

# Agroforestería

y sistemas agroforestales con café

Fernando Farrán Valencia



Federación Nacional de Cafeteros de Colombia



Cenicafé



**Ministro de Hacienda y Crédito Público**  
Mauricio Cárdenas Santamaría

**Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural**  
Rubén Darío Lizarralde Montoya

**Ministro de Comercio, Industria y Turismo**  
Santiago Rojas Arroyo

**Director del Departamento Nacional de Planeación**  
Mauricio Santa María Salamanca

**COMITÉ NACIONAL**

Período 1° enero/2011 - diciembre 31/2014

José Eliecer Sierra Tejada  
Jorge Cala Robayo  
Eugenio Vélez Uribe  
Fernando Castrillón Muñoz  
Crispín Villazón de Armas  
Javier Bohórquez Bohórquez  
Fernando Castro Polania  
Iván Pallares Gutiérrez  
Aura Teresa Pérez de Betancourt  
Alfredo Yáñez Carvajal  
Carlos Alberto Cardona Cardona  
Francisco Javier Pérez Marín  
Jorge Julián Santos Orduña  
Luis Javier Trujillo Buitrago  
Carlos Roberto Ramírez Montoya

**GERENTE GENERAL**  
LUIS GENARO MUÑOZ ORTEGA

**GERENTE ADMINISTRATIVO**  
LUIS FELIPE ACERO LÓPEZ

**GERENTE FINANCIERO**  
JULIÁN MEDINA MORA

**GERENTE COMERCIAL**  
CONSTANZA MEJÍA DE LOS RÍOS (E)

**GERENTE COMUNICACIONES Y MERCADEO**  
LUIS FERNANDO SAMPER GARTNER

**GERENTE TÉCNICO**  
CARLOS ARMANDO URIBE FANDIÑO

**DIRECTOR INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**  
FERNANDO GAST HARDERS

**ISBN**  
978-958-8490-16-8

FARFÁN V., F. Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café. Manizales, Caldas (Colombia), 2014. 342 p.

Palabras clave: Sistemas agroforestales, Agroforestería, Sistema de producción, Caficultura.

FNC – Cenicafé, 2014

## Créditos

**Edición de textos**

Sandra Milena Marín L.

**Diseño y diagramación**

Jonathan Garzón G.  
Carmenza Bacca R.

**Fotografías**

Archivo Cenicafé  
Fernando Farfán V.

**Ilustraciones**

Fernando Farfán V.

**Impreso por**

Blanecolor S.A.S.

# Agroforestería y sistemas agroforestales con café

Fernando Farfán Valencia\*

\*Ingeniero Agrónomo, Universidad de Caldas  
M.Sc. Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible  
Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé,  
Manizales, Caldas, Colombia. Disciplina de Fitotecnia.



Implementado por:



MinAgricultura  
Ministerio de Agricultura  
y Desarrollo Rural





# Presentación

Posicionado el café como un ícono de reconocimiento mundial de Colombia, son muy pocos los que se preguntan o reflexionan sobre las dificultades por las cuales atravesaron los pioneros de la caficultura para lograrlo. La tarea de establecer el cultivo de café en una geografía diferente a la de sus orígenes naturales fue un proceso lento, guiado más por el “ensayo y error”, y la observación de los aciertos y desaciertos.

La transición de cafetos mantenidos en jardines o huertos, por religiosos o individuos visionarios de la época, que vieron en la producción de café un potencial, se dio hacia mediados del siglo XIX. Los cultivos se establecieron de manera desigual y no planificada desde Norte de Santander hacia el interior de las dos cordilleras de los Andes, a los que hoy conocemos como Departamentos Andinos; y hacia el año 1900, ya se habían establecido cultivos de café, con fines de exportación, desde Nariño hasta la Sierra Nevada de Santa Marta.

La comercialización hacia el exterior se hacía por vía fluvial y luego vía férrea, transportándose en recuas de mulas a los puertos fluviales o los centros de acopio. El café se convirtió en un importante dinamizador del desarrollo económico y social de las regiones cafeteras y pilar fundamental de la economía nacional, creándose en 1927 la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

La información histórica sobre el uso de árboles como sombrío en los cafetales indica que fueron los cultivadores de Asia y África, los que los utilizaron como práctica de cultivo. El sombrío fue seleccionado y establecido sin ningún análisis, utilizando cualquier especie; el resultado de este proceder fue desventajoso para los cafetales, y como consecuencia, se desprestigió el uso de los árboles asociados al café.

Los inicios de la caficultura colombiana, hacia el año 1890, tuvieron serios percances surgidos no solo de las dificultades del transporte, si no por otros relacionados con la variación inesperada de prolongados y fuertes períodos secos o períodos húmedos; aparte de lo inapropiado del clima, debido a la elevada temperatura, lo cual llevó el cultivo al fracaso. Como estrategia de protección del cultivo, se inició la siembra del café en asocio de especies arbóreas, sistemas que se caracterizaron por el uso de las variedades de café arábigo, típica y borbón.

En los sistemas de cultivo del café bajo cubierta arbórea se empleaba generalmente el guamo; no obstante, se recomendó el sombrío mixto en todos los territorios cafeteros donde el café se cultiva bajo sombrío, es decir, el componente arbóreo debía estar conformado por distintos árboles para que no los atacaran las mismas plagas y no compitieran entre sí por el consumo de nutrientes; además, los distintos árboles se sembraban intercaladamente para que no interfieran en su alimentación, y sus follajes tenían alturas diversas, con lo que se defendían mejor de las plagas.

Los registros reportados por Monsalve en 1927, indican que entre 1923 y 1925, eran 16 los principales departamentos cafeteros colombianos, distribuidos en 450 municipios, con un 39.000 plantaciones y un total de cafetos sembrados cercano a los 351 millones; siendo los departamentos de Antioquia, Caldas, Cundinamarca, Santanderes, Tolima y Valle del Cauca, donde se encontraban las mayores plantaciones. Todos estos cultivos se establecían bajo sombrío, los árboles más utilizados para este propósito eran *Inga edulis* (guamo santaferoño); *Inga spuria* (guamo bejuco); *Inga ursi pitlier* (guamo cacho de cabra); *Inga marginata* (guamo churimo de ribete); *Calliandra lehmannii* (carbonero morado); *Pseudoacacia spectabilis* (cañofistulo macho, vanillo o vainillo); *Erythrina poeppigiana* (cámbulo, ceiba, cachimbo, anaco, písamo); *Erythrina corallodendro* (chocho, peonía, madrecacao), *Albizia carbonaria* (carbonero) y *Anacardium excelsum* (caracolí), entre otros; los cuales se establecían con densidades entre los 50 y 400 árboles por hectárea.

La información registrada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia en sus 86 años de historia, informa que en 1932 existían cerca de 530 millones de cafetos cultivados bajo sombra; éstos estaban distribuidos en 356.245 hectáreas que comprendían cerca de 149.348 fincas. Entre 1980-1981 se contabilizaron 1.009.572 de hectáreas en café, de las cuales el 65,9% era caficultura tradicional, y el 16,7% caficultura bajo sombra. Actualmente, del área cultivada con café en Colombia (927.815 ha), 308.990 hectáreas están con algún tipo de sombrío ralo y 102.913 hectáreas bajo sombrío; estos datos permiten inferir que en Colombia, el café es un planta que se cultiva a plena exposición solar, pero es común observar plantaciones establecidas con varios tipos y cantidades de cobertura arbórea; y que existe una gran cultura agroforestal con café, dadas las diversas condiciones climáticas y de suelo de nuestras zonas cafeteras.

Con una gran visión de lo que debería ser la caficultura colombiana hacia futuro, por disposición del IX Congreso Nacional Cafetero, en el año de 1938, se creó el Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé; algunos de los resultados de estas valiosas investigaciones en caficultura bajo sombra fueron publicados entre 1946 y 1979 por Castaño, Trojer, Machado y Suárez de Castro, en cuanto a manejo del sombrío; por Triana, Uribe y Quiceno, Machado, Mestre, entre 1957 y 1996, en lo relativo a

fertilización del cultivo. También fueron muy importantes los estudios publicados entre 1951 y 1999 por Schroeder, Trojer, Jaramillo y Gómez, Jaramillo y Chaves, en temas fundamentales como es el clima. Y muchos otros temas de gran relevancia, como la conservación de suelos; sin excluir el gran aporte de la Federación Nacional de Cafeteros con las recomendaciones dadas en 1932 en cuanto al sombrío para el café. Fueron los resultados de estas primeras y más recientes investigaciones las que han permitido generar nuevos y actualizados conocimientos en el manejo integrado de la caficultura bajo sombra o en sistemas agroforestales, y las que han permitido un valioso desarrollo agroforestal para los caficultores colombianos.

Es una gran satisfacción, por medio de esta publicación, de autoría del investigador de Cenicafé, Fernando Farfán Valencia, contribuir al desarrollo agroforestal con café en Colombia, tendiente a recuperar y mantener la producción y la productividad, con criterios de sostenibilidad y calidad; esperando que la misma obra sea de gran apoyo a los caficultores colombianos y al Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros, para el logro del anterior propósito.

*Fernando Gast H.  
Director de Cenicafé  
Chinchiná, Febrero de 2014*



*“Si nosotros pudiéramos conocer primero  
dónde estamos y hacia dónde tendemos,  
podríamos juzgar mejor  
qué hacer y cómo hacerlo”  
(Abraham Lincoln, 1858)*

# Agradecimientos

La historia indica que entre 1730 y 1787 inició la caficultura colombiana; los primeros cultivos crecieron en la zona oriental del país, establecidos bajo árboles de sombrío. El café tuvo una gran expansión entre finales de los años setenta del siglo XIX y comienzos del siglo XX, principalmente en los departamentos de Santander y Cundinamarca, bajo los mismos sistemas de cultivo. Actualmente, de las 920.000 hectáreas cultivadas con café, el 33,1% están con semisombra y el 16,8% bajo sombrío, es decir, la caficultura colombiana es una caficultura con una gran tradición agroforestal; sistemas de producción que han demandado un gran esfuerzo, inversión y dedicación por parte de sus cultivadores. Por esto, es pertinente dar un gran agradecimiento a todos los caficultores colombianos y sus familias por su contribución al desarrollo de la caficultura colombiana, así como a las instituciones cafeteras y personas que con su apoyo han permitido el desarrollo de investigaciones en caficultura en sistemas agroforestales y a la divulgación de sus resultados:

- A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- Al Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé y todas sus dependencias.
- Al Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- A los doctores Marina Sánchez de Prager (Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira), Álvaro Jaramillo Robledo (Cenicafé) y Jorge Fernando Navia Estrada (Universidad de Nariño), por sus valiosos aportes en la revisión del manuscrito.
- Al doctor Gabriel Cadena Gómez, Director de Cenicafé hasta el año 2009.
- A los doctores Alfonso Mestre Mestre y José Néstor Salazar Arias, anteriores investigadores de la Disciplina de Fitotecnia de Cenicafé.
- A los doctores Jaime Arcila Pulgarín (q.e.p.d.), Argemiro Miguel Moreno Berrocal, e integrantes de la Disciplina de Fitotecnia y anterior programa de Agronomía de Cenicafé.

- A los Coordinadores, actual y anteriores, y personal de apoyo de la Estación Central Naranjal de Cenicafé – Chinchiná (Caldas).
- A Pedro María Sánchez Arciniegas, Coordinador de la Estación Experimental Santander (Santander); José Enrique Baute Balcazar, Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar); actuales y anteriores Coordinadores de las Estaciones Experimentales El Tambo (Cauca), Paraguaicito (Quindío) y La Catalina (Risaralda), así como a todo el personal técnico, auxiliar y de apoyo de estas Estaciones.
- A las Disciplinas de Agroclimatología, Economía, Biometría, Suelos, Tecnología de la Información y el Centro de Documentación de Cenicafé.
- Al Banco Alemán de Desarrollo (KFW) por la canalización de los recursos económicos para la publicación de la obra.
- A Raúl Jaime Hernández R., Coordinador Nacional Programa Medio Ambiente de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, por la gestión de los recursos.



# Contenido

Presentación

Agradecimientos

Introducción

## Fundamentos de Agroforestería 17

### 1. Agroforestería: Historia, definiciones y conceptos 19

- 1.1 El concepto de sistemas de producción 19
- 1.2 Estructura de los sistemas de producción 21
- 1.3 Sistemas complejos 22
- 1.4 Origen de la agroforestería 25
- 1.5 Definiciones y conceptos de agroforestería 28
- 1.6 Definiciones de “Café bajo sombra” 29
- 1.7 Características de los sistemas agroforestales 33
- 1.8 Interacciones ecológicas en agroforestería 35
- 1.9 Modelos agroforestales 37
- 1.10 La Forestería Análoga (FA) 41
- 1.11 Los sistemas agroforestales en zonas cafeteras colombianas 46

### 2. Factores que determinan el establecimiento de sistemas agroforestales con café 51

- 2.1 Características de los suelos 52
- 2.2 Deficiencias hídricas en el suelo 53
- 2.3 Uso (vocación) del suelo agrícola 54
- 2.4 Disponibilidad de insumos 56
- 2.5 Objetivos de la producción 57
- 2.6 Vulnerabilidad del suelo y control de la erosión 57
- 2.7 Captación del carbono 59
- 2.8 Servicios ambientales de los sistemas agroforestales 60
- 2.9 Otras razones para establecer árboles en las fincas 67



<b>3.</b>	<b>Factores modificadores de la interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) en SAF con café</b>	<b>70</b>
3.1	La latitud	71
3.2	La altitud	72
3.3	La orientación y dirección de la superficie que recibe la radiación	74
3.4	La hora del día	76
3.5	Radiación directa y difusa	76
3.6	Estratificación del componente arbóreo	77
3.7	Altura del árbol y diámetro de sus copas (dosel)	79
3.8	Distribución de la RFA a través del dosel de los árboles	80
3.9	Densidad de la cubierta vegetal	80
3.10	Patrón horizontal y vertical de hojas y ramas	81
3.11	Ángulo y distribución azimutal de hojas y ramas	81
3.12	Fenofases del árbol	82
3.13	Otros factores que determinan el grado de interceptación de la RFA	82

## **Manejo integrado del Sistema Agroforestal con Café – MISA 83**

	Bases conceptuales para la construcción del MISA	84
	Componentes de MISA	85
	Descripción de los sitios de estudio	86

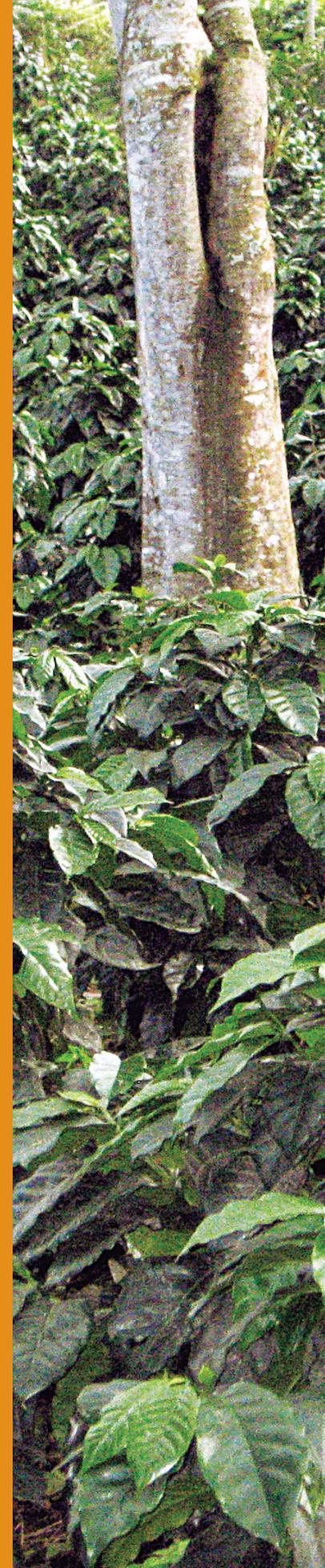
### **1. Primer componente - sostenibilidad de la caficultura 90**

1.1	Recuperación y aumento de la producción	90
-----	---	----

### **2. Segundo componente - Diagnóstico y Diseño del Sistema Agroforestal 94**

2.1	Principios de Diagnóstico y Diseño (D&D) de sistemas agroforestales	94
2.2	Decidir si establecer sombrío al café o “arborizar” la finca cafetera	100
2.3	D&D de un sistema agroforestal con café	102
2.4	Diseño de una finca de producción de café con criterios de sostenibilidad, D&D y Forestaría Análoga	105

<b>3. Tercer Componente - Identificación de estrategias (prácticas de manejo)</b>	<b>108</b>
3.1 Estrategia 1. Controlar la edad del cultivo	109
3.2 Estrategia 2. Incrementar la densidad de siembra de café	113
3.3 Estrategia 3. Establecer un plan de fertilización del café apropiado	120
3.4 Estrategias 4 y 5. Establecer la densidad de siembra del sombrío adecuada y controlar el porcentaje de sombrío	161
3.5 Estrategia 6. Identificar otras potencialidades y factores limitantes de la producción prácticas complementarias	208
3.6 Estrategia 7. Identificar otras potencialidades y factores limitantes de la producción - prácticas complementarias	212
<b>4. Cuarto componente - Recursos Económicos</b>	<b>272</b>
4.1 Recuperación de áreas	272
<b>5. Quinto Componente - sistemas de indicadores</b>	<b>275</b>
5.1 Valora la sostenibilidad de los SAF con café	275
5.2 Sistema de indicadores para diagnosticar el estado de un sistema agroforestal con café	290
<b>Consideraciones generales</b>	<b>296</b>
<b>Modelos agroforestales propuestos</b>	<b>309</b>
<b>Literatura citada</b>	<b>310</b>
<b>Abreviaturas y siglas empleadas</b>	<b>341</b>



# Introducción

La diversidad biológica o biodiversidad es la variación de las formas de vida, y se manifiesta en la diversidad genética de poblaciones, especies, ecosistemas y paisajes. Colombia tiene una extensión continental de 114.174.800 hectáreas, que representan aproximadamente el 0,7% de la superficie continental mundial. En esta área se encuentra el 10% de la biodiversidad, constituyendo a Colombia un país "megadiverso"; sin embargo, se vive un proceso acelerado de transformación de sus hábitats y ecosistemas naturales por causas como la inadecuada ocupación y utilización del territorio, que han agudizado problemas de colonización y ampliación de la frontera agrícola.

En los ecosistemas adicionalmente se ejerce presión sobre el uso del suelo, debido a la explosión demográfica registrada en muchos lugares del trópico, a la tala, quema, siembra de monocultivos y cultivos transitorios, especialmente en topografía quebrada, la eliminación de la biodiversidad y la materia orgánica, a través de prácticas agronómicas no adecuadas, entre otros, lo cual conduce a la degradación del suelo, disminución del rendimiento de los cultivos y a la invasión de hierbas difíciles de controlar. Una de las alternativas para frenar estos procesos y hacer frente a las variaciones que en el clima pueda presentarse a futuro es la explotación de la tierra a través de sistemas agroforestales o agroforestería.

Agroforestería es el nombre genérico para describir un sistema de uso de la tierra en el cual los árboles se combinan temporal y espacialmente con pasturas (uso animal) o cultivos agrícolas; en la agroforestería interactúan elementos de la agricultura con elementos forestales que se traducen en sistemas de producción sostenibles en la misma unidad de terreno (Durán, 2004).

En términos generales, la agroforestería es un sistema de manejo sostenible de los cultivos y del suelo, mediante el cual se busca aumentar los rendimientos en forma continua, combinando la producción de las especies arbóreas con cultivos de valor económico, entre los cuales se incluyen pastos para la producción animal, en una forma simultánea o secuencial en la misma unidad de terreno (Durán, 2004; Sánchez, 2003; Torquebiau, 1993), con aplicación de prácticas de manejo compatibles con las prácticas culturales de la población local (Durán, 2004).

La combinación de árboles y cultivos es una asociación entre entes diferentes que coexisten y comúnmente difieren en rendimientos económicos. En el caso de los cafetales en sistemas agroforestales, sería de los árboles de los cuales se esperaría la menor utilidad. Por tanto, la

introducción de éstos en los cultivos no debe causar pérdidas en la productividad por máspreciado que sea su servicio ambiental (Wadsworth, 1997). La tarea es conocer, identificar e integrar la forestería y la agricultura a las tecnologías forestales y agronómicas, apoyándose en el conocimiento de tradiciones sociales rurales y las destrezas en las relaciones humanas.

La importancia relativa y el efecto de las diferentes interacciones entre los árboles de sombra y el café dependen de las condiciones del sitio (suelo y clima), la selección del genotipo (especie, variedad y procedencia), las características bajo y sobre el suelo de los árboles y los cultivos, así como de las prácticas de manejo del cultivo principal (Beer *et al.*, 1998). Estas interacciones pueden afectar positiva o negativamente la producción del café (Cietto *et al.*, 1991; Herrera *et al.*, 1997; Ramírez, 1995).

En Colombia, el café es un cultivo que se establece a plena exposición solar, pero es común observar plantaciones establecidas con varios tipos y cantidades de cobertura arbórea; es así como de las 920.200 hectáreas cultivadas con café, cerca del 50% se cultiva bajo algún tipo de sombrío (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia- SICA, marzo 2011) dadas las diversas condiciones climáticas y de suelo de nuestras zonas cafeteras. Los árboles de sombrío en los cafetales permiten ejercer un control sobre la economía del agua lo que mitiga los efectos que los períodos de déficit hídrico imponen sobre la producción; también, contribuyen a mantener la fertilidad del suelo, ayudan a reducir la erosión, reciclan nutrimentos y aportan gran cantidad de materia orgánica (Beer, 1987), además, incrementan las poblaciones de plantas epífitas y aumentan la diversidad de las especies de aves, entre otros (Kiara y Naged, 1995).

De acuerdo con Gast (El Caficultor, 2010), en su disertación sobre cambio climático, indica que se debe tener un plan de acción dirigido a mantener una estrategia de adaptación y mitigación de los efectos ocasionados por las variaciones climáticas, con el objetivo prioritario de garantizar la sostenibilidad de la caficultura. Parte de ese plan incluye el establecimiento de alertas tempranas y la modelación de escenarios posibles, con el fin de identificar cuáles son las mejores condiciones para que el café pueda desarrollarse, en la medida en que cambie la temperatura del planeta. “Es necesario adaptar la caficultura colombiana al Fenómeno de La Niña o El Niño. Son condiciones climáticas, lo que hay que garantizar es que la caficultura tenga una estrategia para mitigar los efectos”.

En el Documento Estratégico “Sostenibilidad de la caficultura – 2011” (FNC, 2011), se plantea la necesidad de desarrollar alternativas de adaptación de la caficultura que contribuyan a recuperar, estabilizar y aumentar la producción y la productividad de los cafetales, con sostenibilidad y calidad; dentro de las estrategias se contempla, entre otras: Implementar densidades de siembra y arreglos del cultivo en función del sombrío y del potencial de crecimiento y producción de cada zona cafetera, así como la implementación de sistemas de manejo del sistema agroforestal con café para incrementar la productividad sin poner en riesgo las plantaciones, entre otros.

Los sistemas agroforestales con café y la gran cantidad de prácticas que de ellos se derivan, servirán de soporte técnico a los caficultores colombianos, al Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, a investigadores del Centro Nacional de Investigaciones de Café –Cenicafé–, y a todo aquel que desee establecer o rediseñar los sistemas de producción de café con la inclusión de especies arbóreas, siempre que los modelos agroforestales implementados tengan como propósito la conservación del suelo y el agua, y el aumento y mantenimiento de la producción, para garantizar la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo social y económico de las familias cafeteras colombianas.

El libro **“Agroforestería y sistemas agroforestales con café”**, se ha dividido en dos unidades:

La primera unidad expone los Fundamentos de la agroforestería: Historia, definiciones y conceptos; Factores determinantes del establecimiento de sistemas agroforestales con café; Factores modificadores de la interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) en SAF con café; y los Efectos del estrato arbóreo sobre otros componentes de los sistemas agroforestales con café.

La segunda unidad la componen los capítulos relativos al Manejo Integrado del Sistema Agroforestal con Café –MISA–: Sus bases conceptuales; los componentes del MISA como son la sostenibilidad de la caficultura, el diagnóstico y diseño del sistema agroforestal, la identificación de estrategias o prácticas de manejo, los recursos económicos y el sistema de indicadores para valorar el estado de un SAF con café.

Para finalizar se presenta, a manera de matrices resumen, algunas consideraciones generales finales que podrán servir de consulta rápida y aplicación práctica, al momento de Diagnosticar y Diseñar (D&D) Sistemas Agroforestales con Café (SAFC).



# Fundamentos de Agroforestería

La agroforestería es parte fundamental del proceso integral de la conservación y mejoramiento del suelo. Es una estrategia que tiene como objetivos reforzar y establecer la sostenibilidad en las fincas de los agricultores mediante la promoción de la diversificación productiva y capacitación en el manejo de sistemas estratificados; mejorar y mantener todo tipo de agricultura; aumentar los niveles de materia orgánica del suelo, fijación del nitrógeno atmosférico, reciclaje de nutrientes, modificación del microclima dentro del cultivo; y optimizar la productividad del sistema mediante la producción sostenible, entre otras. En las regiones cafeteras colombianas son una alternativa viable para el desarrollo de las comunidades cafeteras, apoyando la conservación y la optimización de los recursos. Para cumplir estos propósitos es fundamental la contextualización de la agroforestería, para poder realizar aplicaciones prácticas de sus conceptos y definiciones.



# Agroforestería: Historia, definiciones y conceptos

## 1.

### 1.1 El concepto de sistema de producción

El concepto de sistema de producción se basa en la Teoría General de Sistemas desarrollada por el biólogo alemán Von Bertalanffy (Bertalanffy, 1993), que en esencia es una perspectiva integradora y holística (referida al todo). Una de las definiciones de la teoría general de sistemas dice que son conjuntos de componentes que interactúan unos con otros, de tal forma que cada conjunto se comporta como una unidad completa.

Los sistemas también se refieren a un conjunto de elementos o entidades que guardan estrechas relaciones entre sí y que mantienen al sistema directa o indirectamente unido, de modo más o menos estable, cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo (Vidal, 2007). Para describir y, en general, para entender un sistema, es común el uso de diagramas de flujo, los que si bien no dan una visión completa, facilitan la visualización de las interrelaciones, como se indica en la Figura 1.

Para entender y aplicar la teoría de sistemas a la producción de café en un sistema agroforestal es necesario saber qué es y qué no es un sistema (Belil, 1988; Vidal, 2007). Para este efecto y utilizando como ejemplo un sistema de producción de café se pueden identificar los siguientes componentes que lo conforman:

- **Objetivo o propósito del sistema.** La producción de café pergamino seco de una manera sostenible.
- **Límites.** Se establecen para definir qué está dentro y fuera del sistema. Los límites del sistema estarían definidos por los linderos o perímetro de la finca o un lote.
- **Contexto.** Entorno externo en el que opera un sistema. Considera la zona agroecológica (Ejemplo: Ecotopo).

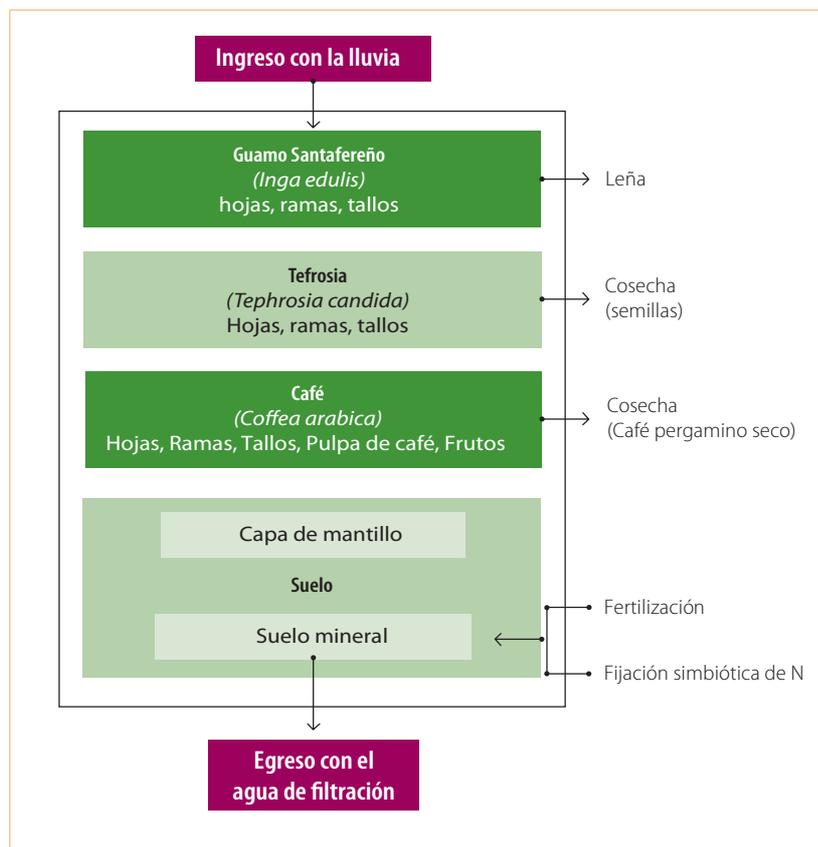


Figura 1.

Representación de un sistema agroforestal con café – SAF.

- **Componentes.** Elementos de un sistema que se relacionan entre sí: Áreas de cultivo, material vegetal, infraestructura, personal de campo y administrativo, entre otros.
- **Interacción.** Relaciones entre los componentes del sistema, pueden ser de tipo biológico, físico, químico y socioeconómico (ejemplo: Densidad de siembra del café y del sombrío, plan de fertilización, ciclos de renovación, variedades utilizadas y épocas de cosecha, entre otros).
- **Recursos.** Componentes que se usan dentro del sistema. Pueden ser primarios o naturales (radiación solar, temperatura, precipitación, suelo, etc.) y secundarios o adquiridos (maquinaria, energía, fertilizantes, trabajo, capital, etc.), expresados en beneficiaderos, equipo para el beneficio del café, número de plantas establecidas, capital disponible y productos de valor económico provenientes de los árboles de sombrío, entre otros.
- **Aportes.** Ingresos al sistema desde el medio externo, definidos como dosis de fertilizante aplicado, uso de agroquímicos y mano de obra, entre otros.
- **Productos.** Es la actividad principal del sistema, por ejemplo: la producción de café pergamino seco.

- **Subproductos.** Son productos secundarios que no hacen parte de los propósitos productivos del sistema, como por ejemplo: la pulpa de café para la fertilización o producción de biocombustibles, madera de café y del sombrío, mucílago para la alimentación animal, residuos vegetales para fabricación de compost, etc.

## 1.2 Estructura de los sistemas de producción

Un sistema de producción agrícola es una actividad dirigida a transformar componentes abióticos (oferta ambiental) en ingresos económicos, mediante componentes bióticos (genotipos) ordenados en arreglos espaciales y cronológicos, sometidos a prácticas adecuadas de manejo; la estructura de los sistemas de producción se denomina arreglo y ordena los componentes bióticos en el tiempo y el espacio (Moreno, 2007). Los arreglos descritos por el autor son:

### 1.2.1 Arreglos interespecíficos

Se relacionan directamente con los componentes de tipo biótico, representados en poblaciones de cultivos (componentes específicos), que interactúan para formar el sistema. Ciertas características estructurales de las plantas cultivadas como la altura, el volumen de raíces y el área foliar determinan la población óptima total y el arreglo espacial y cronológico del sistema. En consecuencia, a la hora de elegir los cultivos es conveniente tener en cuenta las interacciones negativas (competencia o alelopatía), para optimizar los recursos invertidos en la producción de las especies vegetales.

- **Interacciones entre los componentes específicos.**

**Alelopatía.** Es la influencia directa de un compuesto químico liberado por las plantas de una especie que inhibe o altera el crecimiento normal de plantas de otras especies.

**Competencia.** Ésta se da en detrimento de una de las especies. No es deseable en un arreglo interespecífico y debe controlarse con el manejo independiente de los cultivos, utilizando distintos arreglos espaciales y cronológicos.

### 1.2.2 Arreglos espaciales

Son el resultado de la distribución de las poblaciones de los componentes específicos en el terreno. El arreglo espacial define los diferentes tipos de sistemas de producción, puesto que las poblaciones pueden distribuirse en arreglos indefinidos o definidos como surcos, franjas o bordes, y las combinaciones de éstos. El arreglo espacial es determinante a la hora de diseñar un sistema de producción, porque debe hacerse de tal manera que las interacciones interespecíficas afecten lo menos posible los productos del sistema.

### 1.2.3 Arreglos cronológicos

Se refiere a las fechas relativas de siembra de los componentes específicos, lo cual ofrece la posibilidad de realizar una siembra simultánea, adelantada o subsecuente con referencia a uno de los cultivos. El propósito de este tipo de arreglos como el de los espaciales, es reducir las interacciones tanto intraespecíficas como interespecíficas, con el fin de maximizar la producción del sistema. Los diferentes tipos de arreglos cronológicos que pueden ocurrir entre dos o más cultivos dependen del momento de la siembra y del grado de traslape entre los ciclos de los cultivos; por tanto, es posible producir diferentes niveles de interacción entre los cultivos en el tiempo, como por ejemplo: la siembra simultánea, la siembra con retraso, la siembra en relevo y la rotación de cultivos.

## 1.3 Sistemas complejos

Un sistema complejo se compone de partes interconectadas cuyos vínculos crean información para el observador. Como resultado de las interacciones, surgen propiedades que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. En un sistema complejo existen variables cuyo desconocimiento impide analizar el sistema con precisión. Un sistema complejo posee más información que las partes individuales. Para describir un sistema complejo hace falta no sólo conocer el funcionamiento de las partes sino conocer el funcionamiento del sistema con el interrelacionamiento de sus partes.

En un sistema complejo no pueden separarse sus partes y existen fuertes interacciones entre las mismas. En un sistema complejo es tan grande la retroalimentación que es difícil distinguir entre causa y efecto; cuando un componente sufre un impacto directo, el resto de los componentes se ven afectados. En estos sistemas una perturbación pequeña puede ocasionar cambios desproporcionadamente grandes, no obstante, los sistemas tienen gran capacidad para mantener sus funciones frente a impactos exteriores (García, 2006).

### 1.3.1 Características de los sistemas complejos

Los sistemas complejos (Vidal, 2007), se caracterizan por:

- **Cambio.** Son dinámicos, es decir, ningún sistema permanece estático durante largo tiempo. Lo que el sistema es ahora, es la consecuencia de lo que fue o pasó en el pasado, y a su vez, lo que será en el futuro.
- **Medio.** Cada sistema tiene su medio y es a su vez un subsistema de otro. El medio puede influir en el sistema si éste tiene modificaciones.

- **Comportamiento intuitivo opuesto.** Los efectos pueden aparecer con posterioridad a las causas, debido a intervenciones sin un adecuado conocimiento; las soluciones a menudo intensifican los problemas.
- **Tendencia al bajo rendimiento.** Los sistemas complejos tienden con el tiempo a un estado de bajo rendimiento.
- **Interdependencia.** Nada ocurre en forma aislada. Cada evento se ve influenciado por los anteriores y afecta a los posteriores.
- **Organización.** Todos los sistemas complejos tienen componentes altamente organizados; además, los subsistemas y componentes interactúan para llevar a cabo la función del sistema.
- **Función.** En un sistema la función se define en términos de procesos, dicha función se relaciona con los procesos de recibir entradas y producir salidas; los procesos como tal se caracterizan por medio de diferentes criterios, siendo los más ampliamente utilizados: Productividad, eficiencia y variabilidad (UNCCD, 2009).

**Productividad.** Indica la cantidad de salidas que el sistema tiene; éstas permiten medir los productos generados en períodos de tiempo determinados; la producción neta del sistema muestra cuál es el excedente de salidas respecto a las entradas.

**Eficiencia del sistema.** Permite medir su capacidad para producir el máximo de resultados con el mínimo de recursos, de energía y tiempo posible.

**Variabilidad.** Es un concepto que tiene en cuenta la probabilidad en la cantidad de salidas. Así, es posible vincular las prácticas agroforestales como sistemas, los cuales son comúnmente denominados “sistemas agroforestales”. Un sistema agroforestal es un ejemplo específico de una práctica local caracterizada por el ambiente que la delimita, las especies de plantas y sus arreglos (que hacen un papel de componentes e interactúan), aunado a ellos los insumos y productos que utiliza y genera (UNCCD, 2009). Como ejemplos de sistemas complejos se encuentran: La Tierra, el clima, los ecosistemas y los agrosistemas. Debido al gran número de componentes y la dinámica interacción entre éstos, los sistemas agroforestales con café se pueden catalogar como sistemas complejos (Figura 2).

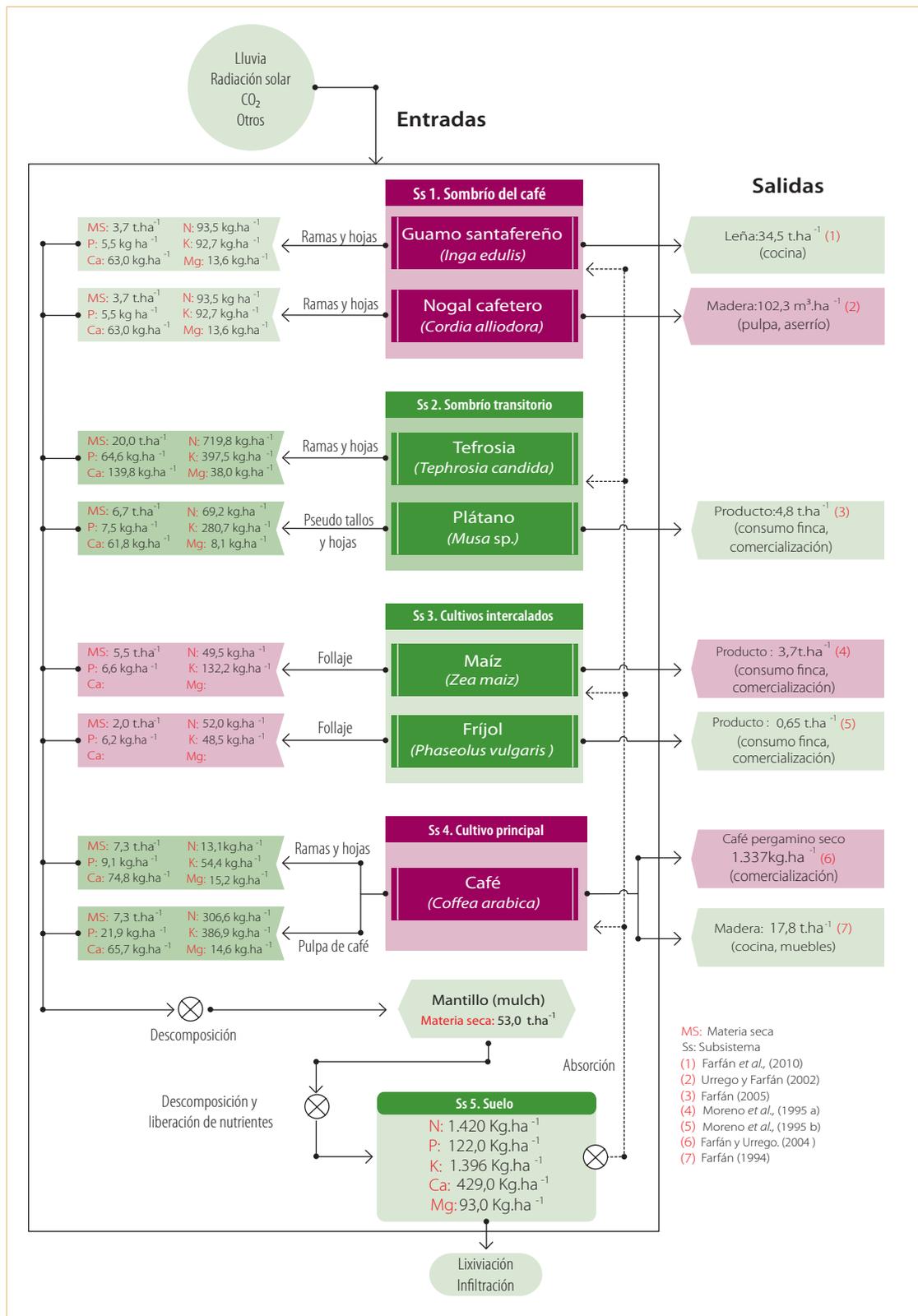


Figura 2.

Diagrama de flujo del sistema agroforestal con café, como sistema complejo.

## 1.4 Origen de la agroforestería

En los ecosistemas previos a la aparición de la agricultura los seres humanos no intervenían de manera decisiva para modificar los equilibrios autorregulados naturales, sino que se limitaban a aprovechar sus frutos. Las plantas y los animales estaban adaptados a las condiciones climáticas, a la temperatura, la humedad, las variaciones estacionales y los suelos. Los ciclos biológicos establecidos durante largos períodos de coevolución de las especies presentes en el medio aseguraban la continuidad autoreproducida de los procesos biológicos y la circulación de los nutrientes al interior del sistema, sin más aporte externo que la energía del sol. Los seres humanos formaban parte del ecosistema natural, vivían en él y de él, y le restituían los nutrientes a través de sus deyecciones.

“Agroforestería” fue el término acuñado por primera vez en 1977, para describir la integración de los árboles y la agricultura. Aunque el término y su definición son recientes, los sistemas de uso de la tierra con interacción de árboles y cultivos se han practicado durante miles de años, y tradicionalmente han sido elementos importantes del paisaje agrícola en las regiones tropicales y templadas de todo el mundo. Las primeras etapas de la historia de la agricultura fueron dominadas por la agricultura migratoria, con alternancia de períodos de agricultura y silvicultura. Posteriormente, se desarrollaron sistemas más estables con la participación del pastoreo y bosques silvopastoriles, cuyo propósito fue la transferencia de nutrientes al sistema a través del estiércol.

En Europa, el forraje de árboles de especies como fresnos, olmos y álamos, fue recogido y almacenado para alimentar al ganado, manteniendo así una estrecha conexión entre la agricultura, la ganadería y la silvicultura. En Alemania hasta el año 1500, el 75% del nitrógeno y el 90% del fósforo necesarios para los cultivos herbáceos, procedía de los bosques a través de los residuos de forraje, estiércol, residuos sólidos y cenizas de los incendios domésticos (Smith, 2010). En Europa, hasta la Edad Media, el establecimiento de árboles y cultivos agrícolas en combinación íntima, unas con otras, fue una práctica rutinaria, que se generalizó entre los agricultores en el mundo entero. Como complemento a la práctica era común tumar y quemar el bosque degradado, para establecer cultivos de plantas comestibles, por períodos diversos, en las áreas despejadas, luego se plantaban árboles simultáneamente con las siembras de los cultivos agrícolas. Este sistema de cultivo fue muy popular en Europa, pero fue practicado extensamente en Finlandia hasta finales del siglo pasado; también fue practicado en algunas áreas de Alemania hasta finales de 1920 (King, 1987).

En América tropical muchas sociedades han simulado las condiciones del bosque para obtener los efectos beneficiosos del ecosistema. Por ejemplo, en América Central ha sido una práctica tradicional que los agricultores planten un promedio de 24 especies de plantas en un área no superior a 1.000 m<sup>2</sup>, en la cual siembran coco y papaya, en un estrato más bajo establecen

plátanos o cítricos, y en un estrato inferior café o cacao, posteriormente, establecen cultivos diversos anuales como maíz y frijol, y finalmente, cultivos como calabaza; es una mezcla íntima de varias especies de plantas con diversas estructuras, la cuales imitan la configuración adoptada por los bosques tropicales (Nair, 1993).

Sólo han pasado unos pocos milenios desde que los primeros pobladores llegaron como cazadores y pescadores a la Amazonía. Al principio, recogían plantas comestibles silvestres y luego adaptaron prácticas agrícolas, plantando sólo lo necesario para satisfacer las necesidades del hogar. Mientras fueron pocos no influyeron significativamente en la estructura y dinámica de los bosques. Luego, los colonizadores europeos descubrieron que los cultivos eran prácticos solamente durante 2 años consecutivos, y si se volvía a plantar después de 10 años de barbecho<sup>1</sup>, sólo era posible una cosecha más. Los suelos de tierra firme carecían de los coloides necesarios para fijar minerales, por lo que no se beneficiaban con minerales agregados, y sólo donde las inundaciones anuales reabastecían de minerales los suelos, era posible continuar cultivando (Wadsworth, 1997).

Son innumerables los ejemplos sobre prácticas tradicionales que implican la producción combinada de productos agrícolas con árboles en el mismo terreno; estas prácticas o sistemas de cultivo son lo que ahora se conoce como agrosilvicultura.

**La agricultura en América.** Se cree que empezó hace 10.000 a 12.000 años. Apareció simultáneamente y en forma independiente en varios lugares del mundo. Se atribuye a las mujeres el desarrollo de la agricultura, pues ellas como recolectoras de vegetales, empezaron a seleccionar aquellas especies que eran útiles. Por ser grupos nómadas, llevaban consigo semillas y partes vegetativas, para sembrarlas en sus nuevos asentamientos. Así empezaron los primeros procesos de domesticación. Luego, una vez que se hicieron sedentarias empezaron a mejorar estas plantas y a crear nuevas variedades. Este sistema producía impactos en el medio ambiente porque se debía destruir lo que había y construir el sistema artificial utilizando el suelo (Acción Ecológica, 2007).

**La agricultura Maya.** La nación Maya se desarrolló en las zonas altas de Guatemala y se extendió al bosque húmedo tropical. Algunas características de este sistema eran: Manejar todos los pisos altitudinales, agricultura itinerante (nómada), tenían un sistema de ordenación del bosque (agrosilvicultura), rotación de cultivos, descanso del suelo y tala selectiva de árboles útiles, basándose en el conocimiento de la fenología de las especies.

**La agricultura Inca.** Aunque no se le puede atribuir a los Incas, la región andina es uno de los centros de origen de la agricultura. Diversas sociedades andinas crearon los sistemas

---

<sup>1</sup> Barbecho: Superficie o terreno que ha dejado de cultivarse por más de 3 años (sinónimo de "rastrajo").

productivos andinos y domesticaron los llamados cultivos andinos. La agricultura Inca se basó en el conocimiento de los ecosistemas de altura, lo que les permitió: Manejar distintas ecorregiones, cultivar en distintos pisos térmicos y cultivar en diversas subregiones de acuerdo a la humedad. La tecnología agrícola tuvo las siguientes características: Un desarrollado sistema de riego mediante un complicado sistema de terrazas y acequias, domesticación y mejoramiento de especies vegetales andinas, rotación de cultivos y barbecho, uso de cultivos asociados para protección fitosanitaria, uso de fertilizantes orgánicos y uso de herramientas adecuadas para la conservación de suelos. Aunque el sistema productivo Inca producía cambios profundos en el medio ambiente, conservaba la diversidad biológica y la complejidad ecológica, pues los paisajes agroecológicos trataban de imitar el orden natural.

**Los sistemas amazónicos.** La agricultura se basó en “la roza y quema”. Algunas características comunes de los habitantes indígenas de la cuenca amazónica es la roza, que consiste en un sistema sucesivo de tala y quema. La tala es pensada en dotar al suelo de la mayor cantidad de nutrientes. Es sabido que el ciclo de nutrientes en los bosques húmedos tropicales es muy rápido por la actividad de los microorganismos del suelo, por tanto, en poco tiempo de iniciado un cultivo comienza a disminuir su producción.

Por ello, se talan primero plantas pequeñas y el sotobosque, los cuales facilitan una rápida reincorporación de nutrientes al suelo. Luego, se cortan los árboles grandes, cuyos troncos fertilizan el suelo a largo plazo. Se trata de minimizar el tiempo que el suelo está expuesto directamente a los rayos solares y a la precipitación, porque esto afectará a la población microbiana. El área talada es siempre reducida; para ampliar la zona productiva, la tala se traslada otro lugar, dejando porciones de selva entre cultivos, para asegurar la permanencia de animales silvestres y estimular la regeneración natural del bosque. Una vez que el suelo ha perdido sus nutrientes, se quema la zona cultivada y se la deja descansar por un número variable de años, hasta que el suelo recupere su fertilidad y el bosque se regenere (barbecho). Los cultivos son movidos entonces a otra porción del bosque.

**La chacra.** En algunas comunidades amazónicas de Perú, Ecuador y Colombia, se desarrolló el sistema de chacras. En la chacra se practicaba también la tala y quema del bosque. A diferencia de otros pueblos indígenas amazónicos, en las chacras se talaban todos los árboles del área desmontada. El campo estaba rodeado por bosque no perturbado, luego había un área que no se quemaba o rozaba pero que era perturbada por la caída de los árboles. Al interior había un área en barbecho sin quemar y, finalmente, otra con ramas de árboles y troncos medio carbonizados. La regeneración del bosque empezaba desde la orilla hacia el interior, a través de la chacra. El cultivo de yuca y otros productos de menor importancia eran reemplazados por vegetación leñosa y árboles frutales, y después de 15 a 20 años se reiniciaba el ciclo. Además de la chacra, poseían un huerto frutal que generalmente estaba ubicado cerca de su casa y cuyo excedente

podía ser comercializado. Este huerto también se quemaba después de cierto tiempo. Tanto la chacra como el huerto estaban al cuidado de las mujeres (Acción Ecológica, 2007).

**Sistema Taungya<sup>2</sup>.** Los árboles son una parte integrante de los sistemas de cultivo y fueron conservados deliberadamente en las tierras, cuyo objetivo era la producción de alimentos. A finales del siglo XIX, establecer cultivos agrícolas en el bosque se convirtió en un objetivo importante para la práctica de la agroforestería, hacia 1806 el imperio Británico practicó el ya conocido sistema *Taungya*, estableciendo cultivos en plantaciones de teca (*Tectona grandis*), convirtiéndose en la manera más eficiente de cultivar la teca; esta práctica llegó a ser cada vez más extensa, fue introducida a Sudáfrica en 1887 y llevada a la India en 1890. La filosofía del sistema *Taungya* era establecer plantaciones en bosques para trabajadores que no poseían tierras, a cambio de realizar todas las prácticas silvícolas (Nair, 1985, 1993).

Muchos factores y cambios se generaron a partir de los años 70 del siglo XX, los cuales contribuyeron a una aceptación general de los sistemas agroforestales como sistema de administración de la tierra, los principales factores fueron: Un examen de las políticas silviculturales; un interés científico por los nuevos sistemas de cultivo de la tierra; el deterioro de la situación alimentaria; la extensión cada vez mayor de tala de los bosques; la degradación ecológica; la crisis energética; y el aumento de los precios de los fertilizantes, entre otros (Nair, 1993).

