio por año (USD ha<sup>-1</sup>) para cada SAF (Figura 7) evidencia que no hay diferencias para los SAF analizados.

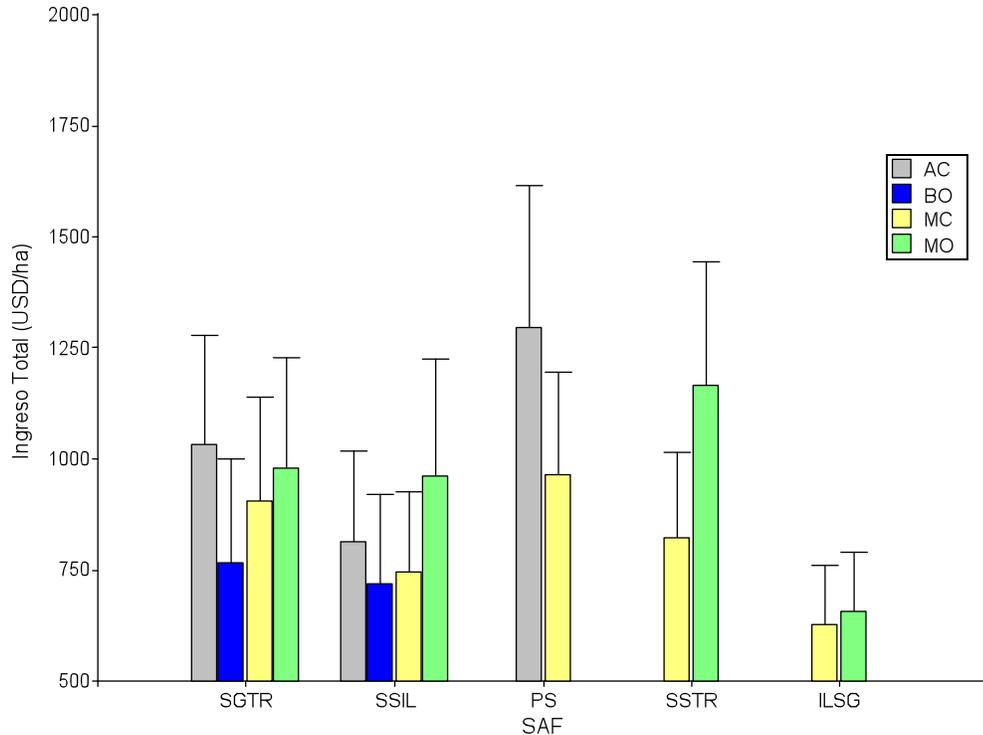


Figura 7. Ingresos totales (USD ha<sup>-1</sup>) promedio por año en SAF de café en Masatepe.

#### 4.6.4 Rentabilidad financiera de los SAF

Para los SAF analizados en el ensayo de Turrialba se encontró que para el valor actual neto VAN (USD ha<sup>-1</sup>) calculado para cada SAF, la interacción entre sombra y nivel de insumo es significativa ( $p=0,0372$ ). En la prueba de medias (Cuadro 25) se muestra que los sistemas PS, E y CE con nivel de insumos químico intensivo (AC) presentan mayores valores de rentabilidad que los demás SAF.

Entre los mejores sistemas también se incluye al E y CE en nivel de insumo BO y T-MO que no presentan diferencias frente al PS-MC. Con los resultados obtenidos se observa que, a excepción del CT-MO, todos los SAF evaluados son opciones viables ya que están generando valores positivos del indicador económico (Figura 8). Es importante considerar que en el caso de Turrialba se analizaron los costos e ingresos sin considerar los dos primeros años de establecimiento y mantenimiento del sistema agroforestal.

Cuadro 25. Comportamiento del Valor actual neto VAN (USD ha<sup>-1</sup>) en diferentes combinaciones de sombra y nivel de insumos en SAF de café en Turrialba.

SAF	VAN (USD ha <sup>-1</sup> )	E.E.					
PS_AC	7632,06	1957,33	A				
E_AC	7262,81	709,19	A				
CE_AC	6203,33	797,36	A				
PS_MC	5439,53	1957,33	A	B			
T_AC	5011,63	978,39	A	B			
ET_MC	4165,37	310,91	A	B			
E_BO	2974,71	709,19		B	C		
T_MC	2912,50	978,39		B	C		
T_MO	2842,87	978,39		B	C		
C_MC	2796,10	222,44		B	C		
CT_MC	2677,80	529,87		B	C		
E_MC	2522,35	709,19		B	C		
CE_BO	2004,52	797,36		B	C	D	
CE_MC	1832,30	797,36		B	C	D	
E_MO	1653,29	709,19		B	C	D	
CE_MO	1316,92	797,36		B	C	D	E
ET_MO	578,37	310,91			C	D	E
T_BO	411,51	1198,28			C	D	E
C_MO	403,40	222,44				D	E
CT_MO	-276,59	529,87					E

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

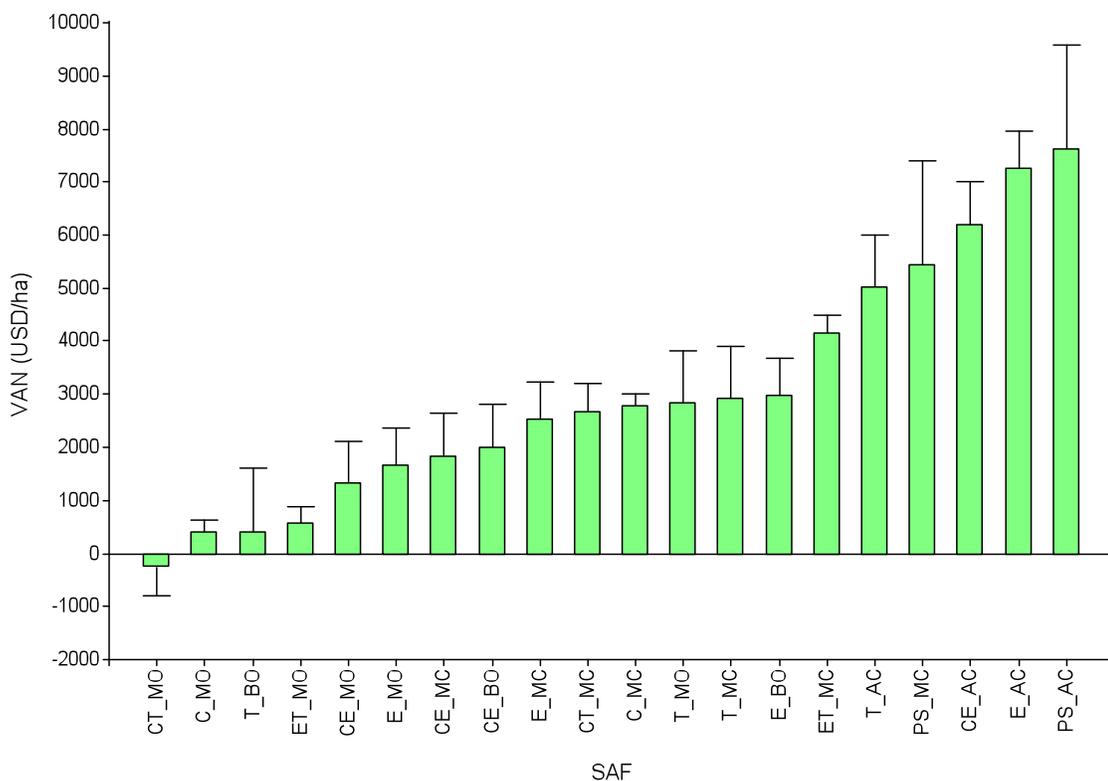


Figura 8. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha<sup>-1</sup>) para los SAF de café evaluados durante el periodo 2000-2008 en Turrialba.

En el caso de Masatepe, se encontró que la interacción entre sombra y nivel de insumo no es significativa ( $p=0,8592$ ) por lo que se analizó cada factor de forma individual. Para el factor sombra no se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0598$ ) mientras que para el factor nivel de insumo si se reportaron diferencias significativas ( $p=0,0031$ ).

Cuadro 26. Comportamiento del Valor actual neto VAN (USD ha<sup>-1</sup>) en diferentes niveles de insumos en SAF de café en Masatepe

Insumo	VAN (USD ha <sup>-1</sup> )	E.E.	
MO	258,26	281,86	A
BO	141,09	302,03	A B
MC	-41,06	276,21	B
AC	-129,23	285,82	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

El valor actual neto (USD ha<sup>-1</sup>) para cada SAF (Cuadro 26) evidencia que el nivel de insumo que presenta mayores valores de rentabilidad son los correspondientes a insumos orgánicos sin existir diferencias entre los niveles de aplicación (intensivo o bajo). Con los

resultados obtenidos se observa que los SAF viables son los que utilizan insumos orgánicos ya que están generando valores positivos del indicador económico. Esto coincide con Boyce et ál. (1993) quienes reportaron que la rentabilidad de la producción convencional de café fue negativa generando pérdidas de 42 USD ha<sup>-1</sup> mientras que el sistema orgánico reporto valores de 35,4 USD ha<sup>-1</sup> en un estudio comparativo entre la producción orgánica y convencional.

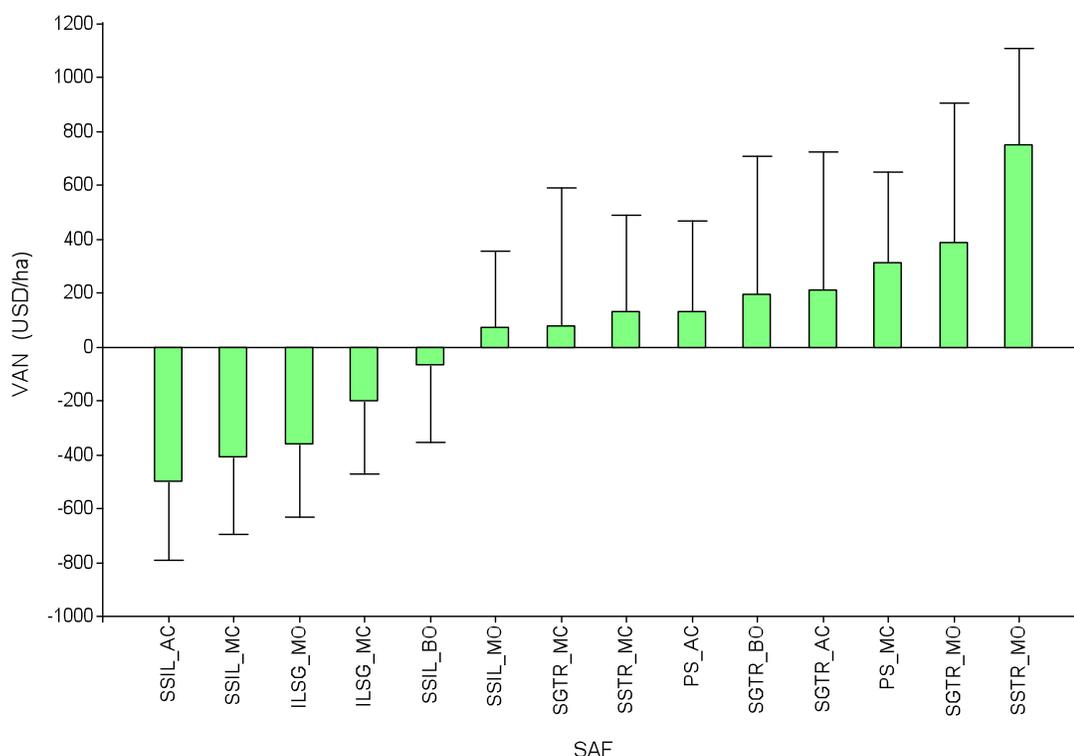


Figura 9. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha<sup>-1</sup>) para los SAF evaluados durante el periodo 2000-2008 en Masatepe.

Se procedió a revisar los valores del indicador económico VAN (USD ha<sup>-1</sup>) para la interacción entre los factores evaluados (sombra y nivel de insumo) (Figura 9). Se muestra que algunos SAF aún no son viables en comparación con los demás sistemas evaluados, ya que presentan valores negativos de rentabilidad. Cabe notar que estos sistemas utilizan combinaciones de sombra con *Inga laurina* (ILSG y SSIL) en diferentes niveles de insumo (AC, MC, MO, BO). La producción de café bajo los sistemas orgánicos reporta menos cambios, lo que genera ingresos constantes y por ende un flujo de caja estable. De esta forma, se mantienen los beneficios netos anuales y la rentabilidad de la producción orgánica que

incrementa a medida que se analiza la situación a largo plazo en comparación a la producción convencional (Duarte 2005).

#### 4.6.4.1 Análisis de sensibilidad

Se analizó el comportamiento del VAN (USD ha<sup>-1</sup>) realizando variaciones de la tasa de descuento, el precio del jornal y el precio de venta del café según los parámetros establecidos (Cuadro 6). Para el VAN, en el caso de Turrialba (Figura 10), se encontró que una tasa alta de descuento incide más en los tratamientos que utilizan insumos químicos en comparación con los sistemas que manejan enmiendas orgánicas.

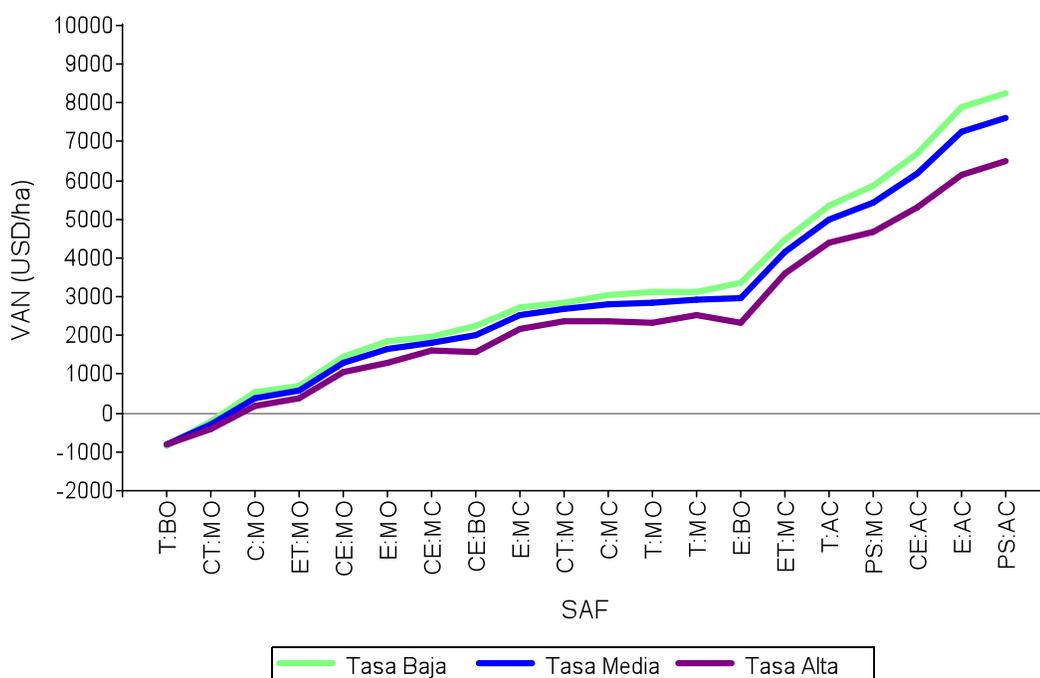


Figura 10. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha<sup>-1</sup>) frente a variaciones de la tasa de interés para los SAF evaluados en Turrialba.

Con la reducción del costo del jornal (Figura 11), la rentabilidad económica expresada mediante el VAN se ve notoriamente incrementada para los sistemas con niveles de insumo MO, BO y MC dado que utilizan más mano de obra, efecto contrario a lo que sucede cuando la mano de obra aumenta. En el caso de la variación en el precio de café, se encontró que el VAN solo es sensible para los sistemas que poseen altas producciones en comparación con los demás sistemas. En función a esto, es importante analizar si existe un sobrepeso para algunos de los sistemas estudiados y ver el comportamiento de la rentabilidad.