## 1.5 Definiciones y conceptos de agroforestería

### 1.5.1 Sistema agroforestal general

La agrosilvicultura es un crecimiento deliberado de árboles perennes en la misma unidad de tierra simultáneamente con cultivos agrícolas, pastos y/o animales, de una forma espacial o secuencial, en la cual debe haber una interacción significativa (positiva o negativa) entre los componentes arbolados y no maderables del sistema, pero siempre con un interés ecológico o económico. Son una serie de sistemas y tecnologías del uso del suelo, en la que se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o pastos en función del tiempo y espacio, para incrementar y optimizar la producción de forma sostenida (Combe y Budowski, 1979; ICRAF, 1983; Raintree y Young, 1983; Fassbender, 1993; Nair, 1993).

La agroforestería es el uso de los árboles en las granjas y parcelas agrícolas; es un sistema de manejo de los recursos naturales dinámica y ecológicamente basado en que, a través de la integración de los árboles en las granjas y en el paisaje agrícola, se diversifique y sostenga la producción con el fin de incrementar los beneficios sociales, económicos y ambientales para los usuarios del terreno a todos los niveles. Las interacciones ecológicas son la característica más

<sup>2</sup> Siembra de cultivos anuales en combinación con plantaciones comerciales de árboles maderables, con fines de optimización y rendimiento del espacio.

distintiva, que distinguen la agrosilvicultura de la silvicultura social (silvicultura realizada por las comunidades o los individuos) (Young, 1991; Beniést *et al.*, 2000).

La agroforestería según Torquebiau (1993), es un sistema de gestión de las tierras que optimiza su productividad mediante las interacciones positivas entre sus componentes en el tiempo y el espacio. Aprovecha la relación complementaria entre los árboles, los cultivos y el ganado, de tal forma que la productividad, la estabilidad y la sostenibilidad del sistema en conjunto sean superiores en comparación con la mayoría de los casos individuales, y que su adecuada explotación sea una notable oportunidad para mejorar sitios degradados y estabilizar los ecosistemas frágiles, constituyéndose también en un sistema agrícola ideal para la recuperación de la agricultura sostenible en zonas de bajo potencial productivo.

Si bien son varias las definiciones de agroforestería o de sistemas agroforestales, todas tienen características similares y orientan hacia un manejo integrado de los recursos productivos que existen en una unidad de terreno, así aunque las definiciones de agroforestería no son perfectas en todos los aspectos, tienen una amplia aceptabilidad. La agrosilvicultura no es más que un nuevo término y se acepta ampliamente como la utilización del suelo que implica una mezcla deliberada de árboles con cultivos y/o animales. La agrosilvicultura es practicada para cumplir una gran gama de objetivos y representa una interfaz entre la agricultura y la silvicultura, abarcando prácticas en la ocupación del terreno. Prácticas tendientes a satisfacer las necesidades de la población, necesidades que no ha podido satisfacer con la agricultura o silvicultura convencional.

Estas definiciones expresan la búsqueda de una definición aún no alcanzada sobre el manejo de los recursos naturales en forma sostenible. El desarrollo agrícola sostenible se refiere a la compatibilidad que se establece entre el mantenimiento o aumento en la producción, con la utilización y conservación a largo plazo del recurso, donde la población humana y el potencial productivo son factores limitantes.

## **1.6 Definiciones de “café bajo sombra”**

Es diversa la terminología empleada para definir un sistema de producción de café bajo árboles de sombra; en términos generales, el centro es la dicotomía sol-sombra, pero estos sistemas de producción forman un gradiente o escala de aumento o disminución de la sombra en el cultivo del café, en cuyos extremos se ubican el cultivo a pleno sol y los bosques manejados o intervenidos (SMBC, 1999); por ejemplo Giovannucci (2001) lo define como “aquel que se cultiva bajo la bóveda forestal, en entornos de selva, y en beneficio para la biodiversidad y las aves”.

### **1.6.1 Café bajo sombra en Perú**

Para el país peruano, Greenberg y Rice (1999) indican que el café cultivado bajo sombra se planta, crece y se cultiva a la sombra de una cubierta de follaje forestal, a diferencia del café que se cultiva

a pleno sol, o el completamente tecnificado, los que tienen muy pocos árboles o carecen de ellos completamente. De acuerdo con Benito (2010), las condiciones de selva peruana permiten plantear la implementación racional del cultivo del café bajo las siguientes alternativas:

**Cultivo en bosque virgen, aclarado por entresaque selectivo.** Los pasos a seguir son “prospección y rozo”, desmonte parcial del bosque, tala y limpieza del terreno, trazado y apertura de hoyos, encalado y abonamiento de los hoyos y siembra del plantón de café.

**Cultivo en bosque de segundo crecimiento o “purma”<sup>3</sup> aclarado por entresaque selectivo.** En este caso se puede adoptar casi el mismo procedimiento que el caso anterior, es decir, manejarla con criterio técnico para lograr un 50% de luminosidad.

**Cultivo bajo arborización reconstruida.** Para llegar a condiciones próximas a los ideales y como resultado de un complejo racionalmente tecnificado se siguen las siguientes etapas: Prospección del terreno y “rozo”, desmonte total del bosque y limpieza del terreno, trazado, apertura de hoyos, encalado y abonamiento para la arborización, y siembra del café.

### 1.6.2 *Café bajo sombra en Costa Rica*

Fournier (1980) describe tres ecosistemas de producción de café, los cuales se pueden observar en países productores de América Central, así:

**Bosque de origen del café.** Caficultura caracterizada por una demanda muy baja o ninguna de insumos secundarios (maquinaria, energía, fertilizantes) y la producción está determinada por el ingreso de suministros primarios (radiación, temperatura, precipitación).

**Cafetal con exceso de sombra.** Descripción igual a la anterior.

**Cafetal de alta densidad de siembra con sombra regulada.** Ecosistemas productores en los que se emplea alto grado de tecnología y los suministros primarios son altamente reducidos.

Para el mismo país, González (2002) identifica dos tipos de sistemas cafetaleros bien definidos:

**Cafetales con sombra tradicional o mezclada.** Plantas de café en combinación con varias especies de árboles frutales y algunos maderables. El sistema con sombra tradicional es muy diferente a los dos siguientes, ya que presenta al menos tres estratos arbóreos bien definidos: (1) plantas de café y algunas herbáceas de menos de 2,0 m, (2) arbustos >10,0 m y (3) árboles >15,0 m asociados a una variedad alta de especies arbóreas (cerca de 62 especies). Debido a esta

<sup>3</sup> *Purma: Es el nombre que recibe en el Perú la chacra abandonada; también bosque secundario.*

variedad de árboles, muchos animales como las aves obtienen su alimento del dosel arbóreo, por la gran disponibilidad de recursos durante la mayor parte del año, incluyendo insectos que son atraídos por árboles tan importantes como *Inga* spp.

**Plantas de café en combinación con una o dos especies de árboles.** Generalmente *Erythrina* spp. e *Inga* spp.

### 1.6.3 Café bajo sombra en México

De acuerdo con Moguel y Toledo (1999) pueden distinguirse cinco tipos básicos de sistemas de producción cafeteros, que varían de acuerdo a la cantidad de sombrío y el tipo de dosel.

**Cultivo rústico.** El café es cultivado en el bosque existente con poca alteración de la vegetación nativa. Las especies arbóreas son diversas, con un promedio de 25 especies por unidad de área. La sombra normalmente se establece en tres o más estratos (capas de vegetación). El porcentaje de sombra es del 70% al 100%.

**Policultivo tradicional.** El café se cultiva bajo una combinación de árboles de bosque nativos y árboles plantados; éstos también incluyen gran diversidad de otras especies de plantas, incluidas frutales, hortalizas, otras leguminosas, tanto para el consumo del caficultor como para su venta en el mercado, leña, plantas medicinales, alimentación animal, etc. Las especies de árboles comunes empleadas como sombrío del café incluyen *Inga*, *Grevillea*, *Acacia*, *Erythrina* y *Gliricidia*. El porcentaje de sombra es del 60% al 90%.

**Policultivo comercial.** En estos sistemas se hace eliminación de un mayor número de árboles con el fin de aumentar el número de plantas de café por hectárea; los árboles son plantados y explotados con fines comerciales. Los árboles establecidos como sombrío son podados con regularidad para permitir el ingreso de luz, y las epífitas son eliminadas. En estos sistemas son comunes las aplicaciones de fertilizantes y pesticidas, debido a la falta de cubierta vegetal que ayuda a prevenir la pérdida de nutrientes del suelo, proliferación de plagas y enfermedades, entre otros. Normalmente, el componente arbóreo sólo forma dos estratos, el dosel de los árboles y el café.

**Monocultivo bajo sombra.** Son densas plantaciones de café bajo una o máximo dos especies de árboles (por lo general *Inga*); los árboles son fuertemente podados para permitir el ingreso de luz al cultivo. Las epífitas son generalmente removidas. El porcentaje de sombra es del 10% al 30%.

**Cultivo a plena exposición solar.** En este sistema no hay una cobertura de árboles o éstos se encuentran muy aislados. El porcentaje de sombra es del 0%.

### 1.6.4 *Café bajo sombra en Colombia*

En Colombia, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC (1958) indica que en las plantaciones de café bajo sombrío intervenían factores como: Competencia entre cafetos y sombrío, mayor o menor cantidad de hojas que sirven como fertilizante, efectos benéficos entre las plantas de la comunidad y mayor o menor cantidad de arvenses competidoras, por tanto, no era posible fijar exactamente la cantidad de sol y de sombra que debía recibir un cafetal para su producción óptima. El Manual de Uso de Fotografías Aéreas, para su aplicación al Sistema de Información Cafetera –SIC@- (FNC, 1993), contiene la información necesaria para efectuar la parte operativa para el alinderamiento de los lotes cafeteros mediante aerofotografía, y sugiere como conceptos básicos a ser aplicados, entre otros, los siguientes:

**Lote cafetero a plena exposición solar.** Es aquel en el cual el efecto de la regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea permanente, inferior a 20 árboles por hectárea y/o inferior de 300 especies arbustivas semipermanentes.

**Lote cafetero con semisombra.** Es aquel en el cual el efecto de la regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea superior a 20 e inferior a 50 árboles por hectárea y/o cualquier especie arbustiva semipermanente, con más de 300 y menos de 750 sitios por hectárea.

**Lote cafetero con sombra.** Cuando el efecto de la regulación de la luz incidente se debe a la presencia de cualquier especie arbórea permanente con densidad superior a 50 árboles por hectárea, igual a una distancia de siembra aproximada de 14,0 m x 14,0 m y/o cualquier especie arbustiva semipermanente con mas de 750 sitios por hectárea, es decir, distancias de siembra de 3,7 m x 3,7 m.

La exposición del café a la luz, según el número de árboles de sombrío y de arbustos semiperennes por hectárea, por ejemplo plátano, se resume así:

Exposición a la luz (según el número de árboles o semiperennes por hectárea)		
<20 árboles o <300 especies arbustivas	>20 y <50 árboles o >300 y <750 especies arbustivas	>50 árboles o >750 especies arbustivas
Café plena exposición solar	Café con semisombra	Café con sombra

### 1.6.5 *Sistema Agroforestal Cafetero Colombiano (SAFC)*

Un sistema agroforestal cafetero es un conjunto de prácticas de manejo del cultivo, donde se combinan especies arbóreas en asocio con el café o en arborización de las fincas, cuyo objetivo es

el manejo y la conservación del suelo y el agua, y el aumento y mantenimiento de la producción para garantizar la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo social y económico de las familias cafeteras (definición del autor).

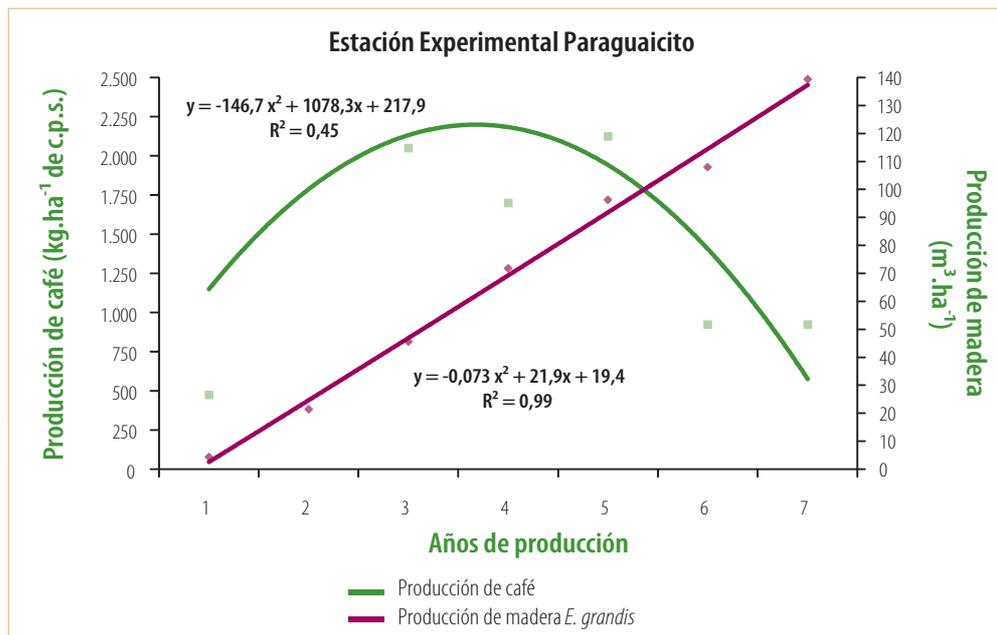
De acuerdo con Farfán y Jaramillo (2009), los porcentajes de sombrero para el café según el número de horas de brillo solar al año, se resume así:

Porcentaje de sombrero (según el número de horas de brillo solar al año)			
0%	Menor de 25%	Entre 25% y 45%	Mayor de 45%
Libre exposición solar	Sombrero ralo o heterogéneo	Sombrero óptimo o adecuado	Sombrero denso u homogéneo

## 1.7 Características de los sistemas agroforestales-SAF

La presencia de árboles provee a los sistemas agroforestales algunas características que favorecen la productividad y la sostenibilidad; las principales características son:

- Incremento de la producción.** Los sistemas agroforestales tienden a mantener o aumentar la producción y la productividad (del suelo o sitio) mediante los productos obtenidos del cultivo y de los árboles, mejoramiento de la producción de los cultivos asociados, reducción en la aplicación de insumos, mano de obra eficiente y eficaz. En la Figura 3 se hace una representación de la producción simultánea de café y eucalipto en un SAF.



**Figura 3.** Producción simultánea de café y madera de eucalipto en un sistema agroforestal (Farfán y Urrego, 2004).

- **Aceptación.** El hecho que la agroforestería sea relativamente una nueva palabra para un viejo sistema de prácticas, en muchos casos, es aceptado por la comunidad agrícola; no obstante, implica el mejoramiento de las tecnologías agrosilvícolas y que la introducción de nuevas áreas a la agroforestería debe ajustarse a las prácticas agrícolas locales (Nair, 1985, 1993).
- **Continuidad.** La agroforestería puede alcanzar y mantener indefinidamente los objetivos de la conservación y de la fertilidad del suelo, conservando el potencial de producción como base del recurso, en función de los efectos benéficos de los árboles sobre el suelo.
- **Resiliencia.** Se define como la capacidad de un ecosistema para volver a su estado original después de una perturbación, manteniendo su característica esencial, composición florística, estructura, funciones de sus componentes y los diferentes procesos que en él se desarrollan. Puede definirse también como la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y retener sus funciones, la estructura básica y su identidad (Thompson *et al.*, 2009). El uso del suelo puede recuperarse de una condición de degradación a una de restauración o resiliencia ( $A = \text{Área de la figura}$ ) (Figura 4).

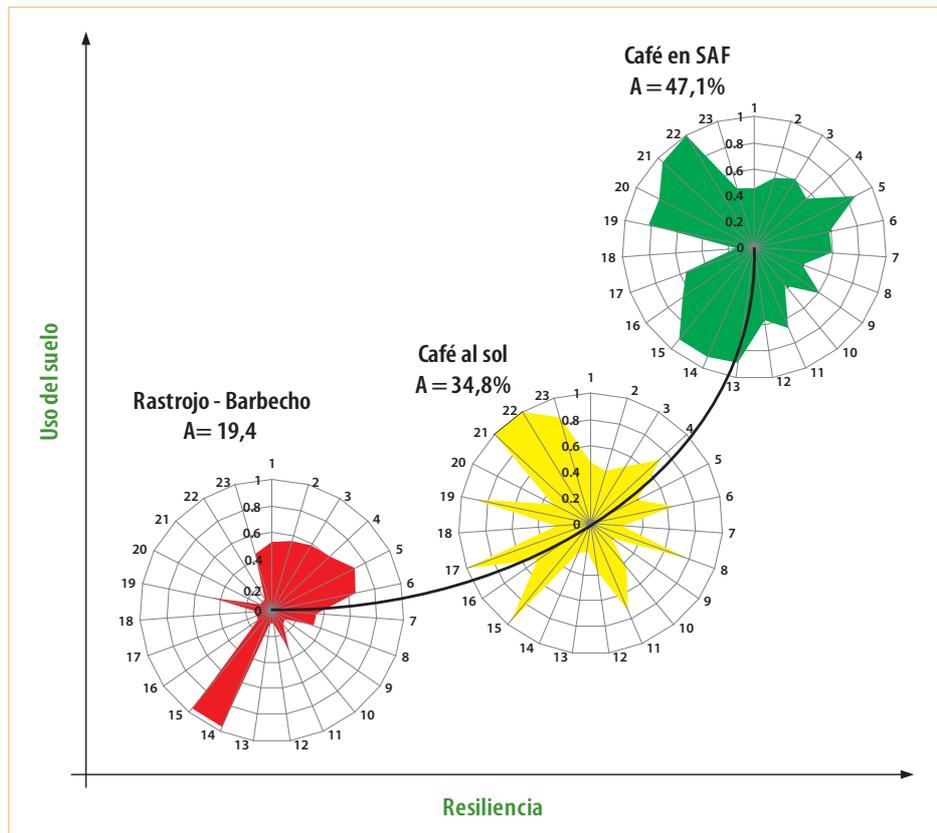


Figura 4.

Restauración o resiliencia de un suelo degradado (Farfán, 2010).

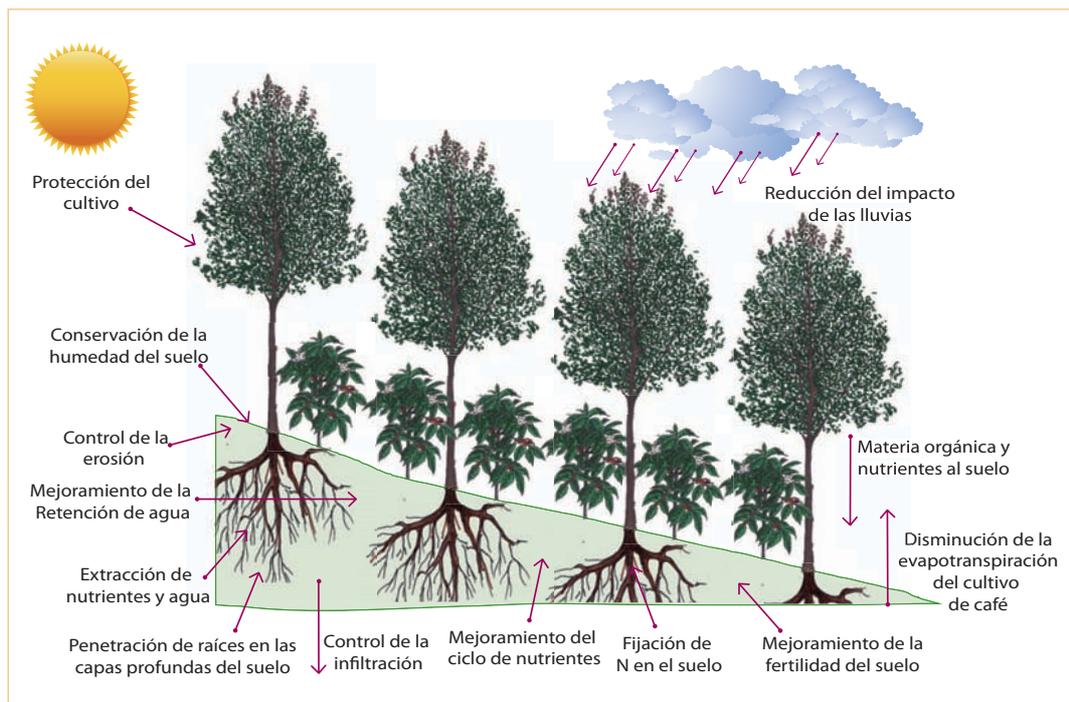
## 1.8 Interacciones ecológicas en agroforestería

La agroforestería es parte fundamental del proceso integral de la conservación y mejoramiento del suelo. Es una estrategia que tiene como objetivo reforzar y establecer la sostenibilidad en las parcelas de los agricultores, mediante la promoción de la diversificación productiva y capacitación en el manejo de sistemas multiestratos.

La agroforestería es una interdisciplina, también una tradición e innovación productiva y de conservación de la naturaleza, desarrollada fundamentalmente por culturas agroforestales en tierras tropicales donde existen formas de manejo y aprovechamiento de sistemas agroforestales en fincas y territorios comunitarios para obtener: (i) Una producción biodiversa; (ii) Una producción libre de agroquímicos; (iii) Una producción duradera con predominio y desarrollo de saberes tradicionales y novedosos; (iv) Una producción con fortalecimiento de la identidad cultural; (v) Diversificación del paisaje; (vi) Interacciones ecológicas totales de complementariedad del sistema.

Estudios realizados por diversos autores indican que el potencial de las interacciones ecológicas en un sistema agroforestal son numerosas, siendo cada una de éstas específicas para diferentes tecnologías agroforestales. El tipo de interacción resultante en las relaciones entre componentes puede manifestarse de manera positiva cuando exista complementariedad entre ellos, negativa al existir competencia y neutral en caso que no se afecten o interactúen. En la Figura 5, se presenta un resumen sobre las diferentes interacciones entre componentes aplicables a sistemas agroforestales.

**Figura 5.** Procesos ecológicos que interactúan en un sistema agroforestal cafetero.



### 1.8.1 Interacciones positivas

- **Aspectos climáticos.** Mejoramiento de las condiciones microclimáticas, especialmente por la reducción de los eventos extremos de la temperatura del aire y del suelo. Reducción de la velocidad del viento. Mantenimiento de la humedad relativa (HR) y aumento de la regulación hídrica en el suelo. Como consecuencia, los cafetales arborizados están mejor protegidos contra las heladas y se crea un ambiente más adecuado para el mantenimiento de su intercambio gaseoso.
- **Aspectos edáficos.** Mejoramiento o mantenimiento de la fertilidad debido al aumento en la capacidad de reciclaje de nutrientes y adición de residuos. La estabilidad de la temperatura del suelo converge con menores pérdidas por volatilización del nitrógeno. Además, la capacidad de absorción e infiltración del agua se incrementa, lo cual favorece la reducción de la erosión. Sin embargo, de modo general, la utilización y la respuesta a la aplicación de nutrientes en cafetales sombreados es menor que en aquellos que crecen a pleno sol.

Damatta y Rodríguez (2007) citan entre las principales interacciones positivas en cafetales arborizados, las siguientes:

- **Aspectos bióticos.** Reducción de la incidencia de *Cercospora coffeicola*, del minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) y de arvenses, especialmente gramíneas.
- **Aspectos endógenos.** Atenuación del ciclo bienal de la producción de café, disminuyendo el estímulo a la superproducción que, a su vez, reduce el agotamiento de la planta y el secamiento de las yemas apicales y, en última instancia, hace el cultivo más perdurable. Además, el tamaño de los frutos producidos es mayor, si bien el incremento en la calidad de la bebida es asunto de controversia. Así mismo, hay un alargamiento del período de maduración del fruto que permite mayor flexibilidad en la cosecha.
- **Aspectos económicos.** Ganancias adicionales derivadas de la explotación de la especie usada para la arborización (madera, frutos, látex, entre otros).

### 1.8.2 Interacciones negativas

Las interacciones negativas de la arborización están íntimamente asociadas con el uso de especies inadecuadas, que compiten significativamente con el cafeto, con el sombrío excesivo y las dificultades en las operaciones de la cosecha. Se pueden destacar como principales desventajas (Damatta y Rodríguez, 2007):

- En regiones con períodos de sequía prolongada, con suelos pobres tanto en su estructura como en contenido de nutrientes, o cuando se usan especies cuyo sistema radicular sea demasiado superficial, puede ocurrir competencia severa entre el cafeto y el árbol de sombrío. En regiones con suelos profundos y poca capacidad de retención hídrica para la caficultura, el uso de árboles con sistemas radiculares profundos compite poco con el café.
- Dependiendo de las especies usadas, la poda puede ser frecuente, ya que la densidad se puede tornar excesiva. Esas operaciones son onerosas pero de fácil ejecución; además, las ramas caídas pueden causar daños mecánicos al cafeto.
- Mayor incidencia de la broca (*Hypothenemus hampei*) y de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*).
- Limitaciones para la cosecha mecanizada. Para minimizar ese problema se pueden plantar los árboles para sombrío en las líneas de la plantación de café, cada 8 ó 16 surcos, lo que favorece la cosecha.
- El potencial de producción se ve muchas veces limitado bajo condiciones de arborización y la respuesta a la aplicación de fertilizantes nitrogenados también es limitada. Especialmente en épocas de precios altos, ello puede tener un impacto considerable en la rentabilidad del cultivo para el agricultor.

## 1.9 Modelos agroforestales

Es necesario identificar y establecer modelos agroforestales que reúnan elementos comunes articulados y jerárquicos, de manera que se facilite el conocimiento de las funciones de los sistemas. Algunos de los modelos comunes son (UMCA, 2006):

### 1.9.1 Árboles asociados con cultivos perennes

Son sistemas agroforestales simultáneos (con interacción directa), en los cuales los componentes agrícolas y arbóreos se encuentran en el mismo terreno durante toda la duración del sistema; en contraste con los sistemas agroforestales secuenciales o con interacción cronológica. El objetivo principal de este modelo es la diversificación de la producción, aunque también pueden lograrse aumentos en la productividad a través de algunas interacciones con el componente arbóreo (OTS, 1986). A esta categoría también pertenecen todas las combinaciones de árboles y cultivos perennes donde el componente arbóreo crea un piso superior y cubre los cultivos. La cubierta del árbol puede ser muy abierta o casi cerrada, como los árboles de sombra de diversos cultivos. Los sistemas agroforestales con café, comunes en las zonas cafeteras colombianas, pueden clasificarse en esta categoría (SAF simultáneos); entre los casos más conocidos se encuentra el café cultivado bajo sombra de *Erythrina* sp., *Inga* sp. y *Cordia alliodora*, entre otros.

### 1.9.2 Árboles en asociación con cultivos anuales (Cultivos en callejones)

Consiste en la asociación de hileras de plantas entre los surcos de los árboles. En estas asociaciones, las interacciones de los cultivos anuales con el componente arbóreo son similares a las del caso anterior. Estos sistemas se establecen para especies anuales tolerantes a la sombra. Aunque se pierde algún espacio por la siembra de árboles, se espera que este sistema se equilibre con un aumento en el rendimiento del cultivo por unidad de área (Van Noordwijk, 2000), obtenido por el efecto de la fertilización del material orgánico proveniente de los árboles.

### 1.9.3 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles y los silvoagrícolas tienen las mismas características estructurales: Los árboles cubren el piso inferior constituido por pastos, el piso inferior y algunas veces también el superior está dedicado a la producción animal. La producción de forraje bajo la cubierta arbolada puede dedicarse a los sistemas de corte. En estos sistemas pueden incluirse diferentes tipos de animales silvestres. Estos sistemas son practicados a diferentes niveles, desde las grandes plantaciones arbóreas comerciales con inclusión de ganado, hasta el pastoreo de animales como complemento a la agricultura de subsistencia.

### 1.9.4 Cortinas rompevientos y barreras vivas con árboles

Los objetivos de las barreras vivas con árboles son: Reducir la velocidad del viento en parcelas con fines agropecuarios; reducir el movimiento del suelo y protegerlo de los procesos erosivos; conservar la humedad del suelo, reducir la acción mecánica del viento sobre el cultivo, proteger la fauna silvestre, regular las condiciones del microclima, incrementar la belleza natural de un área y proteger cultivos y animales, incluso donde la agricultura es intensiva. Además, producen madera, abono verde, leña y frutos, entre otros. Las barreras rompevientos están constituidas por una o varias hileras de árboles (Figura 6).

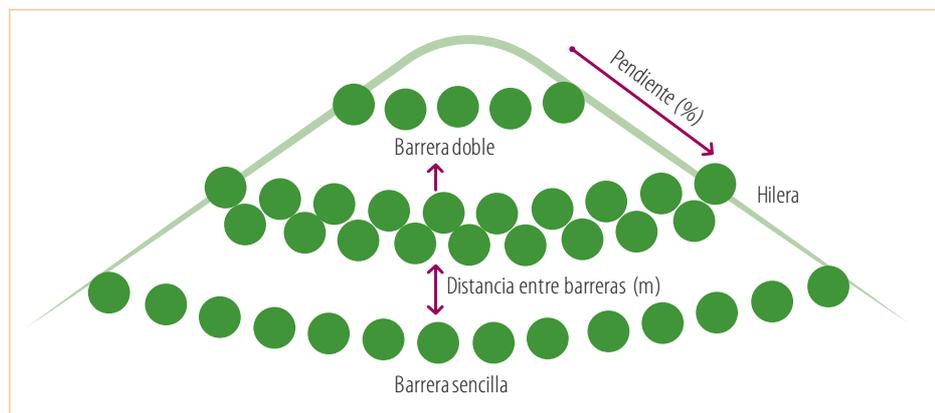


Figura 6.

Barreras vivas con árboles o cortinas rompevientos.

calcular la distancia en metros entre barreras, en función de la pendiente del terreno y la altura del árbol, se debe multiplicar la altura (h) del árbol por el factor correspondiente a cada pendiente, dada en la Tabla 1; en la Tabla 2 se presentan distancias entre barreras (m) en función de la altura del árbol y la pendiente del suelo (%) (Farfán 2012).

**Tabla 1.**

Factores para el cálculo horizontal entre barreras vivas con árboles.

Pendiente del terreno (%)											
h	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,1	2,6	3,4	5,2	10,0	20,0

*h = Altura del árbol*

Por ejemplo, para establecer barreras de nogal cafetero cuya altura es de 20 m, en un lote con pendiente del 40%, entonces: Distancia entre barreras = 20 x 2,6 = 52 m. De la Tabla 1 se obtuvo el factor 2,6 correspondiente a una pendiente del 40%, al multiplicar este factor por la altura del nogal (20 m), indica que se debe establecer barreras sencillas o dobles cada 52,0 m en este lote.

**Tabla 2.**

Distancia entre barreras (m) en función de la altura del árbol y la pendiente del suelo (%).

Altura del árbol (m)	Pendiente del terreno (%)										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
5	7	7	8	8	9	11	13	17	26	50	100
10	13	14	15	16	18	21	26	34	52	100	200
15	20	21	23	24	27	32	39	51	73	150	300
20	26	28	30	32	36	42	52	68	104	200	400
25	33	35	38	40	45	53	65	85	130	250	500
30	39	42	45	48	54	63	78	102	156	300	600
35	46	49	53	56	63	74	91	119	182	350	700
40	52	56	60	64	72	84	104	136	208	400	800
45	59	63	68	72	81	95	117	153	234	450	900
50	65	70	75	80	90	105	130	170	260	500	1.000

### 1.9.5 Plantaciones de árboles en los linderos y cercas vivas

Se usan para delimitar parcelas o fincas y para separar áreas con diferentes cultivos; también son usados para incorporar árboles a los paisajes agrícolas. Los árboles pueden ser explotados con fines comerciales. La cerca viva es una plantación de árboles que sirven de postes para delimitar

una propiedad, un lote, etc. El objetivo básico es la delimitación y protección de los terrenos; de los árboles también pueden obtenerse beneficios como producción de leña, forraje, postes y madera.

### 1.9.6 Agrobosques o fincas forestales

Esta categoría emplea tecnologías agroforestales derivadas o semejantes a los huertos caseros mixtos, y que dan origen a cultivos que se asemejan a los bosques, de aquí el nombre de agrobosque. Frecuentemente, son pequeñas parcelas con una estructura típica de los bosques, debida a la presencia de árboles grandes y multiestratos. A menudo existe gran diversidad de especies en un arreglo no zonal de grandes árboles coexistiendo con otros más pequeños y plantas arvenses que son, generalmente, tolerantes a la sombra. En el agrobosque los árboles y los cultivos se manejan individualmente con distintas prácticas. Otro aspecto importante de los huertos boscosos o agrobosques, es que su estructura, generalmente o algunas veces, cubre áreas muy grandes y por su tamaño y distancia de las fincas están generalmente orientados hacia la explotación como cultivos comerciales mas que hacia cultivos de subsistencia. Otras categorías de modelos agroforestales se presentan en la Figura 7.

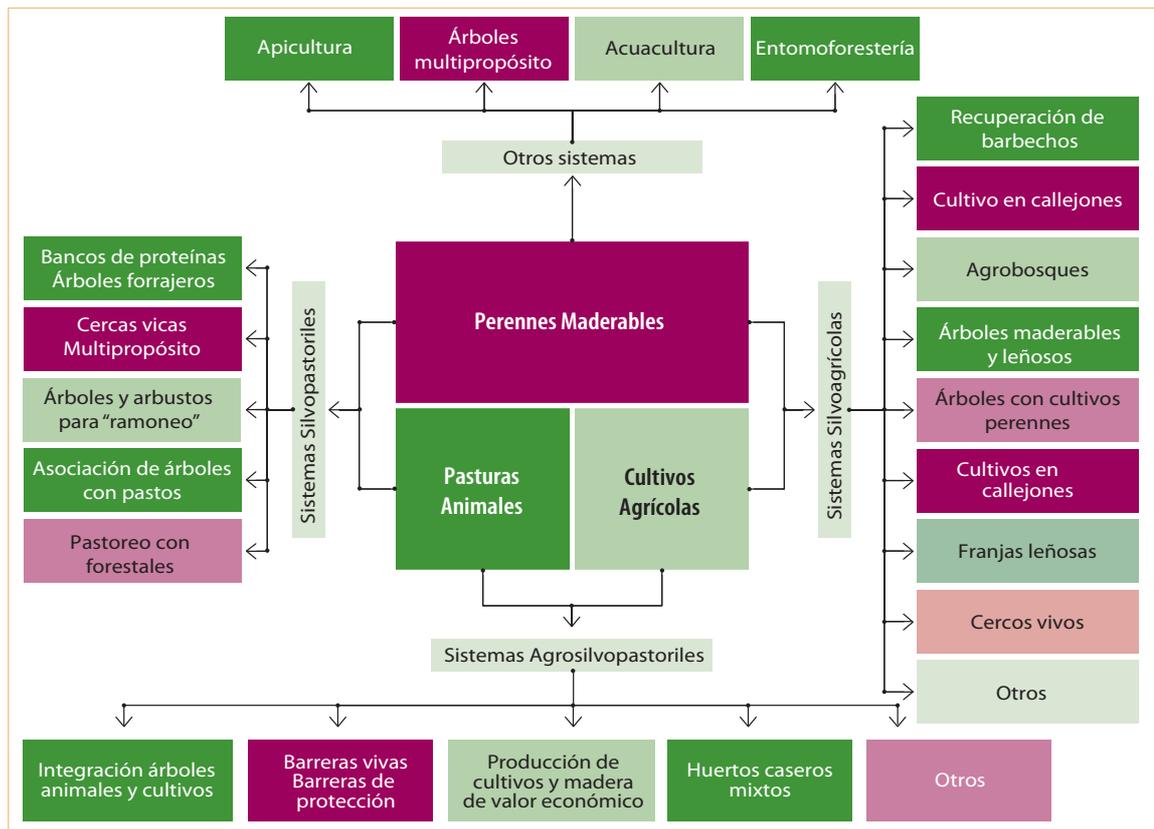


Figura 7.

Modelos de sistemas agroforestales (Fuente: Farfán, 2007).

## 1.10 La Forestería Análoga (FA)

Los bosques tropicales son los ecosistemas más complejos por poseer una biodiversidad de inestimable valor. La diversidad en estas zonas se encuentra bajo una gran amenaza a causa de la pérdida de una superficie relativamente grande de especies y a que continuamente se están invadiendo los bosques para obtener madera, aclarar zonas para crear plantaciones y otros tipos de agricultura. Esto hace que los ecosistemas se simplifiquen y se modifiquen para satisfacer las necesidades alimenticias de los humanos, quedando inevitablemente sujetos a daños por plagas, erosión, extinción de especies animales y vegetales. Varios estudios han demostrado que es posible estabilizar estos daños, diseñando arquitecturas vegetales que incrementan las poblaciones de enemigos naturales, eviten la erosión del suelo y mantengan condiciones adecuadas para el desarrollo de especies vegetales y animales (Torres *et al.*, 2008).

La forestería análoga es una técnica que permite crear un sistema agroforestal en el que se desarrolla una estructura vegetal similar al bosque, donde se recrea un ambiente modificado permitiendo a muchas especies del bosque original extender su rango de dispersión y así brindar estabilidad ecológica (Figura 8). La Forestería Análoga, como principio, busca incrementar la tasa de autoreconstrucción del suelo, considerando que existe una relación simbiótica entre el suelo y la vegetación, es decir que, a medida que se incrementa la diversidad vegetal se incrementa la fertilidad del suelo y por tanto su potencial productivo. Es una exitosa herramienta silvicultural para diseñar y crear ecosistemas estables que sostengan y aumenten los recursos naturales y los servicios ecológicos de un ecosistema. Ecosistemas saludables y productivos se logran promoviendo un aumento de la biomasa, aumento de la diversidad de especies y del suelo activo, rico en materia orgánica (Torres *et al.*, 2008).



**Figura 8.**

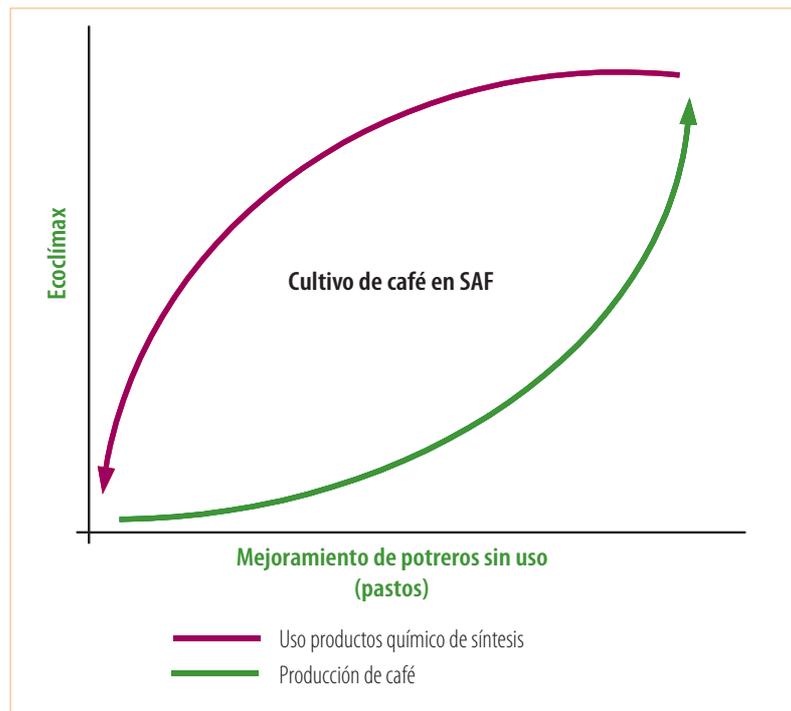
Sistema tradicional de explotación del café- Forestería Análoga (FA).

### 1.10.1 Origen de la Forestería Análoga

La agricultura moderna y las prácticas de forestería han devastado muchos ecosistemas naturales y tradicionales y su diversa flora y fauna, reemplazándolas con monocultivos diseñados para una máxima producción a corto plazo. Los ecosistemas resultantes, altamente simplificados, son inestables e insostenibles, y con frecuencia requieren de considerables insumos externos. En el Centro de Investigación NeoSynthesis en Mirahawatte, Sri Lanka, el biólogo Ranil Senanayake (1987) examinó alternativas a la forestería moderna y desarrolló una estrategia para intensificar la agricultura de una manera ecológicamente sólida, y tras 20 años de investigación ha conducido a un enfoque que intenta trabajar de acuerdo a los diseños de la naturaleza. A este sistema lo denominó Forestería Análoga, demostrando con su trabajo que el cambio a un cultivo con árboles, diseñado de manera ecológica, trae de nuevo la estabilidad económica (Senanayake, 2000).

**Agroclímax.** Es la metodología para determinar el punto máximo donde los componentes económicos y ecológicos alcanzan el equilibrio en sistemas agrícolas; es un paso para la evaluación y diseño de sistemas agrícolas a nivel individual, local y regional. Agroclímax se ha definido como el estado de los sistemas agrícolas en el cual se prescinde de insumos artificiales, el balance energético alcanza los valores máximos de eficiencia y renovabilidad, albergan alta biodiversidad y finalmente presentan buena elasticidad (Figura 9). **Se ha concebido el índice de agroclímax, que evalúa la evolución y clasifica los sistemas agrícolas en sentido del equilibrio ecológico, social y económico (Janssens et al., 2006).**

**Figura 9.** Ecoclímax de un cultivo de café en SAF y prácticas orgánicas, en suelos provenientes de suelos sin uso.



### 1.10.2 Objetivos de la Forestería Análoga

- Producir alimentos sin riesgos para la salud y de alto valor nutritivo.
- Producir madera y fibra de una manera sustentable.
- Facilitar la maduración del ecosistema de producción.
- Mantener y mejorar la fertilidad del suelo.
- Proporcionar hábitat para las especies nativas.
- Restaurar ecosistemas degradados.
- Crear oportunidades de agregar valor a los productos agrícolas.
- Asegurar un ingreso digno para los productores.
- Incrementar el acervo de carbón captado.
- Contribuir a generar agua limpia y fortalecer el ciclo hidrológico.
- Desarrollar sistemas con alto potencial productivo.
- Reducir la huella ecológica asociada al carbón fósil.

### 1.10.3 Principios de la Forestería Análoga (FA)

El trabajo con FA se fundamenta en los siguientes principios (Senanayake, 2000; DeMarco, 2008; Torres *et al.*, 2008):

**Principio 1 - Observar y registrar.** todo lo que está en la finca o parcela, principalmente lo nuevo que va apareciendo. Observar los cambios que se presenten.

**Principio 2 - Comprender y evaluar.** Preguntar por todo lo que se desconoce, todo lo que no se entiende, lo que hará entender qué es lo mejor para la finca.

**Principio 3 - Conocer el terreno.** Los principios anteriores servirán para conocer mejor la finca y saber qué hacer. El conocimiento que se tenga sobre el lugar es clave para llegar a comprender cómo establecer armonía con el entorno natural.

**Principio 4 - Identificar niveles de rendimiento.** Conocer mejor la finca ayudará a detectar el lugar en el cual cada producto tendrá su mayor rendimiento.

**Principio 5 - Mapas de sistemas existentes y potenciales.** Hacer un croquis o mapa de la dirección del viento en la finca, las fuentes de agua y las diferencias de la vegetación, entre otros. A esto se le suman estudios científicos de la zona, que ayudan a evaluar el potencial del suelo.

**Principio 6 - Reducir el índice de energía externa.** Reducir los recursos externos para aumentar la producción en la finca, si los tenemos en ella o si podemos obtenerlos del suelo. Los pasos anteriores ayudan a identificar el potencial de recursos disponibles en la finca, contribuye a ser autoeficiente y aprender a aprovechar los recursos naturales que están al alcance.

**Principio 7 - Guiarse por el paisaje y las necesidades de los vecinos.** Determinar las características del paisaje como subcuencas donde está la finca y trabajar de acuerdo a los elementos naturales y humanos que estén presentes en las mismas.

**Principio 8 - Seguir la sucesión ecológica.** Esto significa seguir el dictado o fases de la naturaleza, lo que se haga contribuirá a una mayor estabilidad del medio ambiente y el bienestar familiar y comunitario.

**Principio 9 - Utilizar los procesos ecológicos.** Lo que se aprende de la naturaleza, si se utiliza en el diseño de la finca, mantiene la estabilidad y la productividad. Se deben estudiar las relaciones de la naturaleza para comprender y poder imitarla.

**Principio 10 - Valorar la biodiversidad.** Valorar la biodiversidad significa interiorizar, apreciar y comprender de los ritmos de la naturaleza con la vida. Además contribuye a la estabilidad ambiental.

**Principio 11 - Respetar el desarrollo del sistema en el tiempo (madurez).** Respetar y valorar la madurez, o sea, la capacidad de un sitio/finca determinada de ser sostenible, es tener una visión a largo plazo.

**Principio 12 - Responder creativamente.** Adaptar las soluciones a las condiciones concretas de la finca; no ser dogmáticos sino creativos.

#### 1.10.4 Procedimiento para el diseño de forestería análoga

El primer paso para la implementación de la metodología de FA, es llevar a cabo un diagnóstico integral pero rápido del entorno y del área a ser evaluada como la ubicación política, las características ambientales y físicas, los aspectos socioculturales y los aspectos económicos.

Una vez se tenga la información básica, que permita entender las características generales del entorno y las características específicas de la parcela o lote como son la descripción del sitio, la información del suelo, el manejo del suelo actual, la historia del manejo en el pasado y los eventos inusuales, se procede a valorar la sostenibilidad del ecosistema.

La información recabada mediante los diagnósticos es importante para realizar una correcta valoración del estado en que se encuentra el ecosistema, pero además es útil para el diseño y la planificación de ecosistemas análogos, ya que proporciona conocimientos sobre las condiciones ambientales, sociales y geográficas del entorno, y sobre las particularidades del área específica de tratamiento.

Los diagnósticos preliminares pueden ser aplicados dentro de un paisaje, una comunidad, una finca, una parcela o lote, y permiten obtener información sobre varios elementos biogeográficos del lugar donde se va a realizar la valoración ecológica (Senanayake, 2000; DeMarco, 2008; Torres *et al.*, 2008).

#### 1.10.5 Valoración ecológica de forestería análoga

*“Esta herramienta permite identificar los elementos débiles o sensibles en el ecosistema y ayuda a priorizar acciones para fortalecer estos elementos ya que requieren mayor atención de forma que se pueda mejorar la salud general del ecosistema”.*

La valoración ecológica tiene como fin levantar información inicial, que permita el estudio comparativo del estado del ecosistema en el área en tratamiento a lo largo del tiempo. Esta información a su vez, mide los beneficios ecológicos del sistema de Forestería Análoga en la restauración de los ecosistemas a lo largo del tiempo, mediante la utilización *in situ* de indicadores cuantitativos y cualitativos. Los indicadores seleccionados se caracterizan por ser sencillos y fáciles de interpretar, muy sensibles, capaces de reflejar cambios ambientales y el impacto de prácticas de manejo en el suelo, la biodiversidad, la estructura y la productividad.

Al ser la valoración ecológica una herramienta que permite establecer comparaciones del estado ecológico de los ecosistemas dentro de un paisaje o una parcela, se determina una escala de calificación con valores, donde se asigna el menor valor al ecosistema más degradado, considerado ecológicamente frágil y poco sostenible en el tiempo, y el mayor valor al ecosistema más complejo que exista, es decir, generalmente se considera al bosque natural o clímax como el ecosistema más maduro y ecológicamente sostenible, mientras que al pastizal como el ecosistema más simple y ecológicamente frágil.

La parte práctica de este ejercicio consiste en: Ir al ecosistema más maduro, clímax íntegro y natural posible y realizar una evaluación visual considerando la realización de ejercicios que

permitan determinar la calidad de suelo, el estado de la biodiversidad, la estructura arbórea y la productividad. Esta información permite tener un referente de un sistema con mayor validez ecológica. Luego, ir al ecosistema más sencillo existente y realizar los mismos ejercicios de evaluación con el fin de obtener un referente de un sistema con poca validez ecológica. Con esta información, se establece una escala referencial, con un valor mínimo y máximo, que servirá como referencia para evaluar el estado de otros ecosistemas existentes en el área a evaluar. Los criterios utilizados en la metodología de FA para realizar la valoración ecológica son: (1) Suelo, (2) Biodiversidad, (3) Estructura y (4) Productividad.

## 1.11 Los sistemas agroforestales en zonas cafeteras colombianas

### 1.11.1 Sistema tradicional de explotación del café

Fue en América donde por primera vez se usó con algún criterio el sombrío en los cafetales. Los cultivadores de Asia y África que lo utilizaron como práctica de cultivo, procedieron sin ningún análisis en la selección de los árboles empleados, utilizando cualquier especie. El resultado de este proceso fue desventajoso para los cafetales y, como consecuencia, se desprestigió el uso del sombrío (FNC, 1958).

En Colombia, hacia el año de 1890, la implementación de la caficultura sufrió serios percances, no solo por las dificultades del transporte, si no de otros aspectos relacionados con la variación inesperada del clima, fuertes veranos y fuertes inviernos. Por esta misma época, en la Sierra Nevada de Santa Marta, se inició el primer cultivo del café con el establecimiento de los primeros “semilleros”, pero el fuerte verano presentado por esta época, aparte de lo inapropiado del clima, debido a la elevada temperatura, llevó el cultivo al fracaso; en otras regiones del país se iniciaron otros cultivos de café, los cuales también tuvieron una vida muy efímera como respuesta del árbol a las altas temperaturas (Federacafé, 1957).

Como estrategia de protección del cultivo, se dio inicio a la siembra del café en asocio de especies arbóreas, sistemas que posteriormente se denominaron “sistemas tradicionales de explotación del café”. Este sistema se caracterizaba por el uso de las variedades arábigo, típica y borbón, que se sembraban y mantenían bajo sombrío. Como sombrío provisional, especialmente en los años improductivos, generalmente se intercalaba plátano. La tecnología permitió una población cafetera ordinariamente del orden de 900 a 1.200 árboles por hectárea y unos 150 árboles de sombrío. Estas plantaciones comenzaban su cosecha a escala comercial a partir del cuarto año y su vida probable superior a los 30 años, declinando su producción gradual y levemente a partir de los 12 años de vida. En estos sistemas de cultivo generalmente no se utilizaban abonos químicos o lo hacían en muy bajas dosis, sus prácticas culturales se limitaban principalmente a

dos desyerbas anuales, podas esporádicas, fumigaciones para combatir algunas enfermedades como la mancha de hierro y la gotera, entre otras (Junguito y Pizano, 1991).

Los requerimientos de mano de obra variaban entre 90 y 110 jornales por año, y la recolección y el beneficio eran las actividades que requerían aproximadamente la mitad de los jornales. El rendimiento obtenido en este tipo de cafetales, alcanzaba en promedio los 500 kg de café verde por hectárea, con diferencias notables en el rendimiento, debido principalmente a la estructura de los cafetales, intensidad y frecuencia de la fertilización, empleo de mano de obra, y en general, a las características del cultivo y tamaño del cafetal (Junguito y Pizano, 1991).

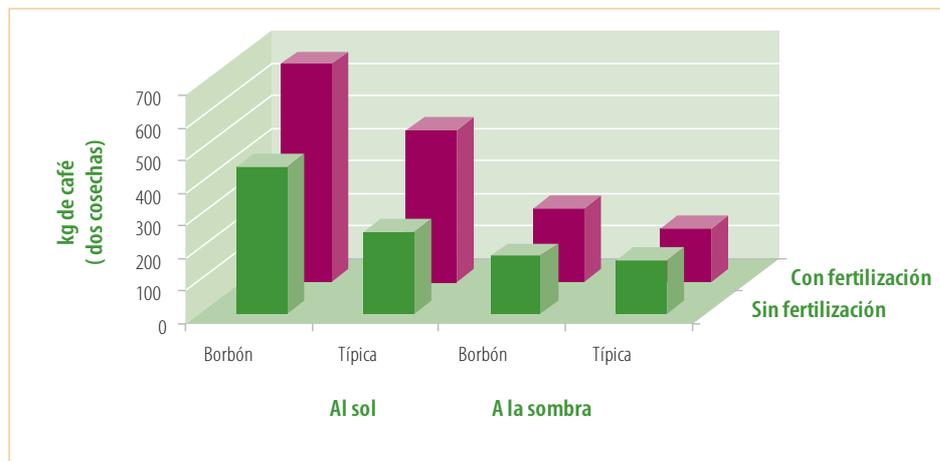
En este sistema de cultivo del café, para el sombrío permanente se empleaba generalmente el guamo en sus distintas variedades. No obstante, el árbol empleado para el sombrío debía reunir las siguientes características: (i) ser un árbol leguminoso (que produzca sus frutos en forma de vainas); (ii) adaptarse a los climas de las regiones del cultivo del café; (iii) tener crecimiento rápido y vida larga; (iv) tener ramificación abundante y buena altura; (v) su follaje debía ser de tal forma que no impidiera la radiación; (vi) con raíces profundas; (vii) su madera debía ser resistente a vientos; e (viii) inmune a plagas que pudieran atacar el cafeto.

De acuerdo con la FNC (1958), el sombrío mixto en los cafetales se recomendó en todos los territorios cafeteros donde el café se cultivaba bajo sombrío y se planteó que un buen árbol de sombrío en los cafetales permitía trazar las siguientes normas: Establecer guamos de distintas especies o variedades y debidamente intercalados entre sí; procurar distribuir las siembras de los árboles de sombrío, de tal forma que los guamos quedaran alternados por distintas alturas según el desarrollo y altura, determinado por las condiciones naturales. En tales condiciones se lograba establecer corrientes de viento dentro de los cafetales, eliminando así el exceso de humedad; estos sistemas de cultivo, debían permitir la siembra de otras especies de valor económico como el plátano.

Así mismo, el sombrío permanente debía estar conformado por distintos árboles para que no los atacaran las mismas plagas y no compitieran entre sí por el consumo de nutrientes; además, que los distintos árboles se sembraran intercaladamente para que no interfirieran en su alimentación y sus follajes tuvieran alturas diversas, con lo que se defienden mejor de las plagas. Los árboles más utilizados para el sombrío eran: *Inga edulis* (guamo santafereño); *Inga spuria* (guamo bejuco); *Inga ursi pitlier* (guamo cacho de cabra); *Inga marginata* (guamo churimo de ribete); *Calliandra lehmannii* (carbonero morado); *Pseudoacacia spectabilis* (cañofístulo macho, vainillo o vainillo); *Erythrina poeppigiana* (cámbulo, ceiba, cachimbo, anaco, písamo); *Erythrina corallodendro* (chocho, peonía, madre cacao), entre otros (Federacafé, 1932; Chalarca y Hernández, 1974).

Puede señalarse que hasta mediados de la década de los sesenta, la totalidad de la producción cafetera colombiana se podía catalogar como de tipo tradicional; pues hacia 1970, 1.034.165 hectáreas eran cultivadas con métodos tradicionales, es decir, el 97% de la superficie cafetera colombiana (Fedesarrollo, 1978).

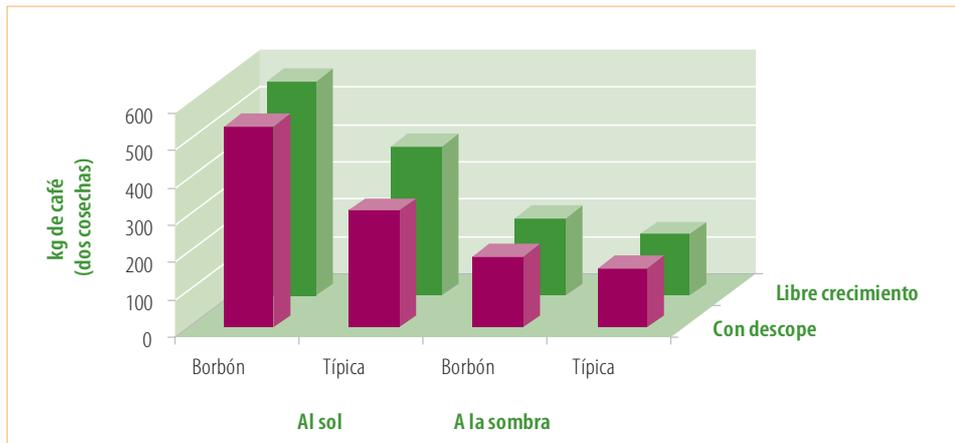
**Primeras investigaciones.** Triana (1957), realizó uno de los primeros reportes de investigación en sistemas agroforestales con café, donde comparó dos sistemas de cultivo (libre exposición solar y bajo sombrío de guamo santafereño), dos variedades de café (Borbón y Típica) y su respuesta a la fertilización. En estos estudios registró que la respuesta en producción (kilogramos de café cereza de 40 plantas, en dos cosechas) de las dos variedades de café, relacionada con el efecto de la presencia o ausencia de sombrío, fue de 1,45:1, es decir, que la variedad Borbón produjo 45,0% más que la variedad Típica, y que el efecto de la fertilización produjo un aumento en producción del 46,0% sobre la no aplicación de fertilizantes, en las dos variedades de café. La diferencia en producción entre las plantas sin sombrío y las cultivadas bajo sombra fue de 153,0% a favor del cultivo a pleno sol (Figura 10).



**Figura 10.**

Producción de café cereza por parcela, de dos tratamientos de sombrío y fertilización (variedad x sombra x fertilización) (Fuente: Triana, 1957).

Al considerar el efecto de la sombra y el sistema de manejo (descope y libre crecimiento), Triana (1957) encontró una diferencia entre los dos sistemas del 12,0% a favor del libre crecimiento. La variedad Típica mostró mayor diferencia entre cultivo con sombra y cultivo a pleno sol, cuando se le dejó a libre crecimiento que cuando se le sometió a descope (Figura 11).



**Figura 11.**

Producción de café cereza por parcela de dos variedades bajo dos tratamientos de sombrío y poda (variedad x sombra x sistema) (Fuente: Triana, 1957).

### 1.11.2 Distribución del área de café tradicional y tecnificado en Colombia

De acuerdo con Federacafé (1932), el cafetal debía mantenerse con buen sombrío pero teniendo presente que un exceso de sombra podría favorecer el desarrollo de enfermedades, y el caficultor debía tener siempre la preocupación constante de cultivar árboles de sombrío permanente con el mismo cuidado que cultiva los cafetos. Según el Censo Cafetero de 1932 (Federacafé, 1932), se registraron cerca de 530 millones de cafetos prácticamente cultivados bajo sombra en Colombia, de los cuales 460 millones se encontraron en producción; éstos estaban distribuidos en 356.245 hectáreas que comprendían cerca de 149.348 fincas. En el Censo Cafetero Nacional 1980-1981, se contabilizaron 1.009.572 hectáreas en café, de las cuales el 65,9% (665.849 hectáreas) era caficultura tradicional<sup>4</sup>, y el 16,7% (168.019 hectáreas) caficultura bajo sombra, es decir, el 82,6% del área cafetera colombiana se encontraba bajo algún grado de sombrío (Federacafé, 1983).

Actualmente, del área cultivada con café en Colombia (927.815 ha), 857.018 hectáreas están establecidas con variedades de porte bajo y 70.797 hectáreas con variedades de porte alto; 308.990 ha están con algún tipo de sombrío o sombrío ralo y 102.913 hectáreas bajo sombrío (Tabla 3) (FNC-SIC@, 2013). En los sistemas de cultivo bajo sombrío la densidad de siembra promedio es de 4.900 cafetos por hectárea y la edad promedio de los árboles es de 10 años (FNC, 1997; Saldías, 2006). De lo anterior, se puede inferir que en Colombia el café es un cultivo que se planta a plena exposición solar pero es común observar plantaciones establecidas con varios tipos y cantidades de cobertura arbórea, y que existe una gran cultura agroforestal con café, dadas las diversas condiciones climáticas y de suelo de nuestras zonas cafeteras.

<sup>4</sup> **Caficultura Tradicional.** Caracterizada por la siembra de café variedad Típica con o sin arreglo espacial, y densidad de siembra menor a 2.500 árboles por hectárea (Saldías, 2006).

**Caficultura Tecnificada.** Siembra de las variedades Colombia, Caturra y Típica con arreglo espacial y densidad mayor o igual a 2.500 árboles por hectárea (Saldías, 2006).

**Tabla 3.**

Distribución del área con café con diferentes proporciones de luminosidad en Colombia  
(Fuente: Federación Nacional de Cafeteros-SIC@, abril de 2013).

Departamento	Café de porte bajo				Café de porte alto			
	Semisombra	Sol	Sombra	Total	Semisombra	Sol	Sombra	Total
Antioquia	26,9	63,6	9,5	132.697	39,4	27,4	33,2	404
Arauca	100,0	0,0	0,0	8	100,0	0,0	0,0	1
Bolívar	40,9	56,6	2,5	571	43,9	32,7	23,4	27
Boyacá	79,9	5,9	14,2	8.030	50,0	1,9	48,2	2.921
Caldas	10,9	86,0	3,2	76.099	43,5	26,8	29,8	1.533
Caquetá	16,2	83,3	0,5	3.535	44,5	55,5	0,0	284
Casanare	87,1	0,3	12,6	1.537	22,6	0,3	77,1	1.127
Cauca	50,9	37,9	11,2	77.016	45,5	5,1	49,4	7.182
Cesar	68,1	14,4	17,6	18.104	59,1	7,0	33,9	10.878
Chocó	13,9	85,4	0,7	195	0,0	100,0	0,0	1
Cundinamarca	51,8	40,1	8,1	32.186	72,8	6,5	20,7	8.857
La Guajira	60,1	1,2	38,7	2.645	42,0	0,3	57,7	3.857
Huila	11,8	85,7	2,5	139.569	27,4	53,5	19,1	2.418
Magdalena	77,8	5,1	17,1	13.673	61,9	1,1	37,0	7.298
Meta	37,3	61,5	1,3	2.843	34,2	62,4	3,4	296
Nariño	47,4	41,5	11,2	36.886	43,4	8,7	47,9	608
Norte de Santander	59,3	23,8	16,8	23.245	64,7	2,9	32,4	6.592
Quindío	32,7	57,2	10,0	28.553	44,0	11,9	44,2	1.410
Risaralda	13,6	83,9	2,5	51.685	38,3	38,6	23,1	901
Santander	52,1	7,9	40,0	44.988	46,6	3,4	50,0	2.055
Tolima	19,6	76,2	4,2	105.776	51,8	12,7	35,5	8.687
Valle del Cauca	53,4	38,4	8,2	64.322	41,2	12,7	46,1	4.724
<b>Total</b>				<b>864.164</b>				<b>72.062</b>

# Factores determinantes para el establecimiento de sistemas agroforestales con café

## 2.

Es tradicional la discusión acerca de si el sombrío 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 los aspectos más importantes (Beer *et al.*, 1998). En sistemas de monocultivo, el café requiere por lo general gran cantidad de insumos con el fin de maximizar la producción. La producción de café a pleno sol exige mayores esfuerzos económicos por parte del caficultor, por tanto, el productor está sujeto a la variabilidad en los costos de producción.

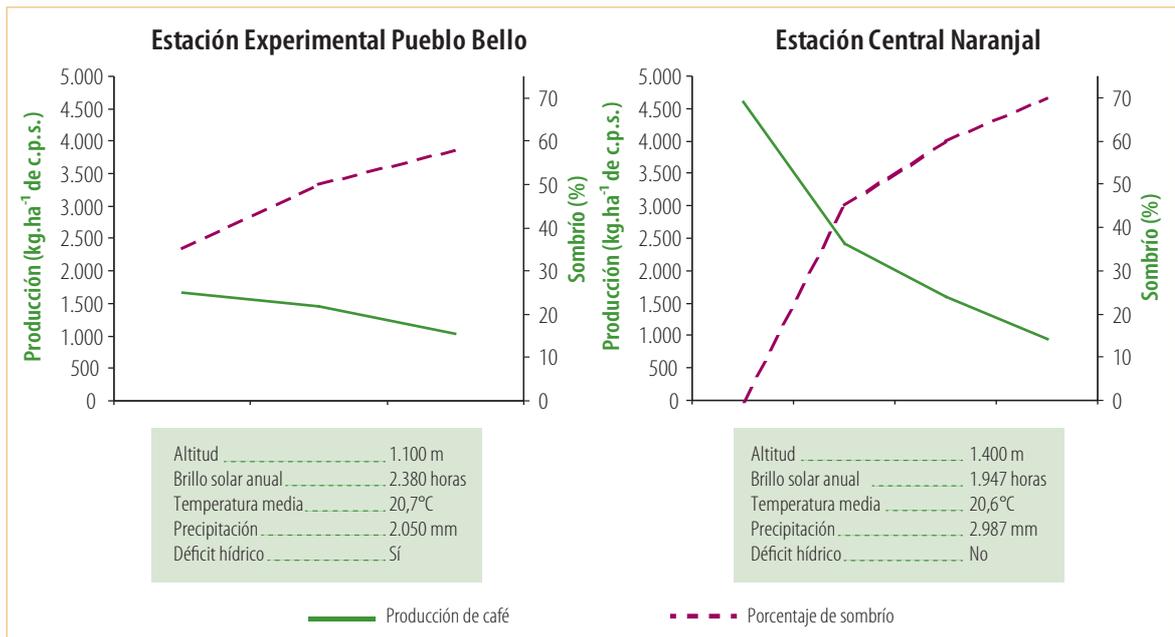
En sistemas agroforestales hay mejor conservación de los recursos naturales y menor aplicación de insumos, lo que se traduce en menores costos de producción. Además, la explotación de los productos adicionales de los árboles utilizados para el sombrío (frutos, madera o leña para producción de carbón vegetal) resulta en ingresos adicionales para el agricultor, lo cual ha estimulado recientemente el interés sobre el uso de árboles para sombra, particularmente en áreas donde esa práctica fue abandonada (Beer *et al.*, 1998; DaMatta y Rodríguez, 2007).

Los árboles de sombrío en los cafetales permiten ejercer un control sobre la economía del agua, lo que mitiga los efectos que los períodos de déficit hídrico imponen sobre la producción; también, contribuyen a mantener la fertilidad del suelo, ayudan a reducir la erosión, reciclan nutrientes y aportan gran cantidad de materia orgánica (Beer, 1987; Kiara y Naged, 1995).

Los factores claves para decidir sobre el establecimiento o no de sistemas agroforestales con café, en este capítulo, se dividen en diez grupos, entre los que se destacan: Características ambientales y de suelo; nivel y calidad de los insumos disponibles para mejorar las condiciones en el café; los objetivos de la producción; control de la erosión y fijación de CO<sub>2</sub>.

## 2.1 Características de clima y suelos

La producción de café puede ser analizada en función de las características del suelo, la altitud y la oferta ambiental. Beer *et al.* (1998) desarrollaron un modelo hipotético para *Coffea arabica*, en el cual plantean que en suelos sin limitaciones hídricas y nutricionales, las mayores producciones se presentarían en plantaciones a pleno sol, en la franja ideal de altitud, y fuera de esa franja altitudinal la producción puede verse reducida significativamente como respuesta a las altas temperaturas en las zonas o regiones bajas, o en respuesta a la baja temperatura y posiblemente a los daños causados por el viento en altitudes elevadas. En esas condiciones subóptimas los árboles de sombrío pueden atenuar los extremos microclimáticos e incrementar la producción con relación a los cafetales a pleno sol. En suelos con limitaciones nutricionales o con baja capacidad de almacenamiento de agua, la ventaja potencial productiva del café a pleno sol con relación al café bajo sombra decrece en cualquier altitud, particularmente en las regiones de altitudes marginales. En la Figura 12, en condiciones óptimas para el cultivo del café a libre exposición solar (Estación Central Naranjal), es marcada la reducción en la producción por el establecimiento de árboles de sombrío e incremento en el porcentaje de sombrío; en condiciones con limitaciones de clima y suelo (alta radiación solar, alta temperatura, deficiencias hídricas, etc), las mejores respuestas en producción se obtienen con el establecimiento de árboles de sombrío (Estación Experimental Pueblo Bello).



**Figura 12.**

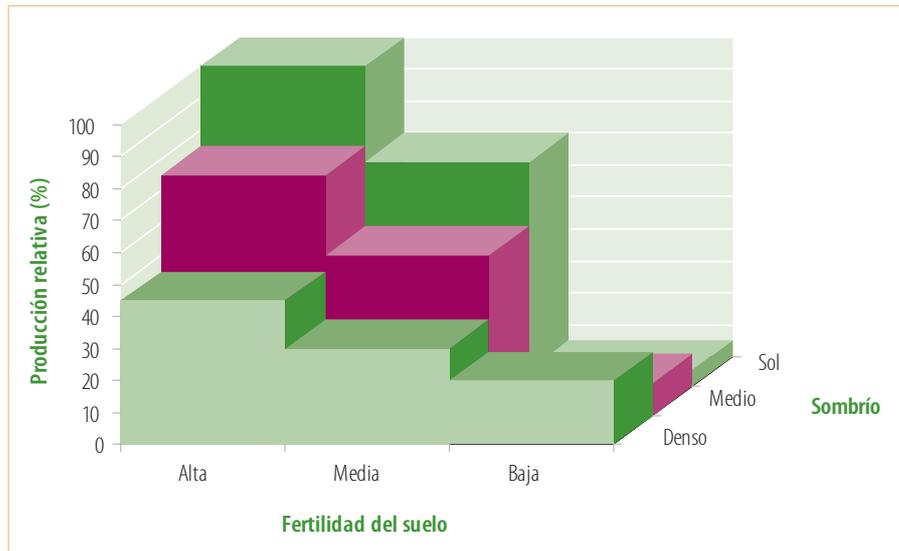
Sistemas de producción de café de acuerdo a las características de suelo y clima.

La disponibilidad de luz puede ser el factor limitante de muchos cultivos, en suelos fértiles y con adecuada disponibilidad de agua la importancia de la luz es relativa. Un ejemplo de tal interacción entre la luz y la disponibilidad de nutrientes, es el planteado por Alvim (1977), indicando que mientras la producción de mazorcas de cacao (*Theobroma cacao*) es máxima bajo condiciones de la alta fertilidad de suelo y de ligero sombrero, las plantas bajo limitación de nutrientes rinden más con un sombrero denso que con sombra ligera o a libre exposición solar; por tanto, son importantes los árboles de sombrero en suelos de baja fertilidad (Figura 13).

Dicho de otra manera, en suelos pobres la planta responde positivamente a mayores niveles de sombra, mientras que en suelos fértiles o con altos niveles de fertilización ocurre lo contrario. No obstante, Muschler (2000) advierte que la alta respuesta al remover la sombra en suelos fértiles no refleja tendencias a largo plazo, porque no se considera el agotamiento de la planta y la degradación del suelo sin sombra y que los pequeños productores deben trabajar en suelos relativamente pobres donde la sombra no mejora las condiciones. Beer *et al.* (1998), plantean que debe establecerse café con árboles si el relieve es fuertemente quebrado, con pendientes fuertes (>50%), si los suelos son susceptibles a la erosión, poco profundos y poco estructurados, con bajos contenidos de materia orgánica, baja fertilidad natural, mal drenaje, baja permeabilidad y baja retención de humedad.

**Figura 13.**

Producción de café en función de la fertilidad del suelo y el nivel de sombra.



## 2.2 Deficiencias hídricas en el suelo

La lluvia en la zona cafetera central presenta una tendencia a distribuirse en dos períodos secos y dos húmedos en el año. Los meses de exceso hídrico son abril-mayo y octubre-noviembre. En las regiones norte, sur y oriente del país la tendencia es a la ocurrencia de una sola estación húmeda

en el año. En la región norte de la zona cafetera -latitudes mayores a 7° Norte- se presenta un período seco pronunciado de diciembre a marzo (o abril) y un período húmedo de mayo a noviembre, con una ligera disminución en julio. En la región sur -latitudes inferiores a 3° Norte- se presenta una estación seca acentuada desde julio hasta septiembre y una estación de exceso hídrico desde octubre a junio (Jaramillo, 2005).

El consumo de agua de la planta de café está próximo a  $125 \text{ mm.mes}^{-1}$ , cuando se mantiene de manera constante un aporte hídrico inferior a este valor, disminuye la producción. Si se considera que en las regiones cafeteras de Colombia, la evaporación diaria alcanza entre 3,0 y 4,0 mm, un período seco de 30 a 40 días consecutivos, afectaría la producción del grano, dependiendo de la altitud (Blore, 1966; Daga, 1971; Kumar, 1979; Camargo y Pereira, 1994; Gutiérrez y Meinzer, 1994, citados por Jaramillo, 2005).

Cuando se analiza la Deficiencia Hídrica Anual (DHA) de muchas regiones cafeteras del mundo, se observa que las regiones con DHA inferiores a 150 mm, son aptas para el cultivo del café. Si en la región considerada la DHA está entre 150 y 200 mm, se considera zona marginal para el cultivo, y allí, para obtener alguna producción se requiere de riego suplementario. Se considera que las regiones no aptas para el cultivo son aquellas donde la DHA es superior a 200 mm. En estas zonas, el riego continuo es absolutamente necesario (Camargo y Pereira, 1994), citados por Jaramillo (2005), o en su defecto el establecimiento de sombra podría considerarse como una solución alterna.

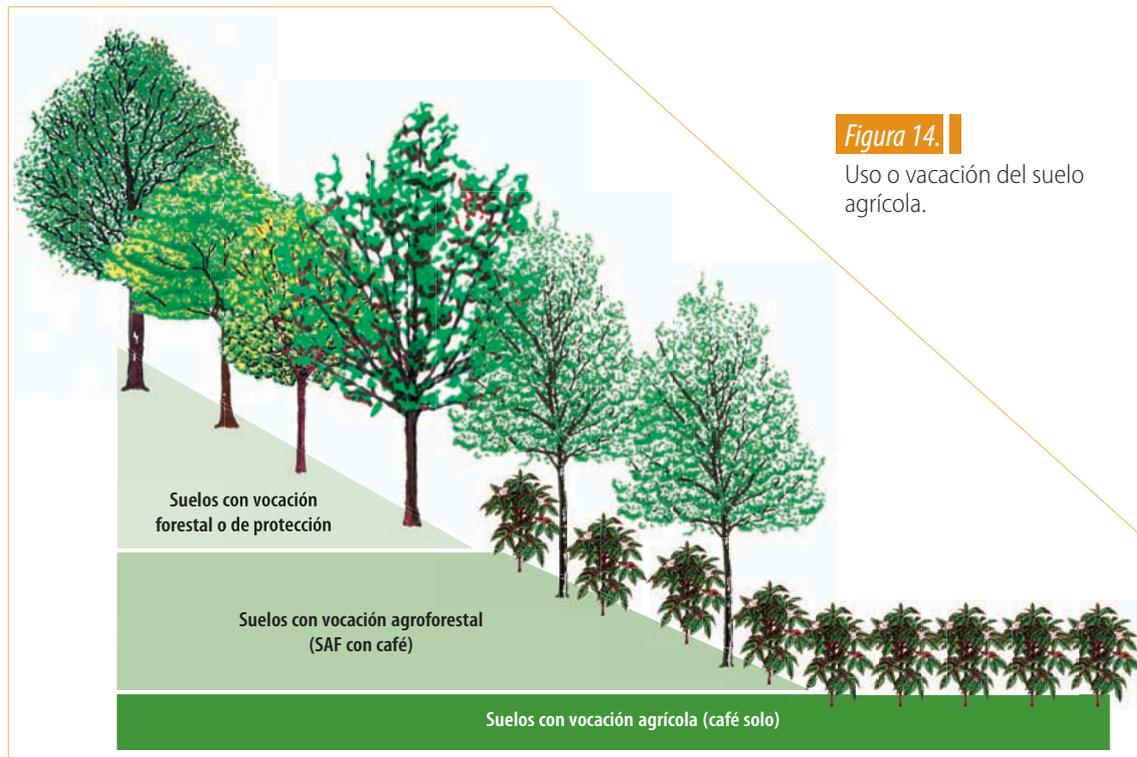
Las deficiencias hídricas anuales más severas se observan en Tibacuy-Cundinamarca (468 mm), Julio Fernández-Valle (363 mm), La Montaña-Tolima (343 mm), Blonay-Norte de Santander (324 mm) y Pueblo Bello-Cesar (272 mm). Tibacuy-Cundinamarca y Blonay-Norte de Santander, son las localidades que presentan la máxima limitación hídrica de los sitios analizados, con deficiencias hídricas acumuladas durante 10 meses continuos, de diciembre a septiembre. El valor mensual más severo de deficiencia se observa en Pueblo Bello-Cesar, en los meses de febrero y marzo con déficit de 78 a 86 mm, respectivamente (Jaramillo, 2005).

Los menores valores de deficiencia hídrica se presentan en Montelíbano-Cundinamarca con 1,0 mm, Naranjal-Caldas con 4,0 mm y Miguel Valencia-Antioquia con 6,0 mm. Un déficit hídrico inferior a 10,0 mm por mes, no debe ser tomado como limitante en la producción agrícola. Para el cultivo del café una deficiencia de agua continua de 100 mm o más reduce la producción; con las tasas de evaporación diaria registradas en la zona cafetera, la planta de café comenzaría a ser afectada cuando se registren más de 40 días sin lluvia.

### 2.3 Uso (vocación) del suelo agrícola

El uso apropiado del suelo quizás no genere de manera tangible ni directamente o en primera instancia recursos económicos a la población, pero el hecho que sus condiciones agroecológicas

vayan mejorando en el tiempo, aseguran que los recursos económicos invertidos en las actividades productivas sean más exitosas, en el sentido que las exigencias de los sistemas implementados en él tengan garantizado sus requerimientos físicos y químicos. Esto significa, que si fuerzas externas que puedan alterar la producción no existen, indudablemente las condiciones de uso del suelo incidirían en el beneficio económico esperado (Cuello, 2008). Para la sostenibilidad de la producción agroforestal, se deben respetar las vocaciones naturales del suelo en función de la topografía, estado nutricional y condiciones agroclimáticas (Figura 14).



### 2.3.1 Suelos de vocación forestal o de protección

Son aquellos que no deben ser aprovechados para el uso agropecuario ni forestal, debido a su frágil estructura, que los hace susceptibles a la degradación y tienen alta importancia en la protección de las cuencas hidrográficas. Su uso se limita al aprovechamiento hidroenergético, fines recreativos, de investigación, de educación y cualquier otro uso directo que no consuma los recursos existentes.

### 2.3.2 Suelos de vocación agroforestal

Se definen como aquellos suelos que debido a sus características físicas, de topografía y pluviosidad, deberían ser mantenidos bajo cobertura arbórea u otra utilización sostenible que pueda evitar externalidades negativas relacionadas al suelo y agua. Los suelos de vocación

agroforestal, en especial los ubicados en los trópicos, son más frágiles, pues cuando se elimina su cobertura boscosa se degradan fácilmente y pierden su fertilidad. Un suelo agroforestal puede considerarse como aquel que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta arbórea (RAN, 2005).

### 2.3.3 Suelos con vocación agrícola

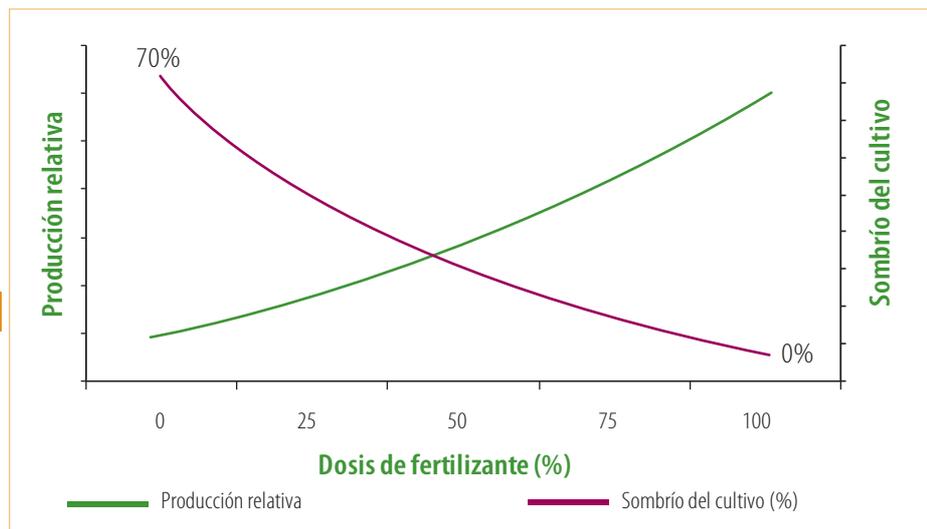
Corresponde a suelos planos o de poca pendiente, donde se puede establecer todo tipo de cultivos agrícolas, sin degradación del suelo. El agricultor generalmente realiza una rotación de cultivos y de potreros, de manera que no se produzca un desgaste del suelo y pérdida de fertilidad. Además, puede combinar los usos agrícolas con especies arbóreas, en forma de callejones, cortinas cortavientos y cercos vivos, entre otros, o también son compatibles los sistemas agroforestales (RAN, 2005).

## 2.4 Disponibilidad de insumos

Las prácticas agroforestales buscan incrementar la productividad a través de un uso eficiente del recurso suelo, permitiendo obtener al agricultor mejores rendimientos de los cultivos, mayor eficiencia en las interacciones entre componentes del sistema suelo-planta, reducción de costos por insumos agrícolas y mano de obra, así como una producción complementaria de materiales maderables provenientes de la masa forestal asociada. Si hay disponibilidad de insumos químicos (fertilizantes, herbicidas, fungicidas, entre otros), de riego, de variedades seleccionadas y altamente productivas, las plantaciones a libre exposición solar deben superar a aquellas plantaciones bajo sombrío (UNCCD, 2006).

En la Figura 15 se presenta la producción relativa de café al incremento en la dosis de fertilizante aplicado, en plantaciones establecidas con 4.500 plantas por hectárea, tanto bajo sombrío (70

**Figura 15.** Producción relativa de café al incremento en la dosis de fertilizante aplicado. Estación Central Naranjal-Caldas.



árboles de *Inga* sp. por hectárea), como a libre exposición solar. Bajo sombrío se aplicó hasta el 75% de la dosis de fertilizante y a libre exposición solar se aplicó el 100% del fertilizante.

## 2.5 Objetivos de la producción

Cuando el objetivo es producir café de calidad y, paralelamente, mantener la estabilidad de la producción, la biodiversidad y la conservación de los recursos naturales, o cuando se desea la obtención de productos adicionales (madera, frutos y leña, entre otros), el establecimiento de árboles en el cafetal es una buena opción (DaMatta y Rodríguez, 2007). En términos de su arquitectura y ecología, muchas plantaciones de café con sombra, se asemejan más a un bosque natural que la mayoría de los otros sistemas agrícolas. Las plantaciones de café con sombra son comparables con un bosque natural como refugio para las aves migratorias. Estos sistemas agroforestales también tienen un alto potencial como refugio para la biodiversidad, para el manejo de zonas de amortiguamiento y como corredores biológicos o lugares de tránsito para la migración de especies animales. Cuando se utilizan especies nativas como árboles de sombra en una zona de amortiguamiento, se puede mantener un banco de genes de estas especies (Beer *et al.*, 1998).

Adicionalmente, si el propósito de la producción es la participación en los mercados y programas de producción de café con la denominación de “Café Especial”, algunas normas internacionales como *Rainforest Alliance* (2008), *Smithsonian Migratory Bird Center* (2001, 2004), entre otras, sugieren sistemas de producción con café bajo árboles de sombrío (Tabla 4).

**Tabla 4.**

Requerimiento arbóreo en café, según Norma para Agricultura Sostenible (Fuente: SMBC, 2001; Rainforest Alliance, 2010).

Criterio de la norma	<i>Rainforest Alliance</i>	SMBC*
Tipo de sombra	Permanente y homogénea	Permanente y homogénea
Número de árboles por hectárea	70	70
Número de especies nativas por hectárea	12	7
Porcentaje mínimo de cobertura	40	40
Estratos arbóreos	2	2
Sistema de producción	Convencional	Orgánico

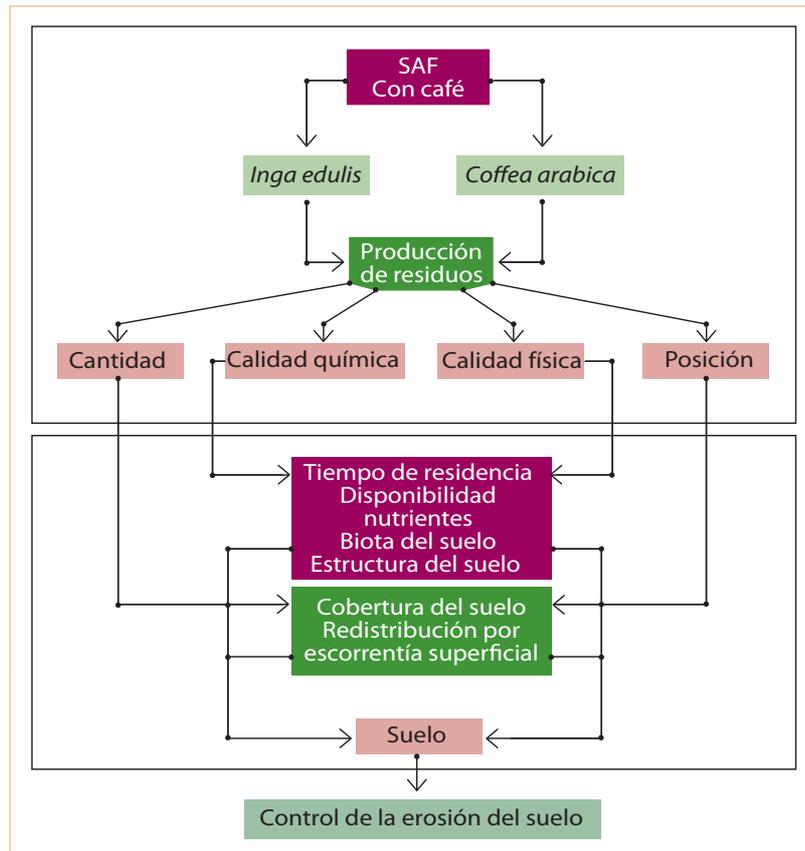
\*SMBC: *Smithsonian Migratory Bird Center*

## 2.6 Vulnerabilidad del suelo y control de la erosión

En terrenos pendientes, la cobertura vegetal proporcionada por los residuos de los árboles (“mulch”) mejora el almacenamiento de agua, regula el microclima, provee alimento a los

organismos del suelo quienes mejoran su estructura y la infiltración, y protege la superficie del suelo contra el impacto de la lluvia que causa la ruptura de los agregados. La estrategia de cobertura para el control de la erosión puede funcionar cuando se cumplen dos condiciones: Proporcionar los insumos suficientes de materia orgánica y un tiempo de residencia del material orgánico lo suficientemente largo en la superficie del suelo, así como asegurar que el suelo esté protegido en todo momento de las fuertes lluvias. El grado de protección de la superficie del suelo por residuos depende del tiempo de residencia, el cual es inversamente proporcional a su tasa de descomposición, siendo determinante de la calidad y su posición en la pendiente, como se observa en la Figura 16 (Hairiah *et al.*, 2005).

Cuando los suelos son muy estables y presentan un horizonte orgánico entre 20 y 50 cm de espesor, topografía de plana a ondulada (0% a 25%) y longitudes de pendientes cortas (50 a 150 m) a muy cortas (menores de 50 m), la erosión generalmente se presenta como un desgaste de las capas superficiales. En ellos, pueden establecerse cafetales al sol con alta densidad de siembra,



**Figura 16.**

Control de la erosión mediante residuos vegetales provenientes de un SAF.

siempre y cuando haya una buena distribución de lluvias durante el año y temperatura adecuada (18 a 21°C), como es el caso de suelos derivados de cenizas volcánicas (Rivera y Gómez, 1992). Se recomienda sembrar cafetales con sombrío en suelos arenosos y pedregosos o cascajosos, con tendencia a la formación de zanjas o cárcavas (zanjas profundas), con pendientes fuertemente inclinadas (25% a 50%) a muy escarpadas (mayores de 75%) y de longitudes largas (300 a 500 m) a extremadamente largas (mayores de 500 m), condiciones que favorecen la concentración de las aguas de escorrentía. También debe usarse el sombrío cuando los suelos tienen tendencia a presentar derrumbes, deslizamientos y hundimientos (Rivera y Gómez, 1992).

El árbol cumple dos funciones importantes en la ladera: Incrementa la resistencia del suelo al corte o al movimiento masal, debido al esfuerzo y anclaje que ejercen las raíces sobre el suelo, y ejerce una fuerza debido al propio peso de la vegetación sobre la ladera; el café no incrementa la resistencia del suelo al movimiento masal al compararlo con un suelo sin cobertura, como sí lo hacen los árboles como nogal (*Cordia alliodora*), guamo (*Inga* sp.), nacedero o quiebrabarrigo (*Trichantera gigantea*). Los árboles regulan los excesos de agua que pueden saturar y erosionar el suelo mediante tres procesos: Interceptación, evapotranspiración y la disminución de la energía erosiva del agua. Es así como la vegetación arbórea y arbustiva es la mejor aliada del caficultor para la prevención de los movimientos masales y erosión avanzada (Salazar e Hincapié, 2006).

## 2.7 Captación de carbono

La concentración atmosférica de dióxido de carbono se ha incrementado durante las últimas cinco décadas, principalmente como consecuencia de la combustión de materia orgánica fósil (carbón, petróleo) y no fósil (bosques), principalmente en los países desarrollados. Las evidencias de los efectos negativos que causan en el clima local y mundial, la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, constituyen temas relevantes. Las acciones orientadas al control de emisiones y flujos de carbono, así como, la estimación del potencial de fijación de los sistemas agroforestales en los sistemas contables de los ciclos de carbono son importantes. Los árboles, base de los sistemas agroforestales, juegan un papel esencial en el ciclo global del carbono (Corral *et al.*, 2006).

El agroecosistema cafetero tiene un potencial apreciable para retener el carbono atmosférico, tanto en las partes aéreas de las plantas, como en el sistema radicular y en la materia orgánica del suelo. Si los cafetales se comparan con ecosistemas forestales, tanto perennifolios como estacionales, la cantidad retenida de carbono en los primeros es menor, sin embargo, su productividad es mayor que la de los bosques. Los agroecosistemas cafeteros debidamente operados con adecuadas medidas de conservación de suelos y con un uso moderado de productos químicos, pueden contribuir en el mantenimiento de la diversidad biológica y a la producción de otros bienes y servicios, tales como recursos hídricos, leña, carbón, madera, frutas y recreación (Fournier, 1995).

Kursten y Burschel (1993), calcularon que cerca de 14 a 52 t.ha<sup>-1</sup> de carbono (C) son almacenadas en la biomasa de la parte aérea de los árboles de sombra en asocio con plantaciones de café y cacao. Comparados con cultivos anuales, estos sistemas agroforestales almacenan carbono adicional, entre 10 y 50 t.ha<sup>-1</sup>, en la capa vegetal y la materia orgánica depositada en el suelo. Ávila *et al.* (2001), evaluaron el almacenamiento y fijación de carbono (C) en los sistemas agroforestales café (*Coffea arabica*) con *Eucalyptus deglupta* (eucalipto), de 4, 6 y 8 años de edad; café con *Erythrina poeppigiana* (poró), y en monocultivos de café. Más del 89% del C almacenado en los sistemas correspondió al C del suelo, mientras que la fijación de C del componente arbóreo estuvo entre 0,4 y 2,2 t.ha-año<sup>-1</sup>.

Magaña *et al.* (2004) cuantificaron el carbono almacenado en la fitomasa aérea (biomasa viva y mantillo) de diferentes sistemas agroforestales de café. De esta manera al comparar un sistema de *C. arabica* en monocultivo de 14 años, a pleno sol, con un sistema de *C. arabica* de 14 años con sombrío de *Eucalyptus deglupta*, de 7 años, se registró un aumento del almacenamiento de C en la fitomasa por encima del suelo en 17,0 t.ha<sup>-1</sup>, que corresponde a la biomasa aérea de los árboles (14,0 t.ha<sup>-1</sup> de C) y al incremento de la capa de mantillo desde 1,2 t.ha<sup>-1</sup> de C bajo café a pleno sol hasta 4,2 t.ha<sup>-1</sup> de C bajo *E. deglupta*.

En la zona cafetera colombiana, la necesidad de suplir los requerimientos energéticos y de materias primas (maderas) ha ocasionado que el mayor porcentaje de las emisiones se deba a cambios en el uso del suelo por la deforestación. Históricamente, parte de los excedentes de la fijación del carbono en los órganos no cosechables del sistema de producción cafetera, principalmente los tallos, han sido utilizados para la producción de carbón, el cual suple en parte las necesidades de energía.

Un cálculo inicial indica que en la zona cafetera se encuentran fijadas solamente en café cerca de 11.000.000 de toneladas de CO<sub>2</sub> y en el mediano plazo (10 años) si fuera renovada en su totalidad el área cafetera para rejuvenecer los sistemas productivos, se fijarían unas 16.000.000 de toneladas. Este carbono fijado puede ser utilizado para obtener un ingreso marginal para los agricultores mediante la venta de un servicio ambiental; aspecto que puede ser tenido en cuenta como una adicionalidad, ya que podría suplir las necesidades energéticas de las fincas cafeteras, permitiendo resguardar los bosques nativos, fuentes de agua y biodiversidad en esta amplia geografía cafetera. Adicionalmente, las dos terceras partes de la zona cafetera colombiana se encuentran en sistemas agroforestales (café con árboles), lo que indicaría que el potencial es mayor pues faltaría valorar la contribución de las especies asociadas al cultivo (Riaño, 2004).

## 2.8 Servicios ambientales de los sistemas agroforestales

Las principales funciones de los servicios ambientales que proporcionan los sistemas agroforestales, reseñados por Beer *et al.* (2003), son:

- La captación de carbono.
- Mantenimiento de la fertilidad del suelo y conservación de la erosión, a través de los aportes de materia orgánica para la fijación de nitrógeno y el reciclaje de nutrientes.
- La conservación del agua (en cantidad y calidad) a través de una mayor infiltración y reducción de la escorrentía superficial, que podría contaminar las fuentes de agua.
- Conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados.

Estas funciones de servicios complementan los productos que los SAF proveen (para uso comercial y doméstico, por ejemplo, leña, madera, frutas), pero los agricultores rara vez son recompensados por ellos. Como servicios ambientales originados de las investigaciones en SAF con café en Cenicafé, se mencionan:

### 2.8.1 Producción de madera de especies forestales en SAF con café

En Colombia y otros países cafeteros son comunes los sistemas de producción de café en asocio con árboles como componente protector o productivo. Estas asociaciones agroforestales son de gran importancia en las culturas cafeteras, especialmente donde el cultivo debe hacerse con el acompañamiento de árboles; los caficultores normalmente conocen las ventajas y beneficios de estas asociaciones, pero en su mayoría desconocen cuáles son las implicaciones en la producción de café y cuáles son los beneficios reales económicos obtenidos por el asocio de especies de valor económico, como componente arbóreo en sistemas agroforestales con café. Por ejemplo, De las Salas (1987) indica que *Cordia alliodora* provee en cafetales y cacaotales una fuente adicional de ingresos al agricultor, especialmente en Colombia, Costa Rica y Ecuador, donde las trozas sin procesar pueden venderse entre US\$ 10 y US\$ 20 el metro cúbico. Las mediciones realizadas en Costa Rica y Colombia indican que esta especie asociada con café y cacao, alcanza un volumen comercial de 100 a 250 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> en un período de 20 a 25 años, con incrementos promedio entre 3,2 y 3,6 cm.año<sup>-1</sup> para diámetro y entre 0,7 y 2,0 m.año<sup>-1</sup> para altura.

Adicional a las ventajas ofrecidas por los sistemas agroforestales, éstos representan una alternativa para los caficultores, al reducir la dependencia de un solo cultivo, logrando por lo general, incrementar la rentabilidad en las fincas. Además, los SAF son ecológicamente deseables, ya que por medio de su establecimiento se logra una serie de ventajas que hacen que los sistemas de producción sean más sostenibles. Considerando que la demanda de productos madereros se incrementa y que en los países tropicales la deforestación de los bosques naturales continúa a ritmos alarmantes, es necesario diseñar alternativas para la producción de madera. Una estrategia es la sustitución de árboles de servicio como el guamo (*Inga* sp.) por árboles maderables en los sistemas de producción de café (Montenegro *et al.*, 1997).

En la Estación Experimental Paraguaicito (Quindío) de Cenicafé y en La Finca la Suecia de Smurfit-Kappa, bajo la coordinación de la Estación Experimental El Tambo (Cauca), se realizaron estudios para cuantificar la producción en madera de especies forestales como sombrío del café, sus efectos en la producción y los ingresos totales del sistema, los cuales se describen a continuación.

- **Estación Experimental Paraguaicito (Q).** (Más adelante se describen las condiciones de la Estación Experimental). En esta localidad se evaluó la producción de madera por las especies forestales *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* en sistemas agroforestales con café. Las densidades de siembra fueron de 4.444 plantas/ha (1,5 m x 1,5 m) para el café y 278 plantas/ha (6,0 m x 6,0 m) para el sombrío.

**Crecimiento de las especies forestales.** Para cumplir con el propósito, inicialmente se realizaron mediciones anuales del diámetro y altura de todos los árboles de nogal, pino y eucalipto presentes en las distintas parcelas. Con esta información se calcularon valores promedio por parcela, que luego se multiplicaron por el factor de área, para estimar los volúmenes por hectárea. En términos de volumen por hectárea los resultados consignados en la Tabla 5 reflejan el efecto de la mortalidad que presentaron las diferentes especies, la cual fue en promedio del 4,0%, 18,0% y 31,0% en nogal, pino y eucalipto, respectivamente. La variación observada en los parámetros de crecimiento de las especies es el reflejo de la interacción entre los requerimientos nutricionales de las especies, la capacidad de los suelos de proveerlas y las diferencias en los mecanismos desarrollados por estos árboles para utilizarlos.

**Tabla 5.**

Crecimiento promedio en altura, diámetro y volumen, de tres especies forestales. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Lotes	Altura (m)			Diámetro (cm)			Volumen con corteza (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )		
	Nogal	Pino	Eucalipto	Nogal	Pino	Eucalipto	Nogal	Pino	Eucalipto
1	16,0	17,8	26,0	31,2	30,8	31,8	199,0	144,8	187,3
2	8,9	17,2	24,4	22,7	28,7	29,7	75,4	119,1	91,2
3	9,3	15,5	22,6	24,7	26,0	26,6	90,3	89,0	154,5
4	7,2	15,9	22,1	19,1	28,5	27,1	44,6	110,2	124,8
Promedio	10,3	16,6	23,8	24,5	28,5	28,8	102,3	115,8	139,4
c. v.	37,4	5,6	9,1	20,8	6,9	8,4	90,0	20,0	29,4

Las producciones de madera (fuste con corteza), para las especies forestales nogal, pino y eucalipto, asociadas como sombrío del café en sistemas agroforestales, fueron de 102,3; 115,8 y 139,4 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>. En resumen: (i) *Eucalyptus grandis* y *Pinus oocarpa* son las especies de mayor productividad en volumen, (ii) se adaptan mejor a diferentes condiciones de suelo, y (iii) exhiben mayor susceptibilidad al ataque de la hormiga arriera que *Cordia alliodora*.

**Ingresos totales (café y madera) obtenidos de los sistemas agroforestales y el café a libre exposición solar.** En la Tabla 6 se presenta los resultados obtenidos de estos sistemas.

La producción de café fue significativamente mayor en el sistema de producción a libre exposición solar al compararse con las producciones obtenidas en los sistemas agroforestales (Farfán y Urrego, 2004); las diferencias en producción fueron de 5.537 kg de café pergamino seco (c.p.s.) con sombrío de nogal y de 2.680 y 2.611 kg de c.p.s. con sombrío de pino y eucalipto, respectivamente. Los ingresos generados por la eventual comercialización de café y madera de las especies de sombra, son considerablemente menores al comparase con los ingresos potenciales obtenidos si se produjera café solo.

**Tabla 6.**

Ingresos totales (café y madera) obtenidos de los sistemas agroforestales y café a libre exposición solar. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Rubros	Sistemas			
	Café al sol	Café + Nogal	Café + Pino	Café + Eucalipto
Producción café (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s) <sup>1</sup>	12.867,8	7.330,0	10.187,2	10.256,5
Producción madera (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	0	102,3	115,8	139,4
Producción equivalente de café x madera (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s)	0	5.537,8	2.680,6	2.611,3
Ingreso por café (\$) <sup>3</sup>	102.942.400	58.640.000	81.497.600	82.052.000
Ingreso por madera (\$) <sup>4</sup>	0	3.580.500	3.474.000	4.182.000
Ingreso total (\$)	102.942.400	62.220.500	84.971.600	86.234.000

1. Acumulado de seis cosechas (1997 a 2002)

2. Para un turno de 7 años

3. Precio de 1,0 kg de café pergamino seco = \$ 8.000 (precios para Manizales, junio de 2010)

4. Precio de 1,0 m<sup>3</sup> de Nogal = \$ 35.000; pino y eucalipto = \$ 30.000

- **Finca La Suecia, Estación Experimental El Tambo (C).** (Más adelante se describen las condiciones de la Estación Experimental). La segunda observación se realizó en esta localidad, donde también se evaluó la producción de madera por parte de las especies forestales *Eucalyptus grandis*, *Pinus tecunumanii* y *Pinus chiapensis* en sistemas agroforestales con café. Las densidades de siembra fueron de 4.444 plantas/ha (1,5 m x 1,5 m) para el café y 278 plantas/ha (6,0 m x 6,0 m) para el sombrío.