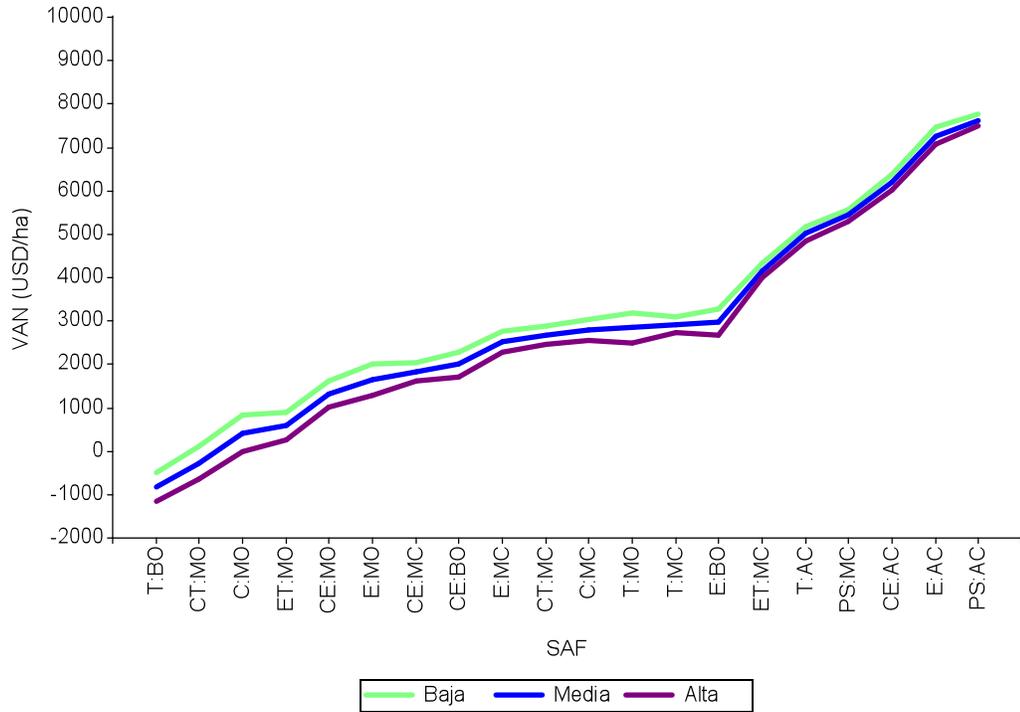


Figura 11. Comportamiento del Valor Actual Neto ( $\text{USD ha}^{-1}$ ) frente a variaciones del valor del jornal para los SAF evaluados en Turrialba.

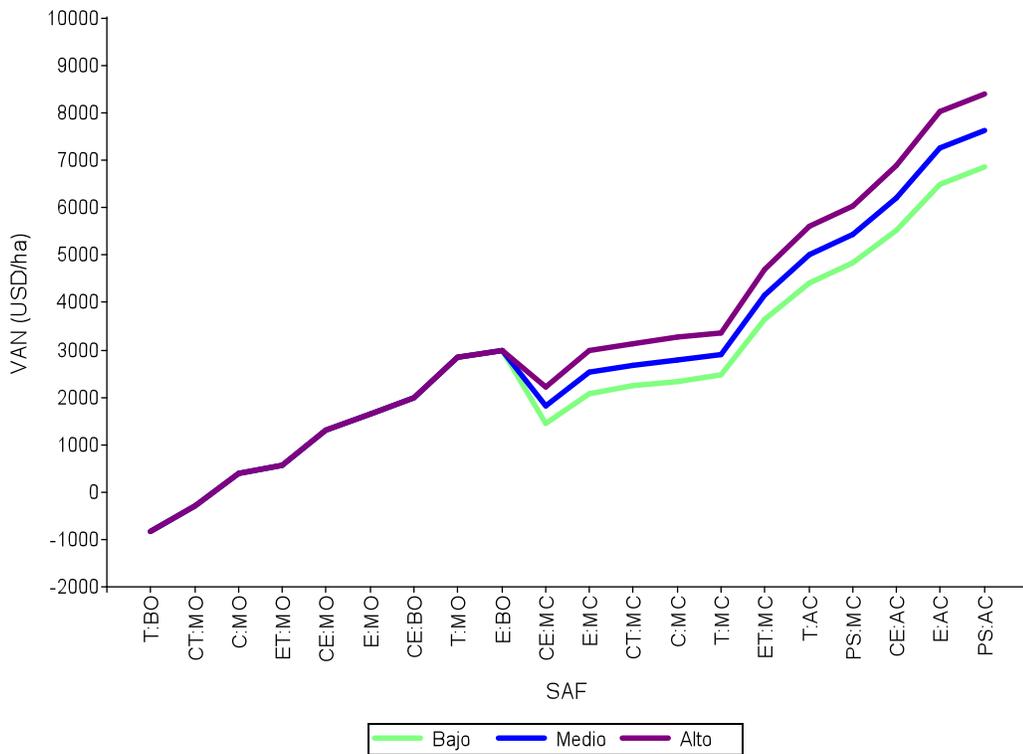


Figura 12. Comportamiento del Valor Actual Neto ( $\text{USD ha}^{-1}$ ) frente a variaciones del precio del café para los SAF evaluados en Turrialba.

#### **4.6.5 Escenarios para el café orgánico**

Sosa et ál. (2004) afirman que el precio pagado por el producto orgánico final debe ser mayor para que los sistemas de producción orgánica sean tan rentables como los sistemas de producción que emplean agroquímicos. Con la finalidad de encontrar un precio justo para la comercialización del café orgánico se plantearon diferentes porcentajes de sobreprecio donde se consideraron aumentos desde el 10% hasta el 40% sobre el precio normal de venta de café, basado en un estudio de FAO (2009), que mostró la tendencia a nivel mundial de los sobreprecios para café convencional y reportó valores hasta el 40% de sobreprecio para el año 2004.

Se realizaron análisis estadísticos utilizando modelos lineales generales y mixtos para evaluar el valor actual neto VAN (USD ha<sup>-1</sup>) calculado para cada SAF y que considera un incremento porcentual como sobreprecio solo para el café orgánico, sin tener diferenciación entre niveles de insumo intensivo o bajo. En el ensayo de Turrialba, se encontró que para el escenario de sobreprecio del café orgánico del 10% de sobreprecio, la interacción entre sombra y nivel de insumo es significativa ( $p=0,0341$ ) para el VAN. De la misma forma se encontró que se mantenía esa significancia ( $p=0,0318$ ) en el escenario del 20% y resultados similares se reportaron para el 30% ( $p=0,0301$ ) y 40% de sobreprecio ( $p=0,0289$ ) respectivamente.

En la prueba de medias (Cuadro 27Cuadro 25) se muestra que el PS-AC es el SAF que presenta mayores valores de rentabilidad y se mantiene a variaciones en el precio. En el primer escenario (10% de sobreprecio), los sistemas que no presentan diferencias en rentabilidad con PS\_AC presentan valores de rentabilidad entre 3940–7632 USD ha<sup>-1</sup>; estos sistemas utilizan insumos químicos sin existir diferencias entre niveles de aplicación (AC-MC) y también se incluyen en este grupo dos sistemas de origen orgánico (T-MO y E-BO). En el escenario de 20% de aumento en el precio de venta de café, se mantienen los SAF del primer escenario y se incluyen dos SAF orgánicos (E-MO y CE-BO) que poseen valores promedios de 3642 y 3603 USD ha<sup>-1</sup>.

En el escenario de 30% de sobreprecio, se mantienen los SAF del segundo escenario y se incluye el SAF orgánico CE-MO con un valor de 3886 USD ha<sup>-1</sup>. En el último escenario (40% de aumento en el precio) 15 de los 20 SAF analizados no son estadísticamente diferentes entre sí. Según Porras (2006), en un estudio realizado en el Corredor Biológico Turrialba–

Jiménez, Costa Rica, el sobreprecio dado a los productores orgánicos en esta zona fue del 38% y Lyngbaek et ál. (1999) indican que los productores requieren de una bonificación del 23% para compensar la baja en la producción en comparación con los sistemas convencionales.

*Cuadro 27. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha<sup>-1</sup>) frente a variaciones del precio de comercialización de café orgánico en SAF de café en Turrialba*

SAF	Sobreprecio (%)							
	VAN S10		VAN S20		VAN S30		VAN S40	
PS_AC	7632,06	A	7632,06	A	7632,06	A	7632,06	A
E_AC	7262,81	A	7262,81	A	7262,81	A	7262,81	A
CE_AC	6203,33	A	6203,33	A	6203,33	A	6203,33	A
PS_MC	5439,53	AB	5439,53	AB	5439,53	ABC	5439,53	AB
T_AC	5011,63	AB	5011,63	AB	5011,63	ABC	5011,63	AB
ET_MC	4165,37	AB	4165,37	AB	4165,37	ABC	4165,37	AB
T_MO	3982,12	AB	5121,36	AB	6260,61	A	7399,85	A
E_BO	3940,72	AB	4906,72	AB	5872,72	AB	6838,72	A
T_MC	2912,50	B	2912,50	BC	2912,50	BC	2912,50	AB
CE_BO	2804,02	B	3603,52	AB	4403,02	ABC	5202,52	AB
C_MC	2796,10	B	2796,10	BC	2796,10	C	2796,10	B
CT_MC	2677,80	B	2677,80	BC	2677,80	C	2677,80	B
E_MO	2647,59	B	3641,88	AB	4636,17	ABC	5630,47	A
E_MC	2522,35	B	2522,35	BC	2522,35	C	2522,35	B
CE_MO	2173,41	BC	3029,90	BC	3886,39	ABC	4742,89	AB
CE_MC	1832,30	BC	1832,30	BC	1832,30	C	1832,30	B
ET_MO	1340,39	BC	2102,42	BC	2864,43	C	3626,46	AB
C_MO	1298,37	BC	2193,34	BC	3088,31	BC	3983,28	AB
T_BO	1029,00	BC	1646,49	BC	2263,98	C	2881,47	AB
CT_MO	468,92	BC	1214,43	C	1959,94	C	2705,45	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ); VAN = Valor Actual Neto  
Celdas sombreadas no representan diferencias significativas.

En el ensayo de Masatepe, se encontró que la interacción entre sombra y nivel de insumo no es significativa (Cuadro 28) para los VAN, considerando los escenarios de sobreprecio del café orgánico. Por lo anterior, se analizó cada factor de forma independiente. En el factor sombra se presentaron diferencias significativas solo en el caso de sobreprecios

del 30 y 40%, mostrando que el SSTR posee los mayores valores de rentabilidad que no son diferentes del SGTR (Cuadro 29 Cuadro 28).

*Cuadro 28. Valores de probabilidad para los distintos efectos evaluados sobre el VAN (USD ha<sup>-1</sup>) considerando sobrepuestos de café orgánico en SAF de café en Masatepe*

Factor	Sobrepuesto (%)			
	10	20	30	40
<b>Sombra x Insumo</b>	0,7856	0,7053	0,6280	0,5599
<b>Sombra</b>	0,0662	0,0588	<b>0,0439</b>	<b>0,0286</b>
<b>Insumo</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>

El PS a pesar de que posee valores bajos de rentabilidad sigue siendo una opción viable al presentar valores positivos del VAN. En el caso del SSIL se observa que al considerar un sobrepuesto del 20% el sistema se vuelve rentable en comparación con la opción de 10% de sobrepuesto. En ILSG el cambio de rentabilidad se observa a partir del escenario de 30% de sobrepuesto. Para los escenarios de 30 y 40% de sobrepuesto solo se presentan diferencias de SSTR con valores de 1115-1339 USD ha<sup>-1</sup> frente a 99,93-382,05 USD ha<sup>-1</sup> correspondientes a PS, ILSG y SSIL.

*Cuadro 29. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha<sup>-1</sup>) en el componente sombra frente a variaciones del precio de comercialización de café orgánico en SAF de café en Masatepe*

Sombra	Sobrepuesto (%)					
	VAN S10	VAN S20	VAN S30		VAN S40	
SSTR	666,18	890,6	1115,02	A	1339,44	A
SGTR	381,85	545,8	709,74	AB	873,69	AB
PS	224,31	224,31	224,31	B	224,31	B
SSIL	-76,14	76,59	229,32	B	382,05	B
ILSG	-155,39	-27,73	99,93	B	227,59	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )  
Celdas sombreadas no representan diferencias significativas.

En el factor nivel de insumo se presentaron diferencias significativas (Cuadro 30) en todos los escenarios de sobrepuesto planteados. La prueba de medias muestra que el MO posee

los mayores valores de rentabilidad y presenta diferencias con BO solo a partir del 30% de sobreprecio. Los niveles de insumo que utilizan enmiendas orgánicas presentan valores viables de rentabilidad caso contrario a los niveles químicos que presentan valores negativos de rentabilidad, es decir, que aun no han recuperado los costos de establecimiento y mantenimiento incurridos por el proyecto en los 8 años de producción. Los resultados coinciden con Boyce et ál. (1993) y Rasul y Thapa (2004) que recomiendan un sobreprecio del café orgánico ya que contribuye en la mayoría de los casos a mejorar la rentabilidad financiera de la producción de café y por ende minimiza el riesgo de cambio de la actividad productiva por una más rentable.

*Cuadro 30. Comportamiento del Valor Actual Neto (USD ha<sup>-1</sup>) en el componente Insumo frente a variaciones del precio de comercialización de café orgánico en SAF de café en Masatepe*

Insumo	Sobreprecio (%)							
	VAN S10		VAN S20		VAN S30		VAN S40	
MO	627,28	A	988,62	A	1345,11	A	1698,65	A
BO	409,43	A	676,09	A	941,76	B	1206,97	B
MC	-50,48	B	-53,46	B	-52,20	C	-48,29	C
AC	-127,51	B	-125,14	B	-122,74	C	-120,50	C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )  
 Celdas sombreadas no representan diferencias significativas.

## 4.7 Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación fue planteada con el objeto de evaluar la rentabilidad de los sistemas agroforestales establecidos por el proyecto Ensayo de Sistemas. Para ello se estimó y se evaluó el indicador económico VAN para los 20 sistemas establecidos en Turrialba, Costa Rica y para 14 sistemas en Masatepe, Nicaragua. De esta evaluación se pudo apreciar que:

- La mano de obra representa el mayor porcentaje de incidencia en los costos de producción en general; siendo los sistemas orgánicos aquellos con mayor peso.
- La producción de café bajo sombra y niveles orgánicos es más estable en comparación con los sistemas a pleno sol, además genera ingresos constantes y un flujo de caja estable, mejorando así los beneficios netos anuales y por ende la rentabilidad de la producción.

- Para que los sistemas orgánicos sean rentables se debe tener por lo menos un 20% de sobreprecio frente al convencional.
- Teniendo en cuenta que con similares costos el reemplazo de mano de obra por insumos no solo es ambientalmente más amigable sino que también genera más posibilidades de desarrollo, menos dependencia de insumos externos, para iguales rentabilidades son preferibles los sistemas orgánicos. Otro punto a favor para los sistemas orgánicos es que estos son bajo sombra y son proclives a un pago por los servicios ambientales que generan.
- Se recomienda incluir en el futuro las ganancias anualizadas por la venta de madera.
- Se recomienda ajustar por precios de mano de obra y estandarizar las cantidades de mano de obra respecto a los testigos como pleno sol, para de esta manera hacer una estimación mejor de la verdadera cantidad de mano de obra invertida en cada sistema.

## 4.8 Bibliografía

- Bacon, C. s/f. Estudio de costos y propuesta de precios para sostener el café, las familias de productores y organizaciones certificadas por Comercio Justo en América Latina. Disponible en: <http://www2.ups.edu/faculty/mwarning/documents/Bacon-Estudio%20de%20Costos.pdf>
- Banco Central de Costa Rica. 2009. Indicadores económicos. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/IndicadoresEconomicos/frmEstructuraInformacion.aspx?idioma=E&codMenu=%20900&DesTitulo=Tasas%20de%20inter%C3%A9s>
- Beer, J.; Muschler, R.; Kass, D.; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* v. 38(1-3) p. 139-164.
- Boyce, J.; Fernandez, A.; Furst, E.; Segura, O. 1993. Crisis e innovación cafetalera en Costa Rica: el café orgánico como opción de desarrollo sostenible. Simposio Internacional

Modernización tecnológica, cambio social y crisis cafetalera. Universidad nacional- ICAFE 20 p.

Castro, F; Montes, E; Raine, M. 2004. Centroamérica la crisis cafetalera: efectos y estrategias para hacerle frente. San José, CR, Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 23. 128 p.

Cordero, J.; Boshier, D.H.; Barrance, A.; Beer, J.; Boshier, D.H.; Chamberlain, J.; Detlefsen, G.; Finegan, B.; Galloway, G.; Gómez, M.; Gordon, J.; Hands, M.; Hellin, J.; Hughes, C.; Ibrahim, M.; Kass, D.; Leakey, R.; Mesén, F.; Montero, M.; Rivas, C.; Somarriba, E.; Stewart, J.; Pennington, T. 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Oxford Forestry Institute, Oxford (RU). CATIE, Turrialba (Costa Rica).

Cuellar, N.; Herrador, D.; Gonzáles, M. 1999. Comercio de servicios ambientales y desarrollo sostenible en Centroamérica: Los casos de Costa Rica y El Salvador. Disponible en <http://iisd.ca/trade/knownet.htm>.

Da Silva, J.M.; Pereira, R.R. 2001. Custos de produção do café na região de Lavras – MG: estudo de casos. Universidade Federal de Lavras, MG, Brasil. Disponible en línea en [http://www.editora.ufla.br/revista/25\\_6/art04.pdf](http://www.editora.ufla.br/revista/25_6/art04.pdf).