**Ingresos totales (café y madera) obtenidos de los sistemas agroforestales y el café a libre exposición solar.** En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de estos sistemas. La producción de café fue significativamente mayor en el sistema de producción de café a libre exposición solar al compararse con las producciones obtenidas en los sistema agroforestales

(Farfán, 2010); las diferencias en producción fueron de 3.835 kg de c.p.s. con sombrío de eucalipto, 5.137 kg de c.p.s. con sombrío de *Pinus chiapensis* y 4.348 kg de c.p.s. con sombrío de *Pinus tecunumanii*. Los ingresos generados por la eventual comercialización de café y madera de las especies de sombra, son considerablemente menores al compararse con los ingresos potenciales obtenidos si se produjera café solo.

Las diferencias en producción y en ingresos reflejan la conveniencia de cultivar café a libre exposición solar en regiones donde por características climáticas y de suelos puede hacerse bajo estas condiciones; debido a que la producción y los ingresos generados por los sombríos con valor económico (en estos estudios de caso) no compensan las reducciones en producción y en ingresos dejados de percibir por el café.

**Tabla 7.**

Ingresos totales (café y madera) obtenidos de los sistemas agroforestales y el café a libre exposición solar- Finca La Suecia-Cauca.

Rubros	Sistemas			
	Café al sol	Café + Eucalipto	Café + <i>P. chiapensis</i>	Café + <i>P. tecunumanii</i>
Producción café (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s) <sup>1</sup>	9.254,1	5.418,8	4.116,7	4.906,0
Producción madera (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	0	210,6	141,8	150,9
Producción equivalente de café x madera (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s)	0	3.835,3	5.137,4	4.348,1
Ingreso por café (\$) <sup>3</sup>	74.032.800	43.350.400	32.933.600	39.248.000
Ingreso por madera (\$) <sup>4</sup>	0	6.480.000	4.254.000	4.527.000
Ingreso total (\$)	74.032.800	49.830.400	37.187.600	43.775.000

1. Acumulado de cuatro cosechas (2004 a 2007)

2. Para un turno de 7 años

3. Precio de 1,0 kg de café pergamino seco = \$ 8.000 (precios para Manizales, junio de 2010)

4. Precio de 1,0 m<sup>3</sup> de pino y eucalipto = \$ 30.000

Glover (1981), para densidades de siembra de 475 árboles/ha de *Cordia alliodora* reporta producciones en madera de 86,0 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, cuando los árboles alcanzaron 14,0 m de altura. Suárez y Somarriba (2002), en *Cordia alliodora* de 5 años, determinaron un volumen equivalente de 113 m<sup>3</sup> de madera por hectárea. Somarriba y Beer (1987), obtuvieron como volumen comercial de madera de *Cordia alliodora* (68 a 290 árboles/ha), en un turno de 34 años, de 191 a 442 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

Olschewski (2003), con 400 árboles/ha de *Eucalyptus* sp., obtuvo producciones de 215 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, en plantaciones de 30 años. Carneiro *et al.* (2008), registraron en *Eucalyptus globulus* (30 árboles), producciones en volumen de madera, de 229 a 265 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>. Beer *et al.* (1998), reportan



producciones de  $84 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , calculado para 7 años, de madera de *Cordia alliodora* (275 árboles/ha), y producciones de  $224 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (calculado para 7 años), de madera de *Eucalyptus grandis* (950 árboles/ha). Geldres *et al.* (2006), estimaron la biomasa total de una plantación de *Eucalyptus nitens* en una secuencia de edad de 4 a 7 años, y producciones de  $49 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de madera con 80 árboles/ha. Santelices (2005), con 1.667 árboles/ha de *Eucalyptus globulus* observaron que los crecimientos medios registrados fueron de 16,2 cm en DAP, 19,7 m en altura y  $28 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  por año ( $196 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , para 7 años). Pérez (2000) reporta que con 90 árboles de *Eucalyptus deglupta* por hectárea, pueden producir cerca de 1.000 pulgadas de madera bruta por árbol, a los 25 años de establecidos. Para *Pinus taeda*, Costas (2006) reporta un volumen de  $99,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , con una plantación original de 2.222 plantas/ha, sobre un suelo no compactado.

### 2.8.2 Producción de madera por plantas de café en SAF

La deforestación es el proceso por el cual la Tierra pierde sus bosques, por la intervención del hombre. El hombre en su búsqueda por satisfacer sus necesidades personales o comunitarias utiliza la madera para fabricar muchos productos o es usada como combustible o leña. De otro lado, las actividades económicas en el campo requieren de áreas para el ganado o para cultivar diferentes productos; esto ha generado una gran presión sobre los bosques. Día a día aumenta la presión sobre los bosques nativos, situación agravada por la colonización, los conflictos sociales y la falta de incentivos. En este sentido, se debe disponer de políticas para cumplir las necesidades madereras en éste y el próximo siglo; propósitos que deberán ir acompañados de grandes programas de conservación de los recursos naturales. Dentro de un ámbito no solo productivo sino ecológico, la producción de madera producto del zoqueo del café, puede contribuir, en gran parte, a la solución del problema.

- **Estación Central Naranjal.** (Más adelante se describen las condiciones de la Estación Experimental). En los años 1992 y 1994, Farfán (1994) realizó dos evaluaciones con el objetivo de conocer la producción maderera en plantaciones de café como un producto del zoqueo. La primera evaluación se realizó en una plantación de 7 años de edad, sembrada a una densidad de 2.666 plantas/ha, tomando una muestra de 712 tallos, la segunda evaluación se hizo en una plantación de 13 años de edad, sembrada a una densidad de 5.000 plantas/ha y el tamaño de la muestra fue de 352 tallos. En las dos observaciones se evaluó la producción de madera de café variedad Colombia. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Producción de madera en plantaciones de café variedad Colombia. Estación Central Naranjal. 1992–1994 (Fuente: Farfán, 1994).

Edad plantación (años)	Número de plantas	Peso fresco (kg)	Peso seco (kg)	Volumen fresco (m <sup>3</sup> )
7	712	4.167	2.428	4,48
	5.000*	29.263*	17.048*	31,50*
13	352	2.239	1.254	3,20
	5.000*	31.798*	17.807*	45,50*

\* Calculado por hectárea.

Del estudio el autor concluyó que los promedios de producción de madera fresca de cafetos plantados a 5.000 árboles/ha son de 38,5 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> o de 17,4 t.ha<sup>-1</sup> de madera seca. Si a estas producciones se substraen el 8,4%, que es el componente en corteza, se obtendría producciones en madera de 35,2 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> en peso fresco ó 16,0 t.ha<sup>-1</sup> en peso seco.

- Estación Experimental Paraguaito.** (Más adelante se describen las condiciones de la Estación Experimental). En 1994 y 2002 se evaluó el comportamiento de las especies forestales *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* como sombrío, y sus efectos en la producción del café. En 2003, cuando las plantas de café tenían 13 años, se realizó un análisis de la producción de madera; para cumplir con este propósito, se seleccionaron ocho parcelas, de 1.296 m<sup>2</sup> cada una; dos de ellas plantadas con café y sombrío de *Cordia alliodora* (nogal), otras dos con café y sombrío de *Pinus oocarpa* (pino), dos más con café y sombrío de *Eucalyptus grandis* (eucalipto) y las dos restantes con café a libre exposición solar. La distancia de siembra del café fue de 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha) y el sombrío a 6,0 m x 6,0 m (278 plantas/ha).

Para valorar la producción de madera, todos los árboles efectivos de café y de cada parcela (361 por parcela), fueron desramados y sus tallos cortados a nivel del piso y luego pesados para determinar su peso fresco en el campo. Aleatoriamente, se tomaron muestras de tallos de los tercios superior, medio e inferior, y posteriormente se llevaron al laboratorio para secarlas en una estufa a 80°C hasta obtener el peso seco constante. Posteriormente, con la relación peso seco y peso fresco obtenido en el campo, se estimó el peso seco total, por árbol y por hectárea. Las producciones medias de madera fueron de 18,4 t.ha<sup>-1</sup> para café a libre exposición solar, de 7,4 t.ha<sup>-1</sup> para café bajo sombrío de nogal y de 12,1 y 16,3 t.ha<sup>-1</sup> para café bajo sombrío de pino y eucalipto, respectivamente. Las diferencias en producción son atribuibles al nivel de sombrío dado por las especies forestales sobre el café.

### 2.8.3 Producción de leña de algunas especies arbóreas

Las plantaciones bajo sombra pueden proporcionar grandes cantidades de leña: 8,5 m<sup>3</sup> por hectárea al año, a partir de 635 árboles por hectárea para *Mimosa scabrella*, de 1.250 árboles por hectárea para *Inga densiflora* y de 330 árboles por hectárea para *Gliricidia sepium*. Las necesidades de leña de las familias justifican la presencia y el mantenimiento de estas especies leñosas en los cafetales. Ciertos árboles de sombra, como *Cordia alliodora* y *Cedrela odorata* suministran madera de construcción. Beer *et al.* (1998) estiman que en los países de América Central la producción comercial media de madera de *Cordia alliodora* varía de 4 a 15 m<sup>3</sup>.ha-año<sup>-1</sup>. Un rodal de 100 árboles de *Cedrela odorata* por hectárea, asociado al café, produce 4,0 m<sup>3</sup>.ha-año<sup>-1</sup>, lo que genera un beneficio equivalente al 10%-15% del valor de la cosecha de café. A la edad de aprovechamiento comercial, entre 15 y 20 años, los árboles producen una renta que supone dos o tres cosechas anuales de café (Bellefontaine *et al.*, 2002).

## 2.9 Otras razones para establecer árboles en las fincas

De acuerdo con Cárdenas y Salinas (2007), la FAO (2009) y World Resources Institute (2010):

- En los últimos 8.000 años, alrededor de la mitad de la cubierta forestal del mundo ha sido destruida; se pasó de unas 6.000 millones de hectáreas de bosques que cubrían el mundo a algo más de 3.000 millones en la actualidad.
- Entre 1990 y 1995 la pérdida neta de superficie de bosque ha sido de 56,3 millones de hectáreas. En los últimos años se han perdido 65,1 millones de hectáreas en los países en desarrollo y 8,8 millones en los países desarrollados. Entre las principales causas de la degradación forestal se destaca: La excesiva recolección de leña, el sobrepastoreo, los incendios, las malas prácticas y abuso en el aprovechamiento de la madera.
- Cada año se pierden en Colombia 598 mil hectáreas de bosques. La deforestación tiene afectado el 32% del territorio nacional. El 55% de la zona andina ha perdido 182.000 km<sup>2</sup> de vegetación boscosa. El departamento del Chocó ha perdido cerca del 40% de sus reservas. El Caribe y la Orinoquía han perdido el 30% y el 15%, respectivamente. La Amazonía colombiana ha perdido el 10% de sus zonas boscosas. Otras zonas afectadas son los ríos Magdalena y Chicamocha, el norte de la cordillera Central, en Antioquia, los bosques secos del Caribe, en Atlántico, Bolívar y Magdalena, la serranía del Perijá, y el Valle del río Cauca.
- Hay deforestación y degradación en zonas de montaña que poseen una cubierta forestal limitada, con entornos frágiles expuestos a la erosión de los suelos y otras formas de degradación; donde las comunidades pobres dependen mucho de los bosques para su alimentación, sus combustibles y sus ingresos. Esta destrucción tiene bajo amenaza a más

de 500 especies de plantas, muchas de las cuales no se les ha podido hacer un diagnóstico. De las 718 especies y subespecies vegetales que se pueden ver en Colombia, 255 están bajo algún grado de amenaza. Los árboles tienen una verdadera contribución a la provisión de servicios ambientales si la reforestación se promueve en conjunto con mejoras en otros componentes de la finca.

En las fincas cafeteras colombianas los árboles cumplen funciones ambientales, económicas y sociales, las que se resumen en las Figuras 17 y 18.



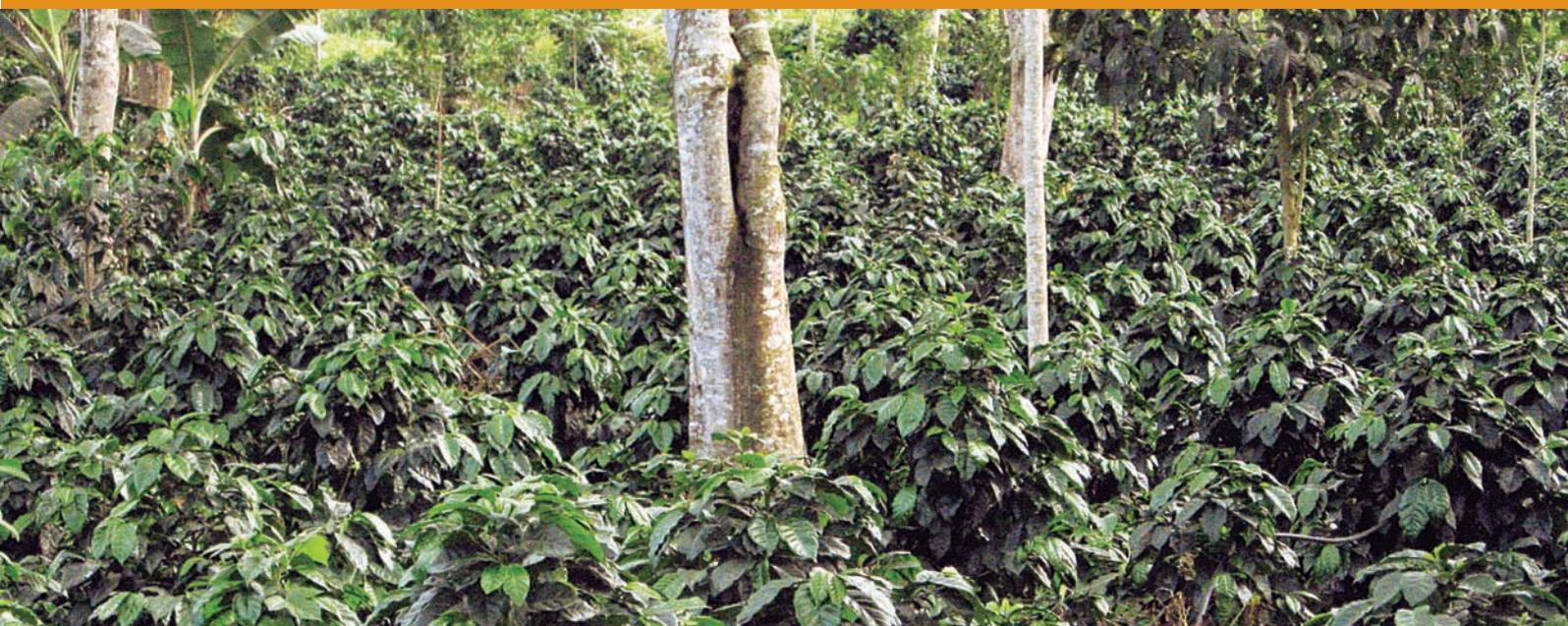
Figura 17.

Beneficios sociales de los árboles en las fincas cafeteras.



**Figura 18.**

Beneficios ambientales y económicos de los árboles en las fincas cafeteras.



# Factores modificadores de la interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) en Sistema Agroforestales (SAF) con café

# 3.

La energía solar constituye el principal factor determinante del clima. Cada día, América tropical recibe el sol directa y verticalmente en alguna parte de su extensión. El 30% de la radiación recibida en el borde superior de la atmósfera terrestre sobre el trópico se pierde por reflexión, principalmente debido a las nubes. La atmósfera absorbe casi el 30% de la radiación no reflejada; la cantidad perdida de este modo es mínima, cuando el sol está directamente perpendicular a la Tierra, y máxima, cuando el sol penetra la atmósfera en un ángulo más agudo. La radiación angular también es menos efectiva porque se difunde en un área más grande de la superficie terrestre. Estas pérdidas son mayores a medida que se va acortando el día y aumenta la distancia latitudinal con respecto a la posición del sol (Wadsworth, 1997).

La Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) es la franja del espectro electromagnético entre 400 y 700 nanómetros, utilizada para los procesos de la fotosíntesis y es un rango próximo a la radiación visible (Luz). Las principales características de la RFA que afectan el comportamiento biológico son la calidad (diferentes rangos de longitudes de onda que constituyen el espectro electromagnético), la irradiancia (cantidad de energía que incide en una superficie por unidad de tiempo) y la duración (tiempo de incidencia de la radiación solar) (Jaramillo, 2005). En la Tabla 9 se presentan algunos efectos que tiene la radiación solar sobre las plantas, en diferentes regiones del espectro.

Tabla 9.

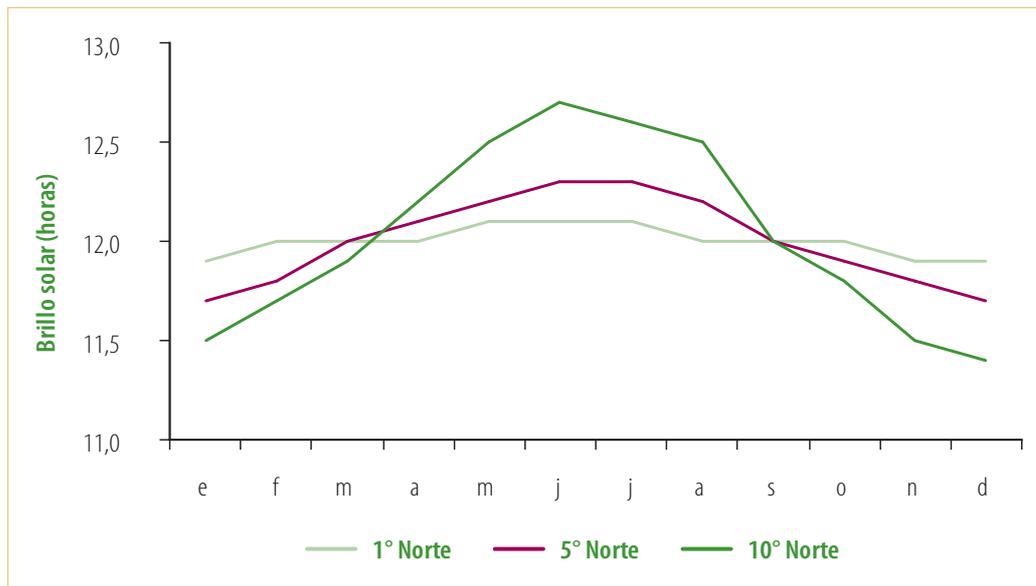
Radiación solar y su efecto sobre las plantas (Fuente: Casierra, 2007).

Tipo de radiación	Región del espectro (nm)	Radiación solar	Efectos de la radiación sobre la planta		
			Temperatura	Fotosíntesis	Desarrollo
Ultravioleta	290 – 380	0% – 4%	Insignificante	Insignificante	Significativo
RFA	380 – 710	21% – 46%	Significativo	Significativo	Significativo
Infrarrojo cercano	710 – 4.000	50% – 79%	Significativo	Insignificante	Significativo
Infrarrojo lejano	4.000 – 100.000	-	Significativo	Insignificante	Insignificante

La radiación solar disponible influye en numerosos procesos fisiológicos, morfológicos y reproductivos de plantas y animales, y afecta de forma significativa al funcionamiento del ecosistema. Sin embargo, la información sobre la luz disponible en los ecosistemas es escasa; dado que la gestión de los sistemas de producción bajo sombra es en buena medida la gestión de la luz y la comprensión de la luz como factor ecológico, tiene directas aplicaciones prácticas. La interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa por las plantas de café se ve afectada por factores como:

### 3.1 La latitud

La radiación solar sobre la superficie terrestre en los trópicos es mayor que en el trópico ecuatorial, debido a la presencia de una mayor cantidad de nubes cerca al Ecuador. La radiación solar a los 10° de latitud es 6% mayor que en el Ecuador, y a los 20° de latitud es casi 10% mayor. En el trópico, en general, cuánto más cerca se está del Ecuador, mayor es la nubosidad. El promedio mundial para las latitudes de 0° a 10° varía entre 52% a 56%. La cobertura nubosa es de 40% a 46% entre 10° y 20° y disminuye de 34% y 38% entre 20° y 30° (Wadsworth, 1997). El valor máximo de horas de brillo solar que llega al tope de la atmósfera entre la línea ecuatorial y los 12° de latitud Norte varía entre 11,3 h.día<sup>-1</sup> y 12,6 h.día<sup>-1</sup>, estos valores se reducen al llegar a la superficie terrestre, influidos por el ciclo diario de la nubosidad, la orientación y exposición de las laderas, y por la amplitud del horizonte (Jaramillo, 2005) (Figura 19).



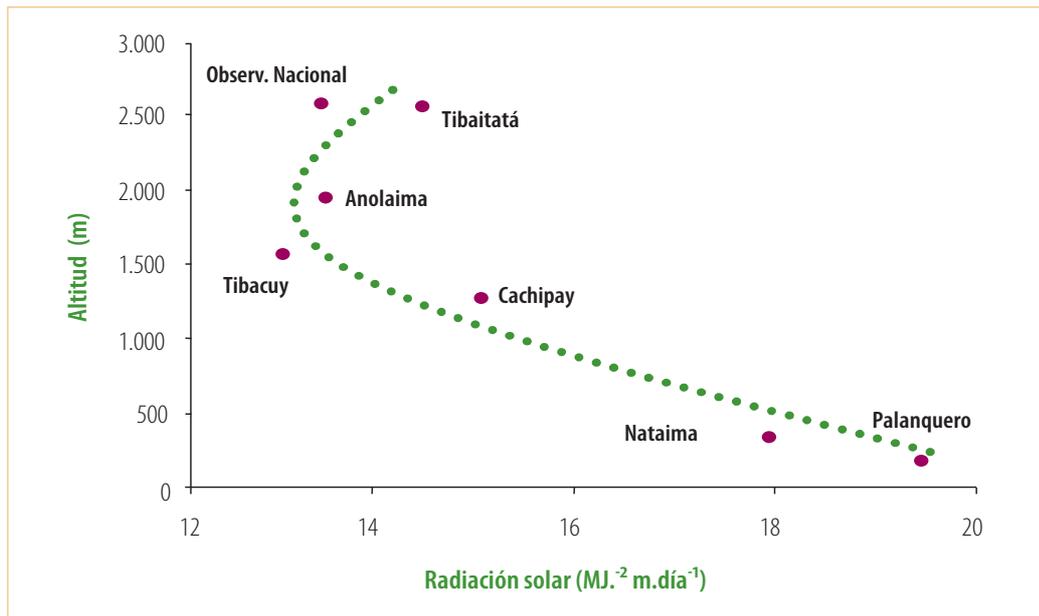
**Figura 19.**

Brillo solar (horas) astronómicamente posibles entre 1° y 10° de latitud Norte (Fuente: Jaramillo, 2005).

### 3.2 La altitud

La radiación global (radiación directa más radiación difusa) presenta modificaciones en sus cantidades diarias, debido a diversos factores, entre ellos la altitud. Este comportamiento se observa claramente en un transecto situado en la vertiente occidental de la cordillera Oriental (Figura 20), donde el máximo valor de la radiación solar se presenta a una altitud de 172 m (Palanquero-Cundinamarca) sobre el valle del río Magdalena ( $20,5 \text{ MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$ ). Desde este nivel hacia arriba se observa una disminución progresiva de la radiación hasta una altitud de 1.550 m (Tibacuy-Cundinamarca) donde se presenta un valor mínimo de  $13,8 \text{ MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$ . A partir de esta altitud se registra un aumento de la radiación hasta un valor de  $15,3 \text{ MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$  a 2.553 m (Tibaitatá-Cundinamarca). La región de disminución de la radiación solar se explicaría en parte por la presencia de la zona de neblina o bosques de niebla presentes en las laderas de la zona Andina (Jaramillo, 2005).

La temperatura del aire cambia con la altitud, a mayor altitud disminuye la densidad del aire, la presión atmosférica y la temperatura del aire. La variación de las temperaturas media, máxima media y mínima media con la altitud, para las diferentes regiones de Colombia, y la relación entre las temperaturas media ( $T_m$ ), máxima ( $T_{máx}$ ) y mínima ( $T_{mín}$ ) del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la altitud ( $A$ , m), para cuatro grandes regiones de Colombia, se presenta en las Tablas 10 y 11.



**Figura 20.**

Variación de la radiación solar con la altitud (Fuente: Jaramillo, 2005).

**Tabla 10.**

Relación entre la temperatura media del aire ( $T_m$ , °C) y la altitud ( $A$ , m) para diferentes regiones de Colombia (Jaramillo, 2005).

Región		Expresión	Rango Altitud (m)
Pacífica	< 3° N	$T_m = 26,97 - 0,0057 A$	2 - 1.181
	3° - 5° N	$T_m = 27,11 - 0,0059 A$	7 - 1.850
	5° - 8° N	$T_m = 27,08 - 0,0056 A$	2 - 1.790
Nudo de los Pastos Meseta de Popayán	1° - 2° N	$T_m = 29,45 - 0,0062 A$	880 - 3.087
Oriente Colombia (Amazonía y Orinoquía)	< 3° N	$T_m = 27,51 - 0,0062 A$	200 - 3.600
	3° - 5° N	$T_m = 27,37 - 0,0058 A$	150 - 2.500
	>5° N	$T_m = 27,35 - 0,0058 A$	120 - 4.000
Cuenca del valle del río Cauca	2° - 5° N	$T_m = 29,40 - 0,0061 A$	915 - 4.200
	5° - 7° N	$T_m = 29,38 - 0,0061 A$	120 - 4.400
Cuenca del valle del río Magdalena	3° - 4° N	$T_m = 29,56 - 0,0061 A$	231 - 4.482
	4° - 7° N	$T_m = 29,46 - 0,0061 A$	100 - 2.825
Región Cundinamarca y Boyacá	3° - 7° N	$T_m = 29,35 - 0,0061 A$	250 - 3.000
Región Atlántica	>7° N	$T_m = 27,72 - 0,0055 A$	2 - 4.000

**Tabla 11.**

Relación entre las temperaturas media ( $T_m$ ), máxima ( $T_{máx}$ ) y mínima ( $T_{mín}$ ) del aire (°C) y la altitud ( $A$ , m), para cuatro grandes regiones de Colombia (Chaves y Jaramillo, 1998).

Región	Número de Estaciones	Expresión	Altitud, m
Andina	626	$T_m = 29,42 - 0,0061 A$	100 - 4.482
	133	$T_{máx} = 33,97 - 0,0058 A$	
	133	$T_{mín} = 23,97 - 0,0059 A$	
Oriental Orinoquía Amazonía	91	$T_m = 27,37 - 0,0057 A$	120 - 4.000
	33	$T_{máx} = 32,13 - 0,0054 A$	
	33	$T_{mín} = 22,63 - 0,0059 A$	
Atlántica	239	$T_m = 27,72 - 0,0055 A$	2 - 4.000
	71	$T_{máx} = 33,06 - 0,0062 A$	
	71	$T_{mín} = 23,10 - 0,0061 A$	
Pacífica	46	$T_m = 27,05 - 0,0057 A$	2 - 1.850

Las expresiones anteriores permiten calcular con gran confiabilidad, para un lugar determinado, los valores anuales de las temperaturas media, máxima media y la mínima media, a partir de la altitud, para las cinco grandes regiones naturales de Colombia: Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquía y Amazonía.

En Colombia, para una misma altitud, la temperatura media del aire de las vertientes expuestas hacia las grandes llanuras (Atlántica, Pacífica, Llanos Orientales) es inferior a la registrada en los valles interandinos. Los gradientes de la temperatura del aire para la región Andina presentan un mayor valor ( $0,61^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) cuando se comparan con las regiones Atlántica, Pacífica, Orinoquía y Amazonía ( $0,55$  a  $0,58^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ). Los gradientes altitudinales por cada 100 metros para la temperatura media varían entre  $0,55$  y  $0,61^{\circ}\text{C}$ , para la temperatura máxima entre  $0,54$  y  $0,62^{\circ}\text{C}$  y para la temperatura mínima entre  $0,59$  y  $0,61^{\circ}\text{C}$ . Los cambios de la temperatura media con la altitud en las distintas vertientes de Colombia son menores en las laderas orientadas hacia las llanuras Caribe ( $1,1^{\circ}\text{C}$ ) y alcanzan los  $1,6^{\circ}\text{C}$  en las vertientes Amazónica y la Orinoquía y los  $1,9^{\circ}\text{C}$  en la región Pacífica (Chaves y Jaramillo, 1998).

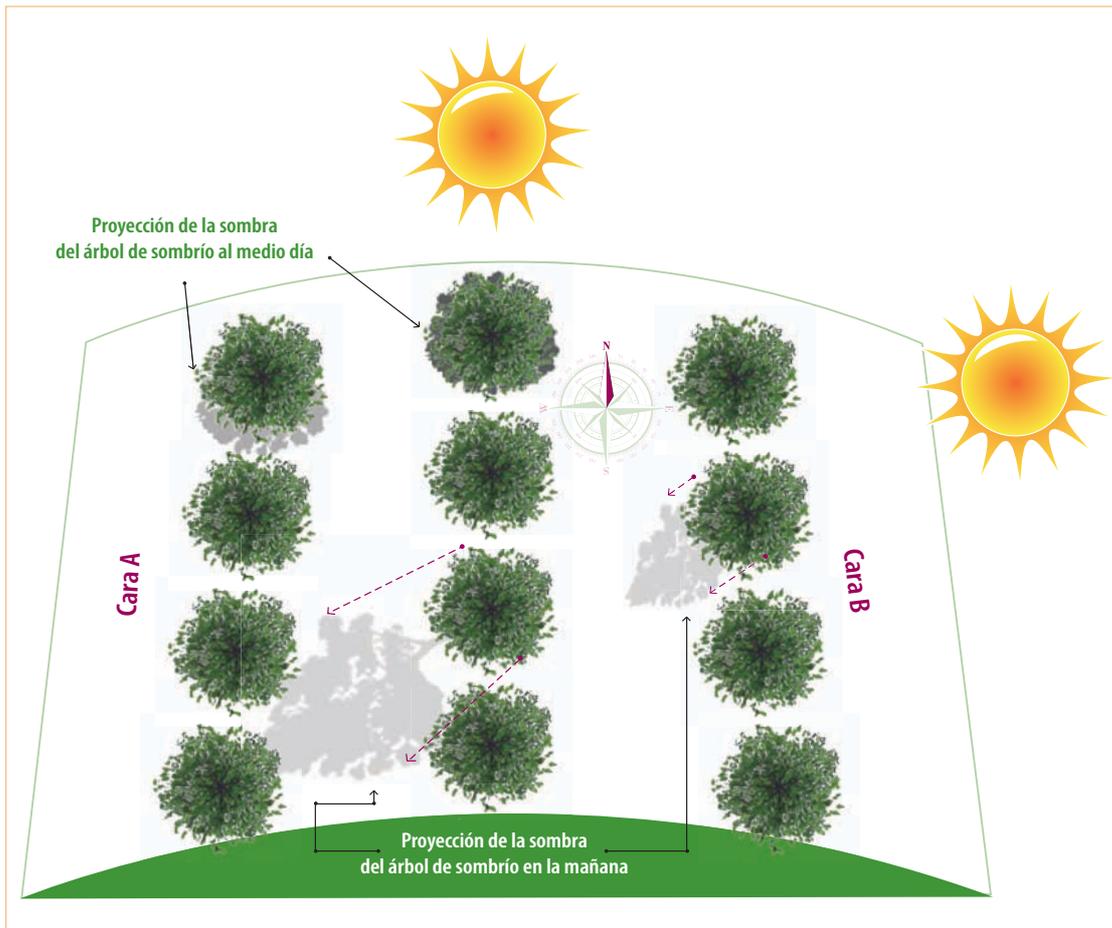
### 3.3 La orientación y dirección de la superficie que recibe la radiación

#### 3.3.1 Existencia de zonas sombreadas

La existencia de zonas con sombra es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante del clima local. En la Figura 21 se hace una representación esquemática del efecto de la posición del sol (línea roja punteada) sobre el área sombreada y la longitud de la sombra (área color gris) en una montaña. La longitud de la sombra será más grande (cara A de la montaña) cuando el sol se proyecta sobre la cara B de la misma, donde es mayor la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA). El área sombreada tiende a ser igual en ambas caras de la montaña cuando el sol está penetrando perpendicularmente, es decir, al medio día (Oyarzun *et al.*, 2007).

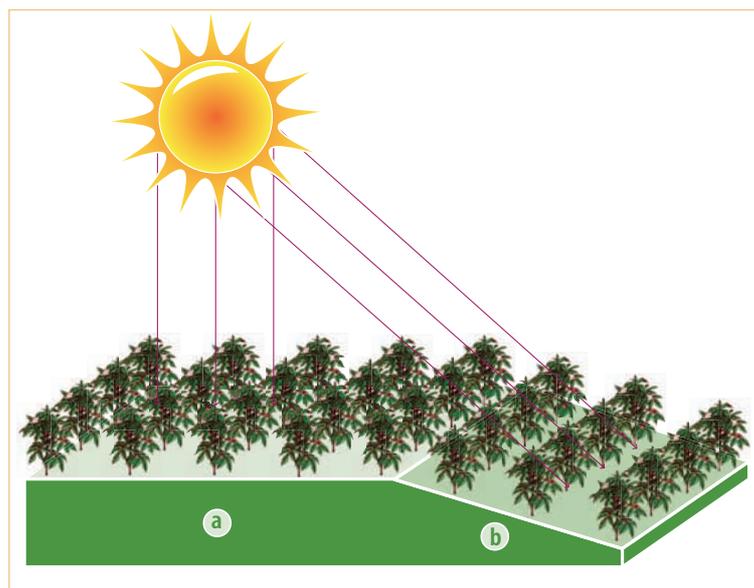
#### 3.3.2 Inclinación de los rayos solares

La inclinación con que los rayos solares inciden sobre la superficie que recibe la radiación o la intensidad calorífica recibida por la superficie del suelo, varía proporcionalmente, y dependiente de la inclinación del terreno y la perpendicular a la dirección de los rayos solares (Urbano, 1995), como se muestra en la Figura 22. Aquellas regiones de la Tierra en las que los rayos solares inciden de forma más perpendicular a la superficie, reciben mayor cantidad de energía por unidad de área (mayor irradiancia) y, por tanto, adquirirán mayor temperatura. Por el contrario, las zonas en las que la radiación solar incidente presenta mayor inclinación, tienen que repartir la misma cantidad de energía en un área mayor, calentándose en menor medida por unidad de superficie.



**Figura 21.**

Efecto de la posición del sol sobre la longitud de la sombra del árbol en un SAF con café.

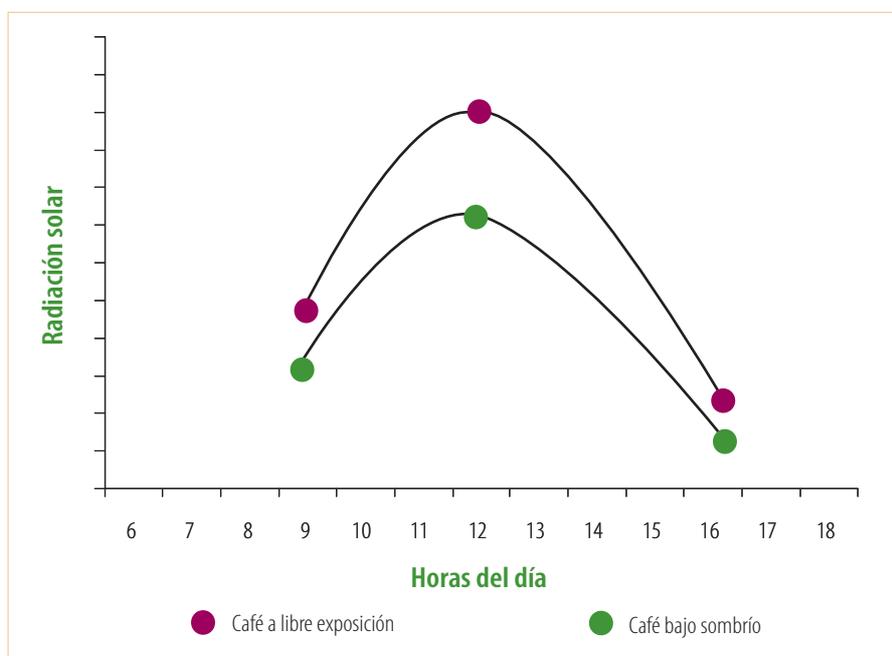


**Figura 22.**

Efecto de los rayos solares sobre el suelo.

### 3.4 La hora del día

El espesor de la capa atmosférica que debe atravesar la radiación solar para llegar a la superficie varía a lo largo del día por el movimiento de rotación, de manera que, mientras a primera hora de la mañana esta capa es gruesa, al mediodía (ángulo solar igual a 0°) el espesor es mínimo y, en consecuencia, la radiación solar recibida es máxima (Wadsworth, 1997; Vaast, 2009). Independiente del sistema de producción (libre exposición solar o bajo sombra), la máxima intensidad de la radiación se presenta entre las 11:00 y 13:00 horas; los valores menores de radiación solar se registran entre las 15:00 y 17:00 horas; y valores intermedios pueden registrarse entre las 8:00 y 10:00 horas (Figura 23).

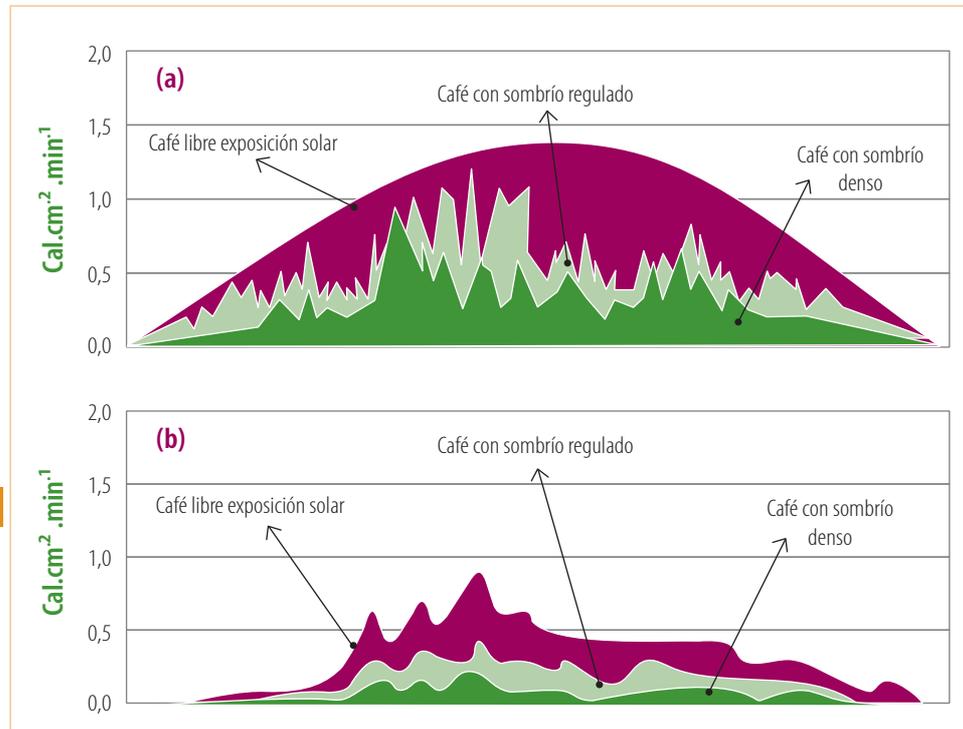


**Figura 23.** Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) en función de las horas del día.

### 3.5 Radiación directa y difusa

La dispersión y reflexión producen una desviación de los rayos solares dando lugar a la radiación difusa. A diferencia de ésta, la radiación directa no presenta tales alteraciones. En días totalmente nubados sólo se registra radiación difusa y en esta situación no se producen sombras, como sí ocurre con la radiación directa. En la Figura 24, en días completamente despejados se presenta la mayor incidencia de radiación y por consiguiente mayores irregularidades o altibajos en la radiación, causados por el sombrío, comparado con el café a libre exposición solar.

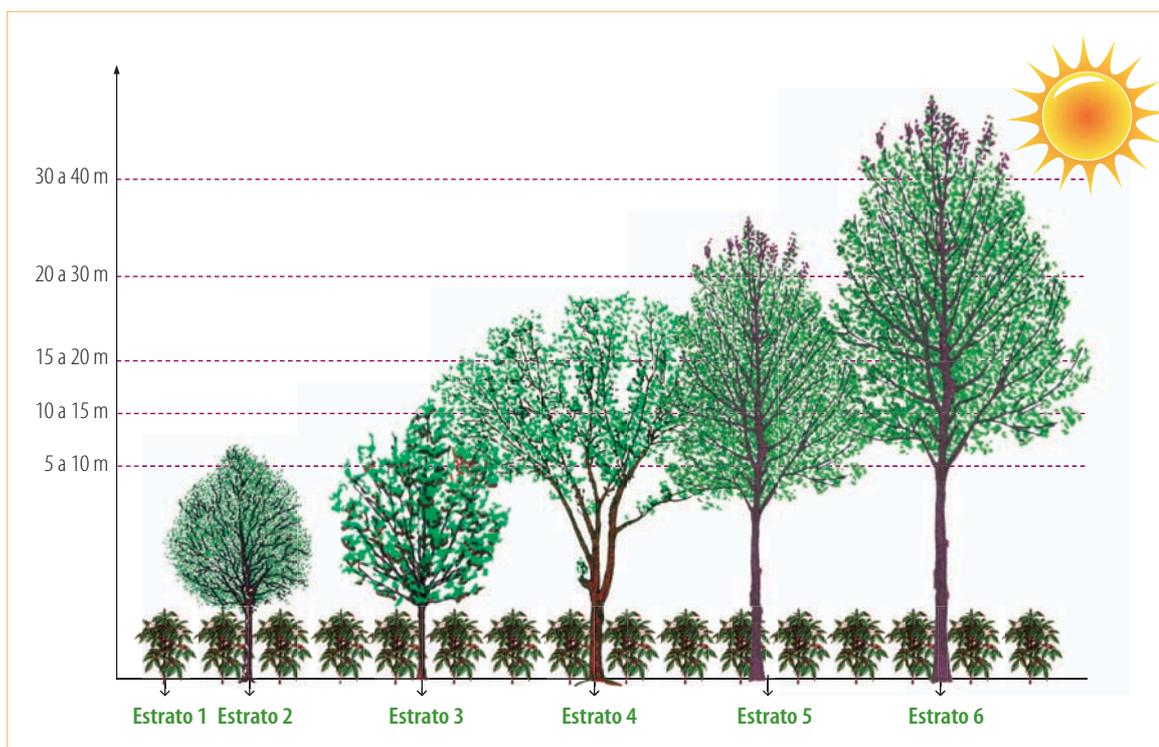
**Figura 24.** Efecto del sombrero (a) en días despejados y (b) en días nublados para las condiciones de Cenicafé (Fuente: Trojer, 1964).



En días completamente nublados (radiación difusa) la disminución en la radiación es proporcional a la densidad de siembra del sombrero; en este sentido la radiación recibida por el café depende principalmente del sombrero natural (nubosidad). Durante días de clima relativamente variable, fluctúa la radiación de acuerdo a la nubosidad. El sombrero intercepta más durante días despejados (radiación directa), los cuales constituyen una característica local por la orientación y la frecuencia de horas de sol (Trojer, 1964).

### 3.6 Estratificación del componente arbóreo

Los agroecosistemas estratificados, similares a bosques, son complejos tanto en sentido vertical como horizontal. Los árboles, los cultivos y las plantas acompañantes (arvenses) pueden ser estratificados verticalmente. La estratificación de las plantas se expresa mejor en términos de su altura en la madurez, pues en cualquier sitio la presencia de árboles inmaduros puede confundir la estratificación. En sistemas agroforestales con árboles tradicionales pueden identificarse cinco o más estratos debido a los doseles altos, la larga duración del crecimiento y la mayor intensidad de la luz solar, producto de un mayor ángulo medio de incidencia (Figura 25).



**Figura 25.**

Estratificación en un SAF con café y el componente arbóreo diverso.

Smith (1973), dentro de sus razones para explicar las ventajas de la estratificación, expone:

***Una selectividad intensificada y una interdependencia entre especies.***

***Uso óptimo de la luz,*** porque los estratos de hojas separados verticalmente por 50 a 70 veces el diámetro de las hojas superiores, permite que las plantas inferiores escapen de la sombra.

***Una mayor fotosíntesis,*** debido a que las aperturas entre los estratos hacen disponible una mayor cantidad de dióxido de carbono.

***Una mejor polinización o dispersión de semillas,*** porque se crean rutas aéreas seguidas por insectos, aves y murciélagos.

***Árboles emergentes aislados o en grupos*** producen una superficie irregular del dosel superior que contribuye a la ventilación de las copas y favorece el mayor tamaño de las hojas superiores, lo cual les permite capturar mayor cantidad de energía y agua, de lo que sería posible con doseles regulares.

No obstante, Peri (1999) plantea que en los sistemas agroforestales con más de una especie ocurre la competencia por los recursos como la humedad del suelo, los nutrimentos y la radiación solar. Cuando los rayos solares atraviesan las copas de los árboles, la cantidad de radiación para los estratos más bajos va siendo menor y su calidad es alterada debido a que las hojas preferentemente absorben la luz roja y la azul, dentro del rango espectral de los 400-700 nm (RFA), por tanto, la intensidad del sombrero en los sistemas agroforestales varía de acuerdo con la especie, la densidad de siembra, la edad, la altura, del arreglo espacial y estructura de las copas del componente arbóreo.

Las comunidades vegetales presentan un sistema de capas sucesivas de hojas parcialmente superpuestas y sombreadas unas con otras. La luz incidente es absorbida progresivamente al pasar a través de las capas (Jaramillo, 2005). En un bosque natural o plantado, con una densidad definida, el follaje superior de las copas de los árboles sirve como una activa barrera entre la atmósfera y el suelo, interceptando una proporción de la radiación solar. Parte de la radiación solar es reflejada hacia el espacio, otra parte es absorbida y el resto penetra a través de las copas y llega al suelo; esto es el reflejo de una mayor o menor utilización de la radiación solar por los diferentes estratos arbóreos, beneficiando a uno u otro, dependiendo del estado de desarrollo y del manejo del sistema de producción (Sotomayor y Silva, 2003).

### **3.7 Altura del árbol y diámetro de sus copas (dosel)**

La luz dentro de los bosques se reduce gradualmente, desde el dosel de los árboles hasta el nivel del suelo (Figura 26). La iluminación visible recibida a los 57 m sobre el nivel del suelo, en un bosque, se reduce al 30% a una altura de 40 m, 10% a 30 m, 5% a 20 m, 2% a 10 m y 0,5% a 1 m. En algunos bosques sólo el 1,5% de la luz plena del sol alcanza el sotobosque, mientras que en otros es el 1,4% (Wadsworth, 1997).

Otro estudio ha arrojado un máximo de 0,1% a mediodía, declinando a 0,05% hacia las 3:00 p.m. y 0,02% a las 4:00 p.m. Del 2% al 3% de los registros en bosques, entre el 5% y 6% reciben luz solar directa, del 25% al 44% luz solar reflejada, y del 50% al 70% luz solar fragmentada (Wadsworth, 1997). Debido a la distancia entre el dosel y el suelo, muchos de los claros del dosel son más pequeños que el diámetro aparente del sol, y por tanto, gran parte de la luz transmitida llega a zonas de penumbra, lo que produce una iluminación relativamente uniforme en el piso del bosque. La disminución de la intensidad de la luz provoca la supresión de árboles (Wadsworth, 1997).



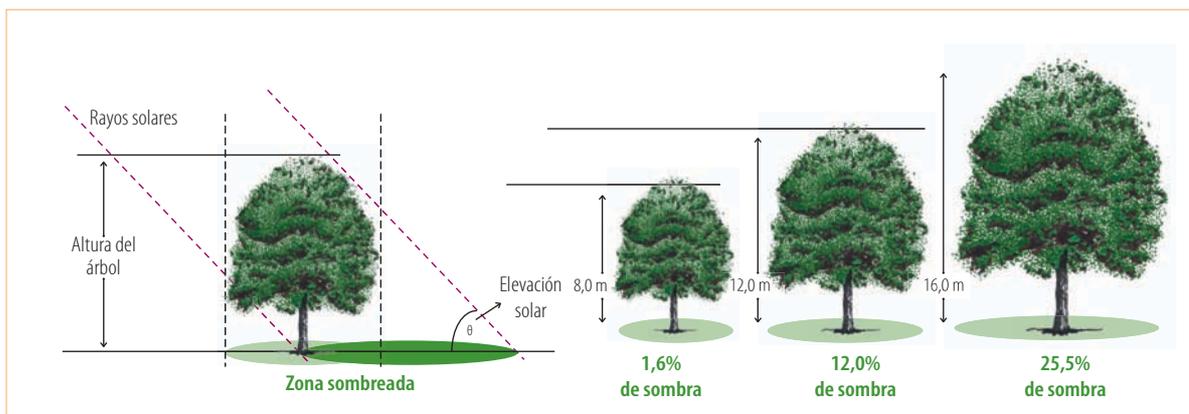


Figura 26.

Relación entre la altura del árbol, el diámetro del dosel y el porcentaje de área sombreada.