De Aquino, A.; De Melo Virginio Filho, E.; Dos Santos, M.; Casanoves, F. 2008. Populações de minhocas em sistemas agroflorestais com café convencional e orgânico. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 32, n. 4, p. 1184-1188. Disponible en línea en [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-0542008000400022&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-0542008000400022&script=sci_abstract)

De Melo Virginio Filho, E. 2009. Sistemas Agroforestales como herramienta para recuperación de paisajes degradados en el ámbito de la concertación interinstitucional para el desarrollo sostenible. I Encuentro Paulista de Biodiversidad. 18 de Noviembre. Disponible en: [http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/SIGAM2/Repositorio/126/Documentos/Eventos\\_09/EPBio\\_28\\_Elias.pdf](http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/SIGAM2/Repositorio/126/Documentos/Eventos_09/EPBio_28_Elias.pdf)

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. The market for organic and fair-trade coffee. Disponible en línea en

[http://www.fao.org/fileadmin/templates/organicexports/docs/Market\\_Organic\\_FT\\_Coffee.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/organicexports/docs/Market_Organic_FT_Coffee.pdf)

- Florián, E. 2005. Tropical bird assemblages in coffee agroforestry systems: exploring the relationships between landscape context, structural complexity and bird communities in the Turrialba - Jiménez Biological Corridor, Costa Rica. . Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 146p.
- Haggar, J; De Melo Virgínio Filho, E. 2001. Calidad, ecología y diversificación. Boletín unidad de comunicación. CATIE.
- Herrera, R. 2001. Evaluación de diferentes enmiendas orgánicas en crecimiento e incidencia de enfermedades foliares de café (*Coffea arabica* L) vivero. Tesis Ing. Universidad Nacional Agraria (UNA). Managua. p. 19-22.
- Instituto del café de Costa Rica (ICAFE). 2008. Estructura de Costos de Producción Agrícola de Café.
- Maginnis, S; Mendez, J; Davies J. 1998. Manual para el manejo de bloques pequeños de bosque húmedo tropical: con especial referencia a la Zona Norte de Costa Rica. Costa Rica. CODEFORSA 208 p.
- Merlo, M. 2007. Comportamiento productivo del (*Coffea arabica* var. caturra), el poró (*Erythrina poeppigiana*), el amarillón (*Terminalia amazonia*) y el cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) en sistemas agroforestales bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 92p.
- Porras Vanegas, C.M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica. Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 131p.
- Rasul, G; Thapa, GB. 2004. Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: an assessment based on environmental, economic and social perspectives. *Agricultural Systems* 79: 327-351.

- Romero, S. 2006. Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* var. Caturra), con tres niveles de manejo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 128p.
- Salazar, M. 2005. Análisis de rentabilidad financiera del programa C.A.F.E Practices de Starbucks en diferentes tipologías de productores cafeteros de altura en Costa Rica. Tesis Mag Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 120p.
- Sosa, L.M.; Escamilla, E.P.; Díaz, S.C. 2004. Organic coffee. In Wintgens, J.N. Coffee: growing, processing, sustainable production. Wiley – UCH, Weinheim 339 – 354.
- United States Department of Agriculture. (USDA). 2008. Reportes de los Mercados Cafetaleros de Diferentes Países Productores. Disponible en [http://www.icafe.go.cr/sector\\_cafetalero/estadsticas/info\\_varios.html](http://www.icafe.go.cr/sector_cafetalero/estadsticas/info_varios.html)
- Zea, Y. 2003. Análisis económico del manejo forestal sostenible: Implicaciones de la aplicación del monitoreo ecológico en la rentabilidad del manejo en bosques con alto valor de conservación bajo certificación, Región Autónoma del Atlántico Norte, Nicaragua. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 97 p.

## **5 ARTÍCULO 2. FIJACIÓN DE CARBONO EN BIOMASA AÉREA EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ**

### **5.1 Introducción**

En los últimos años, los sistemas agroforestales han sido ampliamente estudiados dado el reconocido potencial que tienen para contribuir al mejoramiento del ambiente y a la sostenibilidad de la producción agrícola y forestal, especialmente en fincas pequeñas (Reiche y Gómez 1993). Actualmente, el estudio de cafetales bajo sombra recibe mucha atención no solo por la importancia económica del café sino por los beneficios ambientales debido a la implementación de los sistemas agroforestales (Yepes 2001). Estos estudios han sido dirigidos en función a los beneficios ambientales tales como el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Porras 2006, George 2006, Zuluaga 2004), la fijación de nitrógeno (Osorio 2004, Arana 2003, Gutiérrez 2002), la regulación hídrica (Renderos 2001, Salguero 1996), la captura de carbono (Mena 2008, Merlo 2007, Dzib 2003, Ruiz 2002) y la conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados (Estrada 2009, Perez 2008, Florian 2005, Barbera 2001) entre otros.

Es por esto, que el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) junto con la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), la Universidad Nacional Agraria (UNA), el Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA), la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto del Café en Costa Rica (ICAFE) establecieron en el año 2000 dos ensayos de campo con el fin de identificar las interacciones ecológicas para evaluar la sostenibilidad de los sistemas anteriormente mencionados y para establecer la base del desarrollo de una caficultura sostenible (Hagggar y De Melo 2001). El primer ensayo fue establecido en Turrialba, Costa Rica, en el cuál se estudian las interacciones entre variados tipos de sombra y tipos de insumos en diferentes niveles, para el manejo de plagas y el manejo de la nutrición de los cafetos. En este ensayo se establecieron como árboles de asocio con el café las especies *Terminalia amazonia*, *Abarema Idiopoda* y *Erythrina poeppigiana* que poseen diferentes características físicas y de uso. Según Merlo (2007) no existen estudios sobre estos socios en las fincas en la zona de Turrialba, por lo que es primordial establecer los beneficios tanto económicos como ecológicos de estos sistemas, que permitan generar datos primordiales para la promoción de una caficultura sostenible. Con la misma finalidad se estableció un segundo ensayo en Masatepe, Nicaragua, donde se establecieron como árboles

de asocio las especies *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, *Samanea saman* e *Inga laurina* en diferentes combinaciones.

Es conocido que en la actualidad no se reconoce el servicio de captura de carbono en sistemas agroforestales con café, por lo que es necesario promover sistemas de pago que reconozcan este beneficio ambiental y para esto es importante desarrollar parámetros que evidencien la acumulación de carbono en los SAF café. Se han realizado estudios en sistemas agroforestales que buscan estimar el carbono fijado como principal servicio ambiental en especies usadas comúnmente como sombras en cafetales (Avila 2000, Suarez 2002, Ruiz 2002) y pocos de estos estudios han estado dirigidos a nuevas especies en asocio, en particular hay poca información sobre especies nativas como árboles de sombra y su compatibilidad con el café, por esto es importante determinar la capacidad de fijar carbono que posee cada sistema agroforestal. De esta forma, contribuir a generar información que extienda la base de datos de cantidades de carbono y provisión de servicios ambientales.

## **5.2 Objetivo**

- Desarrollar modelos de biomasa para las especies en asocio presentes en los sistemas agroforestales de café (bajo manejos convencionales y orgánicos).
- Estimar el carbono fijado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales con café.

## **5.3 Hipótesis**

- El manejo agronómico (convencional y orgánico) afecta significativamente el almacenamiento y fijación de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales con café.

## **5.4 Materiales y métodos**

### ***5.4.1 Ubicación del sitio de estudio***

La investigación se realizó en dos ensayos establecidos con una visión a largo plazo (20 años), para evaluar las interacciones agroecológicas en diferentes sistemas agroforestales

en café. El primer ensayo fue establecido en un área de 9,2 ha de la finca experimental del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicado en el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica. El sitio del ensayo está localizado en el sector Bonilla 2, con las siguientes coordenadas 9° 53' 44'' N, 83° 40' 7'' O, con una elevación de 685 msnm y precipitación aproximada de 2600 mm año<sup>-1</sup>.

El segundo ensayo se estableció en el área del Centro de Capacitación y Servicio Regional del Pacífico de Nicaragua (Jardín Botánico) de la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), con coordenadas geográficas de 11° 54' N y 86° 09' O a una altitud de 455 msnm, con precipitación anual de 1400 mm, y temperatura promedio de 24 °C y una humedad relativa de 70-80% (Herrera 2001). Este experimento consiste en tres repeticiones, las dos primeras fueron establecidas en el año 2000 en la zona anteriormente descrita y la tercera repetición fue establecida en el año 2001 en áreas del Centro Experimental de Campo Azules (CECA), propiedad del Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA) con coordenadas geográficas 12° 19' N y 86° 04' O, a una altitud de 455 msnm; ambos sitios están ubicados en el Municipio de Masatepe, departamento de Masaya, Nicaragua.

#### **5.4.2 Suelos y zona de vida**

Los suelos del ensayo de Turrialba se caracterizan como aluviales mixtos, Ultisol e Inceptisol (Merlo 2007), presentan problemas de drenaje clasificándose como *Typic Endoaquults* y *Typic Endoaquepts*, mientras que en Masatepe los suelos son predominantemente Andisoles clasificándose como *Humic Durustand* y *Humic Haplustand*, con presencia de una capa de material volcánica cementada (conocida como tapeltate) a profundidades que varían de 15 cm a 1 m (Soto et ál. 2006). Según la clasificación de Holdrige, el ensayo en Turrialba pertenece a la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano (bmh-P), mientras que el ensayo en Masatepe se encuentra en Bosque Húmedo Premontano (bh-P).

##### **5.4.2.1 Turrialba**

Se establecieron como árboles de asocio para el café las especies *Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda* y *Erythrina poeppigiana* que poseen diferentes características físicas y de uso (Cuadro 31). El ensayo consiste en lotes de café caturra plantado a 2 × 1 m, con los

diferentes tipos de sombra plantados a  $6 \times 4$  m. Los tratamientos de sombra incluyen café a pleno sol y diferentes combinaciones de árboles para formar un gradiente de fenología y forma de dosel.

*Cuadro 31. Características de las especies de asocio – Turrialba*

<i>Especies</i>	<i>Fenología</i>	<i>Forma dosel</i>	<i>Fijador-N</i>	<i>Uso</i>
<i>Terminalia amazonia</i>	Perennefolia	Alto estrecho	No	Madera
<i>Abarema Idiopoda</i>	Perennefolia	Alto abierto	Sí	Madera
<i>Erythrina poeppigiana</i>	Perennefolia	Bajo estrecho	Sí	Servicio

#### 5.4.2.2 Masatepe

Se establecieron las especies *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, *Inga laurina* y *Samanea saman*, que son diferentes en sus características fenológicas, físicas y de uso (Cuadro 32). Los árboles fueron plantados a  $4 \times 3,75$  m, luego raleados el 50% de la densidad inicial a los 5-6 años. Además se realizaron podas anuales de formación y para regulación de sombra. Al igual que en Turrialba, los tratamientos de sombra incluyen café a pleno sol y diferentes combinaciones de árboles para formar un gradiente de fenología y forma de dosel.

*Cuadro 32. Características de las especies de asocio - Masatepe*

<i>Especies</i>	<i>Fenología</i>	<i>Forma dosel</i>	<i>Fijador-N</i>	<i>Uso</i>
<i>Simarouba glauca</i>	Perennifolia	Alto estrecho	no	Madera
<i>Tabebuia rosea</i>	Caducifolia	Alto estrecho	no	Madera
<i>Samanea saman</i>	Caducifolia	Alto abierto	sí	Madera
<i>Inga laurina</i>	Perennifolia	Bajo abierto	sí	Servicio

##### 5.4.2.2.1 Características de las especies de árboles como sombra.

En los experimentos se establecieron diferentes especies de árboles de tipos leguminosos y maderables, que se describen a continuación:

***Inga laurina* (Sw.) Willd. (guaba, guabillo y cuanjiniquil); Familia: Leguminosae Mimosoideae.** La especie *Inga* sp. es apta y ampliamente usada en sistemas de finca donde se requieren arboles de sombra. Este se usa principalmente como sombra para café, pero también en diversos SAF debido a su fácil germinación por semillas, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos, incluyendo los ácidos,

producción de mantillo de lenta descomposición, lo que mejora el control de malezas, la liberación lenta de nutrientes y la conservación de la humedad del suelo. También tiene la posibilidad de ser combinada con otras especies para producir diversidad. También se usa en lugares con estaciones marcadas de hasta seis meses secos, típicos en la zona del Pacífico Centroamericano (Cordero et ál. 2003).

***Simarouba glauca* DC (acetuno, aceituno, negro): Familia: Simaroubaceae.** Es un árbol de mediano a grande, que alcanza 25-27 m de altura y un dap de 40-50 cm, a menudo con un fuste cilíndrico limpio hasta los primeros 9 m, de copa estrecha, corteza fisurada y de color pardo amarillento a grisáceo. Crece rápido y se adapta a una gran variedad de ambientes. Es un árbol del dosel medio que es usado principalmente en restauración ecológica y plantaciones de enriquecimiento del bosque natural, así como también como sombra para café en Nicaragua y El Salvador (Cordero et ál. 2003). Estos autores indican que el crecimiento anual en plantaciones establecidas en Mateare, Managua, Nicaragua (bosque seco), los incrementos medios anuales (IMA) en dap han sido de 1,2 a 2,0 cm y en altura de 0,8 a 1,8 m. En ensayos en Honduras y Guatemala los resultados de crecimiento fueron bajos, pues el IMA fue de 0,3 m en altura, en un sitio de clima similar al del ensayo de Nicaragua, sugiriendo que se debe prestar atención en la plantación y manejo para obtener el potencial que esta especie puede ofrecer (Cordero et ál. 2003).

***Tabebuia rosea* (Bertol.) DC (roble sabanero, macuelizo, falso roble) Familia: Bignoniaceae.** Se caracteriza por ser un árbol caducifolio de porte mediano a grande, hasta 28-37 m de altura, con 50-100 cm de dap. El árbol tiene una copa ancha, que puede ser cónica o irregular con follaje abierto, liviano. La corteza es gris oscura, escamosa con fisuras verticales. Se emplea en plantaciones y ensayos de enriquecimiento, bajo sistemas silvopastoriles, linderos, como sombra ornamental o sombra para café, en proyectos de restauración ecológica en zonas secas, es fuente de alimento y albergue de animales (Cordero et ál. 2003).

Según Cordero et ál. (2003), en parcelas de 3 a 5 años de edad en un rango de sitios en América Central (bosque seco, bosque seco premontano y bosque lluvioso), el promedio de crecimiento varió entre: 0,8 y 2,6 cm por año en dap, 0,7-2,2 m por año en altura. La madera es muy fácil de secar, y parecido en fortaleza a la teca (densidad 0,48-0,57 g cm<sup>-3</sup>). Cabe

resaltar que esta especie no ha sido usada muy comúnmente en plantaciones puras debido a la tendencia del fuste a bifurcar en los primeros años.

***Samanea saman* (Jacq.) Merrill (genízaro, cenizaro, guachapali, carrito negro)**

**Familia: Leguminosae Mimosoideae.** Árbol muy grande desde 25-30 m de altura y hasta 45-50 m, con un tronco corto de hasta 2-3 m de dap. De copa grande y redondeada, tienen la capacidad de fijar nitrógeno, crecen a campo abierto por lo que provee sombra a una amplia área. Posee corteza rugosa y de color pardo grisácea, con líneas verticales. Su madera es resistente y bastante ligera ( $0,42-0,64 \text{ g cm}^{-3}$ ) (Cordero et ál. 2003).

Estos árboles normalmente se encuentran en fincas como individuos grandes aislados en potreros, donde se mantienen por la sombra de su enorme copa, el forraje de las vainas y con el tiempo la madera de aserrío, además es ideal para árbol de sombra, ya que sus folíolos parecidos al helecho, se cierran por la noche, lo que permite que el agua pase a través hasta la cubierta herbácea a sus pies. Sin embargo, al extenderse tanto, la especie no es apta para plantaciones o pequeñas plantaciones para leña. Debido a su extenso sistema radical se debe tener cuidado de no plantar esta especie donde sus raíces puedan competir con cultivos anuales (Cordero et ál. 2003).

***Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Excell (roble coral, amarillón, canxún, naranjo)**

**Familia: Combretaceae.** Se caracteriza por ser un árbol grande de hasta 50 m de altura (típicamente 20-35 m) y 1.5 m de dap. Los árboles maduros tienen gambas grandes, con fustes limpios y cilíndricos a alturas de hasta 20 m. Cordero et ál. (2003) reportan datos de gravedad específica entre 0.58-0.79. Posee una corteza delgada, de color café grisáceo, con fisuras verticales; hojas pequeñas (2-4,5 cm de largo) simples que se concentran en las puntas de las ramas. El fruto es alado (sámara), café-dorado cuando está maduro, de 1,5-2 cm de ancho, con dos alas grandes y tres de menor tamaño. Cada fruto contiene una semilla amarillenta, pequeña. Esta especie ha generado mucho interés por su gran potencial de crecimiento, adaptabilidad a condiciones difíciles, como colinas y planicies costeras, suelos rojos o amarillos, lateríticos profundos, derivados de materiales aluviales o ígneos (Cordero et ál. 2003).

***Abarema idiopoda* (Blake) Barneby & Grimes (cashá, cachá, dormilón) Familia:**

**Leguminosae Mimosoideae.** También conocida como *Chloroleucon eurycyclum*, es un árbol

de hasta 25 m de altura y 80 cm de dap. La forma de la copa es alta y abierta. Cordero et ál. (2003) reportan un crecimiento medio a los tres años fue de 7,3 cm de dap, 6,0 m altura cuando se ensayó a plena luz en plantaciones experimentales de la Estación Biológica La Selva en Heredia, Costa Rica. Bajo sombra, el crecimiento fue de 5,3 cm de dap, 5,2 m altura. Se ha reportado como usada para sombra en cultivos de café en Costa Rica, especialmente en el pacífico sur. La forma de la copa es alta y abierta y se puede combinar bien en estos sistemas con árboles de copas altas o bajas y compactas o abiertas. Es considerada buena para reforestación pues agarra bien y tiene buena supervivencia, aunque produce ramas muy pequeñas. Requiere de poda de formación en ejemplares jóvenes debido a sus ramificaciones irregulares o mal formadas (Romero 2006) por lo que es importante la selección de los mejores ejemplares si se pueden justificar económicamente (Cordero et ál. 2003).

### ***5.4.3 Diseño experimental***

El experimento fue conducido bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones y arreglo en parcelas divididas. En la parcela principal se establecieron los sistemas de producción formados por la asociación árbol-café (más pleno sol) y como subparcela el nivel de insumos. Los sistemas de producción están presentes en los tres bloques; sin embargo, los tratamientos de insumos no están en todas las parcelas principales, por lo que el diseño de tratamientos para efecto de esta investigación es un factorial incompleto en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones.

En los tratamientos, dados por la combinación de sombra y de manejo, establecidos en Turrialba y Masatepe, se han identificado cuatro niveles de insumos para el manejo de la fertilidad y plagas formado por manejos orgánicos y convencionales de niveles de uso intensivo y moderado (Cuadro 33). Si bien los niveles de insumos son los mismos en Turrialba y Masatepe, los tratamientos de asocio son generados con distintas especies (Cuadro 34 y Cuadro 35). Es importante considerar que los niveles de insumo se van adecuando a las necesidades del cultivo y por recomendaciones técnicas y practicas actuales de cada zona.

Cuadro 33. Niveles de insumos en la comparación de sistemas de producción de café

	Alto convencional	Medio convencional	Medio orgánico	Bajo orgánico
Tipos de enmiendas del suelo	Fertilizantes químicos	Fertilizantes químicos	Pulpa de café, gallinaza y piedra mineral molida	Pulpa de café
Nivel de enmiendas del suelo	Mucho mayor a los nutrientes sacados en la cosecha	Mayor a los nutrientes sacados en la cosecha	Mayor a los nutrientes sacados en la cosecha	Retorno de pulpa sacada en la cosecha
Manejo de enfermedades	Uso calendarizado de fungicidas comerciales	Uso infrecuente de fungicidas comerciales	Aplicaciones foliares de botánicos y biológicos	No
Manejo de plagas insectiles	Prácticas manuales y uso frecuente de insecticida comerciales	Prácticas manuales y uso ocasional de insecticidas comerciales	Aplicaciones foliares de botánicos y biológicos y prácticas manuales	Pepena post-cosecha
Manejo de malas hierbas	Suelo desnudo con herbicidas	Manejo selectivo con prácticas manuales y herbicidas en la calle y carril limpio	Manejo selectivo con prácticas manuales en la calle y carril limpio	2-4 desmalezados manuales

Cuadro 34. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Turrialba

Parcela principal	Subparcela			
	Alto convencional	Medio convencional	Medio orgánico	Bajo orgánico
<i>Erythrina poeppigiana</i>	x	x	x	x
<i>Terminalia amazonia</i>	x	x	x	x
<i>Abarema idiopoda</i>		x	x	
<i>T. Amazonia</i> - <i>A. idiopoda</i>		x	x	
<i>T. Amazonia</i> - <i>E. poeppigiana</i>		x	x	
<i>A. idiopoda</i> - <i>E. poeppigiana</i>	x	x	x	x
Pleno sol	x	x		

Cuadro 35. Tratamientos (combinaciones de asocio con nivel de insumos) – Masatepe

Parcela principal	Subparcela			
	Alto convencional	Medio convencional	Medio orgánico	Bajo orgánico
<i>Simarouba glauca</i> - <i>Tabebuia rosea</i>	x	x	x	x
<i>Tabebuia rosea</i> - <i>Samanea saman</i>		x	x	
<i>Simarouba glauca</i> - <i>Inga Laurina</i>		x	x	
<i>Inga laurina</i> - <i>Samanea saman</i>	x	x	x	x
Pleno sol	x	x		

#### **5.4.4 *Estimación de la biomasa aérea***

##### **5.4.4.1 Biomasa del componente leñoso**

La biomasa aérea se midió mediante el método directo (muestreo destructivo), para lo cual se realizó un raleo de los árboles de asocio en cada subparcela teniendo en cuenta criterios como distribución dentro de la parcela de medición y sombra proporcionada al sistema. También se realizó un inventario forestal y en función a éste se seleccionaron individuos por clase diamétrica para cada especie estudiada, con el fin de obtener una muestra que incluya individuos en las diferentes clases diamétricas presentes. Según Segura y Andrade (2008) para desarrollar modelos de biomasa se recomienda muestrear al menos 30 árboles distribuidos en todo el rango de dap, divididos en clases diamétricas y equitativamente entre clases. En este estudio se utilizaron entre 20 y 50 individuos para cada especie, tratando de respetar en lo posible este criterio (Figura 13). Cabe mencionar que en los dos ensayos los árboles muestreados son coetáneos y en total se estudiaron 6 especies, 4 para el ensayo de Masatepe, Nicaragua y 2 para el ensayo de Turrialba, Costa Rica.

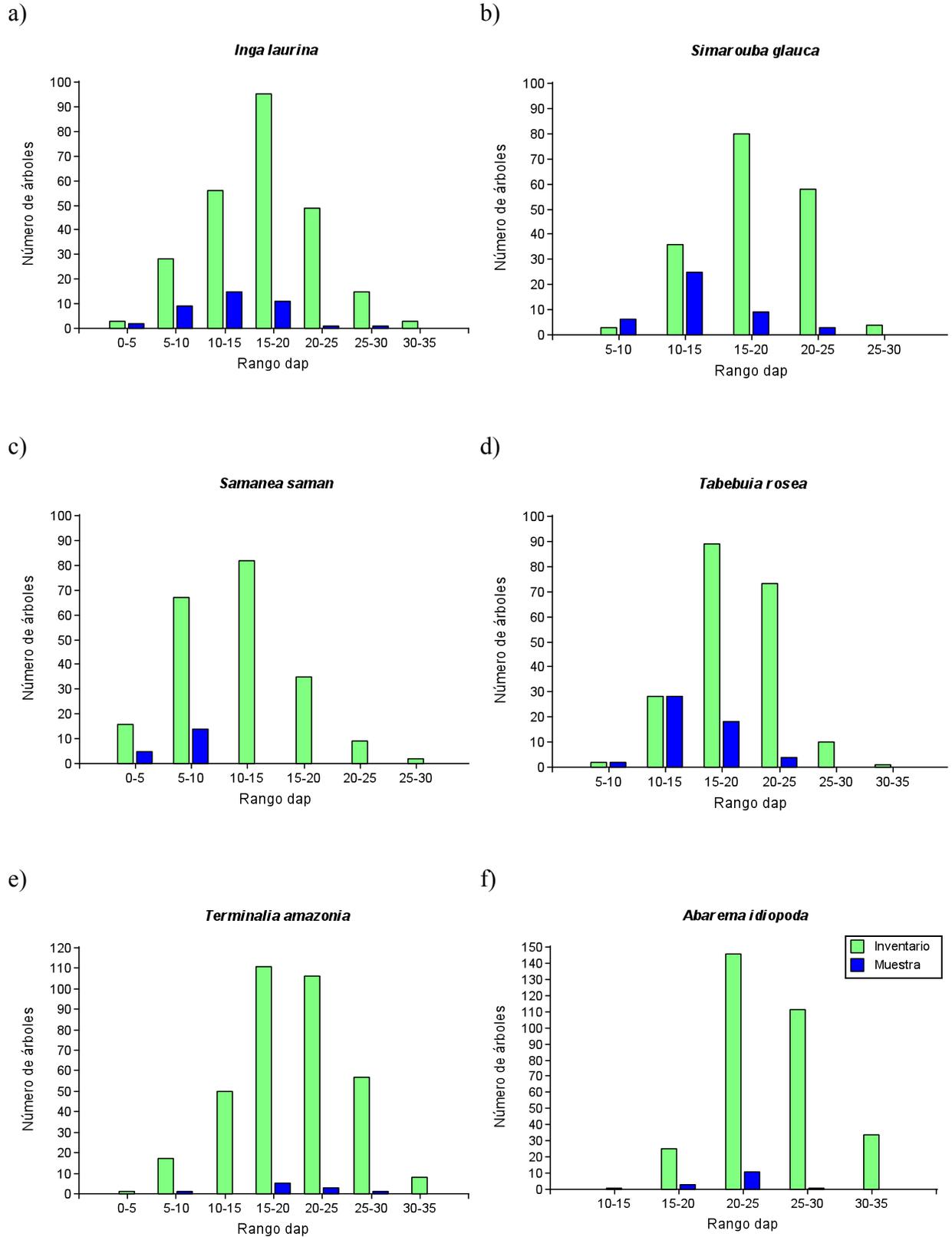


Figura 13. Distribución diamétrica de los árboles presentes en los SAF muestreados

#### 5.4.4.2 Medición en campo

Una vez elegidos los árboles con los criterios anteriormente explicados, se registraron las siguientes medidas para cada árbol.

- Parcela, fila y número de árbol
- Diámetro de copa (N-S, E-O)
- Dap
- Altura (con el árbol caído)

Una vez identificado el árbol a procesar se señaló la zona de caída y se identificó la zona de pesado con el fin de habilitarla para el trabajo de medición y pesado de la biomasa donde se ubica la balanza de 100 kg. El volteo del árbol se ejecutó realizando el corte lo más cerca al suelo posible. Después de caído el árbol se realizó el desrame y trozado para separar la biomasa en componentes (fuste, ramas mayores a 2 cm y ramas menores a 2 cm con hojas). Se pesó la biomasa de ramas y hojas por separado, para esto:

- Se separaron ramas por diámetro: finas (diámetro < 2 cm) y gruesas (diámetro > 2 cm). Las ramas finas se pesan con las hojas.
- Se pesan las ramas por categoría. Si es necesario se trozan las ramas gruesas para facilitar su pesado.

Se obtuvieron dos muestras de cada componente, una muestra de ramas y una de hojas, cada una con un peso en húmedo aproximado de 500 g. En cuanto al fuste comercial, se cortó en secciones, considerando que cada sección no debe pesar más allá de 100 kg debido a las limitaciones de la balanza. A cada sección del fuste comercial se le midió el diámetro menor, el diámetro mayor y su longitud, variando levemente la medición en caso de encontrar un nudo o deformidad. Estas mediciones se utilizan para estimar el volumen de madera extraído de la subparcela utilizando el método de Smalian. Luego, se pesó cada sección, obteniendo la biomasa en verde; por último, se extraen tres muestras (rodajas) de madera de diferentes partes del fuste (tocón, altura comercial). Una de las muestras es pesada en verde y marcada para llevar a laboratorio.

#### 5.4.4.3 Cálculo de biomasa por componentes

Las muestras extraídas de ramas, hojas y una de las muestras del fuste son llevadas a laboratorio para ser analizadas y secadas a 65 °C de temperatura hasta un peso constante con el fin de obtener el peso seco. La otra muestra (rodaja de madera) es utilizada para estimar la densidad de la madera.

Para cada componente se calcula el porcentaje de materia seca:

$$\%MS = \frac{P_s}{P_h} \times 100$$

donde:

$P_s$  : Peso seco (g)

$P_h$  : Peso húmedo (g)

Para calcular la biomasa en seco por cada componente (hojas, ramas mayores, ramas menores y fuste) se utiliza la ecuación:

$$B_{componente} = \frac{\%MS \times P_{h\_total\_componente}}{100}$$

donde:

$\%MS$ : Porcentaje de materia seca;

$P_{h\_total\_componente}$  : Peso húmedo total por componente (hojas, ramas y fuste)

#### 5.4.4.4 Cálculo de la biomasa aérea en árboles de asocio

La biomasa de los diferentes componentes sobre el suelo (hojas, ramas y fuste) se determinó a través de la ecuación:

$$B_{\text{árbol}} = B_{\text{fuste}} + B_{\text{hojas}} + B_{\text{rama}}$$

donde:

$B_{\text{fuste}}$ : Biomasa del fuste (Kg)

$B_{hojas}$  : Biomasa de hojas (Kg)

$B_{ramas}$  : Biomasa de ramas (Kg)

#### 5.4.4.5 Factor de expansión de biomasa

El FEB es el factor de multiplicación que aumenta la madera en pie o el volumen comercial, para tener en cuenta componentes de biomasa no medidos, como ramas, follajes y arboles no comerciales (IPCC 2003). Para obtener el FEB para cada especie se utilizó la ecuación expresada por Segura y Kanninen (2002):

$$FEB = \frac{B_{Total}}{B_{fuste}}$$

donde:

$B_{árbol}$  : Biomasa total arriba del suelo

$B_{fuste}$  : Biomasa del fuste

La estimación del FEB se hizo con la finalidad de tener un dato adicional para poder estimar la biomasa total cuando no se cuenta con otras técnicas de cálculo de biomasa, en este caso el FEB sólo se calculó para conocer la relación biomasa total entre la biomasa del fuste.

#### 5.4.4.6 Construcción de modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea en árboles individuales

En general, la construcción de modelos de biomasa consiste en la medición de árboles en pie y la posterior corta y cuantificación de su biomasa aérea total (Andrade e Ibrahim 2003). Para este estudio se desarrollaron ecuaciones alométricas para las especies *Inga Laurina*, *Samanea saman*, *Tabebuia rosea*, *Simarouba glauca*, *Terminalia amazonia* y *Abarema idiopoda* (también conocida como *Chloroleucon eurycyclum*) establecidas en las diferentes combinaciones de los SAF analizados, considerando como variable dependiente la biomasa total producida por árbol y como variable independiente el dap y la altura total.

Se ajustaron varios modelos y en algunos casos se realizaron transformaciones a logaritmo natural, con el fin de mejorar el ajuste de los modelos alométricos. Estudios sobre

estimación de biomasa mediante modelos alométricos utilizaron variables como el dap, la altura total y la altura comercial pero también dentro de estos modelos utilizan la variable dap como única variable regresora para estimar la biomasa total (Nelson et ál. 1999, Araujo et ál. 1999, Ruiz 2002, Álvarez 2008, Avendaño 2008). Para la elección del modelo a utilizar en la estimación de biomasa se consideraron como criterios de ajuste el  $R^2$ , el  $R^2$  ajustado, el error cuadrático medio de predicción (ECMP) y el cuadrado medio del error (CM error). Existen otros criterios como el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio bayesiano de información (BIC) que también fueron utilizados para la selección del mejor modelo dentro de un conjunto de modelos lineales para la misma variable respuesta (*i.e.* en nuestro caso biomasa total o su transformación logarítmica). De acuerdo a estos criterios el mejor modelo es aquel que tiene un valor AIC o BIC menor. Para cada especie se presentarán los tres mejores modelos.

Después de seleccionado cada uno de los modelos se probaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilks y gráficos *q-q plot* a partir de los residuos estudentizados. La homocedasticidad se evaluó mediante análisis de gráficos de residuos vs. predichos y la prueba de Levene.

#### **5.4.4.7 Biomasa de las plantas (café)**

Segura y Kanninen (2006) desarrollaron modelos alométricos para tres especies de sombra dominantes y para la planta de café en sistemas agroforestales con café en Matagalpa, Nicaragua. Para estimar la biomasa de la planta de café, se utilizó uno de los modelos desarrollados en ese estudio (Cuadro 36) que estiman la biomasa total ( $B_t$ ) en función del diámetro a 15 cm de la base del árbol ( $d_{15}$ ) y la altura total ( $h$ ). Para cada unidad experimental se tomaron al azar 35 plantas de café. Con el valor estimado por planta y los datos provenientes del inventario, se procedió a calcular un valor acumulado por subparcela como se hizo para el cálculo del estrato arbóreo.

Cuadro 36. Modelo alométrico para estimar biomasa en plantas de café

Modelo	Parámetros			R <sup>2</sup>
	a	b	c	
$\text{Log}_{10}(B_t) = a + b \times \text{Log}_{10}(d_{15}) + c \times \text{Log}_{10}(h)$	1,113	1,991	0,581	0,94

Fuente: Segura y Kanninen (2006)

#### 5.4.5 Estimación de biomasa aérea en el componente arbóreo

Con los datos del inventario y los valores estimados por los modelos alométricos generados para cada especie, se estimó el total de biomasa producida por subparcela, considerando a esta como la suma de la biomasa de los dos componentes del sistema agroforestal (árbol de asocio y árbol de café).

Se cuantificó la biomasa para 18 SAF de café en donde los tratamientos están formados por la combinación de sombra y nivel de insumos (Cuadro 37). En el ensayo de Masatepe, la biomasa del componente arbóreo se evaluó en distintos SAF de café en donde el componente sombra de cada parcela es formado por la combinación de dos especies (parcelas mixtas). En el caso de Turrialba, se cuantificó la biomasa aérea de las parcelas con especies puras. En los dos ensayos se utiliza como tratamiento control el pleno sol (PS).