### 3.8 Distribución de la RFA a través del dosel de los árboles

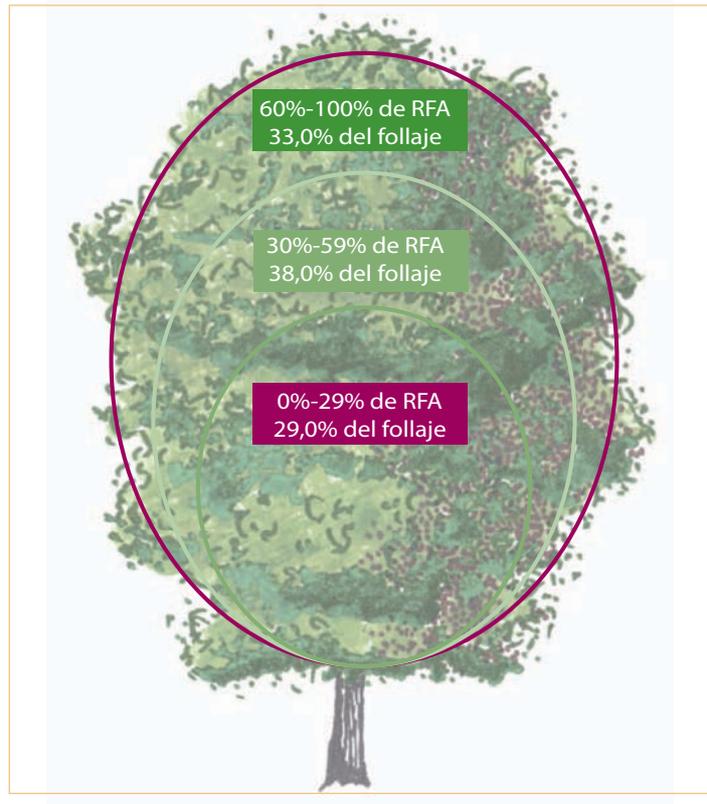
La estructura o el arreglo y forma que presenta la copa (dosel) define en gran medida el microclima dentro del árbol, es decir, regula la interceptación de la radiación solar, temperatura, humedad y movimiento del aire dentro de la misma. Éstos a su vez tienen un efecto directo sobre uno de los procesos más importantes del árbol como es la fotosíntesis. Al disminuir la penetración y distribución de la luz dentro de la copa, la actividad fotosintética disminuye provocando una escasa acumulación de reservas y, por ende, contribuye a una producción alternante (Orozco *et al.*, 2000). Dicha condición también ocasiona una deficiente penetración de la luz a lo largo y ancho del dosel del árbol, impidiendo su llegada al suelo o al cultivo principal en SAF.

El follaje que está expuesto completamente a la radiación, donde se encuentra cerca del 33,0% del área total, recibe entre el 60,0% y el 100,0% de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) que llega al dosel del árbol, y presenta una actividad fotosintética alta; el follaje que se encuentra al interior del dosel del árbol, que representa el 29,0% del área total, sólo recibe entre 0,0% y el 29,0% de la RFA incidente (García y Boccuzzo, 2006) (Figura 27). Estos últimos resultados indican que gran parte del follaje del árbol en lugar de trabajar produciendo carbohidratos, se encuentra como hojas parásitas, es decir, consumiendo estos azúcares (Orozco *et al.*, 2000); adicionalmente impidiendo la penetración de la luz al interior del SAF.

### 3.9 Densidad de la cubierta vegetal

Se expresa de diversas maneras: Biomasa total por unidad de volumen ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), porcentaje de áreas cubiertas por la vegetación y la concentración de clorofila ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), pero la mayor efectividad y significado es el Índice de Área Foliar (IAF), que se expresa como metro cuadrado ( $\text{m}^2$ ) de

superficie foliar por metro cuadrado ( $m^2$ ) de superficie de suelo. Además, es considerado como el mejor descriptor de la morfología o estructura del follaje o copas. Sus valores varían de 2 a 8  $m^2 \cdot m^{-2}$  dependiendo de diversos factores, habiéndose encontrado en plantas arbóreas valores superiores a 10, lo que sugiere una alta superposición de unas hojas (o estratos de hojas) sobre otras y una mayor reducción de las ventanas u orificios en el dosel (Loomis y Williams, 1969).



**Figura 27.**

Distribución de la RFA a través del dosel del árbol.

### 3.10 Patrón horizontal y vertical de hojas y ramas

La interceptación de la luz por una planta o comunidad vegetal no depende solo del IAF, sino de la organización horizontal y vertical de las hojas y ramas. La distribución horizontal puede ser uniforme (con patrones regulares o en forma de mosaico), al azar o distribución desordenada, o en forma de agregados. El patrón vertical está determinado por la distancia o separación vertical de las hojas o ramas; esta característica, junto con la densidad de hojas, tiene gran influencia en la interceptación de la luz y, por ende, en el régimen de iluminación en el estrato arbóreo (Loomis y Williams, 1969).

### 3.11 Ángulo y distribución azimutal de hojas y ramas

Las ramas y hojas de las plantas pueden presentar variaciones en el grado de inclinación, en relación con una línea de referencia perpendicular al suelo. En este sentido se pueden formar

ángulos agudos, medios o rectos. Estas variaciones introducen cambios en la interceptación de la energía luminosa, pero su importancia variará dependiendo del IAF. El patrón azimutal o inclinación preferente de hojas y ramas hacia uno o más puntos cardinales se hace evidente en plantaciones o siembras con marcos definidos, donde la orientación Norte-Sur contribuye a una mejor interceptación de la luz por el estrato arbóreo y menor para estratos inferiores. En árboles aislados la influencia del viento puede deformar las copas, y en sistemas agroforestales la competencia entre árboles por la luz, puede originar patrones en la distribución azimutal (Loomis y Williams, 1969).

### 3.12 Fenofases del árbol

Los cambios fenológicos (aparición de los diferentes estados de desarrollo de la planta) introducen un elemento adicional de complejidad en la alteración del régimen luminoso en los sistemas agroforestales, pues de hecho, provocan cambios en la densidad de la cubierta vegetal. El cambio más importante lo constituye la senescencia y caída de las hojas, sobre todo en plantas caducifolias como *Albizia lebeck*, que hace variar la proyección de sombra de 51,7% en el período lluvioso a 36,9% en el período seco, con valores más bajos en algunos meses (Loomis y Williams, 1969).

### 3.13 Otros factores que determinan el grado de interceptación de la RFA

- Arquitectura de la copa de los árboles y del cultivo.
- Heterogeneidad del componente arbóreo: Diversidad, dimensión y orientación.
- Tamaño de las hojas y duración del follaje.
- Índice de área foliar del componente arbóreo y del cultivo.
- Propiedades ópticas del follaje (estructura y edad de la hoja).
- Arreglo espacial, el manejo del árbol, de acuerdo a las características del sitio.
- Composición y transparencia de la atmósfera. El vapor de agua y el CO<sub>2</sub> atmosféricos debilitan las radiaciones térmicas, y las nubes, el polvo y el humo interceptan la radiación luminosa.

Todos estos factores motivan a que el valor instantáneo de la radiación solar recibida por la superficie del suelo o a la altura del dosel de los árboles, sea variable. En consecuencia, la energía total realmente recibida en el agroecosistema, procedente de la radiación solar, es bastante menor de la que potencialmente pudiera esperarse.



## *Manejo Integrado del Sistema Agroforestal con Café - MISA*

Las numerosas alternativas de prácticas agroforestales que se han establecido en diferentes zonas y regiones del país y bajo condiciones ecológicas, económicas y sociales muy diversas, han contribuido a realizar un adecuado uso racional de los recursos. En regiones con alto potencial climático y de suelos, es decir, bajo condiciones óptimas, el sistema de producción de café en monocultivo o a libre exposición solar es el sistema de producción recomendado. En zonas con condiciones ambientales (clima y suelo) contrastantes, en condiciones subóptimas, baja disponibilidad de recursos, entre otras, las prácticas agroforestales pueden tener un alto potencial.

La asociación del árbol con cultivos agrícolas proporcionan beneficios, ya que éstos interactúan entre sí cumpliendo objetivos adicionales como protección del cultivo en épocas secas o períodos de alta radiación solar y temperatura, protección del suelo en períodos de alta pluviosidad, mantenimiento productivo del cultivo en zonas donde se requiera cultivar bajo cubierta arbolada; lo cual conlleva a una productividad continuada y sostenible no solo del cultivo con valor económico, sino de todos los componentes involucrados en los sistemas agroforestales. Pero para el establecimiento de árboles en asocio con cultivos agrícolas, como el café, es preciso tener conocimiento de la densidad de siembra del café, su edad, su distribución espacial, programa de fertilización, el comportamiento y desarrollo del componente arbóreo a diferentes condiciones, comportamiento productivo del café con el asocio de árboles en diferentes regiones cafeteras, especies de árboles adecuadas para cada región específica, beneficios adicionales de los árboles en los sistemas, entre muchos otros, lo que en su conjunto se ha denominado Manejo Integrado del Sistema Agroforestal (MISA).

## Bases conceptuales para la construcción del MISA

En el sistema agroforestal con café las variaciones en la producción dependerán no solo del nivel de sombrero, incremento o reducción de la densidad de siembra de los árboles y su manejo, de la edad del cultivo, el número de plantas establecidas por hectárea, el nivel de fertilizante aplicado, el manejo fitosanitario y la calidad del grano, entre otros. El MISA propuesto tiene como objetivo la integración e interacción de prácticas de manejo del cultivo bajo cobertura arbórea, de manera que el caficultor posea una estrategia para incrementar y mantener la producción estable y sostenible.

- **Manejo.** Hace referencia a la acción de conducir algo hacia una meta apropiada. Esta conducción implica contar con destrezas y capacidades apropiadas para obtener los mejores resultados; cada tipo de manejo requiere habilidad o carácter específico. También se define como el conjunto de actividades de caracterización, planificación, aprovechamiento, regeneración, reposición y protección del cultivo, conducentes a asegurar una producción alta y constante (Bradley *et al.*, 2002).
- **Manejo Integrado.** Es un sistema de gestión que emplea insumos y recursos de manera controlada, para lograr una producción sostenida, estable y rentable, con el mínimo efecto ambiental negativo, pero con la suficiente flexibilidad para responder a los desafíos naturales y de mercado. Gestión es la comprensión y dirección eficaz de todos los componentes de un sistema, de modo que las necesidades y expectativas de todas las partes interesadas estén equitativamente satisfechas, con un mejor uso de los recursos (Dalling, 2007; Bradley *et al.*, 2002).
- **Manejo Integrado del Cultivo (MIC).** El MIC es un procedimiento holístico que incorpora actividades del plan general del manejo de la finca, el cual requiere de adaptaciones a las necesidades de los agricultores a medida que se aplica, su principal requisito es producir aumentos en la producción de manera sostenida (Hillocks, 2000).
- **Sistema de producción.** La eficiencia del proceso productivo se verá favorecida por la oportunidad y pertinencia de las prácticas de administración tales como control de arvenses, plagas y enfermedades, fertilización, buenas prácticas de cosecha y beneficio, entre otras. La interacción de estos factores y opciones tecnológicas constituye un sistema de producción (Arcila, 2007). Las variables densidad de siembra, número de jornales por hectárea y edad promedio de los cafetales, son factores determinantes de la productividad; y el costo de la tecnología de producción y la productividad son determinantes en la estructura del costo unitario (Duque y Bustamante, 2002).

Son diversas las formas de obtener la producción, entre las que se destacan: La producción elemental, la producción actual, la producción económica, la producción alcanzable y la producción teórica o potencial. Así mismo, los mejores indicadores de la productividad son la

variedad, la densidad de siembra, la edad, el manejo (control de arvenses, plagas, enfermedades y la fertilización), el suelo (condiciones físicas y fertilidad) y el clima (luz, temperatura y agua) en cada región (Arcila, 1990).

## Componentes del MISA

El MISA propuesto tiene su estructura dentro de cinco grandes componentes (Figura 28).



**Figura 28.**

Componentes del Manejo Integrado del Sistema Agroforestal – MISA.

- 1. Sostenibilidad de la caficultura.** Este componente está alineado con la estrategia para la sostenibilidad de la caficultura, la cual propone recuperar, estabilizar y aumentar la producción de los cafetales con sostenibilidad y calidad (FNC, 2011).
- 2. Diagnóstico del sistema agroforestal.** Es el acopio y análisis de información biofísica, socioeconómica, productiva, cultural y familiar, donde se desarrolla el sistema agroforestal y sus componentes. El diagnóstico puede hacerse a diferentes escalas: Lote, finca, vereda y región, entre otros.
- 3. Identificación de estrategias.** Definición de diferentes prácticas agronómicas que se aplicarán al SAF y que contribuyan al cumplimiento del objetivo propuesto dentro del primer componente.

4. **Disponibilidad de recursos.** Grado en que se cuenta con los recursos económicos, humanos, materiales, naturales y de información, necesarios para el máximo desempeño del SAF.
5. **Definición de indicadores.** Diseñar un sistema de indicadores que cubra las dimensiones ambiental, social, económica e institucional, para valorar el desempeño del SAF y hacer ajustes en prácticas durante su desarrollo.

Los componentes del MISA fueron obtenidos de resultados de investigaciones que en Cenicafé se han desarrollado, en diferentes períodos de producción del café, diversos arreglos espaciales y en diversas localidades de las zonas cafeteras colombianas, entre otros.

## Descripción de los sitios de estudio

Cenicafé, es el Centro Nacional de Investigaciones de Café, creado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia en 1938; desde su surgimiento las investigaciones se han desarrollado en el campo, para lo cual el Centro cuenta con ocho Estaciones Experimentales en todo el país. Las investigaciones en sistemas agroforestales con café se han desarrollado en las localidades que se describen seguidamente.

- **Estación Central Naranjal.** Situada en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	04°58' Norte	pH	5,2
Longitud	75°39' Oeste	Materia orgánica (%)	13,3
Altitud (m)	1.381	Nitrógeno (%)	0,51
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	3,0
Temperatura media (°C)	20,6	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,98
Temperatura máxima (°C)	26,8	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	4,3
Temperatura mínima (°C)	16,2	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,9
Precipitación (mm)	2.782	Ecotopo	206A
Brillo solar (horas año)	1.763	Unidad cartográfica	Consociación Chinchiná
Humedad relativa (%)	80,0	Grupo taxonómico	Hapludands
		Material parental	Cenizas volcánicas

- **Estación Experimental Paraguaito.** Situada en el municipio de Buenavista, departamento del Quindío. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	04° 24' Norte	pH	5,7
Longitud	75° 44' Oeste	Materia Orgánica (%)	6,7
Altitud (m)	1.250	Nitrógeno (%)	0,28
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,5
Temperatura media (°C)	21,6	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,78
Temperatura máxima (°C)	28,1	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	2,90
Temperatura mínima (°C)	16,9	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,08
Precipitación (mm)	2.120	Ecotopo	211A
Brillo solar (horas año)	1.800	Unidad cartográfica	Consociación Montenegro
Humedad relativa (%)	78,0	Grupo taxonómico	Typic Hapludands
		Material parental	Cenizas Volcánicas

- **Estación Experimental Pueblo Bello.** Ubicada en el municipio de Pueblo Bello, departamento del Cesar. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	10°25' Norte	pH	5,1
Longitud	73°34' Oeste	Materia Orgánica (%)	7,1
Altitud (m)	1.100	Nitrógeno (%)	0,29
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,0
Temperatura media (°C)	20,7	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,2
Temperatura máxima (°C)	21,1	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	7,0
Temperatura mínima (°C)	15,4	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	2,1
Precipitación (mm)	2.052	Ecotopo	402A
Brillo solar (horas año)	2.380	Unidad cartográfica	Asociación El Palmor
Humedad relativa (%)	74,0	Grupo taxonómico	Dystropepts
		Material parental	Diabasa

- Estación Experimental El Tambo.** Localizada en el municipio de El Tambo, departamento del Cauca. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	02° 24' Norte	pH	5,3
Longitud	76° 44' Oeste	Materia Orgánica (%)	22,8
Altitud (m)	1.735	Nitrógeno (%)	0,75
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,0
Temperatura media (°C)	18,1	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,17
Temperatura máxima (°C)	24,0	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,6
Temperatura mínima (°C)	14,1	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,4
Precipitación (mm)	1.990	Ecotopo	218A
Brillo solar (horas año)	1.777	Unidad cartográfica	Unidad Timbío
Humedad relativa (%)	80,0	Grupo taxonómico	Typic Melanudands
		Material parental	Cenizas volcánicas

- Estación Experimental La Catalina.** Situada en el municipio de Pereira, departamento del Risaralda. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	04° 45' N	pH	5,2
Longitud	73° 03' W	Materia Orgánica (%)	9,0
Altitud (m)	1.321	Nitrógeno (%)	0,37
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,0
Temperatura media (°C)	23,0	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,29
Temperatura máxima (°C)	29,8	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	4,1
Temperatura mínima (°C)	17,5	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,5
Precipitación (mm)	2.202	Ecotopo	209 A
Brillo solar (horas año)	1.640	Unidad cartográfica	Chinchiná
Humedad relativa (%)	73,4	Grupo taxonómico	
		Material parental	Cenizas volcánicas

- **Finca El Roble.** Localizada en el municipio Mesa de los Santos, departamento de Santander y bajo coordinación de la Estación Experimental de Santander. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	06° 52' Norte	pH	5,3
Longitud	73° 03' Oeste	Materia Orgánica (%)	22,8
Altitud (m)	1.646	Nitrógeno (%)	0,75
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,0
Temperatura media (°C)	19,7	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,17
Temperatura máxima (°C)	27,1	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,6
Temperatura mínima (°C)	13,1	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,4
Precipitación (mm)	1.006	Ecotopo	218A
Brillo solar (horas año)	1.996	Unidad cartográfica	Unidad Timbio
Humedad relativa (%)	80,0	Grupo taxonómico	Typic Melanudands
		Material parental	Cenizas Volcánicas

- **Finca La Suecia.** Ubicada en el municipio de El Tambo, departamento del Cauca, y bajo la coordinación de la Estación Experimental El Tambo. La ubicación geográfica y las características climáticas y de suelos, son:

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	02° 29' Norte	pH	5,0
Longitud	76° 50' Oeste	Materia Orgánica (%)	16,2
Altitud (m)	1.693	Nitrógeno (%)	0,6
Características climáticas		Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,0
Temperatura media (°C)	19,6	Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,20
Temperatura máxima (°C)	24,2	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,5
Temperatura mínima (°C)	14,0	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,3
Precipitación (mm)	2.275	Ecotopo	112B
Brillo solar (horas año)	1.545	Unidad cartográfica	
Humedad relativa (%)	78,2	Grupo taxonómico	Melanudands
		Material parental	Cenizas volcánicas

El manejo del sistema agroforestal se describirá secuencialmente por cada componente.

# Primer Componente - Sostenibilidad de la caficultura

1.

Como estrategia para la sostenibilidad de la caficultura colombiana (FNC, 2011), con la que se pretende recuperar, estabilizar y aumentar la producción y la productividad de los cafetales, con sostenibilidad y calidad, se propone:

*“Uso de densidades y arreglos del cultivo en función del tipo de variedad, sombrío y del potencial de crecimiento y producción de cada zona cafetera”.*

*“Manejo del sombrío, para incrementar la productividad sin poner en riesgo las plantaciones de café”.*

Entre las prácticas recomendadas con el propósito de incrementar y mantener la producción de café de una manera estable y sostenible, se mencionan: La utilización de semilla certificada, la producción de colinos de café en la finca, la siembra de un número adecuado de plantas por hectárea, el manejo integrado de arvenses, la fertilización con base en el análisis de suelos, el manejo integrado de la broca del café, la renovación de cafetales y el adecuado manejo de la sombra, entre otros. El manejo del componente arbóreo, dentro del MISA, es una práctica más con la que se persigue: (1) Fomentar el desarrollo del árbol en sus primeros años de vida; (2) Formar bien el árbol, procurando que las ramas se desarrollen y distribuyan convenientemente; y (3) Permitir la penetración y distribución conveniente de la luz en todo el cultivo (FNC, 1958).

Para el primer componente del MISA se analizaron y se describieron tres sistemas de producción y manejo del café en sistemas agroforestales, los cuales van desde un sistema de producción “tradicional” hasta uno “tecnificado” (Tabla 12).

## 1.1 Recuperación y aumento de la producción

### 1.1.1 Sistema 1

En sistemas de producción de café de más de 8 años de edad, con bajas densidades de siembra, sombrío en altas densidades (278 árboles/ha), altos porcentajes de sombra o sombrío homogéneo, y dosis de fertilizante aplicado entre el 0,0% y el 25,0% de la recomendación del análisis de suelos,

**Tabla 12.**

Producción de café en sistemas agroforestales.

Variables	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Edad del café	> 8 años	6 a 7 años	5 a 6 años
Densidad siembra del café	2.500 – 3.000 plantas/ha	3.500 – 4.000 plantas/ha	4.500 a 5.000 plantas/ha
Densidad siembra del sombrío	278 árboles/ha (6,0 m x 6,0 m)	123 árboles/ha (9,0 m x 9,0 m)	70 árboles/ha (12,0 m x 12,0 m)
Porcentaje de sombrío	>45,0%	≤45,0% >35,0%	≤35,0% >25,0%
Dosis de fertilizante	0,0% - 25,0% DRAS*	25,0% - 50,0% DRAS	75,0% DRAS
Calidad (almendra sana)	75,0%	77,0%	79,0%

DRAS: Dosis recomendada en los resultados de los análisis de suelos

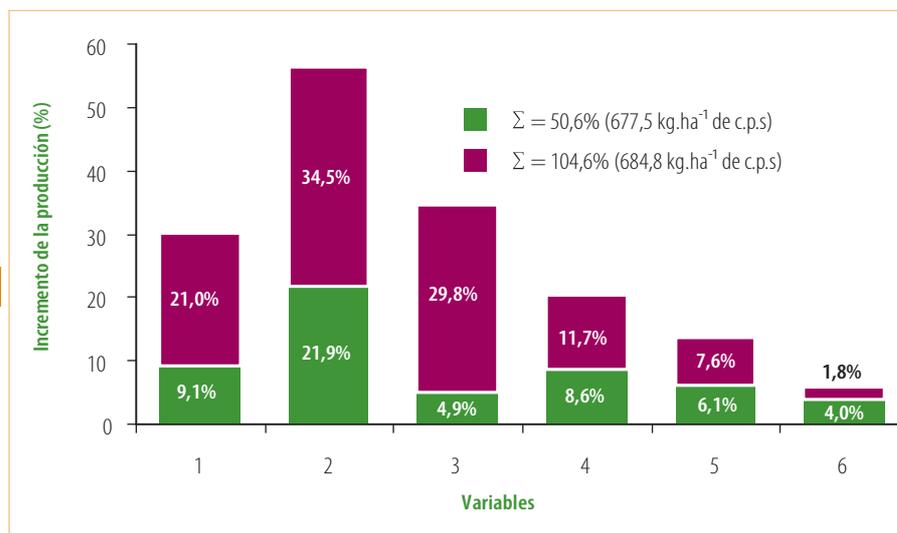
debido a que con altos porcentajes de sombrío el café no responde a la aplicación de fertilizante (Farfán y Mestre, 2004), pueden obtenerse en promedio producciones de **653,8 kg** de café pergamino seco por hectárea.

### 1.1.2 Sistema 2

**Edad del café.** Cuando la renovación del café se realiza después de recolectada la quinta cosecha, entre los 6 y 7 años de establecido el cafetal, se obtendrá un incremento en la producción del 21,0% (137,0 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.) (Figura 29).

**Figura 29.**

Incremento porcentual de la producción, como respuesta del café a la aplicación de prácticas de manejo en SAF.



1. Edad del café - 2. Densidad de siembra del café - 3. Densidad de siembra del sombrío - 4. Porcentaje de sombra  
5. Dosis de fertilizante - 6. Estrategias complementarias

**Densidad de siembra del café.** Si posterior a la renovación del café, por siembras nuevas o por zoqueo, se incrementa la densidad de siembra hasta 3.500 ó 4.000 plantas/ha, se puede aumentar la producción en 34,5% (226 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.).

**Densidad de siembra y porcentaje de sombrío.** El raleo de los arbolés de sombrío de 278 a 123 árboles/ha, contribuye a aumentar la producción de café en un 29,8% (195 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.). Además, si simultáneamente se regula el sombrío al 35,0%-45,0%, dado por los árboles restantes, se obtendría un incremento en producción del 11,7% adicional (76,3 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.).

**Fertilización.** Bajo estas condiciones de sombrío (densidad y porcentaje), se aplica entre el 25,0% y 50,0% de la dosis del fertilizante recomendado en el análisis de suelos, se incrementaría la producción en 7,6% (50 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.).

**Producción.** En conjunto, estas prácticas permitirán obtener un incremento del 104,6% en la producción (Figura 29), es decir, 684 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s., con un promedio de la producción del sistema de 1.338 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.

### 1.1.3 Sistema 3

**Edad del café.** Tomando como punto de partida el Sistema 2, si la renovación del café se realiza posterior a la recolección de la cuarta cosecha, entre los 5 y 6 años de establecido el cafetal, se podría obtener un incremento en la producción del 9,1% (122 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.) (Figura 29).

**Densidad de siembra del café.** Si posterior a la renovación, se incrementa la densidad de siembra del café hasta 4.500 ó 5.000 plantas/ha, la producción se verá incrementada en 21,9% (293 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.).

**Densidad de siembra y porcentaje de sombrío.** Modificar la distribución espacial de los árboles de sombrío mediante raleos, de 123 a 70 árboles/ha, aumenta la producción en un 4,9% (66 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.). Adicionalmente, si se regula el sombrío permitiendo una entrada de luz entre el 65,0% y el 75,0%, se obtendrá un incremento en producción de 8,6% adicional (115 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.).

**Fertilización.** Si bajo la aplicación de estas prácticas de manejo se aplica el 75,0% de la dosis del fertilizante recomendado en el análisis de suelos, se incrementará la producción en 6,1% (82 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.).

**Producción.** Estas practicas en conjunto permitirán obtener un incremento en la producción del 50,6% (Figura 29), es decir, 678 kg de café pergamino seco por hectárea; con este grado de

tecnificación como respuesta al manejo, potencialmente se producirán en promedio 2.699 kg de café pergamino seco por hectárea<sup>5</sup>.

#### 1.1.4 *Análisis de calidad del café*

**En el Sistema 1.** Se asume que el caficultor comercializa el café en Cooperativa, con un contenido del 75,0% en peso de almendra sana como porcentaje base, pagado a \$ 71.900 por arroba (12,5 kg) de café pergamino seco<sup>6</sup>.

**En el Sistema 2.** Adicional a las prácticas de manejo recomendadas, si el caficultor realiza un Manejo Integrado de la Broca del café (MIB) eficiente (Bustillo, 1991), y adopta las buenas prácticas en el beneficio del café (Puerta, 2006), puede llegar a comercializar el café obtenido por el incremento en producción (683,8 kg de c.p.s) con un porcentaje de almendra sana del 77,0%, con un incentivo de calidad por 12,5 kg de c.p.s de \$ 1.347. En términos equivalentes a producción, este sobreprecio significaría un incremento en la producción de 1,8% (11,3 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.) (Figura 29).

**En el Sistema 3.** Con el manejo anterior, se puede llegar a comercializar el café obtenido por el incremento en producción (677,5 kg de c.p.s) con un porcentaje de almendra sana del 79,0% y con un incentivo de calidad por 12,5 kg de c.p.s de \$ 2.765. En términos equivalentes a producción, este sobreprecio representaría incrementar el 4,0% de la producción (26,3 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.) (Figura 29).

---

<sup>5</sup> Información obtenida de resultados experimentales

<sup>6</sup> FNC-Prensa. Precio para el recibo del café a las Cooperativas de Caficultores en las bodegas de Almacafé. Abril 05 / 2012

# Segundo Componente - Diagnóstico y Diseño del Sistema Agroforestal

## 2.

### 2.1 Principios de Diagnóstico y Diseño (D&D) de sistemas agroforestales

#### 2.1.1 *Diagnóstico y Diseño (D&D)*

El D&D es una metodología multidisciplinaria para la planeación del desarrollo agroforestal. Igualmente, es un procedimiento para describir y analizar los sistemas actuales de uso de la tierra, con el propósito de identificar las restricciones de la producción y sus factores causales, así como para el diseño de tecnologías agroforestales apropiadas para resolver problemas de producción y establecer programas de investigación y desarrollo (Gutiérrez y Fierro, 2006). El D&D es un mecanismo para el manejo de problemas del suelo, con el fin de diseñar soluciones agroforestales. Son métodos flexibles y rápidos, adaptados a las necesidades y recursos de diferentes usuarios; en términos generales, es un proceso de aprendizaje y ajuste constante en el terreno (Raintree, 1987).

Uno de los principios fundamentales de la metodología D&D se basa en una analogía con la medicina, es decir, se diagnostica para prescribir el tratamiento. Esto significa que la investigación debe ir orientada al desarrollo de nuevas tecnologías de administración de las tierras, teniendo en cuenta las necesidades y el potencial real de los sistemas para la utilización del suelo. Los procedimientos del diagnóstico se realizan para asegurar que el proyecto emprendido está orientado o va en la dirección correcta desde su inicio y acorde con las necesidades de la zona (Raintree y Young, 1983).

#### 2.1.2 *¿Qué es el diagnóstico?*

Es el acopio y análisis de información biofísica, socioeconómica, productiva, cultural y familiar de los sistemas agroforestales y sus componentes, para comprender el funcionamiento en

la complejidad de su composición, arreglos, manejo y productos (Gutiérrez y Fierro, 2006). La información para el diagnóstico responde a las siguientes preguntas:

- ¿Qué existe en la finca? Usos del suelo, factores determinantes de la productividad como fertilidad del suelo, pendiente del terreno, sistemas agroforestales actuales y sus componentes.
- ¿Cuál es el conocimiento del productor acerca del establecimiento, productividad, manejo, usos y aprovechamiento del SAF y sus componentes?
- ¿Cuáles son las limitantes, potencialidades y proyecciones relacionadas con el sistema agroforestal?

### 2.1.3 ¿Qué es el diseño?

Es la exploración y definición de las alternativas de solución o innovación tecnológica, que va a ser aplicada por el productor para mejorar el desempeño del sistema agroforestal (Gutiérrez y Fierro, 2006). Para el diseño y establecimiento de agrosistemas de producción sostenible, es necesario considerar las características de diversidad, estructura y función de los ecosistemas naturales que existieron originalmente en la localidad. También se deben tener en cuenta las condiciones socio-económicas de la zona (Ramos *et al.*, 2010).

Existe información básica suficiente sobre recursos naturales y sobre la estructura y función de los ecosistemas como para establecer algunos principios para el manejo de estos recursos. Es así como la variabilidad de los ecosistemas naturales y sus procesos sucesionales pueden ser usados como modelos para el diseño de sistemas agroforestales de producción múltiple y sostenida. También la estructura y función del ecosistema natural, sus ciclos de agua y nutrientes, que pueden ser imitados en el diseño de agroecosistemas. Muchos de los sistemas agrícolas tradicionales pueden ser considerados como modelos para el diseño de sistemas opcionales. Además, prácticamente son los únicos sistemas de producción que conservan una alta diversidad biológica y hacen uso sostenible de los recursos naturales en forma exitosa (Ramos *et al.*, 2010).

### 2.1.4 Objetivos del D&D

El objetivo fundamental del D&D es promover la adopción de la agroforestería para mejorar el desempeño de los sistemas de uso de la tierra, de acuerdo con los criterios de optimización de beneficio de los agricultores (Gutiérrez y Fierro, 2006).

El D&D tiene el propósito de:

- Describir y analizar los sistemas actuales de uso de la tierra, con el fin de diagnosticar sus restricciones y factores causales.

- Diseñar y analizar tecnologías agroforestales apropiadas para resolver aquellas restricciones o para explorar las oportunidades y potencialidades para su mejoramiento.
- Identificar las demandas y las oportunidades de investigación y desarrollo agroforestal.
- Diseñar programas de entrenamiento, extensión e investigación para el desarrollo de opciones tecnológicas.

### 2.1.5 Estructura del D&D

Básicamente el D&D comprende el diagnóstico biofísico y el agroforestal. El objetivo del diagnóstico biofísico es identificar las oportunidades, limitaciones, ventajas y desventajas de la agroforestería en la finca, éste puede abarcar:

- La finca se visualiza en superficies (por ejemplo, número de hectáreas dedicadas a cultivos, potreros, áreas no productivas, entre otros) y líneas.
- Se mapean los sitios especiales de la finca tales como las áreas de fuertes pendientes, cauces y drenajes naturales, variaciones notorias en suelos, sitios fuertemente erosionados, zonas expuestas al viento, zonas de protección, etc.
- Se reconstruye la historia de uso de la tierra, especialmente en las áreas con poblaciones maderables importantes.
- Se listan las principales oportunidades y limitaciones de la finca y de su entorno ambiental.

El diagnóstico biofísico se inicia dibujando un mapa de la finca (destacando linderos y colindancias con vecinos, divisiones internas de la finca, caminos, ríos, etc.), estimando la superficie bajo cada uso de la tierra y asignándoles prioridades según la visión del agricultor. Este mapa se verifica y se completa recorriendo toda la finca (linderos externos, caminos y divisiones internas).

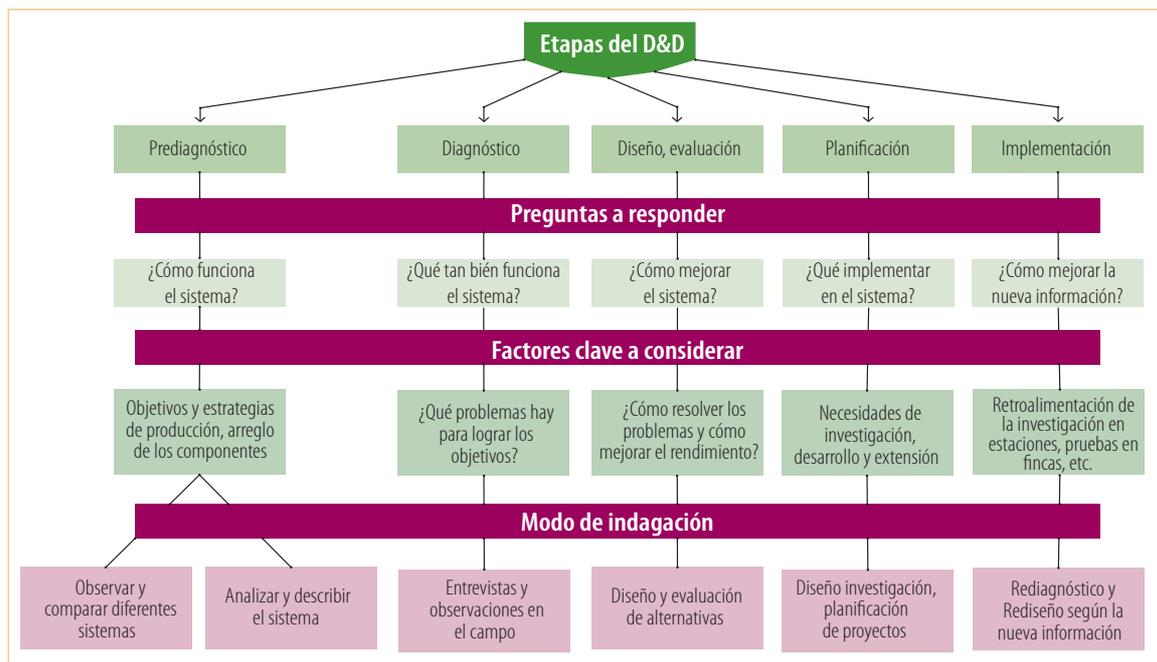
El diagnóstico agroforestal pretende responder las siguientes preguntas:

1. Dónde están plantadas las especies perennes de la finca (en qué sistemas de producción).
2. Cuáles son las especies leñosas perennes (composición botánica).

3. Cuántas especies son (abundancias por especie).
4. Cuáles y cuántos bienes o servicios aportan al productor.
5. Qué efectos favorables o desfavorables ejercen sobre los otros componentes de los sistemas de producción donde se encuentran (análisis de interacciones).

**Análisis de interacciones.** Este análisis requiere preguntas que respondan a las características propias de cada sistema agroforestal y condiciones locales del sitio. Las preguntas tienen que ver con la productividad y sostenibilidad del sistema (Somarriba, 1998). Ejemplo: (i) Son adecuadas las densidades de siembra de los árboles de sombrío en las zonas menos pendientes de la finca?; (ii) Las barreras vivas están cumpliendo eficazmente su función?; (iii) Las especies de árboles seleccionadas como sombrío, son los apropiados para la zona donde se tiene establecido el café?; (iv) La diversidad de especies de árboles, son los adecuados para cumplir con una normativa de certificación?; (v) El nivel de sombrío del café es el óptimo o el adecuado para la zona de cultivo del café?

En la Figura 30 se presentan las etapas que componen un proceso de Diagnóstico y Diseño (D&D).



**Figura 30.**

Modelo de Diagnóstico y Diseño.

### 2.1.6 Criterios del diagnóstico y diseño agroforestal

No hay una metodología o guía para un D&D. Los criterios comprenden: Productividad, sostenibilidad y adopción (Raintree, 1987; Raintree y Young, 1983; Nair, 1993).

**Productividad.** Entendida como la relación entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y los recursos utilizados para obtenerla. También puede ser definida como la relación entre los resultados y el tiempo utilizado para obtenerlos. Cuanto menor sea el tiempo que lleve obtener el resultado deseado, más productivo es el sistema.

**Sostenibilidad.** Se refiere al equilibrio de las especies que conforman un ecosistema y que participan del proceso evolutivo del mismo. Por extensión, se aplica al aprovechamiento de un recurso por debajo del límite de renovabilidad del mismo, sin afectar el equilibrio del ecosistema al que pertenece la especie a aprovechar.

**Adopción.** Los enfoques incluyen:

- Estudios de las características económicas, financieras, sociales, culturales y de comportamiento de quien recibe el mensaje (la recomendación agroforestal) y decide lo que adopta y lo que no.
- Estudio de los mecanismos utilizados para hacer llegar el mensaje y de los incentivos y estímulos requeridos para lograr elevadas tasas de adopción.
- Análisis de los atributos del mensaje y de los efectos que éstos tienen sobre el comportamiento en la decisión de adoptar o rechazar el mensaje.

### 2.1.7 Procedimientos del D&D

La secuencia lógica comprende los siguientes pasos o etapas:

- **Etapa de prediagnóstico (pasos 1-3), ésta cubre:**
  1. La descripción a fondo del área de estudio, incluyendo como aspectos de diagnóstico relevantes, el biofísico, el socioeconómico y el ambiental.
  2. Diferenciación y selección de sistemas en cuanto a la utilización del suelo dentro del área de estudio.
  3. Descripción preliminar de aspectos de diagnóstico relevantes de los sistemas seleccionados.

- ***Etapa de diagnóstico (pasos 4-6), esta etapa incluye:***
  4. Examen de diagnóstico de los sistemas seleccionados y aspectos relevantes para el ajuste ambiental.
  5. Análisis de diagnóstico e identificación de los problemas y de los potenciales usos del suelo.
  6. Diseño de tecnología apropiada (incluyendo opciones con especial atención a la agroforestería potencial).
  
- ***Etapa de diseño de la tecnología (pasos 7-9), esta etapa implica:***
  7. La valoración y la selección de tecnologías para la posible inclusión en el diseño.
  8. Síntesis general de un concepto de diseño para el sistema y un plan para el mejoramiento y desarrollo en la utilización del suelo.
  9. Evaluación y refinamiento al diseño anteriormente propuesto. Las actividades de esta etapa pueden implicar la inclusión de pasos anteriores.
  
- ***Etapa de planificación (pasos 10-12), esta etapa cubre:***
  10. Identificación de las investigaciones necesarias y estudios tecnológicos para la conversión a la agroforestería.
  11. Identificación de las áreas que necesitan atención o un D&D adicional.
  12. Desarrollo de un plan detallado para poner en práctica el proyecto a realizar.

### ***2.1.8 Diseño de sistemas agroforestales basado en análisis estructural***

Este análisis se fundamenta en la presencia, el arreglo y la disposición de los componentes dentro del sistema (Torquebiaeu, 1993).

- **Presencia.** De los tres principales componentes agroforestales: Árboles, cultivos y pasturas.
- **Arreglo.** Se refiere al orden de los componentes en el espacio y en el tiempo. El arreglo espacial tiene que ver con la ubicación física de los componentes en el lote y el arreglo

temporal (secuencia); describe si los componentes están al mismo tiempo en la parcela, si siguen uno a otro, o si se superponen parcialmente en el tiempo. Los principales tipos de arreglos son:

**Mixto.** Los componentes no están arreglados o dispuestos geoméricamente en el lote, es decir, aparecen de manera irregular.

**Zonal.** Los diferentes componentes están arreglados geoméricamente dentro del lote.

- **Disposición.** La disposición o estratificación de los componentes puede ser simple o estar dispuesta en varios estratos (multiestratos).

**Estratos simples.** Sólo hay una capa de árboles.

**Multiestratos.** En la disposición estratificada hay varias capas de árboles.

Existen otras disposiciones de los componentes dentro de los sistemas como:

**Densa.** Los componentes están juntos estrechamente en la parcela.

**Dispersa.** Los componentes están lejos unos de otros.

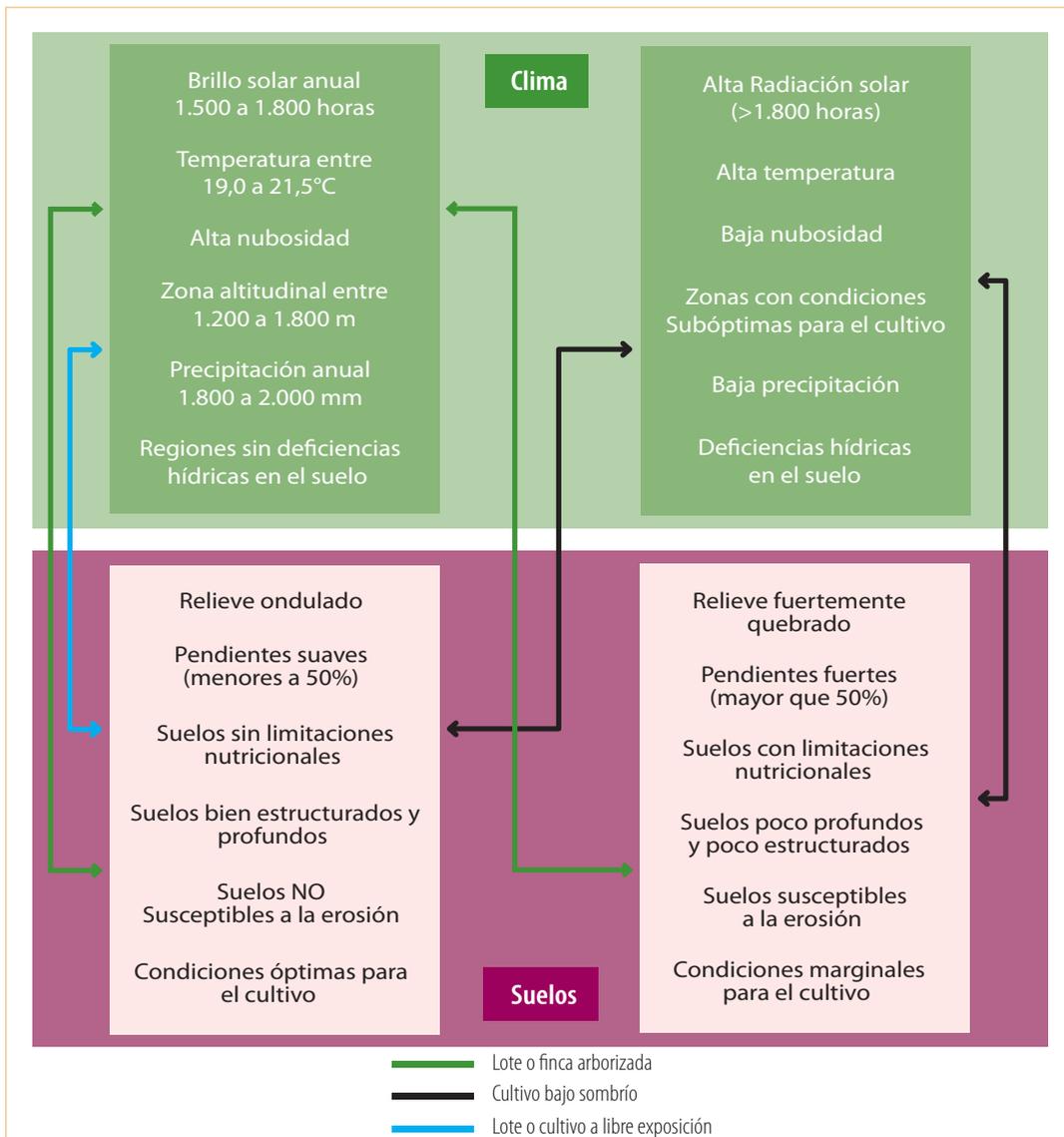
**Simultánea.** Los componentes están presentes al mismo tiempo en la parcela.

**Secuencial.** Los componentes no están presentes simultáneamente en la parcela, uno va tras otro.

## 2.2 Decidir si establecer sombrío al café o “arborizar” la finca cafetera

***En el cultivo del café, no todos los problemas se resuelven con el sombrío, pero el establecimiento de árboles sí puede contribuir a su solución***

Si las características de clima y suelo son las óptimas para el desarrollo de la planta de café, su cultivo puede establecerse a libre exposición solar o mediante la arborización<sup>7</sup> de los lotes o toda la finca cafetera, siendo la estrategia más recomendada. Si las condiciones para el desarrollo de la planta no son favorables desde el punto de vista de la oferta climática y del suelo, la mejor estrategia y donde se obtendrían los mejores resultados sería con el establecimiento de árboles como sombrío del cultivo (Figura 31).

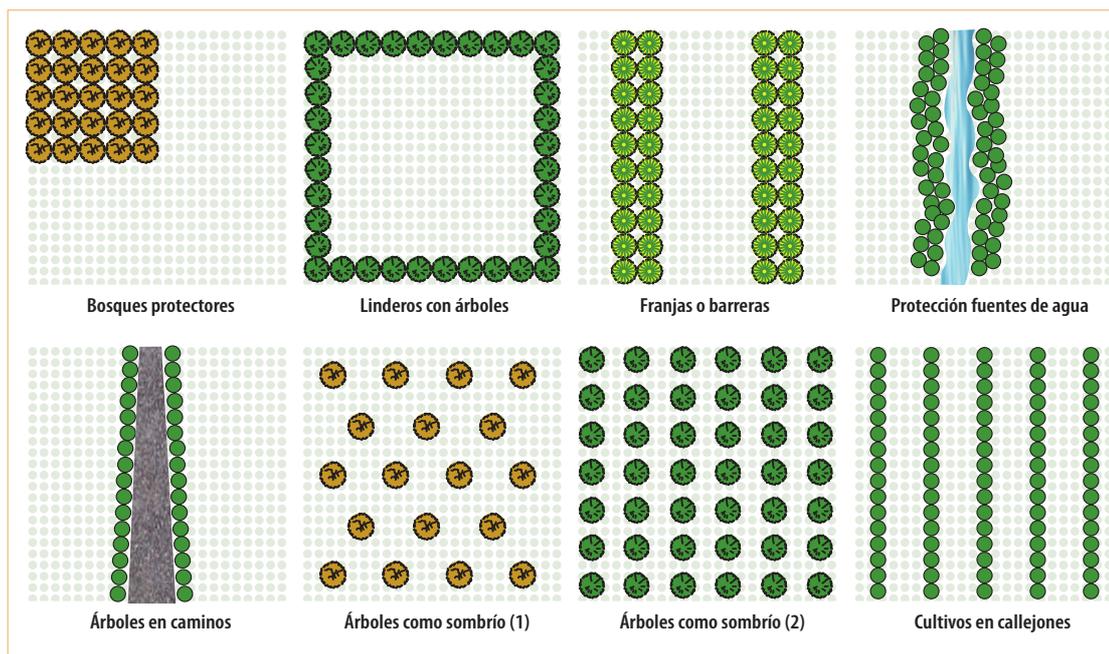


**Figura 31.**

Principales criterios a tener presentes para decidir si establecer un sistema de producción de café a libre exposición solar, bajo sombrío o arborizado.

<sup>7</sup> *Arborizar: Es la capacidad de establecer árboles en la finca, sin que se ocupe un sitio de un árbol de café y sin que se afecte su producción (Farfán et al., 2010).*

En la Figura 32 se presentan algunos ejemplos sobre cultivos de café a libre exposición solar y arborizados, así como modelos agroforestales donde el componente arbóreo cumple una función de sombreado al cultivo.



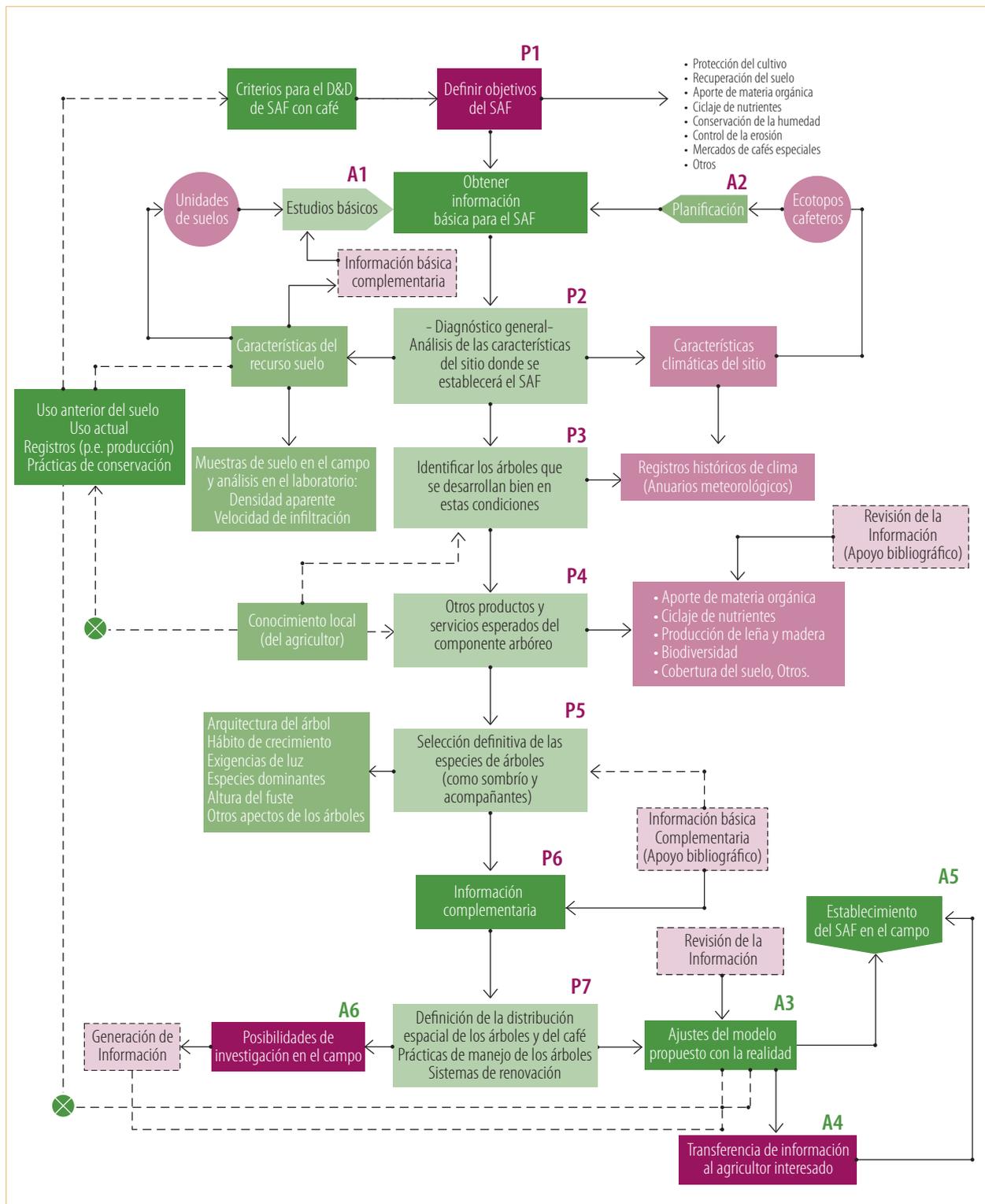
**Figura 32.**

Diversos modelos agroforestales para el establecimiento de café a libre exposición solar o bajo sombrío.

## 2.3 D&D de un sistema agroforestal con café

La selección y el diseño del SAF a establecer en la unidad de producción puede resumirse en siete pasos, como se muestra en la Figura 33 (Farfán, 2007; Wilkinson *et al.*, 2000; Haggard *et al.*, 2001).

**Definir los objetivos del SAF.** El diseño de los sistemas de producción con café se inicia con la definición de los objetivos de producción. Debe hacerse un listado de los productos y servicios que espera obtenerse de los árboles empleados como sombrío en el cafetal, por ejemplo: Protección del cultivo, recuperación del suelo, aporte de materia orgánica, ciclaje de nutrientes, conservación de la humedad del suelo, control de la erosión y producción de cafés especiales, entre otros.



**Figura 33.** Proceso de Diagnóstico y Diseño (D&D) de un Sistema Agroforestal (SAF) con café (Adaptado de: Farfán, 2007).

**Identificar las características del sitio donde se establecerán los árboles.** Características de suelos, condiciones climáticas, altitud, uso y manejo del suelo, y topografía, entre otros. Diferentes investigaciones en Colombia y otros países cafeteros sugieren que el sombrío presenta una serie de ventajas principalmente en climas cálidos y secos, y en suelos con baja retención de humedad y baja fertilidad, condiciones que limitan el crecimiento y el desarrollo del cultivo. Es importante considerar que el sombrío no es universalmente benéfico y que en algunas condiciones se registran desventajas asociadas especialmente con la restricción de la incidencia de la radiación solar, que es el principal factor determinante de la productividad (Beer *et al.*, 1998; Farfán y Mestre, 2004a; Haggard *et al.*, 2001; Muschler, 2000).

Para apoyar la decisión de cuándo es necesaria la sombra en los cafetales deben analizarse varias situaciones:

- Establecer en cuáles ambientes se espera mayor beneficio de los árboles de sombrío.
- Analizar cuáles lotes de la finca reciben mayor beneficio de la asociación con los árboles. En la finca pueden presentarse variaciones en las condiciones de los lotes que la conforman, por tanto, en algunos de estos lotes puede ser útil establecer algún tipo de sombrío o prescindir de éste.

**Identificar los árboles que se desarrollan adecuadamente en las condiciones de la finca.** Una vez caracterizado el sitio donde se establecerá el SAF es necesario hacer un listado (preselección) de árboles que podrían adaptarse o que se desarrollen bien en estas condiciones. Es importante investigar si existen sitios con ambientes similares y qué especies de árboles se desarrollan allí (Cenicafé, 2004; Cordero *et al.*, 2003). Debe tenerse en cuenta que una misma especie no se desarrolla igual en condiciones diferentes de clima y suelo.

**Productos y servicios esperados de los árboles de sombrío.** Al seleccionar la especie arbórea para emplearla como sombrío del café debe tenerse en cuenta: Cuál especie arbórea debe establecerse como sombrío y cuáles servicios y productos se esperan de los árboles (leña, resina, conservación de la biodiversidad, conservación de la humedad del suelo, entre otros) (OTS, 1986; Guharay *et al.*, 2001; Muschler, 2000; Perfecto *et al.*, 1996; Wilkinson y Elevitch, 2000).

**Realizar un listado de las especies a elegir.** De acuerdo con la información recopilada, elaborar un listado de las especies que potencialmente podrían establecerse en el sitio y adicionalmente cumplen con los propósitos.

**Recopilación de información sobre los árboles.** Acompañar el listado anterior con toda la información posible acerca de: Altura de los árboles, diámetro de la copa, diámetro del tronco, forma de la copa, tasa de crecimiento del árbol, permanencia de las hojas en el árbol, forma del tallo, follaje denso o ralo, entre otros.

**Planificar prácticas de manejo de los árboles seleccionados.** De las decisiones tomadas con la información obtenida se planificarán todas las prácticas de manejo de los árboles que fueron seleccionados para conformar el sistema, es decir, definir las prácticas agroforestales (Rice, 1997). Toda esta información facilita el diseño eficiente del sistema de cultivo del café bajo sombrío, el cual permitirá tener rangos de sombrío adecuados y niveles de producción óptimos.

## 2.4 Diseño de una finca para la producción de café con criterios de sostenibilidad, D&D y Forestería Análoga (FA)

Es posible estabilizar los efectos de las prácticas inadecuadas en el establecimiento y manejo de los cultivos como el aumento de la vulnerabilidad de los suelos a la erosión, el incremento en el ataque de plagas y enfermedades, y la reducción en los ingresos, entre otros, a través del diseño de arquitecturas vegetales que incrementen las poblaciones de enemigos naturales, eviten la erosión del suelo y mantengan condiciones adecuadas para el desarrollo de especies vegetales y animales. Las técnicas D&D y FA permiten desarrollar sistemas agroforestales en los cuales se desarrolla una estructura vegetal similar al cultivo original, y un microclima donde se recrea un ambiente modificado, permitiendo a muchas especies extender su rango de dispersión y así brindar estabilidad ecológica (Torres, 2008). El objetivo de este ejercicio es aplicar los conceptos básicos de sostenibilidad en el diseño e implementación de una finca cafetera, para el cultivo en sistemas agroforestales, apoyado en los anteriores conceptos (Sostenibilidad, D&D y FA).

Componentes del SAF	Funciones dentro del sistema
Café ( <i>Coffea arabica</i> )	Cultivo principal. Valor económico.
Guamo santafereño ( <i>Inga edulis</i> )	Aporte de materia orgánica, ciclaje de nutrientes, protección del cultivo, protección del suelo, conservación de la humedad del suelo, leña, biodiversidad.
Nogal cafetero ( <i>Cordia alliodora</i> )	Aporte de materia orgánica, ciclaje de nutrientes, protección del cultivo, protección del suelo, leña, madera para pulpa y aserrío.
Plátano dominico hartón ( <i>Musa sp.</i> )	Sombrío transitorio, alimento, alimento para aves, aporte materia orgánica y ciclaje de nutrientes.
Maíz ( <i>Zea maiz</i> ) y fríjol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	Cultivos de valor económico, alimento en la finca, aporte de materia orgánica y ciclaje de nutrientes.
Tefrosia ( <i>Tephrosia candida</i> )	Cultivo transitorio, abono verde, fijación de nitrógeno, aporte de materia orgánica, ciclaje de nutrientes.

En la Tabla 13, se presenta la distribución espacial de cada componente dentro del sistema.

**Tabla 13.**

Distribución espacial de cada componente dentro del sistema agroforestal.

Especies	Distancias de siembra (m)		Densidad (plantas/ha)	Número de ciclos	Duración (años)
	Entre surcos	Entre plantas			
Guamo santafereño	24,0	12,0	34	Permanente	Indefinida
Nogal cafetero	24,0	12,0	34	Permanente	Indefinida
Plátano	12,0	3,0	278	5,0	
Café	1,5	1,5	4.500	Permanente	Indefinida
Fríjol	0,5	0,3	120.000*	2	1,0
Maíz	1,5	0,2	33.000	1	0,5
Tefrosia	0,6	0,6	28.000	1	2,0 a 3,0

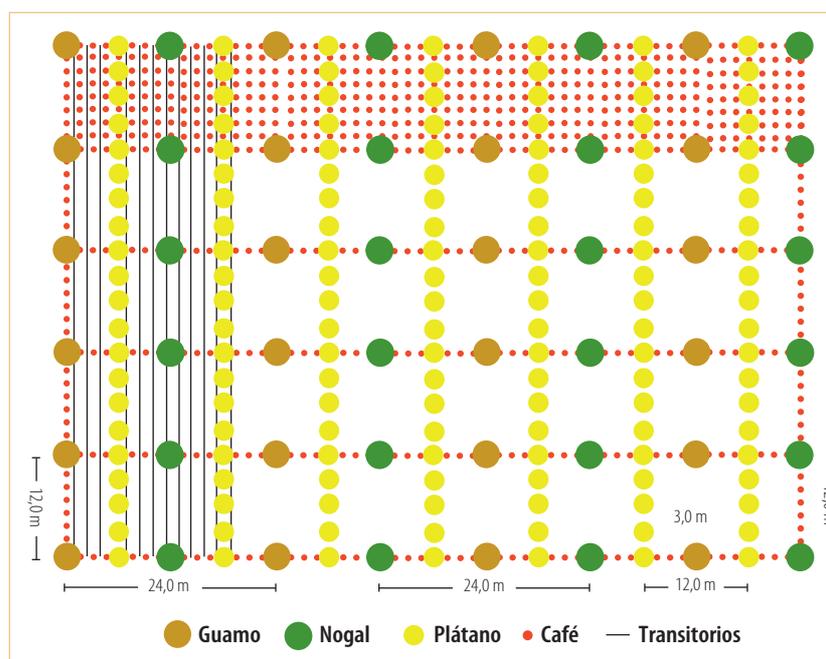
\*Dos plantas por sitio

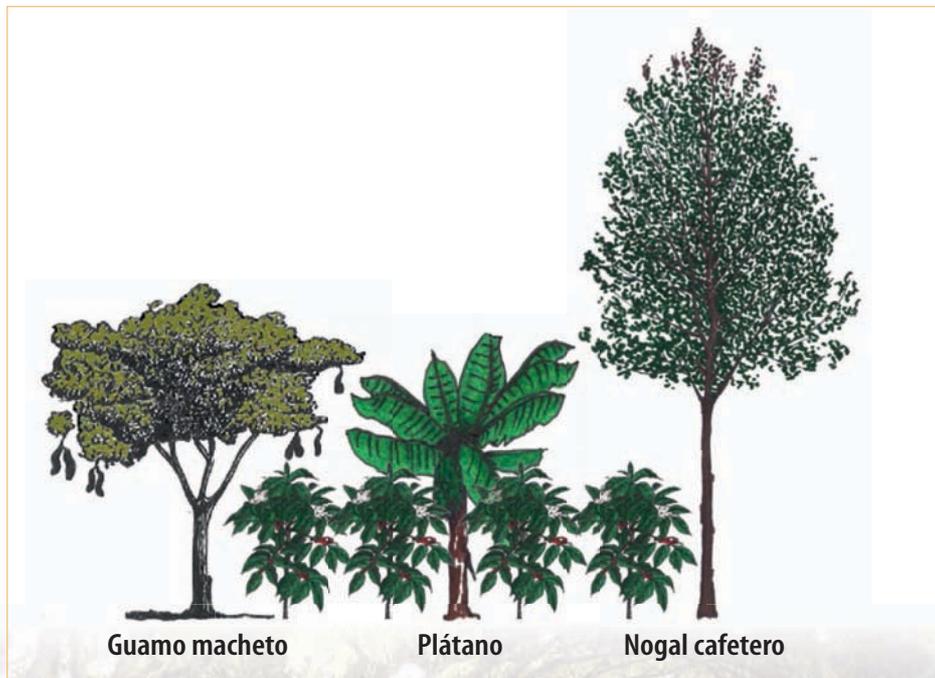
La secuencia para el establecimiento de todos los componentes es:



En la Figura 34 se presenta el esquema del establecimiento del sistema. La vista frontal del sistema agroforestal simultáneo establecido se presenta en la Figura 35.

**Figura 34.**  
Esquema del establecimiento de los componentes dentro del sistema.





**Figura 35.**

Vista frontal del sistema agroforestal establecido.



# Tercer Componente - Identificación de estrategias (Prácticas de manejo)

## 3.

Aunque la fotosíntesis es fundamental para la productividad de las plantas, muchos factores influyen en la productividad obtenida en el campo; existe una relación cuantitativa entre la fotosíntesis y la productividad. En cualquier especie, cuatro factores determinan el aumento de biomasa o productividad neta ( $P_n$ ): la cantidad de luz incidente ( $Q$ ), la proporción de esta luz que es interceptada por los órganos verdes de la planta ( $b$ ), la eficiencia de la conversión fotosintética de la luz interceptada en la biomasa ( $e$ ) y las pérdidas respiratorias de la biomasa ( $R$ ). En ese sentido la fotosíntesis neta puede describirse mediante la función:  $P_n = (Q)(b)(e) - R$ . Lo que indicaría que la productividad se podría incrementar al modificar los factores  $b$ ,  $e$  y  $R$ ; debido a que la cantidad de luz incidente ( $Q$ ) está determinada por el clima, ésta es independiente del cultivo (Scurlock *et al.*, 1987). En el cultivo del café, el anterior planteamiento sería aplicable si el sistema de producción fuese a libre exposición solar, pero en el cultivo bajo el asocio de árboles los cuatro factores ( $Q$ ,  $b$ ,  $e$ ,  $R$ ) se pueden manejar aplicando prácticas de manejo del sistema como:

**La cantidad de luz incidente ( $Q$ ):** Este factor se puede modificar si se tiene en cuenta la densidad de siembra del sombrío; la arquitectura del dosel seleccionado, altura del árbol, especies seleccionadas; la distribución espacial, estratificación del componente arbóreo, orientación de los árboles respecto al sol y prácticas de manejo (podas de formación y mantenimiento, etc).

**La proporción de luz interceptada por los órganos verdes de la planta ( $b$ ):** La proporción de luz interceptada se puede modificar al establecer los rangos de la edad del cultivo, los ciclos y sistemas de renovación, la nutrición de la planta (fertilización) y el manejo integrado de arvenses, de plagas y de enfermedades, entre otros.

**La eficiencia de la conversión fotosintética de la luz interceptada en biomasa ( $e$ ):** Ésta es función del tamaño y estructura del dosel, por tanto, se puede modificar con la densidad de siembra del café, el arreglo espacial, la variedad seleccionada, las prácticas de manejo del cultivo, etc.

**Las pérdidas respiratorias de la biomasa ( $R$ ):** Se puede modificar al controlar la radiación solar incidente dentro del cultivo o el porcentaje de sombra del cultivo; también al controlar la humedad relativa dentro del cultivo, la humedad del suelo y la temperatura dentro del cultivo, mediante prácticas de manejo de los árboles de sombrío.

Lo anterior denota que el cultivo del café bajo sombrío requiere de gran esfuerzo y dedicación por parte del caficultor, y de un gran conocimiento y especialización de quien le presta asesoría

o asistencia técnica. Las estrategias o prácticas de manejo se plantearán secuencialmente de acuerdo a la Figura 29, es decir: Edad del cultivo para su renovación, densidad de siembra del café, densidad de siembra del sombrío y porcentaje de sombrío, fertilización del café bajo sombrío y prácticas complementarias.

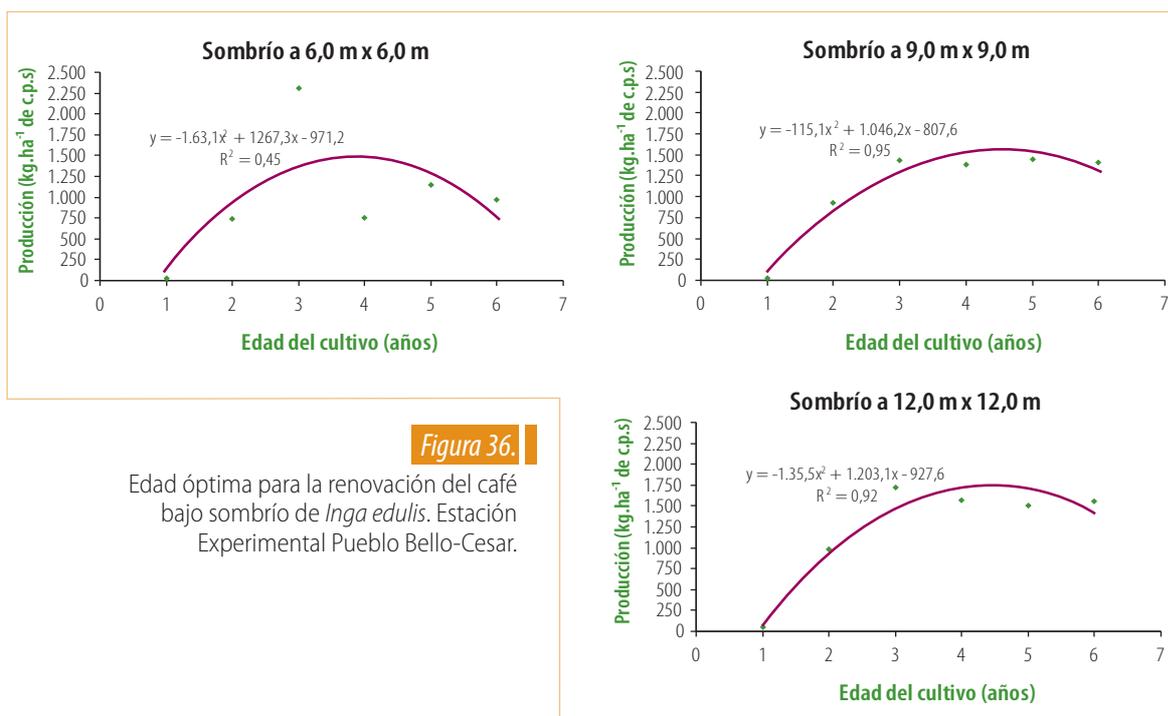
### 3.1 Estrategia 1. Controlar la edad del cultivo

#### 3.1.1 Determinar la edad óptima del cultivo para su renovación

El ritmo de envejecimiento de una planta de café depende de: La calidad del ambiente, la variedad cultivada, el sistema de producción (al sol o a la sombra), la densidad de siembra, la intensidad de la producción, la disponibilidad de nutrimentos, la presencia de plagas y enfermedades o estrés ambiental, así como de las prácticas de cultivo (Arcila, 2007). El promedio de la producción anual de una plantación crece hasta que alcanza un punto máximo y luego disminuye. El punto donde comienza a disminuir el promedio es la edad máxima que comercialmente debe tener una plantación; por ejemplo, Mestre y Ospina (1994) indican que en la producción a través del tiempo, durante ocho cosechas y a tres distancias de siembra del café a libre exposición solar, existe un punto para cada condición, en el cual el promedio de la producción es máximo, y varía entre 5 y 7 años para densidades entre 10.000 y 2.500 plantas/ha, respectivamente.

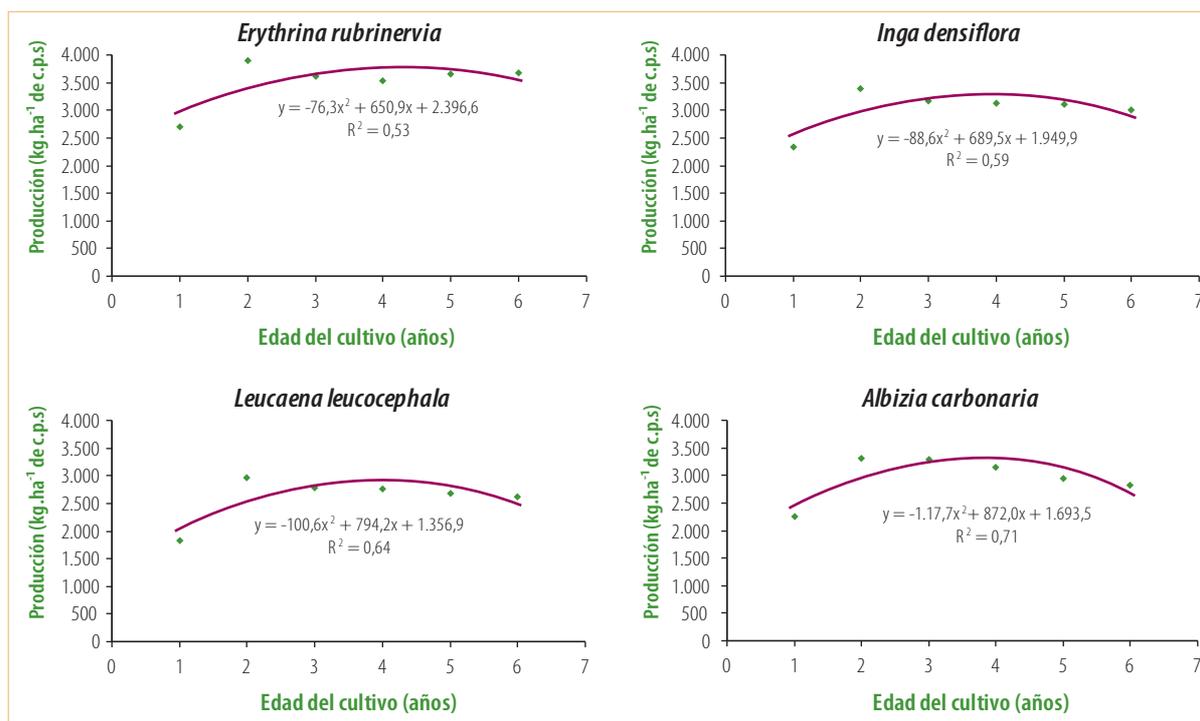
##### 3.1.1.1 Edad óptima para la renovación del café bajo sombrío simple

En la Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar) se estimó que la edad óptima para la renovación del café establecido con 4.500 plantas/ha y bajo sombrío de *Inga edulis* (guamo santaferense) fue de 5 años o cuatro cosechas, para las densidades de siembra del sombrío de 278, 123 y 78 árboles/ha (Figura 36).



### 3.1.1.2 Edad óptima para la renovación del café bajo sombrío estratificado

En la Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar) se estimó que la edad óptima para la renovación del café establecido con 4.500 plantas/ha y bajo sombrío de *Erythrina rubrinervia*, *Inga edulis*, *Leucaena leucocephala* y *Albizia carbonaria*, fluctuó entre entre 5 y 6 años o cuatro y cinco cosechas, para las densidades de siembra del sombrío de 78 árboles/ha (Figura 37).



**Figura 37.** Edad óptima para la renovación del café bajo sombrío de cuatro especies leguminosas. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar

### 3.1.1.3 Edad óptima para la renovación del café bajo sombrío estratificado y con prácticas para la producción orgánica

En la Estación Central Naranjal (Caldas) se estimó que la edad óptima para la renovación del café establecido con 4.500 plantas/ha y bajo sombrío diverso de *Erythrina fusca*, *Inga edulis*, *Leucaena leucocephala* y *Albizia carbonaria*, fue de 6 años o cinco cosechas, para las densidades de siembra del sombrío de 78 árboles/ha (Figura 38).

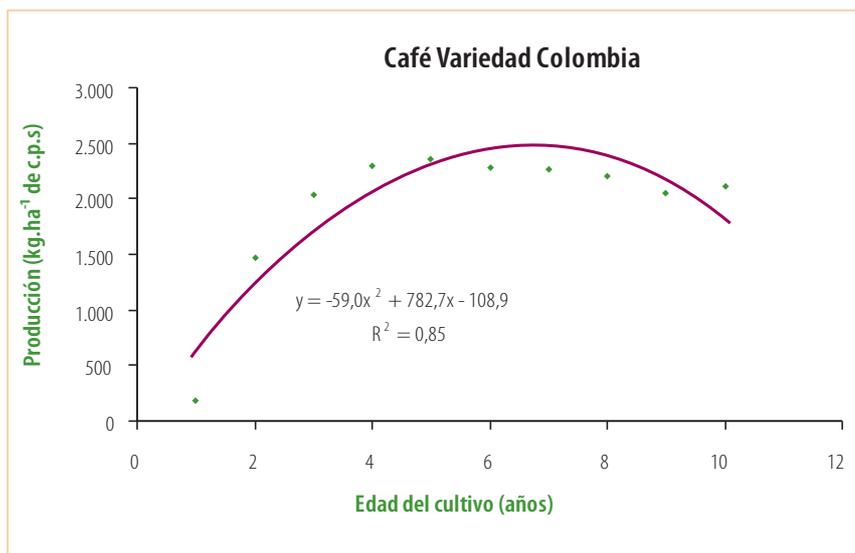
### 3.1.1.4 Efecto de la interceptación de la RFA por *Inga edulis* sobre la producción de café renovado por zoqueo

Para tomar la decisión de cuándo renovar, es necesario considerar la edad del cafetal y el estado de deterioro e improductividad en que se encuentra la plantación (Arcila, 2007). En la Estación

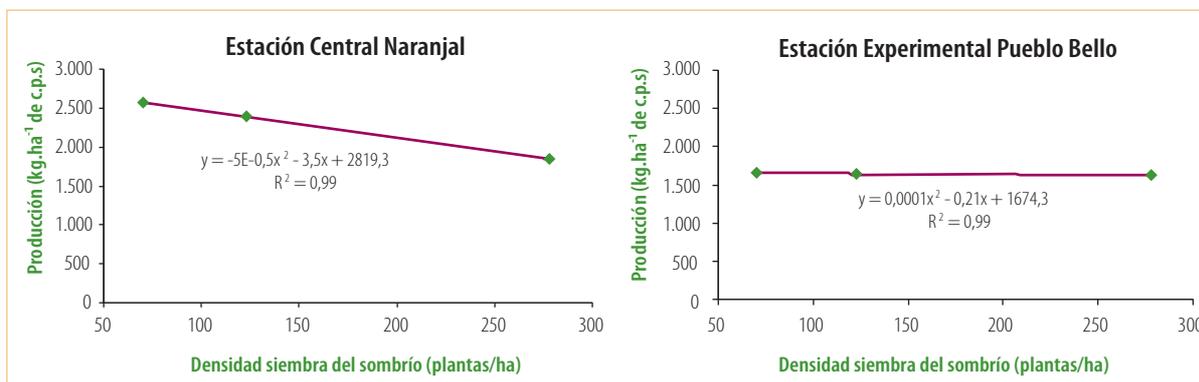
Experimental Pueblo Bello y en la Estación Central Naranjal, se evaluó el efecto del sombrío de guamo santafereño (*Inga edulis*), establecido a tres densidades de siembra (78, 123 y 278 árboles/ha), sobre la producción de café, establecido a 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha) y renovado por zoqueo.

**Figura 38.**

Edad óptima para la renovación del café bajo sombrío diverso y con prácticas orgánicas. Estación Central Naranjal-Caldas.



El efecto de la densidad de siembra del sombrío sobre la producción del café (kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), promedio de cinco cosechas, en la fase de renovación por zoqueo en la Estación Experimental Pueblo Bello, y el promedio de cuatro cosechas en la Estación Central Naranjal se presentan en la Figura 39. Se registró que los porcentajes de sombra dados por *I. edulis* afectan significativamente la producción, al variar la distancia de siembra y manteniendo constante la distancia de siembra del café; la función que describió esta relación fue un polinomio cuadrado del orden  $y = ax^2 + bx + c$ .



**Figura 39.**

Producción del café renovado por zoqueo, y nivel de sombra dado por *I. edulis* a tres densidades de siembra en la Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar y la Estación Central Naranjal.

Es así como en la zona cafetera norte de Colombia la producción promedio fue de 1.704 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s, y en la zona centro de 2.831 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s. En la Estación Experimental Pueblo Bello la producción del café con el sombrío de 123 árboles/ha, sólo se ve reducida en un 6,6% al compararse con la obtenida con el sombrío con 70 árboles/ha; y se redujo en 4,1% cuando el sombrío fue establecido con 278 plantas/ha, si se compara con la producción obtenida bajo 70 árboles/ha de *I. edulis*. En la Estación Central Naranjal la producción del café con el sombrío a 123 árboles/ha se redujo en 27,9% al compararse con la obtenida con el sombrío a 70 árboles/ha y se redujo en 31,9% cuando el sombrío fue establecido con 278 plantas/ha, si se compara con la producción obtenida bajo 70 árboles/ha de *I. edulis*.

### 3.1.1.5 Establecimiento de un sistema de manejo de cafetales en sistemas agroforestales

La caficultura tecnificada colombiana, en un gran porcentaje está conformada por plantaciones que superan los 9 años de edad, y bajo estas condiciones la producción es baja, se dificulta el control de la broca del café y la recolección, y se reduce la calidad del café. Por tanto, en cada finca se debe iniciar el establecimiento de un sistema de manejo de cafetales, con el fin de mantener lotes de café jóvenes y productivos (Mestre y Salazar, 1998). En la Figura 40, se plantea una alternativa para el establecimiento de un sistema de renovación del café en sistemas agroforestales establecidos.

Año/Lote	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Lote 6
Año 0	LPv	LPv	LPv	LPv	LPv	LPv
Año 1	LRz	LPc	LPv	LPv	LPv	LPv
Año 2	LP <sub>1</sub>	LP <sub>1</sub>	LRz	LPc	LPv	LPv
Año 3	LP <sub>2</sub>	LP <sub>2</sub>	LP <sub>1</sub>	LP <sub>1</sub>	LRz	LPc
Año 4	LP <sub>3</sub>	LRz	LP <sub>2</sub>	LP <sub>2</sub>	LP <sub>1</sub>	LP <sub>1</sub>
Año 5	LP <sub>4</sub>	LP <sub>1</sub>	LP <sub>3</sub>	LRz	LP <sub>2</sub>	LP <sub>2</sub>
Año 6	LP <sub>5</sub>	LP <sub>2</sub>	LP <sub>4</sub>	LP <sub>1</sub>	LP <sub>3</sub>	LRz
Año 7	LP <sub>6</sub>	LP <sub>3</sub>	LP <sub>5</sub>	LP <sub>2</sub>	LP <sub>4</sub>	LP <sub>1</sub>

LPv	Lote viejo a renovar
LRz	Lote renovado por zoqueo
LPc	Lote con poda "Calavera"
LP <sub>1</sub>	Lote en producción renovado

**Figura 40.**

Implementación de un sistema de renovación del café en sistemas agroforestales.

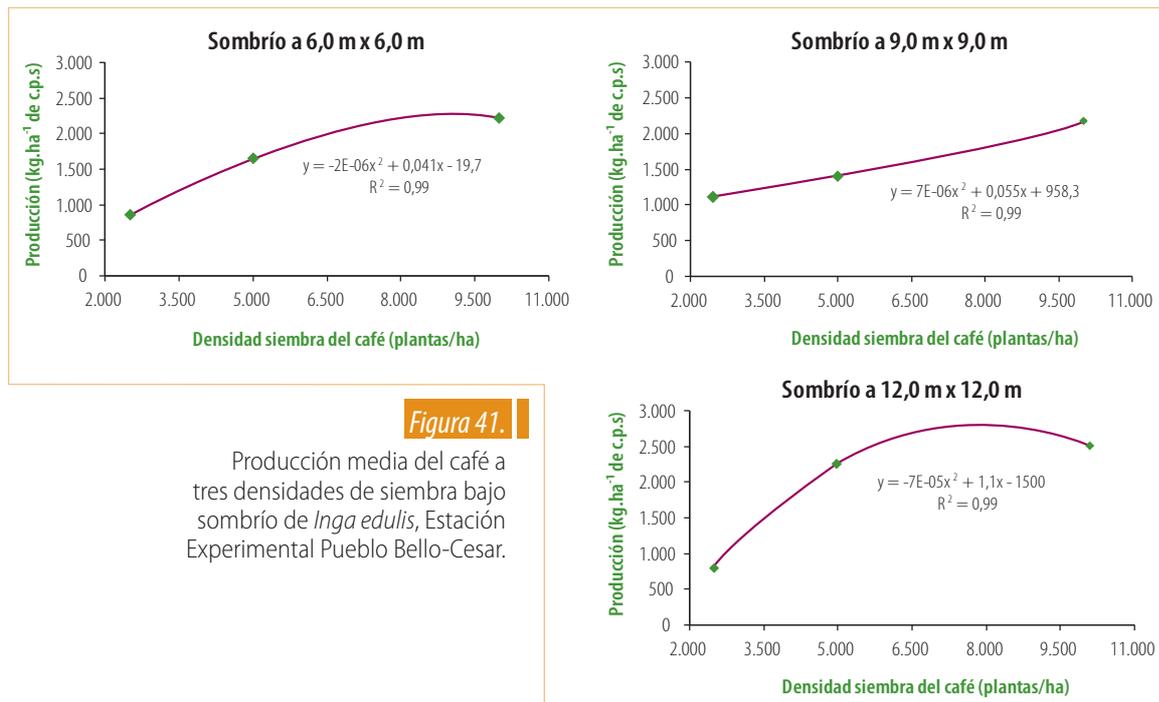
## 3.2 Estrategia 2. Incrementar la densidad de siembra del café

### 3.2.1 Con sombrío establecido incrementar la densidad de siembra del café

#### 3.2.1.1 Producción del café en tres densidades de siembra y tres de siembra de *Inga edulis*

En el campo de la agroforestería son básicos los estudios sobre la importancia relativa de la competencia por luz, agua y nutrientes, a lo largo de los gradientes ecológicos, para identificar los factores limitantes en un rango de condiciones biofísicas. Es importante conocer los efectos de la arquitectura y dinámica de la copa del árbol de diferentes especies y tamaños sobre la disponibilidad de la RFA en el cultivo, los efectos de la sombra sobre la fenología del café, particularmente la iniciación y desarrollo del fruto (Beer *et al.*, 1998); pero más importante aún es conocer las interacciones entre las densidades de siembra del árbol y del café y sus efectos sobre la producción del cultivo, cuando éste se establece bajo cubierta arbolada.

En la Estación Experimental Pueblo Bello, Farfán y Baute (2009) realizaron un estudio para comparar la productividad del café ante la variación conjunta de su densidad de siembra y la densidad de siembra del sombrío de *Inga edulis*. Los tratamientos estuvieron constituidos por la combinación de tres distancias de siembra de sombrío: 6,0 m x 6,0 m; 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m (278, 123 y 70 árboles/ha) y tres distancias de siembra de café, 1,0 m x 1,0 m; 1,42 m x 1,42 m y 2,0 m x 2,0 m (10.000; 5.000 y 2.500 plantas/ha) (Figura 41 a, b y c).



El estudio se inició en marzo de 1995 con el establecimiento del sombrío y en junio del mismo año se realizó la siembra del café. Durante el primer año de establecimiento, todo el sistema estuvo con sombrío transitorio de *Ricinus communis* (higuerillo) y durante el segundo año con sombrío transitorio de *Cajanus cajan* (guandul). De los resultados, se observó que los promedios de porcentaje de sombrío en que se desarrolló el cultivo de café con el sombrío establecido a densidades de siembra de 278, 123 y 70 árboles/ha, fueron: 88,4%; 68,9% y 27,9%, respectivamente.

En la zona cafetera norte de Colombia, Farfán y Mestre (2004a; 2004b), registraron que la mayor producción de café se presenta con niveles de sombrío entre el 35% y 45%. Los análisis mediante regresiones lineales simples permitieron inferir que con *I. densiflora* establecido a distancias de 6,0 m x 6,0 m ( $y = 20,0x - 29,6$ ) y 9,0 m x 9,0 m ( $y = 15,5x - 22,6$ ), este porcentaje de sombrío se alcanzó entre los 3 y 4 años de edad de los árboles. En sistemas de producción con árboles establecidos a distancias de siembra de 12,0 m x 12,0 m, este grado de cobertura se alcanzó a los 6,7 años.

- **Inga edulis a 6,0 m x 6,0 m.** El promedio de la producción registrada en el ciclo de 6 años (1997-2002) y bajo sombrío establecido a 6,0 m x 6,0 m, fue de 2.030; 1.612 y 840 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco, a densidades de siembra del café de 10.000, 5.000 y 2.500 plantas/ha, respectivamente. El promedio de la producción del café plantado a 1,0 m x 1,0 m y 1,42 m x 1,42 m fue mayor, comparada con la obtenida a 2,0 m x 2,0 m, es decir, en sistemas agroforestales de café con *I. edulis* como sombrío, el incremento en la densidad de siembra del café de 2.500 a 5.000 y 10.000 plantas/ha, significa aumentar la producción en 91,9% y 141,6% respectivamente. Romero *et al.* (2002) obtuvieron producciones medias de 1.900 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino bajo sombrío de *Inga latibracteata* (282 árboles/ha), que dieron en promedio el 77,0% de sombra. Estivariz y Muschler (1998), observaron que con un sombrío homogéneo del 60,0% de *Erythrina* sp., la producción de café se reduce un 41,0% comparada con una sombra heterogénea del 20,0% al 40,0%.
- **Inga edulis a 9,0 m x 9,0 m.** Bajo esta distancia de siembra, la producción media registrada, en el ciclo de 6 años (1997-2002), fue de 2.296; 1.399 y 726 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco a densidades de siembra del café de 10.000, 5.000 y 2.500 plantas/ha, respectivamente. Igualmente, el promedio de las producciones del café establecido a 1,0 m x 1,0 m y 1,42 m x 1,42 m, fueron mayores frente a la obtenida a 2,0 m x 2,0 m, es decir, en sistema agroforestales con café y con *I. edulis* como sombrío plantado a 9,0 m x 9,0 m, el incremento en la densidad de siembra del café de 2.500 a 5.000 y 10.000 y plantas/ha, significa aumentar la producción en 92,8% y 216,5%, respectivamente. Lagemann y Heuveltop (1983), reportan producciones de 1.690 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco, en la variedad Caturra establecida a 4.465 plantas/ha y con sombrío diverso de *Erythrina* sp., *Inga* sp., *Gliricidia sepium* y frutales.
- **Inga edulis a 12,0 m x 12,0 m.** El promedio de la producción registrada en el ciclo de 6 años (1997-2002) y con sombrío a 12,0 m x 12,0 m, fue de 2.493, 2.579 y 1.067 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s. a densidades de siembra del café de 10.000, 5.000 y 2.500 plantas/ha, respectivamente.

Los promedios de la producción fueron mayores en cafetales establecidos a 1,0 m x 1,0 m y 1,42 m x 1,42 m, frente a café establecido a 2,0 m x 2,0 m, es decir, en sistema agroforestales con café y con *I. edulis* como sombrío plantado a 12,0 m x 12,0 m, el incremento en la densidad de siembra del café de 2.500 a 5.000 y 10.000 plantas/ha, significa aumentar la producción en 141,8% y 133,7%, respectivamente. En sistemas agroforestales con café y árboles frutales, Matoso *et al.* (2004), reportan que en café variedad Catuaí (4.000 plantas/ha) se reduce la producción en 37,0% al compararse con el café en monocultivo y 5.000 plantas/ha.

Como efecto del incremento de la densidad de siembra se obtienen incrementos sustanciales en la producción de café bajo sombrío, es decir, aumentar el número de plantas por hectárea hasta 5.000 se traduce en incrementos en la producción del 112,4%, al incrementarla a 10.000 plantas/ha se obtienen aumentos en la producción del 159,0% más que con 2.500 plantas/ha; Muschler (2001) y Detlefsen (1988), indican reducciones hasta de un 50% en producción de café al aumentar la densidad de siembra del sombrío de *C. alliodora* (114 a 344 árboles/ha), comparada con la obtenida en café a libre exposición solar. El análisis mediante funciones polinomiales (Figura 41 a, b y c) indica que bajo las densidades de siembra del sombrío de 278, 123 y 78 árboles/ha, las densidades de siembra del café variedad Colombia, con las que se obtuvieron las mayores producciones fueron de 8.500; 9.500 y 8.000 plantas/ha, respectivamente, para esta localidad específicamente.

### 3.2.2 Con variedades de porte bajo en SAF estratificados, establecer densidades de siembra adecuadas para la localidad

#### 3.2.2.1 Producción de café Variedad Castillo® en SAF estratificados

En la Estación Central Naranjal se determinó la densidad de siembra óptima de café Variedad Castillo®, bajo sombrío estratificado de *Inga densiflora* (guamo macheto), *Inga edulis* (guamo santafereño), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Albizia carbonaria* (carbonero), establecido a 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha). Las densidades de siembra del café evaluadas se presentan en la Tabla 14.

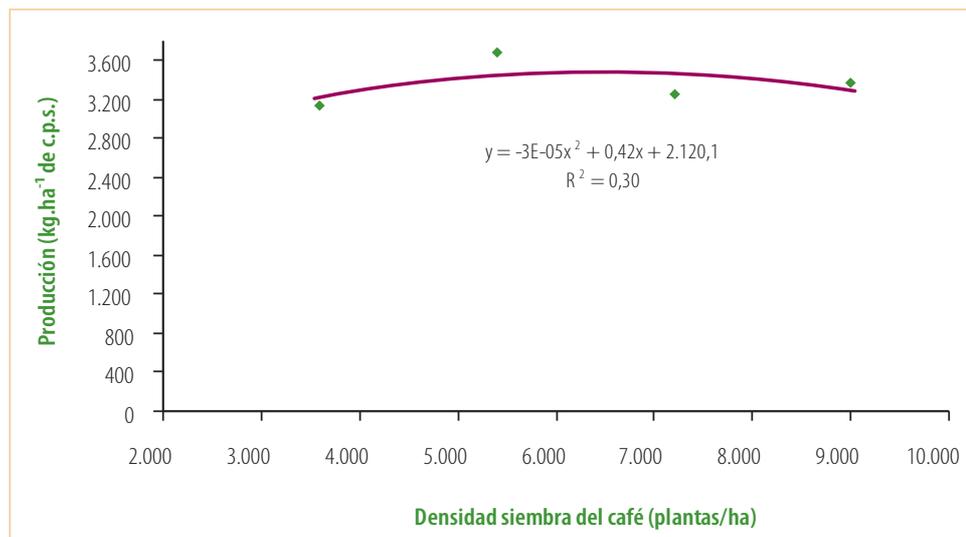
**Tabla 14.**

Tratamientos. Café Variedad Castillo® y Caturra. Estación Central Naranjal-Caldas.

Tratamiento	Densidad (Plantas/ha)	Distancias de siembra (m)
1	3.600	1,65 x 1,65
2	5.400	1,35 x 1,35
3	7.200	1,18 x 1,18
4	9.000	1,05 x 1,05

Los resultados parciales de producción (2008 – 2012) se presentan en la Figura 42.

**Figura 42.**  
Densidad de siembra óptima para café Variedad Castillo®. Estación Central Naranjal-Caldas.



De los resultados parciales obtenidos se estableció que la densidad de siembra óptima con la cual se alcanza la máxima producción para la Variedad Castillo® (3.310 kg de café pergamino seco por hectárea) fue con 6.000 plantas/ha.

### 3.2.3 Con variedades de porte alto en SAF estratificados, establecer densidades de siembra adecuadas para la localidad

#### 3.2.3.1 La variedad Tabi y la densidad de siembra en sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales en los cuales los árboles de sombrío se regulan periódicamente, proporcionan al cultivo una serie de beneficios entre los que se destaca la producción de hojarasca, la cual contribuye a conservar la humedad y la fertilidad del suelo, y además proporciona nutrimentos necesarios para el café (García, 2008). En algunas regiones del país con condiciones climáticas particulares, como veranos prolongados, distribución inadecuada de lluvias y alto brillo solar, existen pequeñas áreas o fincas en las que se practica una caficultura poco tecnificada, caracterizada por el uso de variedades de porte alto, bajas densidades de siembra, empleo de sombrío y bajas aplicaciones de fertilizantes (Moreno, 2002); las variedades de porte alto comúnmente empleadas en estos sistemas son Típica y Borbón, que aunque producen una excelente calidad de bebida son susceptibles a la roya del cafeto.

Producto de las selecciones, Cenicafé desarrollo la variedad Tabi<sup>8</sup>, que en general, es un material sobresaliente por su vigor vegetativo, y que por sus dimensiones (porte alto) puede ser sembrado

<sup>8</sup> Tabi: Expresión que en el dialecto Guambiano significa "Bueno" (Moreno, 2002)

con las densidades acostumbradas con las variedades Típica y Borbón, que usualmente no superan las 3.000 plantas/ha (Moreno, 2002).

- **Estación Central Naranjal (Caldas) – Estudio 1.** En este estudio se evaluaron cinco densidades de siembra del café bajo sombrío de una especie leguminosa. Los tratamientos se presentan en la Tabla 15. *Inga edulis* (guamo santafereño) fue establecido a 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha), en el año 2005. Los resultados de producción se presentan en la Figura 43.

**Tabla 15.**

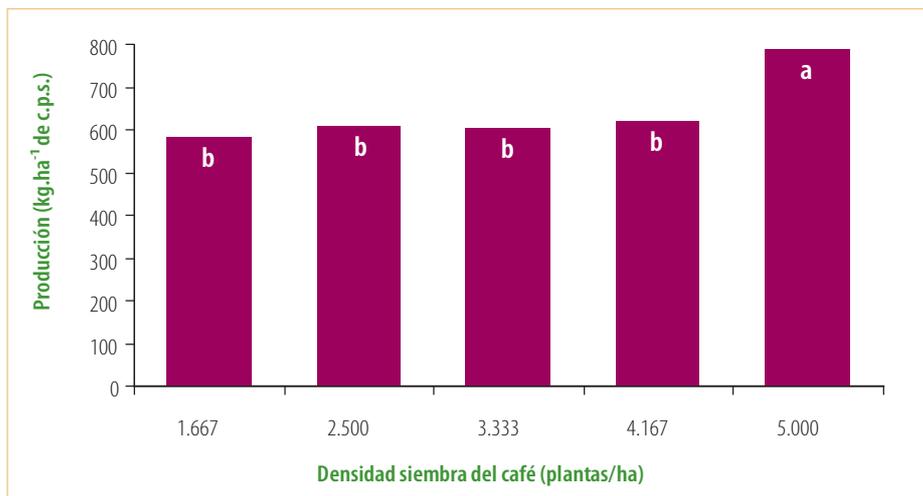
Distancias de siembra de café variedad Tabi. Estación Central Naranjal-Caldas (Estudio 1).

Nº	Distancias de siembra del café (m)	Densidad de siembra (plantas/ha)
1	2,00 x 3,00	1.667
2	2,00 x 2,00	2.500
3	2,00 x 1,50	3.333
4	2,00 x 1,20	4.167
5	2,00 x 1,00	5.000

El análisis del promedio de la producción de café variedad Tabi, de cinco cosechas (2007 a 2011), mostró que son similares las producciones registradas con 1.600 a 4.167 plantas/ha. El promedio de la producción bajo estas densidades de siembra fue menor al ser comparada con el promedio de la producción obtenida con 5.000 plantas/ha (30,5% superior). Para determinar la densidad de siembra con la que se obtienen la máximas producciones se analizaron funciones de producción; la función que mejor explica la densidad de siembra óptima fue cuadrática, del orden  $y = ax^2 + bx + c$  (Figura 44).

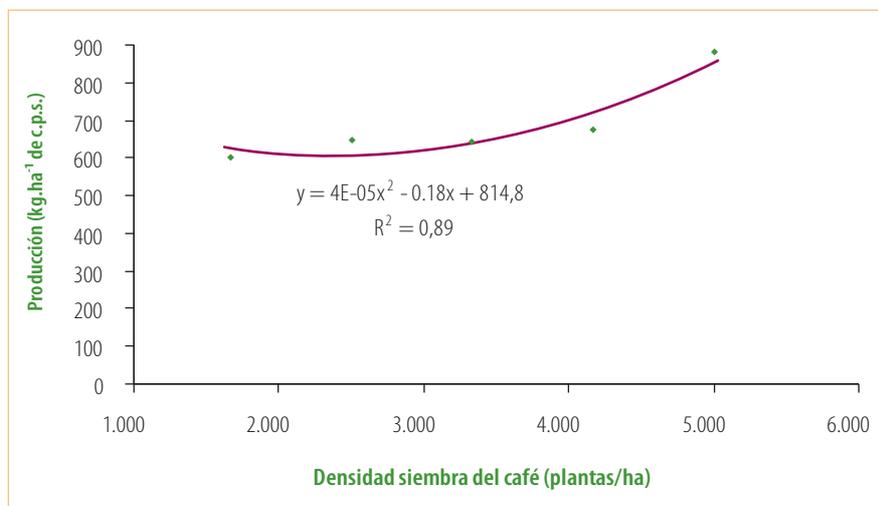
**Figura 43.**

Producción media de café variedad Tabi ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de café pergamino seco), cinco cosechas (2007 a 2011). Estación Central Naranjal-Caldas.



**Figura 44.**

Densidad de siembra de café variedad Tabi. Estación Central Naranjal-Caldas.



De acuerdo a la función determinada, a las condiciones de clima y suelo de la localidad donde se desarrolló el estudio, y al período productivo evaluado (2007 a 2011), la densidad de siembra de café variedad Tabi (porte alto), con la cual se obtiene la máxima producción (883 kg·ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), es de 5.000 plantas/ha.

- **Estación Central Naranjal – Estudio 2.** En este estudio se evaluaron cuatro densidades de siembra del café bajo sombrío estratificado, con cuatro especies leguminosas. Los tratamientos se presentan en la Tabla 16.

**Sombrío y distancia de siembra.** *Inga densiflora* (guamo macheto), *Inga edulis* (guamo santafereño), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Albizzia carbonaria* (carbonero). Establecido a 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha). Los resultados parciales de producción (2008 – 2012) se presentan en la Figura 45.

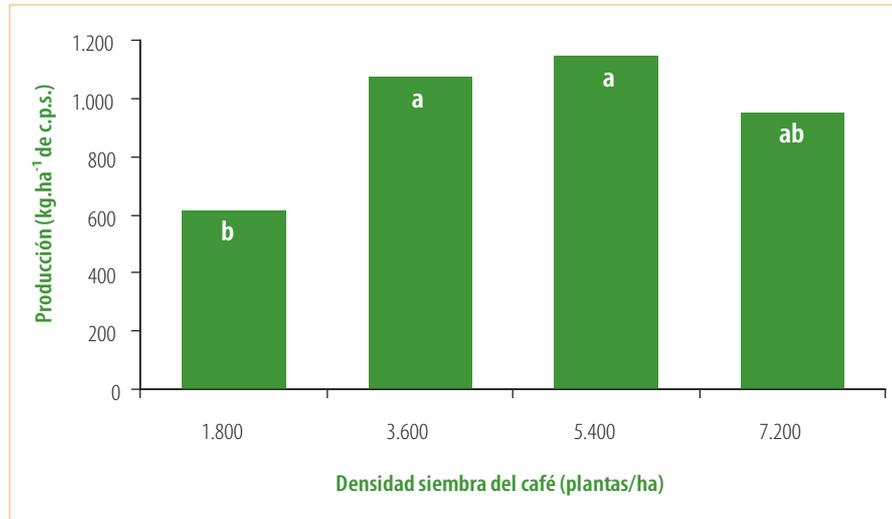
**Tabla 16.**

Distancias de siembra de café variedad Tabi. Estación Central Naranjal-Caldas (Estudio 2).