Cuadro 37. Sistemas agroforestales de café evaluados

SAF	Ubicación	Tratamientos	Nivel de Insumos			
<i>Inga laurina</i> + <i>Simarouba glauca</i>	Masatepe	ILSG	MC	MO		
<i>Simarouba glauca</i> + <i>Tabebuia rosea</i>	Masatepe	SGTR	AC	MC	MO	BO
<i>Samanea saman</i> + <i>Inga laurina</i>	Masatepe	SSIL	AC	MC	MO	BO
<i>Samanea saman</i> + <i>Tabebuia rosea</i>	Masatepe	SSTR		MC	MO	
<i>Terminalia amazonia</i>	Turrialba	TA	AC	MC	MO	BO
<i>Abarema idiopoda</i>	Turrialba	AI		MC	MO	
Pleno Sol		PS	AC	MC		

AC: Alto convencional; MC: Medio convencional; MO: Medio orgánico; BO: Bajo orgánico.

Con los datos del inventario forestal y la estimación de la biomasa aérea por árbol individual, se cuantificó la biomasa total por subparcela. Las cantidades de biomasa por subparcela fueron expresadas en toneladas métricas por hectárea (t ha<sup>-1</sup>). Es necesario considerar que en el momento del inventario se encontraron cantidades diferentes de árboles por subparcela, esto por el manejo forestal (raleo) dado a cada una de las parcelas. Con el fin

de mejorar la precisión de las comparaciones entre los tratamientos se decidió utilizar la relación número de árboles por área (Arb/Area) como covariable.

#### **5.4.6 Estimación del carbono en la biomasa aérea por SAF**

A partir de los valores obtenidos de biomasa aérea total se determina el carbono fijado utilizando la fracción de carbono de 0,5 de la biomasa total (IPCC 1996). El carbono total del sistema agroforestal consistirá en la suma del carbono acumulado por cada componente, es decir:

$$C_{SAF} (tC \text{ ha}^{-1}) = 0,5 \times B_{total \text{ ha}^{-1}}$$

#### **5.4.7 Análisis estadístico**

Los valores de biomasa estimada y de carbono fijado, se analizaron mediante análisis de covarianza (ANCOVA) con el fin de encontrar diferencias en los sistemas analizados. El modelo de análisis se consideró bajo un diseño en parcelas divididas repetido en bloques completos al azar, donde la parcela principal es el componente sombra y la subparcela el nivel de insumo y se utilizó la variable Arb/Area como covariable:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + B_j + S_i B_j + M_k + S_i M_k + \beta X_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

$Y_{ijk}$  : Variable respuesta

$\mu$  : Media general

$S_i$  : Efecto del i-ésimo sistema

$B_j$  : Efecto del j-ésimo bloque

$S_i B_j$  : Error A

$M_k$  : Efecto del k-ésimo manejo

$S_i M_k$  : Interacción de i-ésimo sistema y el k-ésimo manejo

$\beta$  : Tasa de cambio de  $Y$  en frente al cambio unitario de  $X$

$X_{ijk}$  : Variable regresora o covariable (Arb/Area)

$\varepsilon_{ijk}$  : Término de error aleatorio independiente supuestamente distribuido normal con media cero y varianza constante

En el caso de la biomasa en las plantas de café, los valores estimados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANAVA) con el fin de encontrar diferencias en la biomasa aérea existente en el SAF. El modelo se consideró bajo un diseño en parcelas divididas, donde la parcela principal es el componente sombra y la subparcela el nivel de insumo. El modelo de análisis fue:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + B_j + S_i B_j + M_k + S_i M_k + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

$Y_{ijk}$  : Variable respuesta

$\mu$  : Media general

$S_i$  : Efecto del i-ésimo sistema

$B_j$  : Efecto del j-ésimo bloque

$S_i B_j$  : Error A

$M_k$  : Efecto del k-ésimo manejo

$S_i M_k$  : Interacción de i-ésimo sistema y el k-ésimo manejo

$\varepsilon_{ijk}$  : Término de error aleatorio independiente supuestamente distribuido normal

## 5.5 Resultados y discusión

### 5.5.1 Biomasa aérea para las especies de asocio en SAF café

En Masatepe, Nicaragua, el promedio de biomasa aérea por árbol en *Inga laurina* (IL) fue de 155,5 kg utilizando árboles entre 10 y 38 cm de dap; para la especie *Simarouba glauca* (SG) se encontró un promedio de 50,2 kg/árbol en árboles de 6 cm a 36 cm de dap. En el caso de *Samanea saman* (SS) se encontró un promedio de 41,78 kg/árbol (árboles con dap entre 8 y 18 cm) y para la especie *Tabebuia rosea* (TR) se encontró un promedio de 99,6 kg/árbol (árboles con dap entre 8 y 18 cm) (Cuadro 38).

En *Inga laurina* el fuste presenta la mayor participación en biomasa aérea con un 62,9% de contribución, seguido de ramas con un 31,5%; lo anterior debido al manejo en podas (manejo de sombra) dado a esta especie. En el caso de las otras especies estudiadas se encontró un comportamiento diferente; el mayor porcentaje de contribución a la biomasa lo aportaron las ramas, como en el caso de *Tabebuia rosea* en el que se encontró que el 29,6% corresponde a la biomasa del fuste mientras que la biomasa de ramas aportó un 67,1% a la biomasa total. Esto es explicado por Vindel y Pantoja (2004) en un estudio de dinámica de crecimiento y fenología de especies arbóreas realizado en el mismo ensayo, en donde se encontró que la especie *Tabebuia rosea* presentó el mayor crecimiento de ramas pero un menor diámetro de copa y menor número de ramas, ya que esta es una especie de naturaleza en crecimiento alta y estrecha en su tipo de copa, lo que permite un menor grado de poda (Altamirano 2005).

Cuadro 38. Biomasa total y por componente de árboles del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café en Masatepe

Variable	N	Media	Porcentaje	D.E.	Mínimo	Máximo
<b>Inga laurina</b>						
Hojas	36	8,67	5,58	4,53	3,33	17,93
Ramas	36	48,94	31,48	38,50	8,53	153,50
Fuste	36	97,84	62,94	84,99	10,58	282,24
Biomasa aérea	36	155,46	100,00	114,20	44,56	412,35
<b>Simarouba glauca</b>						
Hojas	53	7,33	14,61	4,96	0,59	18,31
Ramas	53	25,46	50,75	22,14	0,00	93,65
Fuste	53	17,37	34,62	14,79	2,06	51,87
Biomasa aérea	53	50,17	100,00	39,09	4,75	146,70
<b>Samanea saman</b>						
Hojas	35	4,21	10,08	3,41	0,00	16,90
Ramas	35	20,28	48,56	14,55	0,00	79,28
Fuste	35	17,27	41,36	6,80	8,56	34,09
Biomasa aérea	35	41,76	100,00	23,35	14,21	130,27
<b>Tabebuia rosea</b>						
Hojas	41	3,30	3,31	4,03	0,00	11,89
Ramas	41	66,84	67,12	51,77	7,74	224,22
Fuste	41	29,45	29,57	16,52	5,70	66,74
Biomasa aérea	41	99,59	100,00	64,42	16,51	258,30

n = tamaño de muestras; D.E. = desviación estándar.

Según Suarez et ál. (2004), la biomasa del fuste constituye alrededor del 52% de la biomasa total, sin embargo, Alvarez (2008) explica que el porcentaje de biomasa acumulado en el fuste y otros componentes del árbol depende básicamente de las características de cada especie, la edad y el manejo dado al rodal. Por ende, manejos de sombra como podas y raleos, afectan la distribución de la biomasa del rodal por componentes.

En *Inga laurina* el aporte de biomasa entre el fuste y las ramas empieza a ser diferente a partir de 25 cm de dap, igual que en *Simarouba glauca*. *Samanea saman* y *Tabebuia rosea* muestran un comportamiento similar, solo que las diferencias empiezan a partir de los 15 cm de dap (Figura 14).

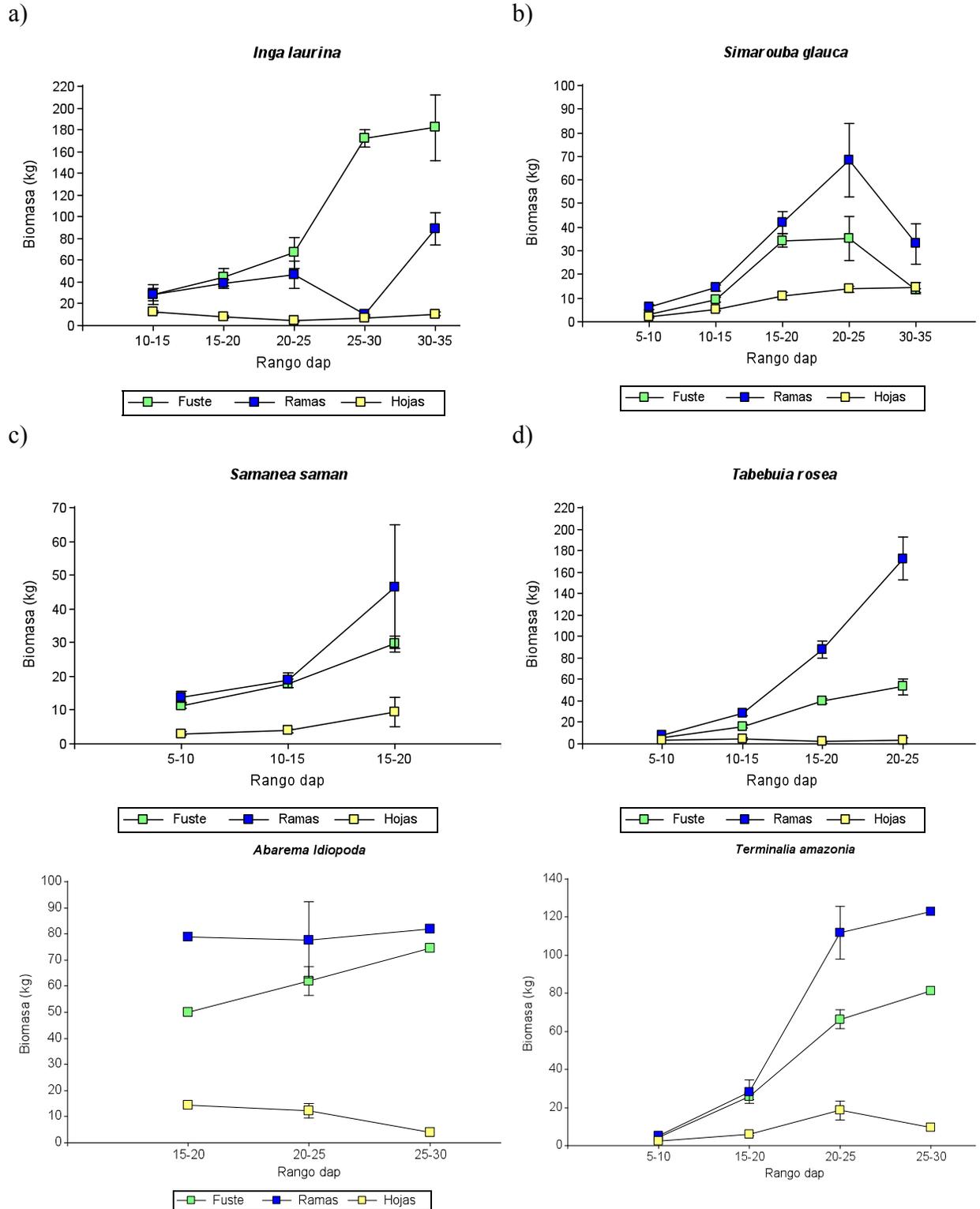


Figura 14. Aporte de componentes en la biomasa aérea por clase diamétrica para cuatro especies de asocio en cafetales.

### 5.5.2 Factor de expansión de biomasa (FEB)

El factor de expansión de biomasa promedio encontrado para *Inga laurina* fue de 2,1 y para *Samanea saman* de 2,4. Los valores más altos encontrados corresponden a *Simarouba glauca* con un promedio de 3,3 y a *Tabebuia rosea* con un valor de 3,5 (Cuadro 39). Estos valores son mayores a los reportados en la literatura, probablemente debido a las condiciones de establecimiento de cada sistema como la densidad de siembra inicial y el manejo forestal (raleo). En Turrialba, el FEB promedio encontrado para *Abarema idiopoda* fue de 2,5 muy cercano al valor promedio encontrado para *Terminalia amazonia* (2,6) (Cuadro 40). Estos valores son cercanos a los citados por Andrade e Ibrahim (2003): promedio de 2,2 con un rango de 1,9 a 2,4 para sistemas agroforestales. Esto últimos autores advierten que el FEB varía mucho entre especies por las condiciones particulares de los ecosistemas forestales. Se observó que la especie *Simarouba glauca* posee una mayor variación en el FEB (Figura 15).

Cuadro 39. Factor de expansión de biomasa promedio para especies utilizadas en cafetales en Masatepe, Nicaragua

Especie	n	Media	D.E.	Mín	Máx
<i>Inga laurina</i>	36	2,1	0,95	1,09	4,60
<i>Simarouba glauca</i>	53	3,3	1,17	1,37	7,05
<i>Samanea samán</i>	35	2,4	0,55	1,00	3,82
<i>Tabebuia rosea</i>	41	3,5	1,16	2,02	7,58

n = Tamaño de muestras; D.E. = desviación estándar; Mín. = valor inferior; Máx. = valor superior.

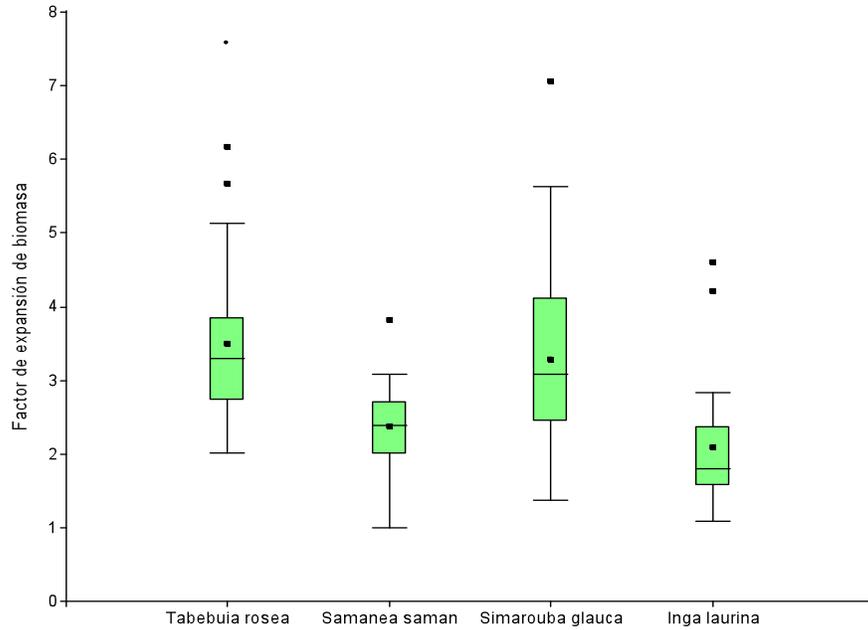


Figura 15. Distribución del FEB para especies arbóreas utilizadas como sombra en SAF de café.

Cuadro 40. Factor de expansión de biomasa promedio para especies utilizadas en cafetales en Turrialba, Costa Rica

Especie	n	Media	D.E.	Mín	Máx
Abarema idiopoda	12	2,48	1,00	1,00	3,71
Terminalia amazonia	10	2,59	1,58	1,58	3,26

n = Número de muestras; D.E. = desviación estándar; Mín. = valor inferior; Máx. = valor superior.

### 5.5.3 Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea en árboles individuales

Para las seis especies estudiadas solo el dap logró explicar significativamente la biomasa arriba del suelo, por lo tanto, esta fue la única variable independiente usada en los modelos definitivos (Cuadro 41).

Cuadro 41. Estadísticas descriptivas para las variables utilizadas en la estimación de biomasa aérea en las especies estudiadas

Variable	n	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
<b>Inga laurina</b>					
Dap (m)	36	0,24	0,09	0,10	0,38
Bs (kg)	36	155,46	114,20	44,56	412,35
Ht (m)	36	5,32	2,43	0,92	10,37
Hc (m)	16	3,28	0,90	2,21	4,63
<b>Simarouba glauca</b>					
dap (m)	53	0,15	0,05	0,06	0,36
Bs (kg)	53	50,17	39,09	4,75	146,70
Ht (m)	18	6,75	2,55	4,00	11,59
Hc (m)	41	6,62	1,73	2,31	8,50
<b>Samanea saman</b>					
dap (m)	33	0,12	0,02	0,08	0,18
Bs (kg)	35	41,76	23,35	14,21	130,27
Ht (m)	33	5,91	2,14	4,00	10,68
Hc (m)	21	2,72	0,74	1,79	4,31
<b>Tabebuia rosea</b>					
Dap (m)	41	0,16	0,03	0,10	0,24
Bs (kg)	41	99,59	64,42	16,51	258,30
Ht (m)	30	8,33	1,73	3,30	11,87
Hc (m)	41	3,74	1,97	1,18	8,70
<b>Terminalia amazonia</b>					
Dap (m)	10	0,19	0,05	0,08	0,26
Bs (kg)	10	111,59	79,85	11,93	220,77
Ht (m)	10	13,00	2,95	6,90	18,49
Hc (m)	10	4,61	1,15	2,65	6,52
<b>Abarema idiopoda</b>					
Dap (m)	15	0,22	0,03	0,17	0,25
Bs (kg)	12	151,77	53,73	73,14	231,26
Ht (m)	15	14,17	1,00	12,37	16,03
Hc (m)	15	4,88	1,03	2,83	6,66

n = Número de muestras; D.E. = desviación estándar; Bs = Biomasa seca; Ht = Altura total; Hc = Altura comercial.

### 5.5.3.1 Biomasa total para *Inga laurina*

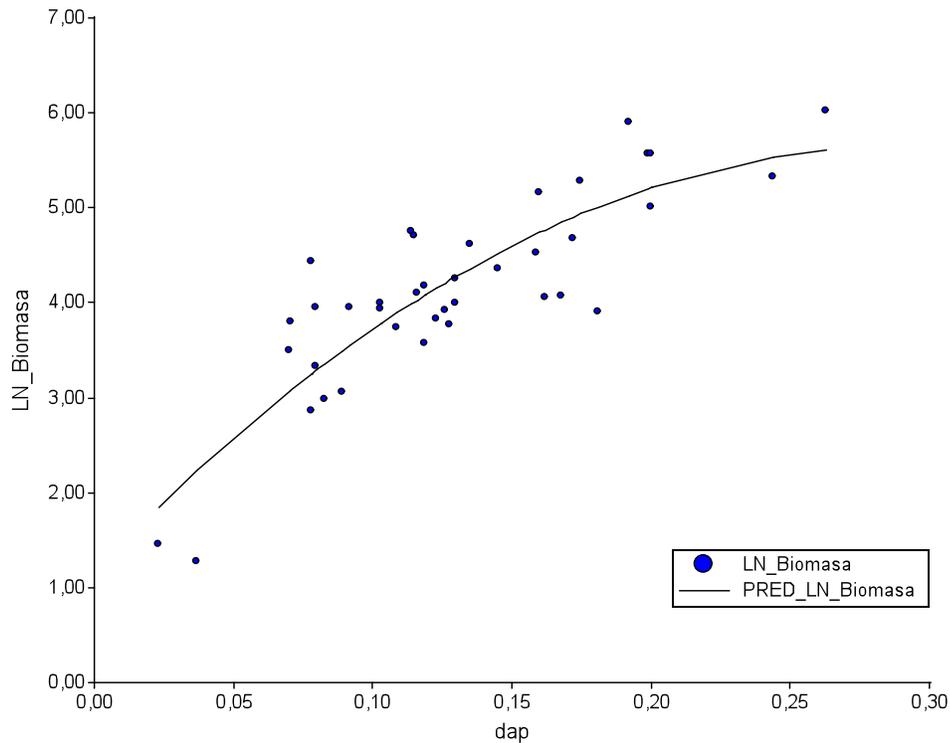
En los modelos seleccionados tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ( $p < 0,05$ ) y todos los modelos presentaron buen ajuste (Cuadro 42).

*Cuadro 42. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Inga laurina*

Modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	ECMP	CM Error	Bondad de ajuste	Modelo
1	0,62	0,61	4011,17	3398,97	0,1309	$Bt = -87,09 + 1402,41 \times dap$
2	0,70	0,69	0,36	0,31	0,5285	$Ln(Bt) = -2,06 + 15,95 \times dap$
<b>3</b>	<b>0,74</b>	<b>0,72</b>	<b>0,35</b>	<b>0,30</b>	<b>0,6061</b>	$Ln(Bt) = -1,17 + 30,78 \times dap - 52,74 \times dap^2$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error; Bt = Biomasa total

El modelo 2 presentó un AIC de 69,3 y un BIC de 74,3 mientras que el modelo 3 presentó AIC y BIC menores con 66,1 y 72,7 respectivamente. Además el modelo 3 presenta la mayor proporción de variabilidad explicada con un 74%, siendo el modelo que presenta un mejor ajuste. Se construyeron diagramas de dispersión de Ln(Bt) versus el dap y se obtuvo la función ajustada (Figura 16) usando los valores predichos por el modelo.



*Figura 16. Relación del logaritmo de la biomasa aérea en función del dap para Inga laurina.*

### 5.5.3.2 Biomasa total para *Simarouba glauca*

En los modelos seleccionados para *Simarouba glauca* tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 43).

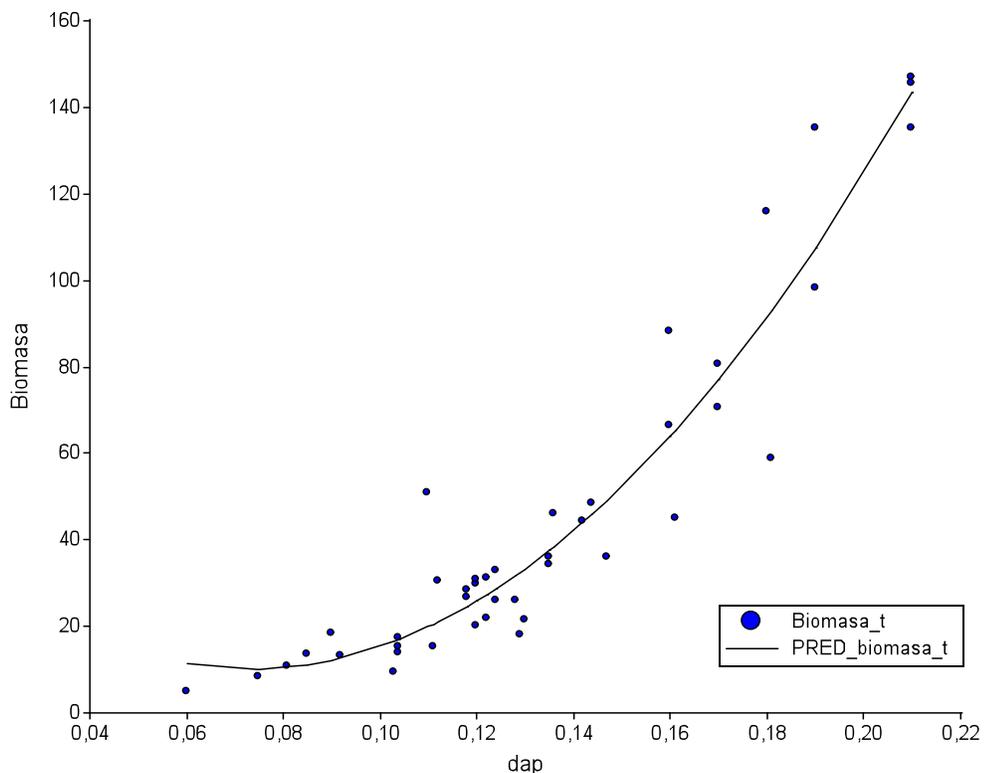
*Cuadro 43. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Simarouba glauca*

Modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	ECMP	CM Error	Bondad de ajuste	Modelo
1	0,83	0,82	316,70	276,21	0,0060	$Bt = -83,80 + 970,33 \times dap$
<b>2</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>164,07</b>	<b>144,40</b>	<b>0,1212</b>	$Bt = 47,46 - 1027,24 \times dap + 7065,91 \times dap^2$
3	0,88	0,88	0,09	0,08	0,0047	$Ln(Bt) = 0,67 + 21,10 \times dap$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error; Bt = Biomasa total.

Utilizando los valores de la prueba de ajuste para los modelos evaluados solo el modelo 2 se considera que no presenta falta de ajuste ( $p=0,1212$ ) contrario a los modelos 1 y 3; además, el modelo 2 reporta la mayor proporción de variabilidad explicada (91%).

Se construyeron diagramas de dispersión de Bt versus el dap y se obtuvo la función ajustada (Figura 17) usando los valores predichos por el modelo.



*Figura 17. Relación de la biomasa aérea en función del dap para Simarouba glauca.*

### 5.5.3.3 Biomasa total para *Samanea saman*

En los tres modelos seleccionados tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ( $p<0.05$ ) (Cuadro 44).

*Cuadro 44. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Samanea saman*

Modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	ECMP	CM Error	Bondad de ajuste	Modelo
1	0,89	0,89	128,22	53,40	0,0949	$Bt = -80,27 + 1083,02 \times dap$
2	0,79	0,78	105,21	53,40	0,1101	$Bt = 262,10 + 100,54 \times \ln(dap)$
<b>3</b>	<b>0,83</b>	<b>0,82</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,5595</b>	$\ln(Bt) = 8,62 + 2,27 \times \ln(dap)$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error; Bt = Biomasa total

Utilizando los valores de AIC y BIC para los modelos 1 y 2, se encontró que el modelo 1 presentó un AIC de 141,2 y un BIC de 144 mientras que el modelo 2 presentó AIC y BIC menores con 132,9 y 135,6 respectivamente. Al utilizar el criterio del R<sup>2</sup>, para comparar entre el modelo 2 y 3, el modelo 3 es el que reporta un mayor valor, dado que reporta un 83% de proporción de variabilidad explicada por el modelo.

Se construyeron diagramas de dispersión de Ln(Bt) versus el Ln(dap) y se obtuvo la función ajustada (Figura 18) usando los valores predichos por el modelo.

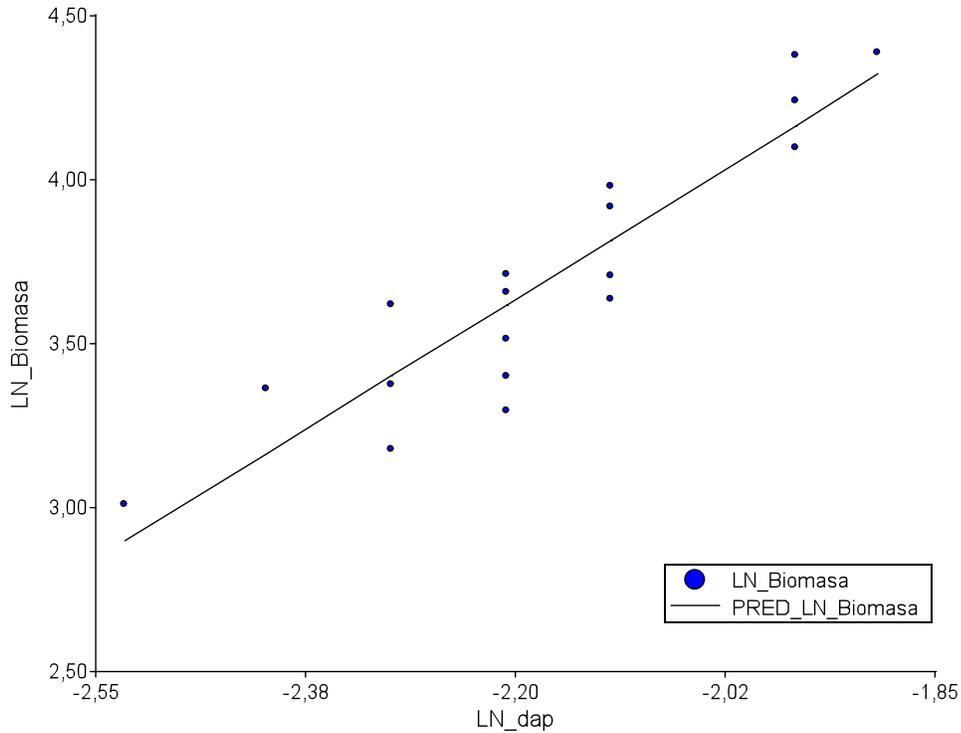


Figura 18. Relación del logaritmo de la biomasa aérea en función del logaritmo del dap para *Samanea saman*.

#### 5.5.3.4 Biomasa total para *Tabebuia rosea*

En los modelos seleccionados (Cuadro 45), tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ( $P < 0,05$ ). El modelo que presenta los menores valores de AIC y BIC es el 3 con 10,5 y 16,2 respectivamente. Revisando los valores del  $R^2$  es uno de los modelos que presenta mayor proporción de variabilidad explicada con un 90%, siendo el modelo que presenta un mejor ajuste.

Cuadro 45. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de *Tabebuia rosea*

Modelo	$R^2$	$R^2$ aj	ECMP	CM Error	Lack of Fit	Modelo
1	0,90	0,90	442,00	298,00	0,1152	$Bt = -182,38 + 1766,22 \times dap$
2	0,87	0,87	0,08	0,06	0,1709	$Ln(Bt) = 1,06 + 20,56 \times dap$
<b>3</b>	<b>0,90</b>	<b>0,86</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,6881</b>	$Ln(Bt) = 10,29 + 3,2 \times Ln(dap)$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error; Bt = Biomasa total

Se construyeron diagramas de dispersión de Bt versus el dap y se obtuvo la función ajustada (Figura 19) usando los valores predichos por el modelo.

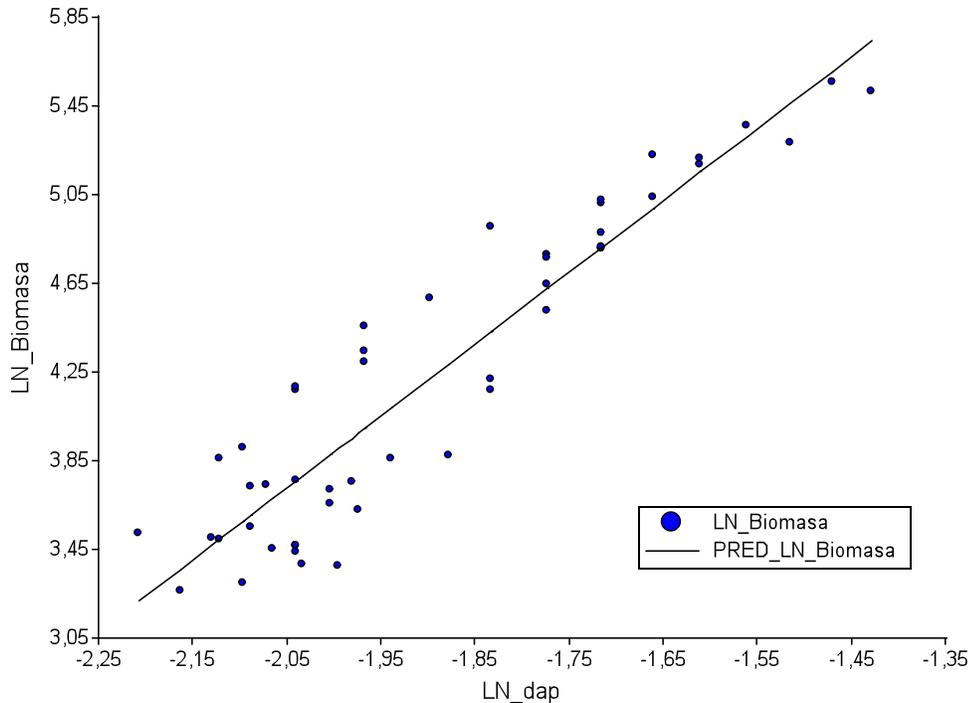


Figura 19. Relación del logaritmo de la biomasa aérea en función del logaritmo del dap para *Tabebuia rosea*.

#### 5.5.3.5 Biomasa total para *Abarema idiopoda* y *Terminalia amazonia*

Se construyeron modelos con el logaritmo de la biomasa total (Cuadro 46). Para este caso solo se logró obtener la biomasa para 10 y 12 árboles de *Terminalia amazonia* y *Abarema idiopoda*, respectivamente, por lo que se decidió realizar una regresión lineal con los datos en conjunto utilizando variables auxiliares (*dummy*) para verificar si la relación entre biomasa y dap era igual para las dos especies. Esta suposición se prueba por medio de la hipótesis de igualdad de pendientes y ordenadas de la regresión para cada especie. Según Balzarini et ál. (2008) estas ecuaciones son las mismas que se obtendrían haciendo las regresiones separadamente, usando la variable especie como criterio de partición, pero los errores estándar de las estimaciones son notablemente menores en el modelo incluyendo las variables auxiliares, ya que se trabaja con más grados de libertad para la estimación del error experimental que cuando se realizan los ajustes por separado.

*Cuadro 46. Modelos de regresión para estimación de biomasa total en árboles de Terminalia amazonia y Abarema idiopoda*

Modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	ECMP	CM Error	Modelo
1	0,86	0,84	0,13	0,08	$Ln(Bt) = 2,41 - 0,58 \times dap$
2	<b>0,87</b>	<b>0,85</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	$Ln(Bt) = 2,24 + 12,12 \times dap$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error; Bt = Biomasa total

Para los modelos evaluados se encontró que tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ( $p < 0.05$ ). Utilizando los valores de AIC y BIC para los modelos 1 y 2, se encontró que el modelo 2 presentó AIC y BIC menores en comparación con el modelo 1 (11,7 y 17,18 respectivamente). En cuanto al R<sup>2</sup> presenta un mayor valor el modelo 2 con un 87% de la proporción explicada por el modelo. Para el modelo seleccionado, no hubo diferencias significativas entre ordenadas al origen ( $p = 0,3663$ ) ni entre pendientes ( $p = 0,3224$ ) por lo que se procedió a utilizar el mismo modelo para las dos especies.