Nº	Densidad (Plantas/ha)	Distancias de siembra (m)
1	1.800	2,35 x 2,35
2	3.600	1,65 x 1,65
3	5.400	1,35 x 1,35
4	7.200	1,18 x 1,18

**Figura 45.**

Promedio de la producción de café variedad Tabi (kg. ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), en cinco cosechas (2008 a 2012). Estación Central Naranjal-Caldas.

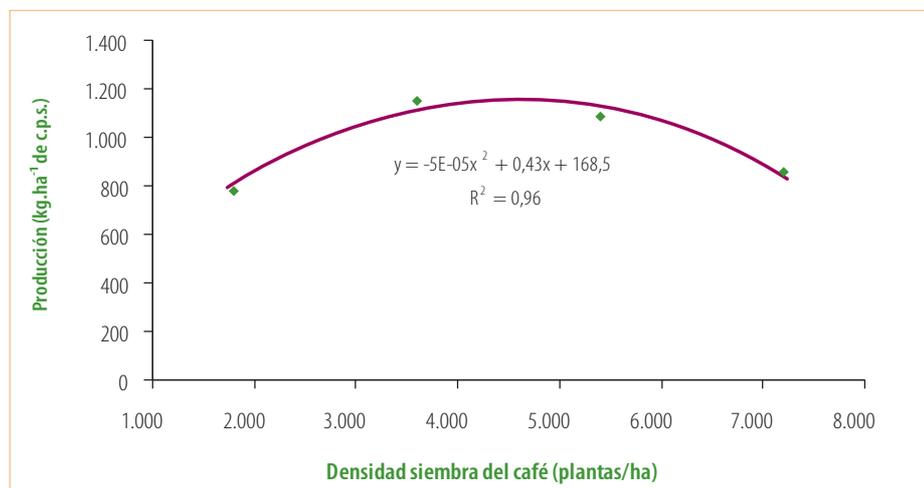


La comparación del promedio de la producción registrada de cinco cosechas de café (2008 a 2012), indica que cuando se cultiva café variedad Tabi con sombrío de cuatro especies leguminosas y con aplicación de fertilizante orgánico, la menor producción se obtiene con densidades de siembra del café de 1.800 plantas/ha. Bajo las mismas condiciones de cultivo y con densidades de siembra del café de 3.600, 5.400 y 7.200 plantas/ha, se obtuvieron producciones similares. El promedio de la producción bajo estas tres densidades de siembra fue de 1.057 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco.

Para determinar la densidad de siembra con la que se obtiene la máxima producción, se analizaron funciones de producción, y se registró que la función que mejor explica la densidad de siembra óptima fue la cuadrática, del orden  $y = ax^2 + bx + c$ . De acuerdo a la función determinada, a las condiciones de clima y suelo de la localidad donde se desarrolla el estudio, y al período productivo evaluado (2008 a 2012), la densidad de siembra del café variedad Tabi (porte alto), con la cual se obtiene la máxima producción (1.189 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), es de 5.200 plantas/ha (Figura 46).

**Figura 46.**

Densidad de siembra óptima de café variedad Tabi (Estudio 2). Estación Central Naranjal.



### 3.3 Estrategia 3. Establecer un plan de fertilización apropiado

#### 3.3.1 *En SAF aplicar dosis de fertilizante de acuerdo a los resultados de los análisis de suelos y nivel de sombrío*

Muchos efectos de los árboles a largo plazo se expresan a través de las propiedades del suelo, el mantenimiento de altos niveles de materia orgánica es uno de los principales factores, tanto por su rol de mantener la estructura del suelo como por su importancia como fuente y sustrato de nutrientes. Los altos niveles de materia orgánica son una causa y efecto de una alta productividad de ecosistemas y de la intensidad de su manejo (Muschler, 2000).

Mientras algunos efectos de los árboles a través del suelo se notan a corto plazo (por ejemplo, la reducción de la temperatura del suelo, aumento en la humedad), son pocos los resultados de investigaciones en cuanto a la fertilización del café bajo sombra a largo plazo; en general, estos estudios recomiendan la reducción de la sombra, puesto que la producción está más o menos determinada por la cantidad de luz recibida, independiente de la cantidad de fertilizante aplicado.

Los sistemas de producción bajo sombra tienen, generalmente, producciones más estables por un determinado tiempo y éstos requieren niveles más bajos de fertilizante que el café a plena exposición solar. El café responde simultáneamente a la entrada de luz y a la fertilización (Szzott y Kass, 1997; Farfán y Mestre, 2004b), por tanto, los estudios sugieren la fertilización con la poda periódica de los árboles, para inducir un incremento en la producción. Estudios sobre la respuesta del café a la fertilización realizada en Cenicafé, se presentan a continuación.

##### 3.3.1.1 *Respuesta del café en SAF a la aplicación del fertilizante*

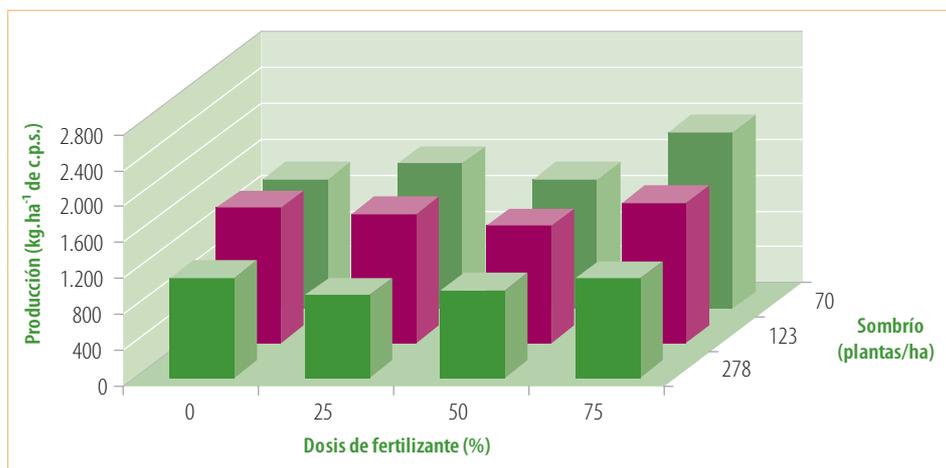
En el establecimiento y desarrollo de cafetales en sistemas agroforestales debe tenerse en cuenta la respuesta, positiva o negativa, de las interacciones entre el clima, el sombrío, la variedad de café y los niveles de insumos, especialmente de fertilizantes.

- **Principio de respuesta condicionada.** “Reacción o respuesta ante un estímulo”. De acuerdo a este principio “la respuesta a la fertilización depende de una serie de factores de orden natural y del manejo”. Dentro de éstos está el tipo de suelo, sus características intrínsecas de fertilidad harán que una respuesta sea alta, baja o nula. Por otra parte, la presencia de plagas, enfermedades y arvenses puede alterar completamente la respuesta. El sistema y manejo del cultivo y el riego también pueden alterar fuertemente la respuesta (Ruiz, 2010).

En Colombia, se han realizado diversos estudios sobre la respuesta del café bajo sombra a la fertilización, pero no es amplia la información sobre la interacción del grado de cobertura arbórea y los diferentes niveles de fertilización. Con el propósito de estudiar estas interacciones se han desarrollado estudios para evaluar el comportamiento productivo del café con sombrero, a la aplicación de niveles de fertilizante.

**Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar.** En la zona cafetera norte de Colombia Farfán y Mestre (2004b), evaluaron el efecto de cuatro dosis de un fertilizante inorgánico completo, en café variedad Colombia, establecido en un sistema agroforestal. Las dosis se determinaron con base en las recomendaciones del análisis de suelos (0%, 25%, 50% y 75%). El sistema agroforestal estuvo compuesto por café e *Inga edulis* plantado a tres distancias de siembra, 6,0 m x 6,0 m (273 plantas/ha), 9,0 m x 9,0 m (123 plantas/ha) y 12,0 m x 12,0 m (70 plantas/ha).

El café se estableció a una distancia de 1,5 m x 1,5 m (4.444 plantas/ha), en todos los casos. Los resultados obtenidos les permitieron concluir que en la zona cafetera norte de Colombia, con el sombrero a densidades de 278 y 123 plantas/ha, el café no responde a la aplicación de dosis bajas o altas del fertilizante. Con el sombrero a 70 plantas/ha hubo respuesta del café a las aplicaciones del 75% de la dosis del fertilizante. También observaron que hubo diferencias al comparar el promedio de la producción de los tres subsistemas; la producción más baja se registró en el café con el sombrero establecido a 6,0 m x 6,0 m y un promedio del porcentaje de sombra del 57,0%, seguida de la producción obtenida con el sombrero plantado a 9,0 m x 9,0 m y el promedio del porcentaje de sombra del 47%. La producción más alta se presentó en el café con el sombrero establecido a 12,0 m x 12,0 m y un nivel de sombra del 35,0% en promedio (Figura 47).



**Figura 47.**

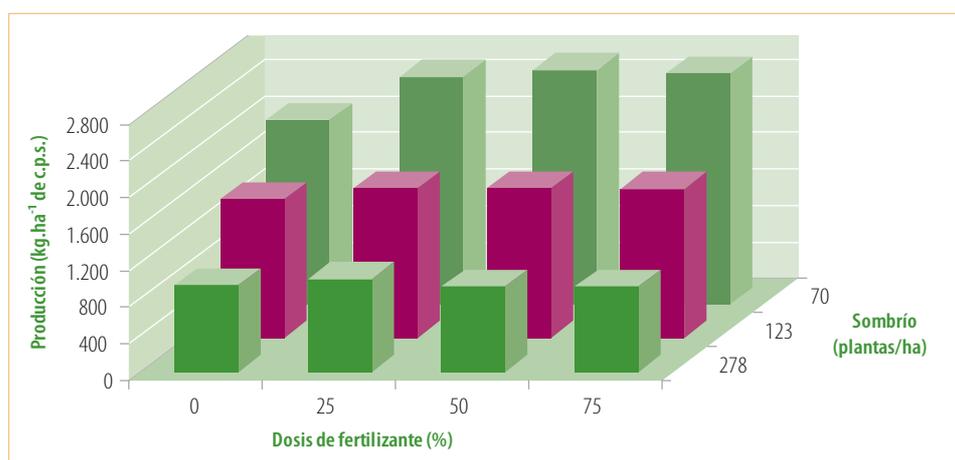
Producción del café variedad Colombia (kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.). Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (Fuente: Farfán y Mestre 2004a y 2004b).

**Estación Central Naranjal-Caldas.** En la zona cafetera central de Colombia Farfán y Mestre (2004a), evaluaron el efecto de la aplicación en café de cuatro niveles de fertilizante inorgánico (0%, 25%, 50% y 75% de las recomendaciones de los análisis de suelos), en un sistema agroforestal donde el componente arbóreo fue *Inga edulis*, plantado a distancias de 6,0 m x 6,0 m (273 plantas/ha), 9,0 m x 9,0 m (123 plantas/ha) y 12,0 m x 12,0 m (70 plantas/ha). El café se estableció a una distancia de 1,5 m x 1,5 m (4.444 plantas/ha), en todos los casos. Con los resultados obtenidos concluyeron que en la zona centro de Colombia, con sombrío a densidades de 278 y 123 plantas/ha, el café no responde a aplicaciones de fertilizante. En el cultivo establecido con sombrío a 12 m x 12 m (70 plantas/ha), hay respuesta del café a aplicaciones del 25%, 50% y 75% del fertilizante, con una diferencia mínima del 20% del promedio general registrado en la cuarta cosecha.

Igualmente, determinaron que con la aplicación del 25% del fertilizante se aumenta la producción en 32,4%, con el 50% de la dosis se aumenta la producción en 38,1% y con el 75% del fertilizante se incrementa la producción en 34,7%, al compararlos con el testigo (0 fertilización). También observaron que al comparar la producción media de los tres subsistemas hubo diferencia entre ellos; la producción más baja se registró en el café con el sombrío establecido a 6,0 m x 6,0 m y un porcentaje promedio de sombrío del 70,0%, seguida de la producción obtenida con el sombrío plantado a 9,0 m x 9,0 m y porcentaje promedio de sombra del 60,0%. El promedio más alto de la producción en el café se registró con el con el sombrío establecido a 12,0 m x 12,0 m y un nivel de sombra promedio del 45,0% (Figura 48); de los resultados se puede inferir que el café responde inicialmente al ingreso de luz al cultivo y posteriormente a las aplicaciones del fertilizante. En el cuarto año de establecido el componente arbóreo se debe hacer regulación del sombrío mediante podas, que permitan menor interceptación de radiación y aumento de la producción de café.

**Figura 48.**

Producción del café variedad Colombia (kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.). Estación Central Naranjal-Caldas (Fuente: Farfán y Mestre 2004a y 2004b).



### 3.3.1.2 Respuesta del café en SAF y renovado por zoqueo, a la aplicación de fertilizante

Del estudio anterior y posterior cumplimiento de su primer ciclo productivo, fue necesaria la renovación por “zoqueo”, con el propósito de mantener la producción alta y estable; seguidamente, se evaluó la respuesta del café bajo sombrío, en su fase de renovación a la aplicación de diferentes dosis de fertilizante. En la Estación Experimental Pueblo Bello la renovación se realizó en el primer semestre de 2004, por tanto, los registros evaluados corresponden a las cosechas de 2005 a 2009. En la Estación Central Naranjal la renovación se realizó en el primer semestre del año 2000 y los registros analizados corresponden a las cosechas de 2001 a 2004. Los porcentajes del sombrío dado por *Inga edulis* afectan significativamente la producción, al variar la distancia de siembra y manteniendo constante la distancia de siembra del café; la función que describió la relación entre la distancia de siembra del sombrío y el nivel de fertilizante aplicado sobre la producción de café, en la mayoría de los casos, fue un polinomio cuadrado del orden  $y = ax^2 + bx + c$ .

En la Figura 49 se presenta el efecto de la interacción, densidad de siembra del sombrío y dosis de fertilizante aplicado, sobre la producción del café ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café pergamino seco), promedio de cuatro cosechas (en la fase de renovación por zoqueo) en la Estación Experimental Pueblo Bello.

En la Figura 50 se presenta la respuesta en producción del café a la aplicación de dosis diferenciales de fertilizante en la Estación Central Naranjal.

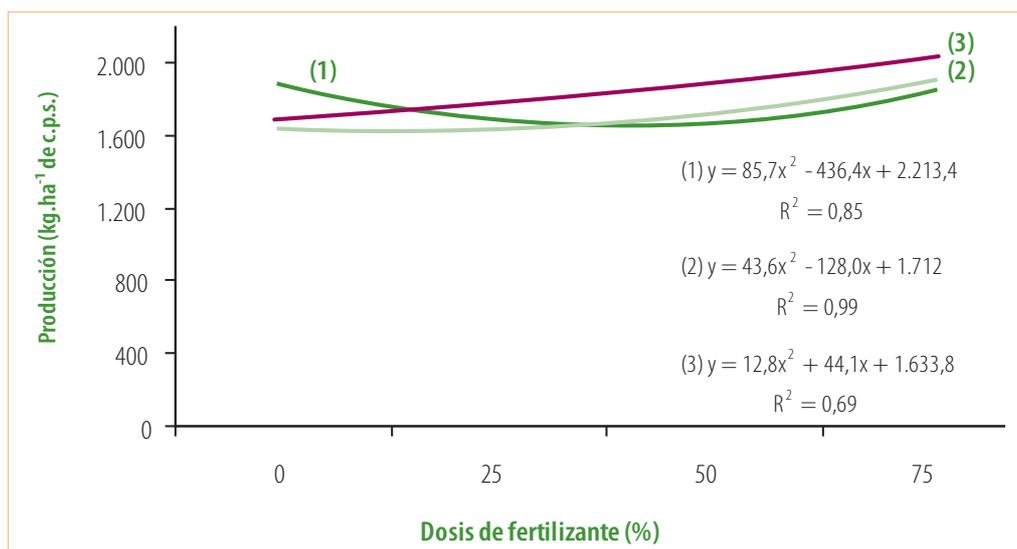
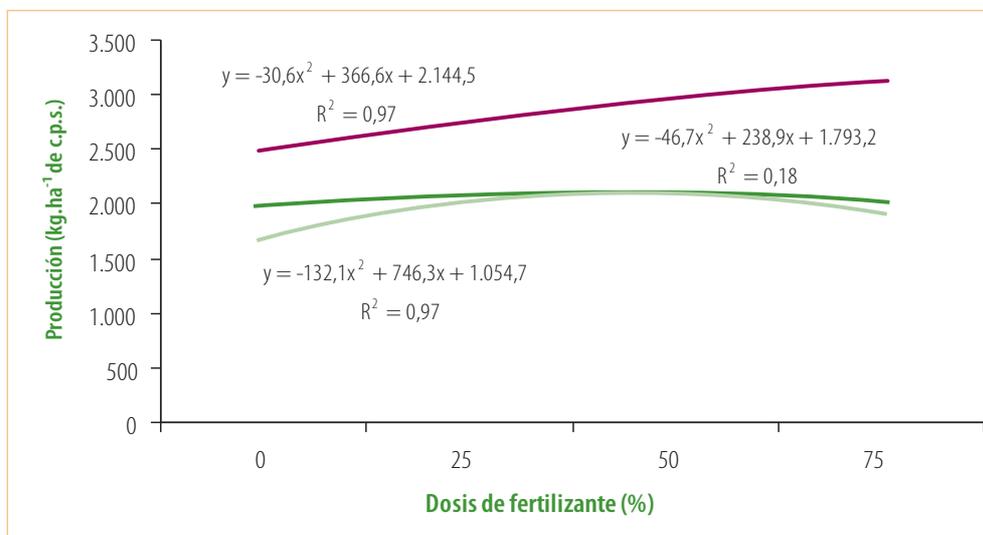


Figura 49.

Respuesta del café variedad Colombia a la aplicación de diferentes dosis de fertilizante y bajo sombrío. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar.



**Figura 50.**

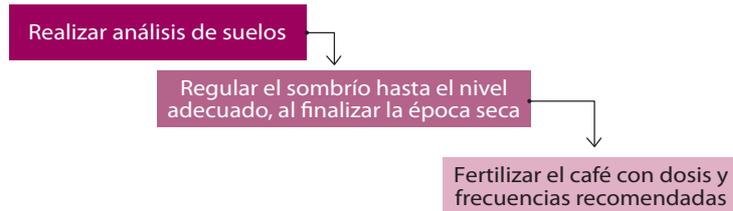
Respuesta del café variedad Colombia a la aplicación de diferentes dosis de fertilizante y bajo sombrío. Estación Central Naranjal-Caldas.

En las zonas cafeteras norte y centro del país, donde por condiciones de clima y suelo, bajo las cuales se estableció el estudio, es recomendado el cultivo del café bajo sombrío y a libre exposición solar, respectivamente; se obtuvo que con distancias de siembra del café a 1,5 m x 1,5 m, en su fase de renovación y con sombrío de *Inga edulis* establecido a 6,0 m x 6,0 m (278 plantas/ha) y a 9,0 m x 9,0 m (123 plantas/ha), no hubo respuesta del café a las aplicaciones de dosis bajas o altas de fertilizante inorgánico. En cultivos de café en arreglos espaciales al cuadro a 1,5 m x 1,5 m, con sombrío a 12,0 m x 12,0 m (70 plantas/ha), la mayor respuesta a aplicaciones de fertilizante se obtuvo cuando éstas incluyeron el 75% de la dosis según análisis de suelo.

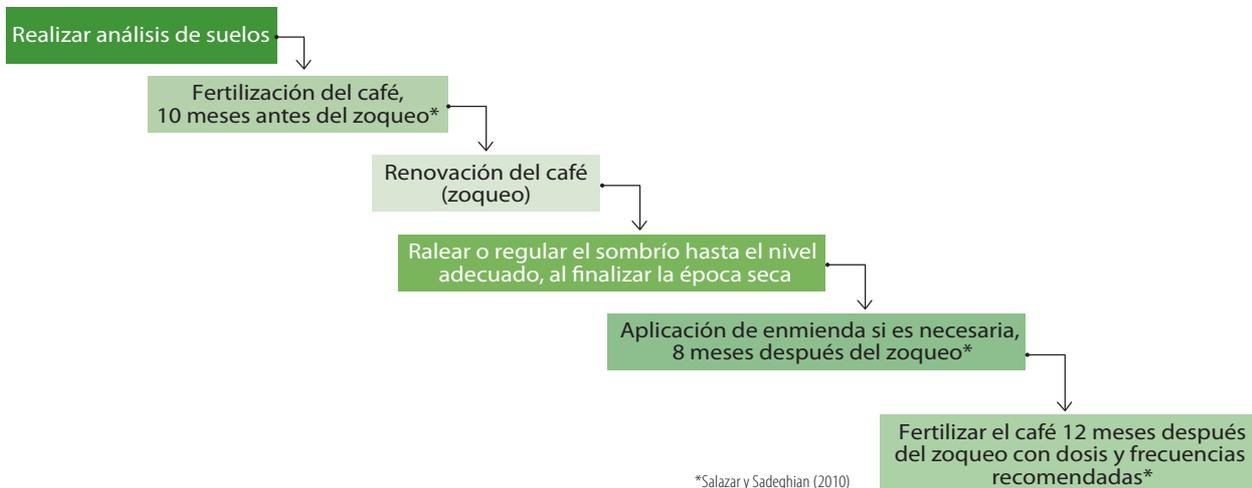
De los anteriores resultados se concluye que el café con altos porcentajes de sombrío, superiores al 43,9% estimado para la Estación Experimental Pueblo Bello y superiores al 36,8% calculado para la Estación Central Naranjal (Farfán y Jaramillo, 2009), no responde a las aplicaciones de fertilizante, y que para implementar un programa de fertilización en sistemas agroforestales, inicialmente se debe regular el sombrío hasta llevarlo a los niveles adecuados y luego fertilizar, es decir, la producción del café bajo sombrío como respuesta a la aplicación de fertilizante se puede ver favorecida con un manejo de la cobertura arbórea, mediante la poda de los árboles, práctica que permitirá la entrada de luz al cultivo y una mayor circulación del aire. Actualmente hay un interés creciente por la introducción de árboles en las fincas o en los cafetales, motivado por sus aportes económicos y ecológicos, y los árboles pueden reducir la necesidad de usar ciertos insumos, especialmente fertilizantes; pero los efectos económicos de los árboles pueden ser mayores en zonas óptimas para café, que no tengan limitaciones de fertilidad de suelo y clima para el cultivo.

Como aplicación práctica la secuencia de los planes de fertilización para el café en producción y a renovar en SAF, se sugiere:

#### Secuencia para la fertilización del café en producción y bajo sombrío



#### Secuencia para la fertilización del café a renovar por zoqueo y bajo sombrío



#### 3.3.1.4 Producción del café con asocio de diferentes especies de árboles y fertilización orgánica

Cuando la producción de café se realiza aplicando prácticas orgánicas, es recomendable el establecimiento de sombrío transitorio o permanente y coberturas vegetales; no obstante, es posible establecer café orgánico a libre exposición solar si las condiciones de nubosidad, radiación solar y luminosidad, entre otras, lo permiten. El sombrío permanente puede ser mixto (diferentes especies de árboles), conformado por especies leguminosas y otras especies forestales o maderables, siempre que dejen pasar buena cantidad de luz. Las plantas de sombrío deben manejarse con podas de formación y los residuos vegetales resultantes de esta práctica servirán como aporte de materia orgánica (Farfán, 2000).

En la Finca El Roble, se estableció un sistema para la producción de café orgánico, con el menor impacto posible de la producción y que se adapte a las condiciones ecológicas de la zona cafetera

del departamento de Santander y simultáneamente determinar el efecto de la intensidad del sombrío sobre la cantidad y la calidad de la producción del café, cuando se cultiva según los principios de la agricultura orgánica en la zona cafetera del departamento. Los sistemas evaluados se describen en la Tabla 17.

**Tabla 17.**

Agrosistemas evaluados en la Finca El Roble-Santander.

N°	Descripción
1	Café con sombrío de guamo + carbonero, sin fertilización
2	Café con sombrío de guamo + carbonero, con fertilización
3	Café con sombrío de guayacán + nogal, sin fertilización
4	Café con sombrío de guayacán + nogal con fertilización

**Fertilización.** El biofertilizante aplicado fue una mezcla de 70,0% pollinaza + 30,0% de pulpa de café + otros residuos (cascarilla de arroz, estiércol vacuno, etc.); la dosis aplicada fue de 4,0 kg/planta al año, fraccionada en dos aplicaciones, mitad de la dosis en el primer semestre del año y la otra mitad en el segundo. Las concentraciones de nutrientes determinados para este material orgánico se presentan en la Tabla 18.

**Tabla 18.**

Características del biofertilizante aplicado.

N (%)	M.O. (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	pH
2,07	63,1	2,20	3,03	5,80	0,91	8,7

En la Tabla 19 se presenta los resultados obtenidos en cinco cosechas (2005 a 2009).

**Tabla 19.**

Promedio de la producción (kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.) de cinco cosechas de café (2005-2009). Finca El Roble-Santander.

Años	Producción (kg. ha <sup>-1</sup> de c.p.s.) en cada sistema			
	Café con sombrío de guamo y carbonero		Café con sombrío de guayacán y nogal	
	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización
2005	949 b	1.373 a	905 b	1.374 a
2006	2.442 b	3.175 ab	2824 ab	3.265 a
2007	2.985 b	4.823 a	1.821 b	4.641 a
2008	3.018 a	3.270 a	2.632 a	2.588 a
2009	2.861 a	2.386 a	2.193 a	1.900 a
Media	2.451 ab	3.005 a	2.075 b	2.754 ab
c. v.	0,32	0,38	0,33	0,41

Los análisis estadísticos realizados a la producción de café registrada en los años 2006 y 2009, bajo cada condición de sombrío y nivel de fertilización, indican que no se presentan diferencias significativas cuando se cultiva café con sombrío de las dos especies leguminosas y las dos forestales con fertilización orgánica. Tampoco hubo diferencias cuando no se realiza algún tipo de fertilización y se cultiva bajo sombrío. En el año 2007, las máximas producciones se obtienen en los sistemas de producción, que además de tener sombrío, fueron fertilizados. Las mayores producciones se obtuvieron con el cultivo de café con sombrío de guamo + carbonero y café con sombrío de guayacán + nogal, con fertilización.

La comparación de la producción media registrada de cuatro cosechas de café (2005 a 2009), indica que cuando se cultiva café con sombrío de guamo y carbonero, y guayacán más nogal, con aplicación de fertilizante orgánico, en promedio se produce 28,0% más si se fertiliza el café con abonos orgánicos; al cultivar café con sombrío de guamo más carbonero y guayacán más nogal la producción es igual si se fertiliza el café. También se registraron producciones iguales al cultivar el café con sombrío de las dos especies leguminosas y las dos forestales sin aplicación de fertilizantes orgánicos.

La limitación o eliminación de la práctica de fertilización en sistemas de producción de café en sistemas agroforestales y con técnicas orgánicas, puede traer efectos detrimentales para el cultivo. En el sistema café más guamo y carbonero, con fertilizaciones orgánicas de 4,0 kg/planta al año del abono orgánico anteriormente descrito, se alcanzaron promedios de producción de 3.005 kg.ha<sup>-1</sup> c.p.s., 554 kg más que cuando no se realiza la fertilización. En el sistema café más guayacán y nogal, con fertilizaciones orgánicas, con las mismas dosis del abono orgánico, se alcanzaron promedios de producciones de 2.754 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s., 679 kg más que cuando no se realiza la fertilización.

### **3.3.2 *El componente arbóreo en SAF contribuye con el mantenimiento de la fertilidad del suelo***

#### **3.3.2.1 *Aporte de materia seca y liberación de nutrientes en SAF con café***

El componente arbóreo en un sistema agroforestal busca optimizar el uso de recursos y aumentar la productividad por unidad de terreno, además de ser una fuente energética, de madera, frutos o sombrío, puede regular las condiciones de luz para el cultivo principal y suplir parte de los nutrientes requeridos por él; además, con una densidad suficiente de árboles se logra reducir los vientos fuertes, lo que contribuye a la protección del suelo y del café (Zaia y Gama, 2004). Los árboles también aportan gran cantidad de residuos vegetales que actúan como material de cobertura (López, 2001); la capa de hojarasca es el eslabón que mantiene unidos los componentes arbóreos con el suelo, esta capa a su vez, por procesos de descomposición y mineralización, liberará nutrientes que podrán ser nuevamente absorbidos por las plantas (Schroth *et al.*, 1993; Staver *et al.*, 2001).

El retorno anual de la materia orgánica y bioelementos al suelo, a través de la hojarasca, es uno de los condicionantes más importantes en la renovación en el seno del ecosistema agroforestal. El efecto que la acumulación de los restos orgánicos en la superficie del suelo tiene sobre la productividad, ha inducido a muchos autores al estudio de la cinética de la descomposición de la hojarasca (Bunvong y Granger, 1979; De las Salas, 1987). El posible papel de las especies arbóreas sobre la circulación de nutrientes en su ecosistema depende de la cantidad de material reciclable y de su tasa de descomposición. Por ello, es importante la identificación de las especies con influencia positiva sobre la restauración de la fertilidad del suelo, para utilizarlas en el diseño de plantaciones arbóreas mixtas y sistemas agroforestales (Labrador, 1996; Montagnini *et al.*, 1993; Zaia y Gama, 2004). Investigaciones sobre el aporte de materia seca aérea y transferencia de nutrientes, se presentan en este aparte.

- **Liberación de nutrientes y requerimientos por las plantas - Principio de sincronía nutricional.** De acuerdo con Ruiz (2010), el principio se puede sintetizar así: “Para satisfacer la necesidad nutricional del crecimiento aéreo o la demanda local de tejidos específicos, el nutriente debe agregarse o debe estar en los sitios estratégicos previamente a la misma”, es decir, “hay que anticiparse a la demanda del nutriente”, pues el acopio de nutrientes por la planta antecede a la necesidad que se generará con el propio crecimiento, si el nutriente escasea se afecta el rendimiento.

Los sistemas naturales conservan nutrimentos y tienen pérdidas pequeñas, pero frecuentemente las pérdidas de los sistemas agrícolas son grandes. Para aumentar la productividad tiene que conservar nutrimentos existentes o aplicar insumos de bajo costo, por tanto, se debe aplicar el ciclo de los nutrientes donde un manejo adecuado puede aumentar (mineralización) o inhibir (inmovilización) la cantidad de nutrimento disponible para la planta (Myers *et al.*, 1997).

**Manejo para mejorar la sincronía.** En el uso de residuos orgánicos, el manejo de la sincronía es clave para la sostenibilidad de los agroecosistemas, siendo importante tener algunas consideraciones (Figura 51):

**Planta:** Tipo de cultivo, sistema radical, demanda, plantas que modifican los patrones de liberación de nutrimentos.

**Manejo de fertilizantes:** Liberación controlada o lenta, aplicaciones divididas, inhibidores de nitrificación, mezclas de abonos orgánicos e inorgánicos.

**Insumos orgánicos:** Uso de residuos de cultivos, abonos verdes, estiércoles, compost, desechos.

Como factor fundamental en la sincronía o la liberación de nutrientes, es el conocer la tasa o velocidad de descomposición de los residuos orgánicos.



**Figura 51.**

Representación esquemática de las relaciones de nutrimentos entre sistemas forestales, agrícolas y agroforestales.

- Descomposición de la materia orgánica en el suelo.** Las transformaciones por las que pasa el carbono comprenden esencialmente dos fases, una de fijación y otra de regeneración. La fijación del gas carbónico atmosférico es efectuada por los organismos fotosintéticos, plantas verdes, algas y bacterias autótrofas. Esta fijación finaliza con la síntesis de compuestos hidrocarbonados de complejidad variable, amidas, hemicelulosas, celulosas, ligninas, proteínas, aceites y otros polímeros. Estos compuestos retornan al suelo con los residuos vegetales y son utilizados por los microorganismos que regeneran a gas carbónico durante reacciones de oxidación respiratoria, en las cuales se emplea energía (Mendonca y Gomide, 2005).

La velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo, independiente de la forma en que se encuentre, está condicionada por numerosos factores, entre ellos están: origen y naturaleza de la materia orgánica, agentes responsables de la descomposición, humedad, temperatura, acidez del suelo y contenido de nutrientes del suelo.

**Origen y naturaleza de la materia orgánica.** La materia orgánica del suelo proviene, casi en su totalidad, de residuos vegetales cuya composición media varía entre las diferentes especies vegetales, dentro de una misma especie varía con la edad y nutrición de la planta (Mendonca y Comide, 2005).

Durante la descomposición de la materia orgánica por acción de las enzimas y los microorganismos, algunos compuestos son utilizados más rápidamente que otros, siendo la fracción soluble en el agua y las proteínas los primeros compuestos en ser metabolizados. La celulosa y hemicelulosa no desaparecen con la misma intensidad, pero la permanencia de estos compuestos en el suelo es relativamente corta. Las ligninas son altamente resistentes, tornándose a veces como las más abundantes en la materia orgánica en descomposición.

**Relación Carbono:Nitrógeno (C:N).** Esta relación depende de las especies y la edad de las mismas, y es un buen indicador de la susceptibilidad de la hojarasca a ser degradada. El rango óptimo en los residuos orgánicos se encuentra entre 25 y 30:1; si el residuo inicial es rico en C y pobre en N, la descomposición será lenta, pero si el residuo tiene altas concentraciones de N, éste se transformará en amoníaco e impedirá la correcta actividad biológica. Si el material final, después del proceso de descomposición, tiene un valor C:N alto (>35), indica que no ha habido una descomposición completa y si el índice es muy bajo (<25), puede ser por una excesiva mineralización (De Las Salas, 1987; Fassbender, 1993; Oliver *et al.*, 2002). Una relación C:N en los residuos orgánicos mayor a 30 es alta; entre 15 y 30 es equilibrada y una menor de 15 es baja (Mendonca y Gomide, 2005); aunque todo ello depende de las características del material de partida (Farfán, 1995; Farfán y Urrego, 2004; Minagricultura, 2004).

La relación carbono:nitrógeno (C:N) puede determinar muchas veces la cinética o velocidad de la descomposición, entonces debe considerarse la dinámica de la relación C:N bajo dos aspectos:

- a. La relación C:N de los microorganismos
- b. La relación C:N de la materia orgánica

En el primer caso, la relación C:N de las células microbianas es muy variable; por ejemplo, la relación C:N en hongos es de 10:1, en actinomicetos de 8:1, en bacterias aeróbicas 5:1 y en las anaerobias 6:1. Durante la descomposición de la materia orgánica en el suelo la relación C:N disminuye, y parte de C orgánico se pierde en forma de CO<sub>2</sub> (Mendonça y Comide, 2005).

**Mineralización.** Es la degradación completa de un compuesto a sus constituyentes minerales, donde el carbono orgánico es oxidado hasta CO<sub>2</sub>. Dado que la descomposición de un sustrato orgánico por medio del proceso de respiración aeróbica tiene como productos principales el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, la evolución de CO<sub>2</sub> puede utilizarse como un indicador bastante preciso de la actividad respiratoria de comunidades en agua y suelo. La mineralización incluye un conjunto de procesos por medio de los cuales, el N y el P, entre otros, en combinación con la materia orgánica, son transformados a moléculas inorgánicas de constitución más simple (Meléndez, 2003).

**Inmovilización.** La adición de residuos orgánicos está acompañada de un incremento en la población microbiana, estas poblaciones requieren nitrógeno para hacer posible el crecimiento

de la biomasa microbial. Al tomar el N necesario para su crecimiento, la flora microbiana baja los niveles de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  disminuyendo la disponibilidad de N para los organismos nitrificantes y para las plantas, esto se conoce como inmovilización (Meléndez, 2003).

- **Coefficiente asimilatorio de carbono (C).** Cuando se aplican residuos vegetales con una elevada relación C:N, en una primera fase, se produce una inmovilización del nitrógeno presente en el suelo por parte de los hongos encargados de la descomposición de esos restos, principalmente celulósicos o lignínicos. Cuando la citada relación va bajando al producirse el consumo del carbono, utilizado como fuente de energía de todos los microorganismos del suelo, se inicia una mayor actividad bacteriana que va liberando nitrógeno mineral a la velocidad que los hongos lo inmovilizan (Simon, 2004).

Al mismo tiempo se produce la muerte de muchos de ellos y su transformación por parte de las bacterias con liberación del nitrógeno que posee. En ese lapso de tiempo, el nitrógeno del suelo no sufre variaciones significativas. Finalmente, cuando la relación C:N es baja los compuestos presentes son degradados con mayor facilidad por las bacterias que equilibran su población, por lo que va resultando un excedente de nitrógeno que queda en el suelo en forma mineral y se produce una liberación del elemento que será utilizado por las plantas (Simon, 2004).

Los coeficientes asimilatorios o consumo de carbono orgánico, dados en porcentaje, por algunos microorganismos son: Hongos 30% a 40%, actinomicetos 15% a 30% y bacterias 1% a 15%. En términos prácticos, puede considerarse un coeficiente asimilatorio de carbono orgánico del 35%, el cual tiene mucha utilidad práctica, por ejemplo:

Descomposición de residuos secos de sorgo. El sorgo contiene 40% de C y 0,7% de N.

- Considerando un coeficiente de asimilación de C del 35%, en 100 kg de materia seca, resultan 14,0 kg de C asimilable: (40 kg de C total x 0,35).
- Considerando una relación C/N de los microorganismos de 10:1, se obtiene que se necesitan 1,4 kg de N para la descomposición de 100 kg de residuos de sorgo:  $C/N = 14/10$ .
- Del material residual del sorgo, 100 kg contienen 0,7 kg de N disponible.
- Como se requieren 1,4 kg de N para la descomposición de los residuos y sólo se tienen 0,7 kg, hay déficit de 0,7 kg de N para la completa descomposición.

En este caso los microorganismos retiran del suelo el N disponible, provocando un fenómeno de inmovilización de N del suelo y compitiendo así con las plantas por este elemento.

Esta es una de las razones de la controversia existente entre la conveniencia de enterrar las pajas de los cereales o destruirlas. En terrenos con una actividad biológica intensa y con contenidos en nitrógeno mineral altos, su incorporación al suelo resulta beneficiosa, pues facilita el desarrollo microbiano e incrementa el contenido orgánico del suelo. En caso contrario, se tendrán efectos negativos, pues el material se transformará con excesiva lentitud y provocará grandes espacios en la superficie del suelo que impedirán el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas recién germinadas (Fassbender, 1993; Herrera, 2001; Labrador, 1996; Primavesi, 1984; Burbano, 1989).

- **El ciclo de los residuos orgánicos.** De acuerdo con Alvarado (2008), el ingreso de nutrimentos al ecosistema está más ligado a su ciclaje que a la forma en que funciona la adición de residuos provenientes del ecosistema, sin que se encuentren diferencias entre lo que ocurre en las plantaciones o bosques tropicales. Se entiende por residuos los productos orgánicos acumulados en los suelos provenientes de la vegetación viva que crece sobre ellos (hojas, ramas, flores y madera), aunque el concepto puede ampliarse para incluir raíces en descomposición y los residuos de animales muertos que viven sobre el suelo. Entre las principales funciones que tienen los residuos en el ecosistema, son las funciones de mineralización (liberación de nutrimentos ligados a los residuos) y de la humificación (proceso que conlleva a la formación de sustancias orgánicas que se acumulan en el suelo) y de allí en adelante los efectos específicos que cada una de estas dos fracciones juega sobre las propiedades del suelo (Alvarado, 2008).

### 3.3.2.2 Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica*, *Cordia Alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en SAF con café

- **Dinámica en el aporte de hojarasca del café y el componente arbóreo.** En la Estación Experimental Paraguaicito, Farfán y Urrego (2007) evaluaron la descomposición de la materia seca y transferencia de nutrientes de las especies forestales *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* en sistemas agroforestales con café. Las densidades de siembra fueron de 4.444 plantas/ha (1,5 m x 1,5 m) para el café y 278 plantas/ha (6,0 m x 6,0 m) para el sombrío. En estudios previos, Urrego y Farfán (2002), en la misma localidad y área de estudio, obtuvieron que el aporte de materia seca media por año en café a libre exposición solar fue de 4,9 t.ha<sup>-1</sup> y bajo sombrío de *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis* de 3,8; 4,6 y 4,1 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente, y que el promedio de la producción de residuos vegetales de solo nogal, pino y eucalipto fue de 3,5; 6,7 y 6,4 t.ha-año<sup>-1</sup>. Los contenidos de nutrientes (kg.ha-año<sup>-1</sup>) se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20.**

Biomasa seca y contenido de nutrientes en especies forestales y café. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Especies	Biomasa seca (t.ha-año <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg
		kg.ha-año <sup>-1</sup>				
Café	4,9	102,7	4,4	62,2	79,7	16,1
<i>Cordia alliodora</i>	3,5	68,0	3,7	39,3	184,5	33,3
<i>Pinus oocarpa</i>	6,7	18,9	1,0	10,5	18,8	2,6
<i>Eucalyptus grandis</i>	6,4	45,8	2,9	35,8	84,9	9,2

El material vegetal (hojas y pecíolos frescos) para el análisis de la tasa de descomposición de la materia seca producida por el café bajo cada sistema de cultivo y los producidos por *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis*, se tomó directamente de las plantas de café y de los árboles. En cada bolsa depositaron 100 g de material vegetal seco, de cada una de las especies forestales y el café. Finalmente, las bolsas se ubicaron de manera aleatoria en cada una de las parcelas correspondientes.

**Descomposición del material vegetal residual.** Para la determinación de la tasa de descomposición emplearon el método de “bolsas de descomposición”.

Durante un período de 365 días, cada 30 días se recolectaron 21 bolsas (tres por cada especie forestal y tres por cada sistema de cultivo de café). Posteriormente, evaluaron la descomposición del material como la pérdida de peso correspondiente a cada tiempo de degradación y se expresó como porcentaje de peso de la materia seca remanente (porcentaje peso seco - %Psr); el %Psr se estimó mediante el cociente del peso seco del material mensual remanente en el horno (*Psm*), sobre el peso seco del material inicial en el horno (*Psi*), Ecuación <1>:

$$\%Psr = (Psm/Psi100) \quad <1>$$

Los *Psr* se determinaron para estimar la tasa de mineralización o descomposición del material vegetal. Debido a que la descomposición es proporcional al contenido de materia orgánica, la tasa relativa de descomposición o de transferencia mensual de material vegetal al suelo puede representarse por un modelo exponencial simple (Oelbermann *et al.*, 2004; Santa, 2001; Singh *et al.*, 1999; White *et al.*, 1988; Wieder y Lang, 1982), Ecuación <2>, del orden:

$$y = y_0 e^{-kt} \quad <2>$$

El modelo exponencial simple asume que:

$y$ : Es el porcentaje de peso seco remanente o residual.

$y_0$ : Es el porcentaje de peso seco inicial.

$t$ : Es el tiempo

$k$ : Es la tasa relativa de descomposición mensual o constante de velocidad de descomposición del residuo orgánico (Oliver *et al.*, 2002; Santa, 2001).

El coeficiente de descomposición es un indicador de la “velocidad” con que se transforman o descomponen los residuos vegetales; la tasa de descomposición puede fluctuar entre 0,1 por día para residuos de muy rápida descomposición a 0,00001 por día para residuos de muy lenta degradación (Corbeels, 2001).

**Coefficiente Isohúmico ( $k_1$ ).** Definido como la constante de transformación en humus de la materia seca aportada o también como la fracción de la materia orgánica que queda sin descomponerse o se descompone muy lentamente después de un período de tiempo dado. El  $k_1$  depende esencialmente, pero no exclusivamente, de las características del residuo orgánico (Henin y Dupuis, 1945; Labrador, 1996). Debido a la naturaleza de sus componentes como ligninas y proteínas. Henin y Dupuis (1945) y Saña (2001) sugieren determinar este coeficiente a través de la fracción orgánica del residuo vegetal, la cual es relativamente resistente a la descomposición biológica, mediante la Ecuación <3>:

$$K_1 = Mo_{\text{humificada}} / Mo_{\text{aportada}} \text{ <3>}$$

**Biomasa seca descompuesta e incorporada al suelo.** Al final del período de evaluaciones (12 meses), basados en los aportes totales de hojarasca y otros residuos producidos por las especies forestales y por el café en sus diferentes sistemas de cultivo, se estimó la cantidad total de biomasa seca descompuesta e incorporada al suelo.

**Concentración de nutrientes en la biomasa seca inicial y remanente.** Del material vegetal obtenido directamente de los árboles y del café, se tomaron submuestras para determinar la concentración de nutrientes. Estas concentraciones se denominaron concentraciones iniciales ( $C_i$ ) o en el día cero (0).

**Liberación de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg).** Para la evaluación de la liberación o la transferencia de nutrientes contenidos en la materia seca remanente de todas las especies forestales y del café en sus diferentes sistemas de cultivo, también se aplicó el modelo exponencial simple (Ecuación <4>), propuesto por Olson (1963), Saña (1999), Sinha *et al.* (1977) y Wieder y Lang (1982):

$$W_f = W_i e^{-kt} \quad <4>$$

$W_f$ : Cantidad remanente de N, P, K, Ca y Mg

$W_i$ : Cantidad inicial de cada elemento mineral

$k$ : Constante de liberación de nutrientes

$t$ : Tiempo de descomposición de la hojarasca, expresado en meses

- **Peso seco residual (Psr) de las muestras de las tres especies forestales y del café.**

Los promedios del peso seco de las muestras remanentes de café a libre exposición y con sombrío, y de las especies forestales se presentan en la Tabla 21. El peso seco de la muestra inicial fue de 100 g en todas las especies.

**Tabla 21.**

Peso seco (g) de las muestras remanentes de café a libre exposición y con sombrío y de las especies forestales. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Sistema de cultivo	Peso seco remanente (g)		
	30 días	180 días	365 días
Café al sol	93,0	60,5	34,5
Café y sombrío de nogal	89,7	51,0	33,6
Café y sombrío de pino	93,0	49,0	36,8
Café y sombrío de eucalipto	94,0	62,0	30,1
Nogal	94,3	60,5	41,5
Pino	98,7	78,5	74,6
Eucalipto	98,3	63,0	42,1

\*El peso seco inicial fue de 100 g para todas las especies

Moro y Domingo (2000), en la descomposición de residuos de *Pinus pinaster* y *P. nigra*, registraron pesos secos de 80 y 90 g en las muestras remanentes a los 180 y 360 días; además encontraron pesos secos entre 50 y 80 g a los 180 días y entre 25 y 60 g a los 360 días, para las especies *Adenocarpus decorticans* y *Cistus laurifolius*, respectivamente. Lusk *et al.* (2001), reportan pesos secos remanentes de 60 g en *P. radiata*, en un período de 5 meses, y en *Pinus sp.*, Callahan *et al.* (2004) obtuvieron pesos remanentes de 85 y 75 g a los 200 y 300 días de descomposición de los residuos. Así mismo, White *et al.* (1988) y Sariyildiz (2003), registraron pesos remanentes de 55 g en muestras de *Pinus sp.* a los 360 días, y de 75 y 60 g en *P. sylvestris* a los 180 y 360 días de descomposición. Después de 365 días de descomposición de residuos de *Azadirachta indica*, *Dalbergia sissoo*, *Pongamia pinnata* y *Shorea robusta*, Singh *et al.* (1999) obtuvieron porcentajes de masa remanente de 27,2%, 31,9%, 41,2% y 52,9%, respectivamente.

- **Descomposición de la hojarasca.** En la Tabla 22 se presenta las tasas relativas de descomposición ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) para nogal, pino, eucalipto, café a libre exposición solar y café bajo sombrío. Modelos similares fueron aplicados por Heuveland *et al.* (1989) en *C. alliodora*, por Gama-Rodrigues *et al.* (2003) en *Peltogyne angustiflora*, *Centrolobium robustum*, *Arapatiella psilophylla*, *Sclerobium chrysophyllum*, *C. trichotoma* y *Macrolobium latifolium*, por Prause y Lifschitz (2007) en *Gleditsia amorphoides*, *Patagonula americana*, *Chlorophora tinctoria* y *Astronium balansae*, y por Munguía *et al.* (2004) en *Eucalyptus deglupta*, *Erythrina poeppigiana* y café, entre otros.

Tabla 22.

Valores estimados de la tasa de descomposición mensual del follaje de café, a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las especies forestales. Estación Experimental Paraguacito-Quindío.

Tratamientos	Tasa de descomposición de residuos	
	$k \cdot \text{año}^{-1}$	c.v.
Café a libre exposición	1,00 a	0,04
Café con sombrío de nogal	1,01 a	0,37
Café con sombrío de pino	0,87 a	0,12
Café con sombrío de eucalipto	1,08 a	0,22
<i>C. alliodora</i> (nogal)	0,78 a	0,11
<i>P. oocarpa</i> (pino)	0,26 b	0,03
<i>E. grandis</i> (eucalipto)	0,72 a	0,15

Valores identificados con letras distintas indican diferencia estadística (Tukey al 5%)  $k$ : Tasa de descomposición anual; c.v. Coeficiente de variación

De acuerdo con los análisis, no hubo diferencias entre la tasa de descomposición anual para el café a libre exposición solar y bajo sombrío; tampoco fue evidente esta diferencia en la tasa de descomposición de los residuos de nogal y eucalipto; pero sí hubo diferencia entre la tasa de descomposición de los residuos vegetales de pino y el café bajo todos sus ambientes y nogal y eucalipto, es decir, que los residuos vegetales de pino se descomponen más lentamente que el resto de los materiales.

La tasa de descomposición reportada por Ribeiro *et al.* (2002) para *E. globulus* varía entre 0,37 y 0,42  $k \cdot \text{año}^{-1}$ , mientras que Guo y Sims (2001), para esta misma especie encontraron promedios de las tasas de descomposición de 0,01 y 1,34. En otras especies como *Metrosideros polymorpha*, Austin y Vitousek (2000) obtuvieron una tasa de descomposición ( $k$ ) entre 0,22 y 1,06. Moro y Domingo (2000) registraron valores de  $k$  de 0,13 y 0,16 en *P. pinaster* y *P. nigra*, respectivamente. En *C. trichotoma*, Gamma *et al.* (2003) fijaron un  $k$  de 1,2. Al ajustar modelos exponenciales en la tasa de descomposición de 51 especies arbóreas, Simmons y Hawkins (2005) encontraron que la tasa de descomposición fluctuaba entre 0,002 y 0,45.