#### **5.5.4 Estimación de biomasa aérea en el componente arbóreo**

Los modelos desarrollados para la estimación de la biomasa arriba del suelo son resumidos en el Cuadro 47.

*Cuadro 47. Modelos para estimación de biomasa de árboles en SAF de café.*

Especie	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	ECMP	CM Error	Modelo
IL	0,74	0,72	0,35	0,30	$Ln(Bt) = -1,17 + 6,74 \times dap - 52,75 \times dap^2$
SG	0,91	0,91	164,07	144,40	$Bt = 47,46 - 1027,24 \times dap + 7065,91 \times dap^2$
SS	0,81	0,80	89,94	57,87	$Ln(Bt) = 8,62 + 2,27 \times Ln(dap)$
TR	0,89	0,88	0,07	0,07	$Ln(Bt) = 10,29 + 3,2 \times Ln(dap)$
TA y AI	0,87	0,85	0,10	0,08	$Ln(Bt) = 2,24 + 12,12 \times dap$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error; Bt = Biomasa total

Los valores de biomasa estimada se analizaron mediante un análisis de covarianza (ANCOVA) con el fin de encontrar diferencias en la biomasa aérea existente en el SAF (Cuadro 48). El modelo se consideró bajo un diseño en parcelas divididas, donde la parcela principal es el componente sombra y la subparcela el nivel de insumo y se utilizó la variable Arb/Area como covariable.

Los valores de probabilidad del ANCOVA muestran que las especies analizadas en Masatepe, no aportaron cantidades diferentes de biomasa ( $p=0,6445$ ), sin embargo, si se presentaron diferencias significativas en el caso del nivel de insumos ( $p=0,0284$ ). En cuanto a la covariable se encontró una relación lineal significativa ( $p=0,0026$ ) de pendiente positiva (2,54) entre la biomasa aérea estimada por subparcela y el número de árboles presentes por área.

*Cuadro 48. ANCOVA para la biomasa aérea estimada en el componente arbóreo en SAF de café en Masatepe*

Tratamientos				
Valor p	SSIL	SSTR	ILSG	SGTR
0,6001	30,37	38,89	37,95	49,62

Nivel de Insumo				
Valor p	AC	MC	MO	BO
<b>0,0284</b>	38,92 A	40,24 A	38,54 B	40,34 AB

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Los valores promedios de biomasa estimada por subparcela (Cuadro 49) muestran que en Masatepe el tratamiento SGTR es el SAF que posee más biomasa con valores promedios entre 37,2 y 59,7 t ha<sup>-1</sup>, en contraste con SSIL que presenta valores promedios entre 26,9 y 39,5 t ha<sup>-1</sup>.

*Cuadro 49. Estadística descriptiva de la biomasa aérea de árboles en SAF de café estudiados en Masatepe*

Tratamiento	Insumo	Bmedia(t ha <sup>-1</sup> )	D.E.	Mínimo	Máximo
SGTR	MC	59,66	35,92	27,24	98,27
SGTR	BO	46,80	24,70	27,30	74,58
SSTR	MO	40,88	6,27	34,47	47,00
ILSG	MC	40,60	6,16	34,12	46,39
SSIL	BO	39,48	20,01	26,66	62,54
SGTR	AC	39,05	1,78	37,00	40,23
SSIL	MC	38,52	18,12	26,78	59,39
SGTR	MO	37,19	9,88	28,48	47,93
SSTR	MC	36,75	1,26	35,36	37,81
ILSG	MO	36,10	15,27	20,06	50,46
SSIL	MO	31,71	9,96	24,55	43,08
SSIL	AC	26,90	8,14	18,26	34,42

B = Biomasa aérea; D.E. = desviación estándar.

En el caso de Turrialba, se encontraron diferencias significativas (Cuadro 50) para tratamiento ( $p=0,0322$ ) y para insumo ( $p=0,0308$ ), siendo AI la que presenta mayor media en comparación con TA y el nivel de insumo MO el que presenta una biomasa promedio de 101,9 t ha<sup>-1</sup>.

*Cuadro 50. ANCOVA para la biomasa aérea estimada en el componente arbóreo en SAF en Turrialba*

Variable	Tratamientos					Nivel de Insumo								
	Valor p	TA	AI	AI	AI	Valor p	AC	MC	MO	BO				
Biomasa	<b>0,0322</b>	62,67	B	118,98	A	<b>0,0308</b>	69,40	B	78,82	B	101,86	A	57,8	B

AC = Alto convencional; MC = Medio convencional; MO = Medio orgánico; BO = Bajo orgánico  
Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Al analizar los valores promedios de biomasa estimada por subparcela (Cuadro 51) se encuentra que en Turrialba el tratamiento AI es el SAF que posee más biomasa con valores promedios entre 86,5 y 100 t ha<sup>-1</sup> mientras que el TA presenta valores promedios entre 49,1 y 60,2 t ha<sup>-1</sup>.

*Cuadro 51. Biomasa aérea de árboles en SAF de café estudiados en Turrialba*

Tratamiento	Insumo	B(t ha <sup>-1</sup> )	D.E.	Mínimo	Máximo
AI	MC	104,72	11,28	91,7	111,23
AI	MO	100,03	133,24	10,89	126,95
TA	AC	69,4	19,03	51,72	89,54
TA	BO	57,87	14,41	46,74	74,15
TA	MC	52,92	27,82	21,43	74,16
TA	MO	70,48	5,00	65,01	74,82

B = Biomasa aéreas; n = Número de muestras; D.E. = desviación estándar.

Los valores de aportes de biomasa encontrados en los ensayos coinciden con Suarez (2002) quien reporta valores entre 33 y 35,7 t ha<sup>-1</sup> en SAF de café con sombra diversificada y especies maderables respectivamente, con árboles mayores a 10 m de altura en la región de Matagalpa, Nicaragua. Ávila (2000), en un estudio realizado en cafetales con *Eucalyptus deglupta* en Costa Rica, encontró valores de aporte de biomasa entre 17,9 y 27,9 t ha<sup>-1</sup>, de la misma forma, Dzib (2003) encontró para tres especies forestales en cafetales aportes entre 28 y 77 t ha<sup>-1</sup>, que corresponden al eucalipto y laurel respectivamente.

### **5.5.5 Biomasa de las plantas (café)**

En el ensayo de Masatepe, para las sombras se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0322$ ) y analizando los valores promedios de biomasa se separan el café a pleno sol (PS) del café con sombra (SSIL, ILSG, SGTR) que muestran valores entre 4,0 y 4,5 t ha<sup>-1</sup> en contraste con el PS que reporta valores 3,3 y 3,7 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 52). Estos valores coinciden con Suarez (2003) que reporta valores de biomasa en el café entre 0,4 y 5,6 t ha<sup>-1</sup> en SAF de café con sombra diversificada y especies maderables en la región de Matagalpa, Nicaragua. En cuanto al nivel de insumo también se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0308$ ) donde el nivel MC muestra el menor valor promedio. En el caso de Turrialba, solo se encontraron diferencias significativas para nivel de insumo ( $p=0,0044$ ) separando a BO de los demás niveles (Cuadro 53).

Cuadro 52. ANAVA para la biomasa aérea estimada en el componente café en SAF en Masatepe

Variable	Tratamientos										
	Valor p	PS	SSIL	SSTR	ILSG	SGTR					
Bcafé	<b>0,0322</b>	3,52	B	4,22	A	3,92	AB	4,35	A	4,11	A

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Variable	Nivel de Insumo										
	Valor p	AC	MC	MO	BO						
Bcafé	<b>0,0308</b>	4,14	A	3,92	B	4,19	A	4,05	AB		

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Cuadro 53. ANAVA para la biomasa aérea estimada en el componente café en SAF en Turrialba

Variable	Tratamientos				Nivel de Insumo								
	Valor p	PS	AI	TA	Valor p	AC	MC	MO	BO				
Bcafé	0,6366	5,75	5,91	5,48	<b>0,0044</b>	6,75	A	5,79	A	6,03	A	3,35	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

### 5.5.6 Biomasa aérea total

Con los valores encontrados anteriormente se estimó el total de biomasa aérea por subparcela, considerando como biomasa total la suma de la biomasa de los componentes del sistema agroforestal (árbol de asocio y cafeto). El ANCOVA realizado para los SAF en Masatepe (Cuadro 54) muestra que no existe interacción significativa ( $p=0,0724$ ) entre el tratamiento (sombra) y el nivel de insumos, por esta razón se procedió a analizar los factores de forma independiente. El aporte de biomasa de los SAF analizados es significativamente diferente para las sombras ( $p=0,0060$ ) pero no para los niveles de insumo ( $p=0,2785$ ). En cuanto a la covariable se encontró una relación lineal significativa ( $p=0,0015$ ) de pendiente positiva (887,02) entre la biomasa aérea total estimada por SAF y el número de árboles presentes por área.

Cuadro 54. ANCOVA para la biomasa aérea total estimada en SAF de café en Masatepe

Variable	Tratamientos					
	Valor p	PS	SSIL	SSTR	ILSG	SGTR
Bsaf (t/ha)	<b>0,0006</b>	3,52 A	29,04 B	36,71 BC	36,19 BC	45,91 C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Variable	Nivel de Insumo				
	Valor p	AC	MC	MO	BO
Bsaf (t/ha)	0,2785	35,44	37,75	38,68	40,37

Los valores promedios de biomasa estimada por subparcela (Figura 20) muestran que en Masatepe el tratamiento SGTR es el SAF que posee más biomasa aérea, con valores entre 41,6 y 63,7 t ha<sup>-1</sup> diferente de SSIL que reporta entre 31,4 y 43,8 t ha<sup>-1</sup>. Cabe resaltar que no se encontraron diferencias entre los tratamientos ILSG y SSTR que no son diferentes de SGTR. El tratamiento control (PS) presenta valores promedios entre 3,3 y 3,7 t ha<sup>-1</sup> estadísticamente diferente de los demás tratamientos.

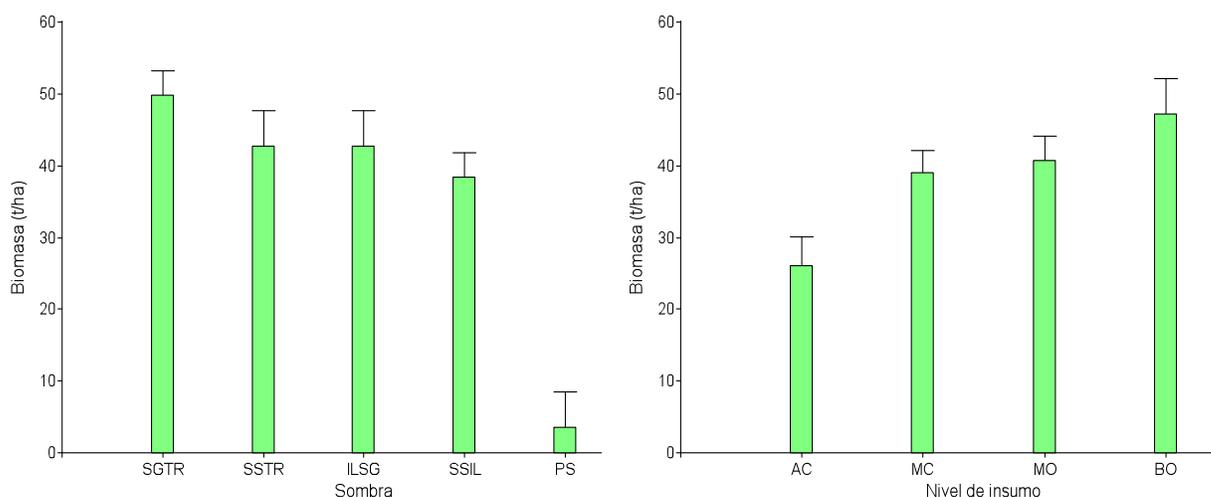


Figura 20. Aporte de biomasa aérea en SAF de café en Masatepe por sombra y por nivel de insumo.

Estos valores coinciden con Suarez (2002) que reporta valores de biomasa entre 33 y 35,7 t ha<sup>-1</sup> en SAF de café con sombra diversificada y especies maderables, con árboles mayores a 10 m de altura en la región de Matagalpa, Nicaragua. De la misma forma, Ávila

(2000), en un estudio realizado en cafetales con *Eucalyptus deglupta* en Costa Rica, encontró valores de aporte de biomasa entre 17,9 y 27,9 t ha<sup>-1</sup>.

En el caso de Turrialba, el ANCOVA (Cuadro 55) mostró que la interacción entre el tratamiento (sombra) y el nivel de insumos no es significativa (p=0,4824), por esta razón se procedió a analizar los factores de forma independiente. El aporte de biomasa de los SAF analizados es significativamente diferente entre sombras (p=0,0001) pero no es diferente entre los niveles de insumo (p=0,1339). En cuanto a la covariable la relación lineal entre la biomasa aérea total estimada por SAF y el número de árboles presentes por área no es significativa (p=0,4589).

Cuadro 55. ANCOVA para biomasa aérea total estimada en SAF de café en Turrialba

Variable	Tratamientos			Nivel de Insumo					
	Valor p	PS	TA	AI	Valor p	AC	MC	MO	BO
Bsaf (t/ha)	<b>0,0001</b>	5,75 A	64,73 B	116,79 C	0,1339	49,14	60,70	100,29	52,89

Letras distintas indican diferencias significativas (p ≤ 0,05)

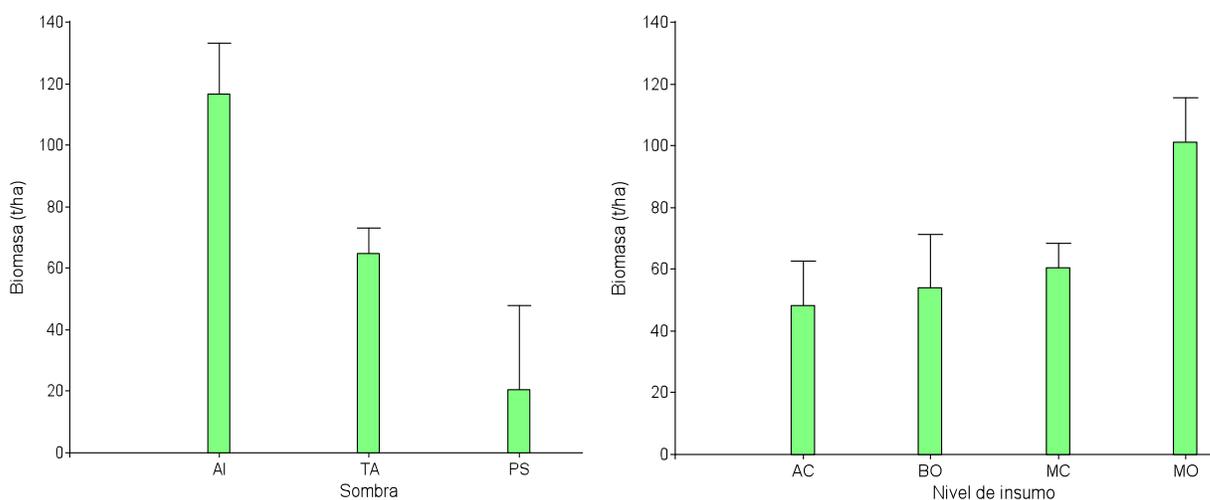


Figura 21. Aporte de biomasa aérea por sombra y por nivel de insumo en SAF de café en Turrialba.

Los valores promedios de biomasa estimada por subparcela (Figura 21) muestran que en Turrialba el tratamiento AI es el que presenta el mayor valor de aporte de biomasa aérea con valores entre 110,6 y 139,2 t ha<sup>-1</sup> diferente de TA que presentó valores entre 58,6 y 76,6 t ha<sup>-1</sup>. Los valores encontrados en este estudio son similares a los reportados por Dzib (2003),

en el caso de TA el promedio de biomasa aérea fue de 66 t ha<sup>-1</sup> cercano a Montero y Kanninen (2002) que reportaron un valor promedio de 82 t ha<sup>-1</sup>.

### 5.5.7 *Carbono almacenado en la biomasa aérea total en SAF*

Se estimó la fijación de carbono en biomasa aérea por subparcela. El ANCOVA realizado para los SAF en Masatepe (Cuadro 56) muestra que no existe interacción significativa ( $p=0,5471$ ) entre el tratamiento (sombra) y el nivel de insumos. El aporte de biomasa de los SAF analizados es significativamente diferente ( $p=0,0006$ ) a diferencia de los niveles de insumo que no presentaron diferencias significativas ( $p=0,2785$ ). En cuanto a la covariable se encontró una relación lineal significativa ( $p=0,0015$ ) de pendiente positiva (443,51) entre la carbono almacenado y el número de árboles presentes por área.

*Cuadro 56. ANCOVA para el carbono acumulado en la biomasa aérea total en SAF de café en Masatepe*

Variable	Tratamientos					
	Valor p	PS	SSIL	SSTR	ILSG	SGTR
Csaf (t/ha)	<b>0,0006</b>	1,76 A	14,52 B	18,36 BC	18,10 BC	22,96 C

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Variable	Nivel de Insumo				
	Valor p	AC	MC	MO	BO
Csaf (t/ha)	0,2785	16,96	16,74	18,35	20,82

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Los valores promedios de carbono acumulado en la biomasa aérea por subparcela (Figura 22) muestran que en Masatepe el tratamiento SGTR es el SAF que capturo más carbono, con valores entre 20,8 y 25,3 t ha<sup>-1</sup> diferente de SSIL que reporta entre 15,7 y 21,3 t ha<sup>-1</sup>. Cabe resaltar que no se encontraron diferencias entre los tratamientos ILSG y SSTR que no son diferentes de SGTR. El tratamiento control (PS) presenta valores promedios entre 1,6 y 1,9 t ha<sup>-1</sup> estadísticamente diferente de los demás tratamientos.

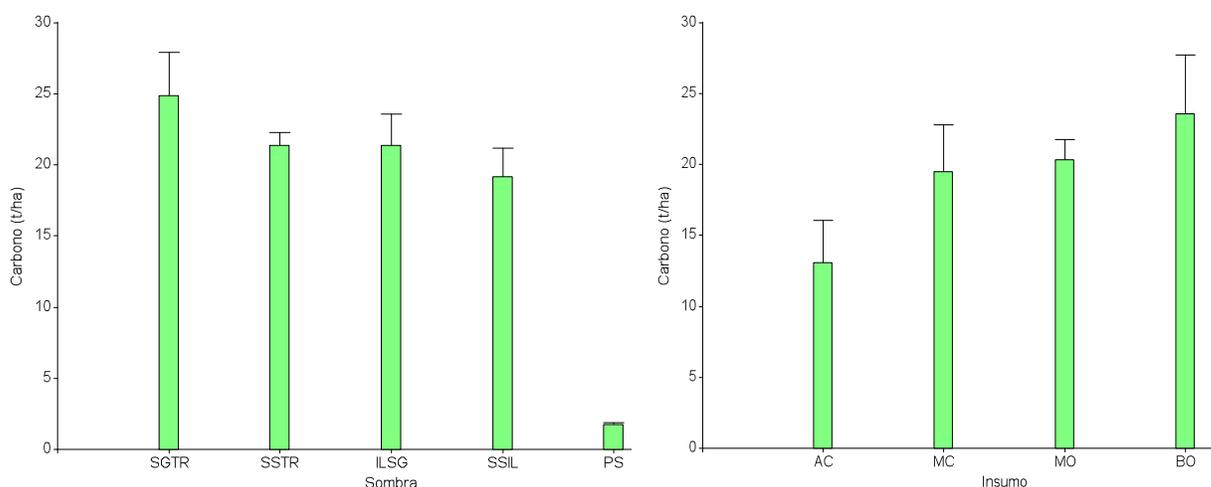


Figura 22. Carbono acumulado en biomasa aérea por sombra y por nivel de insumo en SAF de café en Masatepe.

En el caso de Turrialba, el ANCOVA realizado (Cuadro 57Cuadro 56) muestra que no existe interacción significativa ( $p=0,4824$ ) entre el tratamiento (sombra) y el nivel de insumos. El aporte de biomasa de los SAF analizados es significativamente diferente ( $p=0,0001$ ) mientras entre los niveles de insumo no se encontraron diferencias ( $p=0,1339$ ). En cuanto a la covariable se encontró una relación lineal significativa ( $p=0,0015$ ) de pendiente positiva (443,51) entre el carbono total estimado por SAF y el número de árboles presentes por área.

Cuadro 57. ANCOVA para el carbono acumulado en la biomasa aérea total en SAF de café en Turrialba

Variable	Tratamientos			Nivel de Insumo						
	Valor p	PS	TA	AI	Valor p	AC	MC	MO	BO	
Csaf (t/ha)	<b>0,0001</b>	2,88	A 32,37	B 58,39	C	0,1339	24,06	30,18	50,64	26,98

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

Los valores promedios de biomasa estimada por subparcela (Figura 23) muestran que en Turrialba el tratamiento AI es el que presenta el mayor valor de aporte de biomasa aérea con valores entre 69,6 y 55,3 t ha<sup>-1</sup> diferente de TA que presentó valores entre 38,3 y 29,3 t ha<sup>-1</sup> cercanos a los reportados por Dzib (2003), en el caso de TA el promedio de biomasa aérea fue de 66 t ha<sup>-1</sup> cercano a Montero y Kanninen (2002) que reportaron un valor promedio de 82 t ha<sup>-1</sup>.

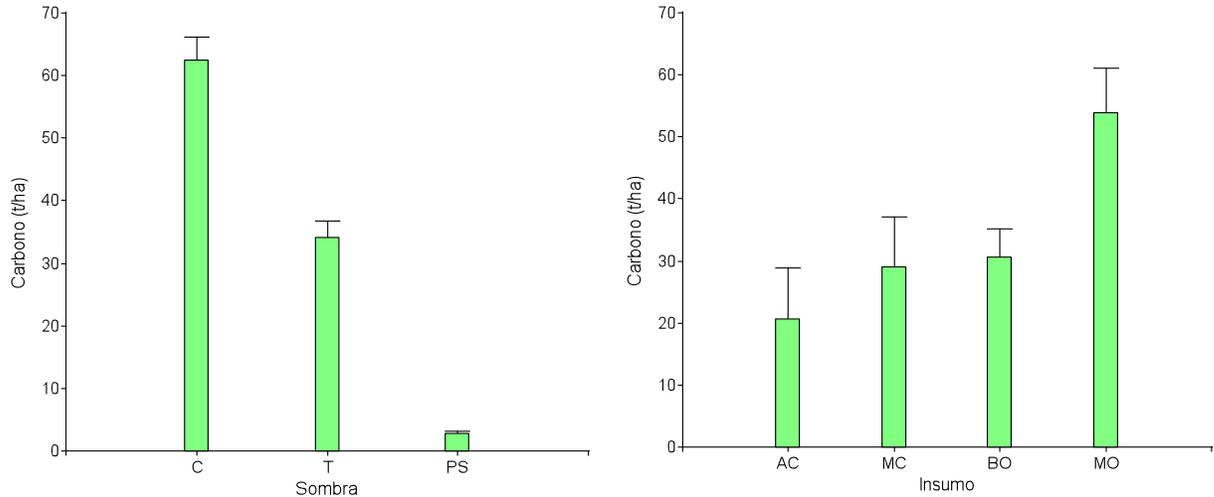


Figura 23. Carbono acumulado en biomasa aérea por sombra y por nivel de insumo en SAF de café en Turrialba.

## 5.6 Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación fue planteada con el objeto de evaluar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales establecidos por el proyecto Ensayo de Sistemas. Para ello se estimó el contenido de carbono en biomasa aérea para 8 sistemas establecidos en Turrialba, Costa Rica y para 14 sistemas en Masatepe, Nicaragua. De esta evaluación se pudo apreciar que:

- Los modelos de biomasa desarrollados para cada especie presentaron buenos ajustes y se recomiendan para la predicción de biomasa aérea dado que utilizan como variable regresora el dap que en campo es de fácil medición, en comparación con otras variables.
- La biomasa estimada de las plantas estuvo afectada por los factores analizados, en el caso de los niveles de insumos utilizados en el sistema, el nivel orgánico (MO) presentó los mayores valores de biomasa acumulada sin ser diferente del café a pleno sol (PS). En el caso del tipo de sombra, el asocio maderable-fijador (SSIL, ILSG) que presentó mayores valores diferentes al PS.

- El promedio de la biomasa aérea para Masatepe fue diferente entre el asocio maderable fijador-fijador (SSIL) y maderable-maderable (SGTR). En Turrialba, *Abarema idiopoda* fue la sombra que presentó el mayor promedio frente a *Terminalia amazonia*.
- Para complementar la información sobre carbono en los sistemas analizados, se recomienda realizar estudios relacionados con el contenido de carbono en el suelo y en materia orgánica del suelo, como forma de estimar el almacenaje de carbono total en el sistema.

## 5.7 Bibliografía

- Albrecht, A.; Kandji, S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99 (1-3): 15-27. Consultado en línea. Disponible en: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6T3Y-48KFGC7-4&\\_user=10&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=4929bca92e9feaeccc64afd4e239d05b](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6T3Y-48KFGC7-4&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=4929bca92e9feaeccc64afd4e239d05b)
- Alvarado, A.; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1): 85-94. Consultado en línea. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v29n01\\_085.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf)
- Alvarez, G. 2008. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 89 p.
- Altamirano, J. 2005. Biomasa y nutrientes de mantillo en diferentes sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio de Masatepe departamento de Masaya, Nicaragua. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua.
- ANACAFÉ (Asociación nacional de café en Guatemala). 1997. Importancia de la sombra en el cafetal. *Agroforestería en las Américas* 4(13): p.25-27.

- ANACAFÉ (Asociación nacional de café en Guatemala). 1998. Manual de Caficultura. 318p.
- Andrade, H. e Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de Carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10(39-40): p.109-116.
- Andrade, H.; Segura, M.; Somarriba, E.; Villalobos, M. 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* (46): p.45-50.
- Arana, V. 2003. Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (*Coffea arabica* L.) asociado con poró (*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook). Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 100 p.
- Avendaño, Jeimmy. 2008. Modelos genéricos de biomasa aérea para especies forestales en función de la arquitectura y la ocupación del rodal. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. p.
- Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., Robledo C.W. 2008. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Banco Mundial. 1994. Glosario anotado de términos basados en el análisis Económico de Proyectos Agrícolas. Baltimore, US, John Hopkins University Press. 134 p.
- Barbera, N. 2001. Diversidad de especies de hormigas en sistemas agroforestales contrastantes de café, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 78p.
- Beer, J.; Muschler, D.; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*. 38: 139-164.
- Beer, J.; Harvey, C.A.; Ibrahim, I.; Harmand, J.; Somarriba, E.; Jiménez, F. 2003. Funciones de servicio de los sistemas de agroforestería. XII congreso Forestal Mundial, Quebec, Canadá. 9 p. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS20-S.HTM>
- Benjamín, J; Masera, O. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.inecol.edu.mx/myb/resumeness/7.1/pdf/Ordonez%20y%20Masera%2001.pdf>

- Boarman, A.; Greenberg, D; Vining, A; Weimer, D. 2001. Cost-benefit analysis: Concepts and practice. Prentice Hall. 473 p.
- Brown, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. Roma: FAO, Montes 134, 1997. 55 p. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W4095E/W4095E00.htm>
- DaMatta, F; Rodriguez, N. 2007. Sustainable production of coffee in agroforestry systems in the Neotropics: an agronomic and ecophysiological approach. Agronomy colomb 25(1):113-123.
- De Melo Virginio Filho, E. 2007. Resumen de proyecto CAFNET. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2 p.
- Duarte, N. 2005. Sostenibilidad socioeconómica y ecológica de sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) en la microcuenca del Río Sesesmiles, Copán, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 154 p.
- Dzib Castillo, B. 2003. Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 124 p.
- Estrada, N. 2009. Identificación de áreas prioritarias en la oferta de servicios ecosistémicos para establecer esquemas de pagos (PSA) direccionados, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 98p.
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2006. La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios. UN Food and Agriculture Organization. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s06.htm>
- Fischersworing, B.; y Roskamp, R. 2001. Guía para la caficultura ecológica. GTZ Alemania. 153p.
- Florian Rivero, E. 2005. Avifauna en sistemas agroforestales cafetaleros: relaciones entre el contexto paisajístico, la complejidad estructural y comunidades de aves dentro del

- Corredor Biológico Turrialba - Jiménez, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 146p.
- George, A. 2006. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 101p.
- Gutierrez, M. 2002. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 62p.
- Gómez, M. y Quirós, D. 2001. *In*: Louman, B.; Quirós, D.; Nilsson, M. 2001. Eds. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Serie técnica. Manual técnico no. 46. CATIE.265p.
- Haggar, J; De Melo Virginio Filho, E. 2001. Calidad, ecología y diversificación. Boletín unidad de comunicación. CATIE.
- Henríquez, C. Cabalceta, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, Costa Rica. ACCS (Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo). 112 p.
- HERRERA, R. 2001. Evaluación de diferentes enmiendas orgánicas en crecimiento e incidencia de enfermedades foliares de café (*Coffea arabica* L) vivero. Tesis Ing. Universidad Nacional Agraria (UNA). Managua. p. 19-22.
- ICAFFE (Instituto del café de Costa Rica). 2009. Cifras mundiales USDA-FAS. Consultado en línea. Disponible en: [http://www.icafe.go.cr/sector\\_cafetalero/estadsticas/Cifras%20mundiales%20USDA-FAS.xls](http://www.icafe.go.cr/sector_cafetalero/estadsticas/Cifras%20mundiales%20USDA-FAS.xls)
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climatic Change). 1996. Report of the twelfth session of the intergovernment panel on climatic change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Ciudad de México.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman, J; Gytarsky, M; Hiraishi, T; Krug, T; Kruger, D; Pipatti, R; Buendia, L; Miwa, K; Ngara, T; Tanabe, K; Wagner, F. (Eds.). Tokio, Japon. pG12.
- Kurz,W.; Beukema, S.; Apps, M. 1996. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector. Canadian Journal of Forest Research 26: 1973-1979.
- Louman, B.; Valerio, J.; Jiménez W. 2001. In: Louman, B.; Quirós, D.; Nilsson, M. 2001. Eds. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Serie técnica. Manual técnico no. 46. CATIE.p. 68-69.
- Maginnis, S; Mendez, J; Davies J. 1998. Manual para el manejo de bloques pequeños de bosque húmedo tropical: con especial referencia a la Zona Norte de Costa Rica. Costa Rica. CODEFORSA 208 p.
- Masera, O; Astier, M; López-Ridaura, S. 1999. Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales: El marco de evaluación MESMIS. MX, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada. 109 p.
- Mena, V. 2008. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 88 p.
- Merlo, M. 2007. Comportamiento productivo del (*Coffea arabica* var. caturra), el poró (*Erythrina poeppigiana*), el amarillón (*Terminalia amazonia*) y el cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) en sistemas agroforestales bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 92p.
- Montero, M. M.; Kanninen, M. 2002. Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica. Revista Forestal Centroamericana. Vol. 39-40, p. 50-55

- Muschler, R. 2000. Árboles en cafetales. Turrialba, Costa Rica. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. 139 p.
- Organización Internacional del Café (OIC). 2009. Informe sobre el mercado del café diciembre del 2008. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.ico.org/>
- Ordóñez, A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F. Consultado en línea. Disponible en:  
<http://www.inecol.edu.mx/myb/resumenes/7.1/pdf/Ordonez%20y%20Masera%202001.pdf>
- Osorio Moreno, V. 2004. Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 75p.
- Oxfam (Comité Oxford de ayuda contra el hambre). 2005. La crisis del café continua: evaluación de la situación y recomendaciones de políticas para reducir la pobreza en el sector cafetalero. EUA, 9p.
- Perez, O. 2008. Evaluación de la biodiversidad de mariposas diurnas presentes en sistemas agroforestales modernos con café en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 68p.
- Porras Vanegas, C.M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 131p.
- Reiche, C; Gómez, M. 1993. Costos de establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Costa Rica. *In* Semana científica CATIE (8-10 dic 1993). Memorias Ed. Rodolfo Salazar. Turrialba. CR. (2). p.79-81.
- Renderos, R. 2001. Efecto de sistemas agroforestales café-Eucalyptus deglupta sobre la contaminación del agua con nitratos en microcuencas de la zona sur de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 68p.

- Romero, S. 2006. Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* var. Caturra), con tres niveles de manejo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 128p.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguas, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 111p.
- Salguero, E. 1996. Valoración económica de la contaminación de las fuentes de agua por los desechos de la industria del beneficiado húmedo del café: el uso del concepto de costo defensivo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 127p.
- Sierra, C.; Del Valle, J.; Orrego, S. 2003. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. *In*: Orrego S, S.A.; Valle A, J.I. del; Moreno H, F.H.; eds. Medición de la captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. p.169-188.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 120 p.
- Segura, M. y Kanninen, M. 2002. Inventarios para estimar Carbono en ecosistemas forestales tropicales. *In*. Orozco, L. y Brumér, C. Eds. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba: CATIE. p.202-222.
- Segura, M. y Kanninen, M. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* (68). p.143-150.
- Somarriba, E. 1990. ¿Qué es agroforestería? Boletín informativo sobre recursos naturales renovables. El chasqui (24) CATIE. p.1-10.
- Suarez, D. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café de la Comarca Yassica Sur, Matagalpa Nicaragua. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 117 p.

- Suarez, D; Segura, M; Kanninen, M. 2004. Estimación de la biomasa aérea total en arboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos. *Agroforestería en las Américas*. 41-42: p.112-119.
- Zea, Y. 2003. Análisis económico del manejo forestal sostenible: Implicaciones de la aplicación del monitoreo ecológico en la rentabilidad del manejo en bosques con alto valor de conservación bajo certificación, Región Autónoma del Atlántico Norte, Nicaragua. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 97 p.
- Zuluaga Pelaez, J. 2004. Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas agroforestales de café con *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook en Costa Rica. Dynamic of organic matter in soils of coffee agroforestry systems with *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook in Costa Rica. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 116p.