Esta variación en la tasa de descomposición, de acuerdo con Berg (2000), la cual puede decrecer de 0,1% por día a 0,00001% por día, puede deberse a la composición química del material vegetal o a la calidad del sustrato. Santa (2001) reportó índices de descomposición ( $k$ .mes<sup>-1</sup>) en *P. pinea* y *P. pinaster* de -0,15 y -0,08, y Kwabiah *et al.* (1999), al aplicar modelos exponenciales simples en la descomposición de residuos de *Croton megalocarpus*, *Sesbania sesban* y *Calliandra calothyrsus*, obtuvieron coeficientes de descomposición ( $k$ .día<sup>-1</sup>) de 0,037; 0,042 y 0,012, respectivamente.

- **Coefficiente Isohúmico ( $k_i$ ).** Las pruebas de comparación realizadas entre los coeficientes Isohúmicos ( $k_i$ ) de café a libre exposición solar y bajo sombrío, no mostraron diferencias estadísticas, lo que indica que la fracción no descompuesta del material vegetal del café no está determinada por el tipo de sombrío. El  $k_i$  durante un año de evaluación fue del 0,37 para el café a libre exposición solar y bajo sombrío (Tabla 23).

**Tabla 23.**

Coefficientes isohúmicos de los residuos de café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las tres especies forestales. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Tratamientos	Coefficiente Isohúmico ( $k_i$ )	c.v.
Café a libre exposición	0,37 a	0,13
Café con sombrío de nogal	0,36 a	0,42
Café con sombrío de pino	0,42 a	0,14
Café con sombrío de eucalipto	0,34 a	0,17
<i>Cordia alliodora</i> (nogal)	0,46 a	0,14
<i>Pinus oocarpa</i> (pino)	0,77 b	0,01
<i>Eucalyptus grandis</i> (eucalipto)	0,49 a	0,16

Letras distintas indican diferencia estadística (Tukey al 5%). c.v. Coeficiente de variación

Ribeiro *et al.* (2002), observaron que en *E. globulus*, después de 645 días de descomposición, se conservaba el 52,8% del material inicial. En residuos de *C. alliodora*, Fassbender (1987) determinó que la fracción sin descomponer, en un período de 300 días, fue del 50,8%; mientras que Arguello (1995) indica que después de 12 semanas de descomposición de los residuos de especies como *Erythrina sp.*, se conservaba más del 61% del peso inicial sin descomponerse.

- **Tasa de incorporación de residuos vegetales.** En los primeros 30 días de descomposición del material vegetal aportado por el café a libre exposición solar (4,9 t.ha-año<sup>-1</sup>) y bajo sombrío (4,2 t.ha-año<sup>-1</sup>) se incorporó al suelo el 9,8% y el 14,3%, respectivamente. La incorporación del 50% de los residuos vegetales se registró a los 240 días de descomposición y a los 365 días se degradaron e incorporaron al suelo el 64,1% y el 65,4% de la materia orgánica producida por el café a libre exposición solar y bajo sombrío, respectivamente.

Del material vegetal aportado por el nogal (3,5 t.ha-año<sup>-1</sup>), el pino (6,7 t.ha-año<sup>-1</sup>) y el eucalipto (6,4 t.ha-año<sup>-1</sup>), en los primeros 30 días de descomposición se incorporaron al suelo el 11,2%, el 5,0% y el 10,8%, respectivamente. El 50% de los residuos vegetales de nogal y el 51% de los de eucalipto se incorporaron entre los 300 y 330 días de descomposición, y a los 365 días se degradaron e incorporaron al suelo el 56,7%, el 25,2% y el 54,0% de la materia orgánica producida por nogal, pino y eucalipto, respectivamente.

Munguía *et al.* (2004), obtuvieron tasas de descomposición del 23% en *E. deglupta* a los 213 días, y del 60% en *Coffea arabica*, después de 213 días. En *P. radiata*, Ganjegunte *et al.* (2004) obtuvieron tasas de descomposición del follaje del 24% anual, esta baja tasa de descomposición es atribuible a los compuestos polifenólicos y a las grandes concentraciones de lignina de esta especie. Santa (2001), en *Quercus rotundifolia*, *P. pinea* y *P. pinaster*, registró que cerca del 30% de la materia seca se descompone durante los primeros 4 meses. Hartemink y O'Sullivan (2001), en *Piper aduncum*, *Gliricidia sepium* e *Imperata cylindrica* registraron una tasa de descomposición del 50% en las diez primeras semanas. Para el caso de *E. globulus*, Ribeiro *et al.* (2002) obtuvieron tasas de descomposición del 47,2% a los 645 días. Moro y Domingo (2002), registraron porcentajes de descomposición del 14,0% en *P. pinaster* y *P. nigra*, después de 360 días, además que el tiempo de descomposición total puede fijarse entre 4 y 5 años. Gama-Rodrigues *et al.* (2003), encontraron que en un año se descompuso e incorporó al suelo el 60% de los residuos de *C. trichotoma*.

En general, Prause y Lifschitz (2001), indican que las hojas de las diferentes especies forestales se descomponen a una velocidad diferente, cabe anotar que el proceso es rápido al comienzo, con pérdidas de peso en los primeros 3 meses entre el 28% y el 60% del peso total del material vegetal. En un bosque compuesto por *Acacia polyphylla*, *Alchornea triplinervia*, *Aspidosperma polyneuron*, *Bastardiopsis densiflora*, *Cordia trichotoma*, *Gallesia integrifolia*, *Luehea divaricata* y *Machaerium brasiliense*, entre otros, Tundis *et al.* (2004) registraron un coeficiente de descomposición (k) de 1,7 y definieron que es necesario esperar entre 150 y 639 días para la descomposición del 50% al 95% del material.

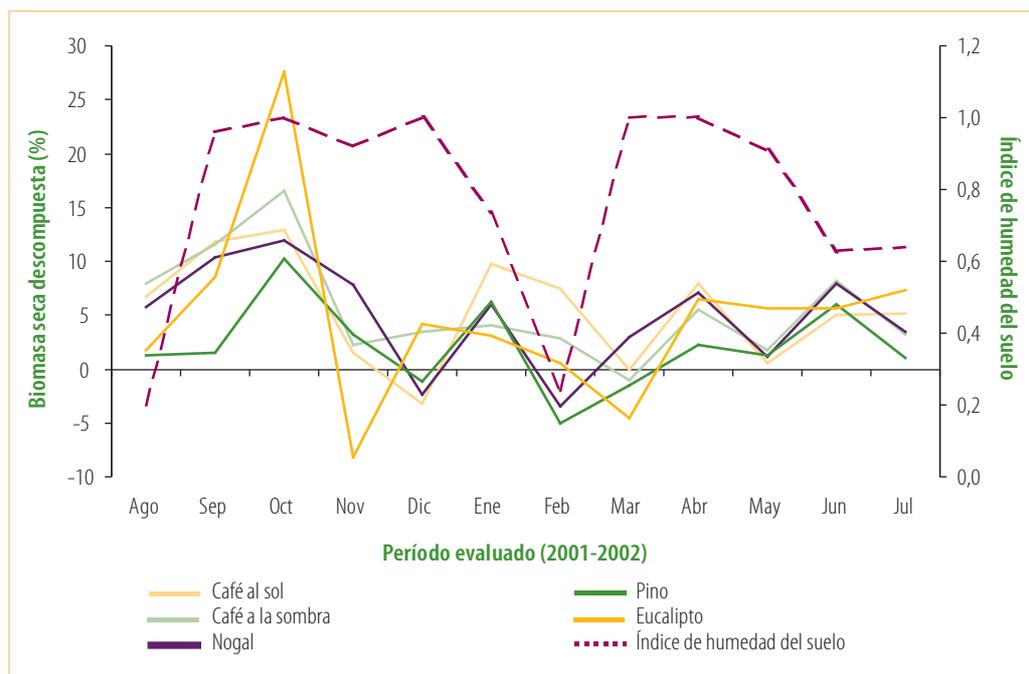
- **Descomposición de residuos vs. Índice de humedad del suelo (IHS).** La influencia de la humedad del suelo sobre la proporción de la biomasa seca descompuesta cada mes, entre agosto de 2001 y julio de 2002, se presenta en la Figura 52.

El coeficiente de correlación (r) entre el IHS y el porcentaje de la materia seca que se descompone cada mes en el tratamiento café a libre exposición solar fue de -0,18, en café bajo sombrío de 0,05, en nogal y pino de 0,31 y en eucalipto de 0,21; no obstante, los análisis de varianza no mostraron relación entre estas dos variables, lo que indica que la disponibilidad o no de agua en el suelo no tuvo influencia sobre la descomposición de la masa vegetal, en las condiciones ambientales para la época y de suelos donde se desarrolló el estudio. Sin embargo, Bunvong y Granger (1979) y Kochy y Scott (1997), sostienen que el clima modifica notablemente la rapidez de la descomposición de los residuos vegetales en la superficie del suelo, y además ejercen influencia

sobre el tipo y la abundancia de la materia orgánica. La humedad y la temperatura se encuentran entre las variables más determinantes, porque influyen en el desarrollo de la vegetación y en la actividad de los microorganismos.

**Figura 52.**

Relación entre la humedad del suelo y el porcentaje mensual de biomasa seca descompuesta (agosto 2001 y julio 2002). Estación Experimental Paraguacito-Quindío (Fuente: Farfán y Urrego, 2001).



Índices menores a 0,6 indican deficiencias de humedad en el suelo.

Así mismo, Bunvong y Granger (1979) afirman que la intensidad máxima de la descomposición de la materia orgánica se registra en condiciones de temperatura moderada (alrededor de 30°C) y con un contenido de humedad del suelo entre el 60% y el 80% de su capacidad máxima de retención de agua. En otros estudios, McTiernan (2003) en *P. sylvestris*, y Liski *et al.* (2003) en *Pinus sp.*, observaron que hay una correlación positiva entre la tasa de descomposición de los residuos vegetales y la humedad relativa, la evapotranspiración, la precipitación y la temperatura. Guo y Sims (2001) observaron que existe correlación positiva de la tasa de descomposición de residuos vegetales de *E. globulus* y los factores como la precipitación, la temperatura y la radiación solar.

Camiré *et al.* (2002) y Simmons y Hawkins (2005), en la evaluación de 51 especies arbóreas, encontraron correlaciones positivas entre la tasa de descomposición y los elementos climáticos, temperatura y precipitación; mientras que Austin y Vitousek (2000) observaron que hay correlación positiva de la precipitación y la tasa de descomposición de residuos vegetales

de *Metrosideros polymorpha*. Dora *et al.* (2002), en *Peltogyne gracilipes*, obtuvieron relaciones inversas entre la tasa de descomposición y la distribución de lluvias. Thaiutsa y Granger (1979) aplicaron regresiones lineales simples para relacionar las variables climáticas y la descomposición de la hojarasca en bosques tropicales, y encontraron que los porcentajes de descomposición aumentan con la precipitación y la humedad relativa, y que la temperatura no tenía influencia sobre la tasa de descomposición.

Sin embargo, la tasa de descomposición no depende sólo de los factores ambientales como la temperatura, la humedad y la precipitación y de las características del suelo, de su humedad y de las poblaciones microbianas (Dora *et al.*, 2002; Fassbender y Bornemisza, 1987); las diferencias en la descomposición de los materiales vegetales están en función de la composición química, de las concentraciones de los nutrientes y de la relación C:N (Fassbender, 1993; Oliver *et al.*, 2002). Sariyildiz (2003) afirma que la concentración de N y la relación C:N se han identificado como los factores más importantes que controlan los procesos de descomposición de la materia orgánica.

- **Carbono orgánico, nitrógeno y relación C:N.** En la Tabla 24 se presentan las concentraciones iniciales y finales de C orgánico y de N, y la relación C:N del café a libre exposición solar y bajo sombrío y de las tres especies forestales.

**Tabla 24.**

Concentración inicial (Ci) y final (Cf) de C orgánico (CO), N y la relación C:N del material remanente del café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las especies forestales. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío (Fuente: Farfán y Urrego, 2001).

Especies	CO (%)			N (%)			C:N		
	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Inicial	Final	r
Café solo	53,4	49,5	-0,49	1,7	2,5	0,68	32,2	19,8	-0,69
Café con sombrío	53,3	50,1	-0,85	2,1	3,0	0,75	24,9	16,9	-0,80
<i>C. alliodora</i>	47,1	42,5	-0,75	2,0	2,4	0,06	23,8	18,1	-0,43
<i>P. oocarpa</i>	55,7	55,4	-0,38	0,5	0,8	0,48	105,1	73,9	-0,38
<i>E. grandis</i>	55,2	52,6	-0,88	0,8	1,4	0,91	71,7	37,3	-0,90

La relación C:N inicial registrada en el café a libre exposición solar fue de 32,2 y la final de 19,8 (a los 365 días de descomposición del material vegetal); mientras que estas relaciones bajo sombrío fueron de 24,9 y 16,9, respectivamente. Los coeficientes de correlación entre el tiempo de descomposición de la biomasa seca del café en los dos sistemas de cultivo (libre exposición solar y bajo sombra), fueron de -0,69 en el primer caso y de -0,80 en el segundo, lo que indica una relación inversa entre estas dos variables, es decir, que la relación C:N disminuye al incrementarse el tiempo de descomposición de los residuos del café.

Las relaciones C:N iniciales en los residuos de *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis*, en su orden fueron de 23,8; 105,1 y 71,7 y la relaciones finales (a los 365 días) fueron de 18,1; 76,9 y 37,3, respectivamente. Los coeficientes de correlación entre el tiempo de descomposición de la materia seca fueron de -0,43 en nogal, de -0,38 en pino y de -0,90 en eucalipto, valores que indican una relación inversa entre estas dos variables, es decir, que la relación C:N disminuye al incrementarse el tiempo de descomposición de los residuos vegetales. La alta relación C:N en *P. oocarpa* indica una lenta descomposición de sus residuos vegetales. Gama-Rodrigues *et al.* (2003) reportan relaciones C:N para *C. trichotoma* de 27,3. Sariyildiz (2003) para *P. sylvestris* registró relaciones de 5,3; pero para la especie *P. rigida*, White *et al.* (1988) indican relaciones iniciales C:N de 95,0 y finales (863 días) de 0,39.

Xu *et al.* (2004) obtuvieron correlaciones positivas entre la masa remanente y la relaciones C:N y C:P, después de 2 años de descomposición de los residuos de *Castanopsis sieboldii* y *Schima wallichii*; Moro y Domingo (2000) y Corbeels (2001), afirman que la descomposición de residuos vegetales de *P. pinaster* y *P. nigra*, después de 2 años, está correlacionada positivamente con la relación C:N inicial. Por lo general, el índice de descomposición es más alto en las especies que tienen máximos valores de ceniza y de nitrógeno, y mínimos valores en la relación C:N y de lignina (Bunvong y Granger, 1979).

- **Concentraciones iniciales y finales de nutrientes.** Las concentraciones iniciales (0 días) y las finales (365 días) de N, P, K, Ca y Mg, en las muestras remanentes de café a libre exposición y bajo sombrío y de las tres especies forestales, se presentan en la Tabla 25.

**Tabla 25.**

Concentraciones (%) de nutrientes iniciales y remanentes de café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis*. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío (Fuente: Farfán y Urrego, 2001).

Tto	N (%)			P (%)			K (%)			Ca (%)			Mg (%)		
	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r
CLE	2,81	2,82	-0,49	0,19	0,11	0,20	1,23	0,14	0,81	1,70	3,00	-0,81	0,33	0,35	-0,41
CSN	2,87	3,30	-0,78	0,25	0,10	0,57	1,29	0,15	0,85	1,76	4,33	-0,92	0,39	0,51	-0,76
CSP	2,79	2,87	-0,38	0,17	0,10	0,42	1,21	0,08	0,96	1,68	3,13	-0,96	0,31	0,33	0,08
CSE	2,84	2,80	-0,53	0,22	0,10	0,36	1,26	0,12	0,85	1,73	2,93	-0,81	0,36	0,33	0,33
NOG	1,44	2,32	-0,87	0,07	0,11	-0,42	0,80	0,12*	0,87	5,50	6,10	-0,62	0,80	0,62	0,48
PIN	0,48	0,67	-0,61	0,02	0,03	-0,76	0,18	0,08	0,45	0,45	0,63	-0,74	0,06	0,11	-0,80
EUC	0,78	1,42	-0,84	0,05	0,08	-0,69	0,59	0,15	0,90	1,07	1,82	-0,71	0,14	0,20	-0,66

CLE: Café libre exposición solar; CSN: Café con sombrío de nogal; CSP: Café con sombrío de pino; CSE: Café con sombrío de eucalipto; NOG: Nogal; PIN: Pino; EUC: Eucalipto. Se registraron valores inferiores a la concentración final.

**Coffea arabica.** Los valores de regresión ( $r$ ), entre el tiempo de descomposición y las concentraciones de nutrientes, indican que al disminuir el porcentaje del material vegetal remanente las concentraciones de N, Ca y Mg aumentan y las de P y K se reducen. Los promedios de las concentraciones iniciales y finales de N, P, K, Ca y Mg del café, bajo los tres sistemas de sombrero, tuvieron el mismo comportamiento que a libre exposición solar.

**Cordia alliodora.** Los coeficientes de regresión entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de nutrientes indican que las concentraciones N, P y Ca aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal remanente, mientras que disminuyen las de K y Mg. Gama-Rodrigues *et al.* (2003) obtuvieron relaciones similares entre la concentración de N y el porcentaje de la muestra remanente en la descomposición del materia vegetal de *C. trichotoma*.

**Pinus oocarpa.** Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de estos elementos indican que las concentraciones de N, Ca y Mg aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal restante, mientras que las concentraciones de P y K disminuyen. McTiernan (2003) en *Pinus sylvestris*, Santa (2001) en *P. pinea*, *P. pinaster* y *P. nigra*, Moro y Domingo (2003) en *P. pinaster* y *P. nigra*, White *et al.*, (1988) en *P. rigida*, Zhi-an Li *et al.* (2001) en *Acacia mangium*, *A. auriculaeformis*, *Eucalyptus citriodora*, *P. ellioti* y *Schima superba*, y Montagnini *et al.* (1993) en *Stryphnodendron excelsum*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia hondurensis* y *Hyeronima alchorneoides*, observaron correlaciones negativas de las concentraciones de N y el porcentaje de la masa residual en la descomposición de estos materiales vegetales.

**Eucalyptus grandis.** Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de estos nutrimentos indican que las concentraciones N, P, Ca y Mg aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal remanente, mientras que las concentraciones de K disminuyen al reducirse este porcentaje.

Se han encontrado relaciones negativas entre la masa vegetal residual y las concentraciones de N; así mismo, se han observado relaciones directas con las concentraciones de P, K y Ca en la descomposición de los residuos de *E. globulus* y *Metrosideros polymorpha* (Austin y Vitousek, 2000; Ribeiro *et al.*, 2002). Montagnini *et al.* (1993), en la descomposición de residuos de *Stryphnodendron excelsum*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia hondurensis* y *Hyeronima alchorneoides*, observaron que al descomponerse el material vegetal de las dos especies de *Vochysia* la concentración de P aumenta y en *Stryphnodendron excelsum* y en *Hyeronima alchorneoides* la concentración disminuye. En el caso de *Eucalyptus globulus*, Ribeiro *et al.* (2002) no encontraron correlaciones de la muestra residual mensual y la concentración de Mg en la descomposición de residuos. Dora *et al.* (2002), en *Peltogyne gracilipes*, obtuvieron correlaciones positivas de la tasa de descomposición y las concentraciones de Mg.

- **Liberación de nutrientes.** La dinámica en la transferencia de nutrientes ( $k$ ) a los 365 días de descomposición de la hojarasca del café, a libre exposición y bajo sombrero, y de las tres especies forestales, se presenta en la Tabla 26.

**Nitrógeno.** La transferencia de N del café bajo sombrío de eucalipto fue mayor que la de café bajo sombrío de nogal; y en café a libre exposición solar fue igual a la tasa de transferencia del café bajo las diferentes especies de sombrío. En *C. alliodora* y *E. grandis* fue igual, mientras que en *P. oocarpa* se observó inmovilización del N. Cabe destacar que la hojarasca de café transfiere N en una tasa más alta que la hojarasca de las especies forestales. Munguía (2004) obtuvo tasas de liberación ( $k.día^{-1}$ ) de N en *E. deglupta* y *C. arabica* de 0,06 y 0,034, respectivamente.

**Tabla 26.**

Tasa de transferencia de nutrientes ( $k.año^{-1}$ ) por el café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las tres especies forestales. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío (Fuente: Farfán y Urrego, 2001).

Especies	Tasa de liberación de nutrientes ( $k.año^{-1}$ )					p
	N	P	K	Ca	Mg	
Café a libre exposición	-0,06† ab	-0,082 ab	-0,248 ab	-0,020 bc	-0,054 bcd	*
Café con sombrío de nogal	-0,056 b	-0,122 a	-0,233 ab	-0,003 d	-0,049 cd	*
Café con sombrío de pino	-0,064 ab	-0,084 ab	-0,320 a	-0,022 b	-0,087 abc	*
Café con sombrío de eucalipto	-0,073 a	-0,106 a	-0,257 ab	-0,045 a	-0,111 a	*
<i>Cordia alliodora</i> (nogal)	-0,015 c	-0,050 b	-0,225 ab	-0,039 a	-0,091 ab	*
<i>Pinus oocarpa</i> (pino)	0,006 d+	-0,002 c	-0,086 c	-0,003 d	0,014 e	*
<i>Eucalyptus grandis</i> (eucalipto)	-0,003 cd	0,011 c	-0,170 bc	-0,006 cd	-0,026 d	*

+ Valores positivos indican inmovilización del nutriente

• Valores de k seguidos por letras distintas en la misma columna, indican diferencia estadística (Tukey 5%)

\*  $p < 0,001$  en todos los casos

**Fósforo.** No hubo diferencias estadísticas en la liberación de P por la hojarasca del café en descomposición, en los cuatro sistemas de cultivo. Se observó que *C. alliodora* transfiere P en una tasa más alta que *P. oocarpa*, mientras que se presenta inmovilización de este nutriente en *E. grandis*. Las tasas de liberación de P fueron mayores en café a libre exposición solar y bajo sombrío de eucalipto, que en *C. alliodora* y *P. oocarpa*. Munguía (2004), en *E. deglupta* y *C. arabica*, obtuvo tasas de liberación ( $k.día^{-1}$ ) de P de 0,12 y -0,035, respectivamente.

**Potasio.** No se registró inmovilización de K en café en alguno de sus diferentes sistemas de cultivo, ni en las especies forestales. Las tasas de liberación de K fueron iguales en la hojarasca del café (bajo sombra y a libre exposición) al compararse con las de *C. alliodora*. Los valores de las tasas de liberación de K de la hojarasca producida por *P. oocarpa* y *E. grandis* fueron iguales, y a su vez éstas fueron diferentes (menores) a las de café y nogal. En otros estudios, Munguía (2004) obtuvo tasas de liberación ( $k.día^{-1}$ ) de K en *E. deglupta* y *C. arabica* de -0,49 y -0,56, respectivamente.

**Calcio.** Las mayores tasas de liberación de Ca se registraron en la hojarasca de *C. alliodora* y en la de café bajo sombrío de eucalipto. A pesar de no haberse registrado inmovilización de Ca en el café ni en las especies forestales, las tasas más bajas de liberación de este nutriente se encontraron en las hojarascas de café bajo sombrío de nogal, en pino y eucalipto.

**Magnesio.** Los residuos de café bajo sombrío de eucalipto presentaron una tasa de liberación de Mg más alta que la hojarasca del café bajo sombrío de nogal y a libre exposición solar. Entre las especies forestales la tasa de transferencia más baja se registró en *E. grandis* al compararse con *C. alliodora*; mientras que en *P. oocarpa* hubo inmovilización de este nutrimento. Del trabajo se concluyó que:

- El promedio de la producción de biomasa seca en café fue de  $4,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , en *C. alliodora* de  $3,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , en *P. oocarpa* de  $6,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  y en *E. grandis* de  $6,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ .
- El modelo que mejor representó la tasa de descomposición de los residuos vegetales fue el exponencial simple; similar al reportado por Santa (2001), Singh *et al.* (1999), White *et al.* (1988), y Wieder y Lang (1982).
- La tasa relativa de descomposición mensual ( $k$ ) en café a libre exposición solar fue de 1,0, en café bajo sombrío fluctuó entre 0,87 y 1,08, en *C. alliodora* fue de 0,78, en *P. oocarpa* de 0,26 y en *E. grandis* de 0,72.
- El sistema de cultivo de café a libre exposición solar o bajo sombra, no afecta la tasa de descomposición de sus residuos vegetales. Los residuos vegetales de *P. oocarpa* se descomponen más lentamente ( $k=0,20$ ) que los residuos de *C. alliodora* y *E. grandis*.
- En un período de 365 días se descomponen e incorporan al suelo el 65,1% de los residuos producidos por café, el 56,7% de los producidos por *C. alliodora*, el 25,2% de los producidos por *P. oocarpa* y el 54,0% de los producidos por *E. grandis*.
- La fracción de la materia orgánica sin descomponer ( $k'$ ), en un período de 365 días, fluctuó entre el 34% y 42% en café bajo sus diferentes sistemas de cultivo; en *C. alliodora* fue del 46%, en *P. oocarpa* del 77% y en *E. grandis* del 49%. La disponibilidad de agua en el suelo no tiene influencia sobre la descomposición de la masa vegetal en estos sistemas agroforestales.
- En un período de 365 días de descomposición, la biomasa seca producida por el café transfiere al suelo el 64,8% del N, el 82,9% del P, el 96,7% del K, el 34,3% del Ca y el 63,1% del Mg, contenidos en los residuos vegetales. La descomposición de los residuos vegetales producidos por *C. alliodora*, transfiere al suelo el 33,3% del N, el 54,4% del P, el 93,6 del K, el 54,0% del Ca y el 67,7% del Mg, contenido en estos residuos.

- A los 365 días los residuos vegetales producidos por *P. oocarpa* no transfirieron al suelo N, P, Ca y Mg; solamente liberaron el 64,5% del K presente en los residuos. En el mismo período, la descomposición la biomasa seca producida por *E. grandis*, transfiere al suelo el 23,6% del N, el 35,5% del P, el 89,3% del K, el 28,5% del Ca y el 39,9% del Mg, contenido en los residuos vegetales.

### 3.3.2.3 Aporte de hojarasca, contenido y transferencia de nutrientes de *Eucalyptus grandis*, *Pinus chiapensis*, *Pinus tecunumanii* e *Inga edulis* empleadas como sombrío en café

Los efectos de la cobertura vegetal muerta o “mulch” son variados y complejos, y actúa de dos maneras sobre el balance hídrico del café: Indirectamente, estimulando el crecimiento de las raíces, y directamente, aumentando la humedad del suelo. El estímulo para el crecimiento radical se debe probablemente al aumento de la humedad y a otros factores. El efecto directo también es de importancia; el mulch aumenta la penetración del agua en el suelo, evitando el escurrimiento. También reduce considerablemente la pérdida de agua por evaporación, dando como resultado una mayor humedad debajo de la capa vegetal, en comparación con el suelo limpio. La retención de mayor humedad en el suelo, permite al café aprovechar más agua, y tener además agua disponible durante gran parte de la época seca (Müller, 1960).

En la finca La Suecia se evaluó el aporte de hojarasca y contenido de nutrientes de *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. edulis* empleadas como sombrío en café (*Coffea arabica*), variedad Colombia. Las evaluaciones se realizaron en: (I) Café con sombrío de *E. grandis*; (II) Café con sombrío de *P. chiapensis*; (III) Café con sombrío de *P. tecunumanii*; (IV) Café con sombrío de *I. densiflora*; y (V) café a libre exposición solar. El sombrío se estableció a 6,0 m x 6,0 m, el café a 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha). El estudio se inició en mayo de 1999 con el establecimiento de las especies forestales y la leguminosa, y continuó 2 años después con el establecimiento del café. La cantidad de materia orgánica depositada como hojarasca por las diferentes especies de sombra, se evaluó mediante trampas de follaje de 0,5 m<sup>2</sup> de superficie, cada una. Para la determinación de la concentración y contenido de nutrientes se procedió de igual forma que en el estudio anterior, realizado en la Estación Experimental Paraguaicito en el Quindío. De los análisis realizados se obtuvieron los siguientes resultados:

#### • Aporte de hojarasca por *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. Edulis*

Las mayores producciones de biomasa seca durante las tres evaluaciones, las registró *E. grandis*, con 7.919, 9.901 y 9.397 kg.ha<sup>-1</sup> en los años 2004, 2005 y 2006, respectivamente; el promedio de la producción de hojarasca fue de 9.072 kg.ha-año<sup>-1</sup>. Las producciones más bajas de hojarasca fueron las de *P. chiapensis* con valores de 1.574, 3.569 y 4.806 kg.ha<sup>-1</sup> en los años 2004, 2005 y 2006, respectivamente, con un promedio de la producción de hojarasca de 3.316 kg.ha-año<sup>-1</sup>. *P. tecunumanii* e *I. densiflora* produjeron en promedio 5.512 y 4.954 kg.ha-año<sup>-1</sup> de hojarasca, respectivamente (Tabla 27).

**Tabla 27.**

Producción anual y media general (kg.ha<sup>-1</sup>) de hojarasca en *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora*. Finca la Suecia-Cauca.

Años	Especies forestales			
	<i>E. grandis</i>	<i>P. chiapensis</i>	<i>P. tecunumanii</i>	<i>I. edulis</i>
2004	7.919 a	1.574 c	2.099 c	3.243 b
2005	9.901 a	3.569 d	7.934 c	5.221 b
2006	9.397 a	4.806 c	6.504 b	6.399 b
<b>Media</b>	<b>9.072 a</b>	<b>3.316 c</b>	<b>5.512 bc</b>	<b>4.954 b</b>
c. v.	0,11	0,49	0,55	0,32

*Eucalyptus salubris* puede producir cerca de 1.169 kg.ha-año<sup>-1</sup> de materia seca. Herwitz y Gutterman (1990) y Maggs (1985), indican que la producción media anual de biomasa seca producida por *Pinus elliottii* puede ser de 6,5 t.ha<sup>-1</sup>. En plantaciones de coníferas compuestas por *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* y *Abies borisii*, Kavvadias *et al.* (2001) obtuvieron producciones de biomasa de 4.000 kg.ha<sup>-1</sup>; Dames *et al.* (1998) reportan producciones de biomasa seca entre 3,6 y 5,9 t.ha-año<sup>-1</sup> en *Pinus patula*. En estudios realizados por Urrego y Farfán (2002), obtuvieron que el aporte de materia seca en nogal, pino y eucalipto fue de 3,5; 6,7 y 6,4 t.ha-año<sup>-1</sup>. Segura *et al.* (2006) estimaron que la biomasa de los árboles *Cordia alliodora*, *Juglans olanchana*, *Inga tonduzzi* e *I. punctata* empleados como sombrío del café, oscila entre 3,5 y 886 kg por árbol.

Nolte *et al.* (2003) en *Calliandra calothyrsus* (3.947 plantas/ha), registraron producciones entre 18,9 y 25,0 Mg.ha<sup>-1</sup> de materia seca, durante 2 años, y en *Acacia senegal*, Deans *et al.* (1999) reportan producciones de biomasa seca de 1.770 kg.ha-año<sup>-1</sup> plantados a 6,0 m x 6,0 m. En estudios sobre balances de la materia orgánica en sistemas agroforestales, Fassbender *et al.* (1991), reportan producciones de biomasa seca de 110,6 t.ha<sup>-1</sup> en *Cordia alliodora* y de 13,6 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en *Erythrina poeppigiana*. El promedio de la producción de biomasa seca del café bajo sombrío de *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora* fue de 72,0; 777,0; 625,7 y 123,7 kg.ha-año<sup>-1</sup>, respectivamente, y en café a libre exposición solar fue de 188,8 kg.ha-año<sup>-1</sup> (Tabla 28).

**Tabla 28.**

Promedios de la producción de biomasa seca (kg.ha<sup>-1</sup>) por el café bajo sombrío de *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. Densiflora*. Finca La Suecia-Cauca.

Años	Biomasa seca del café				
	Café con <i>E. grandis</i>	Café con <i>P. chiapensis</i>	Café con <i>P. tecunumanii</i>	Café con <i>I. edulis</i>	Café solo
2005	26,9	319,0	835,6	55,9	289,7
2006	118,6	1.235,0	415,8	191,4	87,8
<b>Media</b>	<b>72,8</b>	<b>777,0</b>	<b>625,7</b>	<b>123,7</b>	<b>123,7</b>
c. v.	0,89	0,83	0,47	0,77	0,76

- **Concentración de nutrientes en tres especies forestales y una leguminosa.**

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y materia orgánica en la hojarasca de las cuatro especies arbóreas, se presentan en la Tabla 29.

**Tabla 29.**

Promedios de la concentración (%) de nutrientes de la hojarasca de cuatro especies de sombrío del café. Finca La Suecia-Cauca.

Especies	Concentración de nutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	MO
<i>E. grandis</i>	0,79	0,037	0,37	1,15	0,15	95,9
<i>P. chiapensis</i>	0,79	0,032	0,17	1,30	0,16	94,9
<i>P. tecunumanii</i>	0,55	0,023	0,16	0,62	0,11	94,7
<i>I. densiflora</i>	1,90	0,057	0,41	0,10	0,15	92,3

MO: Materia orgánica

- **Contenido de nutrientes en tres especies forestales y una leguminosa.** Los contenidos de nutrientes en la biomasa seca producida por las cuatro especies arbóreas empleadas como sombrío del café se presentan en la Tabla 30.

**Tabla 30.**

Contenidos (kg.ha<sup>-1</sup>) de N, P, K, Ca, Mg y materia orgánica en la hojarasca de *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora*. Finca La Suecia-Cauca

Especies	Contenido de nutrientes (kg.ha <sup>-1</sup> )					
	N	P	K	Ca	Mg	MO
<i>E. grandis</i>	71,0 b	3,2 a	33,6 a	106,1 a	14,9 a	8.745 a
<i>P. chiapensis</i>	26,1 c	1,0 b	6,2 c	43,0 b	5,2 c	3.136 c
<i>P. tecunumanii</i>	28,4 c	1,1 b	9,6 c	31,6 b	5,7 c	5.256 b
<i>I. densiflora</i>	92,7 a	2,8 a	21,4 b	4,5 c	7,2 b	4.580 b

MO: Materia orgánica

Molinero y Pozo (2004), obtuvieron contenidos anuales de 40 kg.ha<sup>-1</sup> de N en la hojarasca de *Eucalyptus globulus*. La especie *Calliandra calothyrsus* establecida a 3.947 plantas/ha, produce cerca de 225 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Nolte *et al.*, 2003). Deans *et al.* (1999), en *Acacia senegal* plantados a 6,0 m x 6,0 m, registraron que esta especie acumula cerca de 945 g/árbol de N. Slodicak *et al.* (2005), obtuvieron que el N acumulado en la materia seca producida por *Picea abies* fluctúa entre 720 y 950 kg.ha<sup>-1</sup>.

*Calliandra calothyrsus* establecida a 3.947 plantas/ha, produce cerca de 19 kg.ha<sup>-1</sup> de P (Nolte *et al.*, 2003); y en 3 plantados a 6,0 m x 6,0 m, Deans *et al.* (1999) indican que éstos acumulan cerca

de 38 g/árbol de P y 420 g/árbol de K. Leclau *et al.* (2000), encontraron que la biomasa producida por *Eucalyptus* sp., hasta de 7 años de edad contenía 100 kg de N, 30 kg de P, 39 kg de K, 33 kg de Ca y 19 kg de Mg por hectárea, y Maggs (1985) obtuvo que la biomasa seca producida por *Pinus elliottii* puede contener cerca de 22,8 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 1,5 kg.ha<sup>-1</sup> de P, 4,5 kg.ha<sup>-1</sup> de K, 33,9 kg.ha<sup>-1</sup> de Ca y 9,3 kg.ha<sup>-1</sup> de Mg. En plantaciones de coníferas compuestas por *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* y *Abies borisii*, Kavvadias *et al.* (2001) registraron que los contenidos de nutrientes en la biomasa seca fluctuaban entre 235,4 y 913,9 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 15,4 y 55,8 kg.ha<sup>-1</sup> de P, 40,4 y 113,1 kg.ha<sup>-1</sup> de K, 99,3 y 506,9 kg.ha<sup>-1</sup> de Ca y 39,9 a 285,5 kg.ha<sup>-1</sup> de Mg.

- **Descomposición de residuos y transferencia de nutrientes del café, las tres especies forestales y la leguminosa.** Los análisis realizados arrojaron los siguientes resultados.

**Peso seco residual (Psr) de las muestras de las cuatro especies arbóreas y del café.**

Los promedios del peso seco de las muestras remanentes de café con sombrío de las especies forestales y la leguminosa, del café a libre exposición solar y de las especies empleadas como sombrío, se presentan en la Tabla 31.

**Tabla 31.**

Peso seco residual (g) de las muestras vegetales de café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las cuatro especies arbóreas. Finca La Suecia-Cauca.

Especies	Días después de la descomposición		
	30	180	365
Café con sombrío de <i>E. grandis</i>	68,1	30,0	13,2
Café con sombrío de <i>P. chiapensis</i>	59,2	37,0	16,6
Café bajo sombrío de <i>P. tecunumanii</i>	51,7	32,7	14,1
Café con sombrío de <i>I. densiflora</i>	57,6	37,8	14,0
Café a libre exposición solar	57,6	42,5	20,6
<i>E. grandis</i>	61,5	28,5	5,9
<i>P. chiapensis</i>	73,1	60,8	44,9
<i>I. densiflora</i>	76,9	61,9	46,7

*El peso seco de la muestra inicial fue de 100 g en todas las especies.*

El peso seco de las muestras remanentes, registrado por Farfán y Urrego (2007), en café a libre exposición a los 30, 180 y 365 días fue de 93,0; 60,5 y 34,5 g; en café con sombrío de nogal de 89,7; 51,0 y 33,6 g; en café bajo sombrío de pino de 93,0; 49,0 y 36,8 g; y en café con sombrío de eucalipto, de 94,0; 62,0 y 30,1 g, respectivamente. Guo y Sims (2003), en el análisis de la descomposición de biomasa vegetal y transferencia de nutrientes en *Eucalyptus* sp. inferen que la especie tiene gran influencia en su tasa de descomposición y su relación de nutrientes, es así como después de 12 meses los porcentajes de descomposición fueron: *E. globulus* (84%) > *E. botryoides* (55%) > *E. ovata* (41%) y las mismas tendencias se observaron para N, P, K, Ca, Mg y Mn. Farfán y Urrego (2007), para los mismos períodos de tiempo, obtuvieron pesos remanentes en nogal de 94,3; 60,5 y 41,5 g; en pino de 98,7; 78,5 y 74,6 g; y en eucalipto de 98,3; 63,0 y 42,1 g.

Moro y Domingo (2000), en la descomposición de residuos de *Pinus pinaster* y *P. nigra*, registraron pesos secos de 80 y 90 g en las muestras remanentes a los 180 y 360 días; además encontraron pesos secos entre 50 y 80 g a los 180 días y entre 25 y 60 g a los 360 días, para las especies *Adenocarpus decorticans* y *Cistus laurifolius*, respectivamente; Lusk *et al.* (2001), reportan pesos secos remanentes de 60 g en *P. radiata*, en un período de 5 meses, y en *Pinus* sp., Callahan *et al.* (2004) obtuvieron pesos remanentes de 85 y 75 g a los 200 y 300 días de descomposición de los residuos.

**Descomposición de la hojarasca.** En la Tabla 32 se presentan las tasas relativas de descomposición ( $k$ ) para el café bajo diferentes especies de sombrío y a libre exposición solar, y para *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora*. Modelos similares fueron aplicados por Wanga *et al.* (2004), Alhamd *et al.* (2004), Teklaya y Marmel (2004), Guao y Sims (1999) y Kurz *et al.* (2000).

La tasa de descomposición anual ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) en los residuos vegetales de café con sombrío *E. grandis* fue de 2,27, como la más alta; las menores tasas de descomposición fueron estimadas en *I. densiflora* (0,53) indicando una rápida descomposición del material vegetal. El material vegetal residual de café a libre exposición solar se descompone a una tasa anual de 1,16 y los de las especies forestales entre 0,68 para residuos de *P. chiapensis* y 2,47 en *E. grandis*. Farfán y Urrego (2007) reportan tasas de descomposición anual de 0,37 en café a libre exposición solar, 0,46 en *Cordia alliodora*, 0,77 en *Pinus oocarpa* y 0,49 en *Eucalyptus grandis*. La tasa de descomposición registrada por Ribeiro *et al.* (2002) para *E. globulus* oscila entre 0,37 y 0,42  $k \cdot \text{año}^{-1}$ , mientras que Guo y Sims (2001), para esta misma especie encontraron promedios de las tasas de descomposición de 0,01 y 1,34. Moro y Domingo (2000) registraron valores de  $k$  de 0,13 y 0,16 en *P. pinaster* y *P. nigra*, respectivamente. Santa (2001), reportó índices de descomposición ( $k \cdot \text{mes}^{-1}$ ) en *P. pinea* y *P. pinaster* de -0,15 y -0,08.

**Tabla 32.**

Tasas de descomposición anual del follaje de café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las especies forestales. Finca La Suecia-Cauca.

Tratamientos	Tasa descomposición de residuos	
	k.año <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
Café con sombrío de <i>E. grandis</i>	2,27	0,89
Café con sombrío de <i>P. chiapensis</i>	1,49	0,96
Café con sombrío de <i>P. tecunumani</i>	2,35	0,88
Café con sombrío de <i>I. densiflora</i>	1,56	0,95
Café a libre exposición	1,16	0,97
<i>Eucalyptus grandis</i>	2,47	0,97
<i>Pinus chiapensis</i>	0,68	0,93
<i>Pinus tecunumani</i>	1,18	0,82
<i>Inga densiflora</i>	0,53	0,80

k: Tasa de descomposición anual

Durante un período de 12 meses, Alhamd *et al.* (2004), analizaron la descomposición del material vegetal depositado por *Castanopsis sieboldii*, *Schima wallichii*, *Elaeocarpus japonicus* y *Daphniphyllum teijsmannii*; las tasas de descomposición constante (k) fueron 1,19 para *D. teijsmannii*; 1,09 para *C. sieboldii*; 0,94 para *E. japonicus* y de 0,66 por año para *S. wallichii*. Teklay y Marmel (2004), encontraron que las tasas de descomposición (k) fueron de -0,023 por semana en *Cordia* y de -0,034 por semana en *Albizia*. Adicionalmente informan que la cobertura dada por los árboles no afecta la descomposición de las hojas, Guo y Sims (1999), en descomposición de residuos de *Eucalyptus brookerana* y dos tipos de *E. botryoides* las constantes de descomposición (k) de las especies plantadas con 2.340 árboles/ha fueron de 0,34 para *E. brookerana* y de 0,35 y 0,36 k.año<sup>-1</sup>, para las otras dos especies de eucalipto; Para *Pinus pinaster* Kurz *et al.*, (2000) obtuvieron tasas constante de descomposición entre 0,135 y 0,180 k.año<sup>-1</sup>.

De acuerdo a los porcentajes de muestra remanente a los 365 días de descomposición del material vegetal de solo café, los residuos de café expuestos al sol se descomponen más lentamente que los residuos bajo sombra. Kurz *et al.* (2005), representaron la tasa de descomposición de los residuos vegetales de pino mediante una función exponencial simple, la cual mostró una baja tasa de descomposición del material (3 años) catalogándolo como un material recalcitrante; Kainulainen y Holopainen (2001), condujeron estudios para determinar las concentraciones de compuestos secundarios y nutrientes durante la descomposición de residuos de pino durante 19 meses; observaron que durante este período solo se había descompuesto el 22% del material; y las concentraciones de N, P y Ca habían incrementado, mientras que las de Mg y K disminuyeron.

Durante 12 meses, Sariyildiz y Anderson (2003), analizaron la descomposición y calidad del material depositado por *Fagus sylvatica* y *Quercus robur*. Se observó que a los 4, 8 y 12 meses ya eran significativas las reducciones en la masa remanente en las dos especies (38,7% en *Fagus* y 27,8% en *Quercus*). Handayanto *et al.* (1993) encontraron porcentajes de descomposición hasta del 50% en residuos vegetales de *Erythrina* sp., en 3 semanas, mientras que en *Calliandra* sp. y *Peltophoron* sp. este porcentaje se alcanzó en 15 semanas. En sistemas agroforestales estratificados, con sombrío de árboles frutales y maderables y café a libre exposición, Hairiah *et al.* (2006) registraron que la producción de biomasa seca fue de 6,1; 4,5; 3,8 y 3,0 Mg.ha<sup>-1</sup> para bosque, en SAF estratificados, café con sombra y café bajo sombrío, respectivamente; la descomposición de la biomasa fue del 33% al 40% de la biomasa total. Byard *et al.* (1996), determinaron que en *Vochysis guatemalensis* y en *Jacaranda copaia* las porcentajes de descomposición fueron del 16% después de 12 meses y en *Callophylum* brasiliense de 23% en el mismo período.

**Tasa de incorporación de residuos vegetales.** Según las condiciones climáticas de la localidad, en los primeros 30 días de descomposición del material vegetal aportado por el café a libre exposición solar (0,19 t.ha-año<sup>-1</sup>) y bajo sombrío (0,40 t.ha-año<sup>-1</sup>) se incorporaron al suelo el 29,7% y el 27,6%, respectivamente. La incorporación del 50% de los residuos vegetales se registró a los 120 días de descomposición y a los 365 días se degradaron e incorporaron al suelo el 75,6% y el 86,9% de la materia orgánica producida por el café a libre exposición solar y bajo sombrío, respectivamente.

Del material vegetal aportado por *E. grandis* (9,1 t.ha-año<sup>-1</sup>), *P. chiapensis* (3,3 t.ha-año<sup>-1</sup>), *P. Tecunumanii* (5,5 t.ha-año<sup>-1</sup>) e *I. densiflora* (5,0 t.ha-año<sup>-1</sup>), en los primeros 30 días de descomposición se incorporaron al suelo el 32,4%, 18,6%, 30,1% y 21,6%, respectivamente. El 50% de los residuos vegetales de *E. grandis* se incorporó a los 91 días, los de *P. chiapensis* a los 301 días, los de *P. Tecunumanii* a los 153 días y los de *I. densiflora* a los 365 días. A los 365 días se degradaron e incorporaron al suelo el 93,0%, 56,4% y el 76,5% de la materia orgánica producida por *E. grandis*, *P. chiapensis* y *P. Tecunumanii*.

Munguía *et al.* (2004), obtuvieron tasas de descomposición del 23% en *E. deglupta* y del 60% en *Coffea arabica*, después de 213 días. En *P. radiata*, Ganjegunte *et al.* (2004) obtuvieron tasas de descomposición del follaje del 24% anual. Santa (2001), en *Quercus rotundifolia*, *P. pinea* y *P. pinaster*, registró que cerca del 30% de la materia seca se descompone durante los primeros 4 meses. En general, Prause y Lifschitz (2001), indican que las hojas de las diferentes especies forestales se descomponen a una velocidad diferente y que el proceso es rápido al comienzo, con pérdidas de peso en los primeros 3 meses entre el 28% y el 60% del peso total del material vegetal.

**Descomposición de residuos versus Índice de humedad del suelo (IHS).** La influencia de la humedad del suelo sobre la proporción de la biomasa seca descompuesta cada mes, entre agosto de 2001 y julio de 2002, se presenta en la Tabla 33.

**Tabla 33.**

Relación entre la humedad del suelo y el porcentaje mensual de biomasa seca descompuesta (agosto 2001 a julio 2002). Finca La Suecia-Cauca.

Especies	Índice de Humedad del Suelo (IHS)												r
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,73	0,49	0,62	
Porcentaje de la biomasa descompuesta cada mes													
Café/ <i>E. grandis</i>	31,2	8,6	6,8	6,0	6,0	4,7	4,1	4,1	3,2	2,9	2,8	2,2	0,47
Café/ <i>P. chiapensis</i>	24,5	14,3	10,4	8,7	8,0	5,8	4,8	4,5	3,2	2,7	2,5	1,8	0,31
Café/ <i>P. tecunumani</i>	24,5	14,3	10,4	8,7	8,0	5,8	4,8	4,5	3,2	2,7	2,5	1,8	0,47
Café/ <i>I. densiflora</i>	29,9	9,2	7,2	6,3	6,2	4,8	4,3	4,2	3,3	2,9	2,9	2,2	0,33
Café al sol	29,7	6,9	5,6	5,1	5,2	4,2	3,8	3,9	3,1	2,9	2,9	2,4	0,28
<i>E. grandis</i>	32,4	13,5	9,7	8,0	7,3	5,2	4,3	3,9	2,8	2,3	2,1	1,5	0,39
<i>P. chiapensis</i>	18,6	4,8	4,1	3,8	4,1	3,4	3,2	3,4	2,9	2,7	2,9	2,4	0,26
<i>P. tecunumani</i>	30,1	7,1	5,7	5,2	5,3	4,2	3,8	3,9	3,1	2,9	2,9	2,3	0,28
<i>I. densiflora</i>	21,6	3,7	3,1	3,0	3,2	2,7	2,6	2,8	2,4	2,3	2,5	2,1	0,21

Índices menores a 0,5 indican deficiencias de humedad en el suelo

El coeficiente de correlación ( $r$ ) entre el IHS y el porcentaje de la materia seca que se descompone cada mes en el café bajo sombrío osciló entre 0,31 y 0,37 y en café a libre exposición solar fue de 0,28. En *E. grandis* este coeficiente fue de 0,39, en *P. chiapensis* de 0,26, en *P. Tecunumanii* de 0,28 y en *I. densiflora* de 0,21, lo que indica que la disponibilidad de agua en el suelo tiene influencia sobre la descomposición de la masa vegetal, en las condiciones ambientales y de suelos donde se desarrolló el estudio. Así lo confirman Bunvong y Granger (1979) y Kochy y Scott (1997), al sostener que el clima modifica notablemente la rapidez de la descomposición de los residuos vegetales en la superficie del suelo, y además ejercen influencia sobre el tipo y la abundancia de la materia orgánica. La humedad y la temperatura se encuentran entre las variables más determinantes, porque influyen en el desarrollo de la vegetación y en la actividad de los microorganismos.

**Relación Carbono:Nitrógeno (C:N).** En la Tabla 34 se presentan las concentraciones iniciales y finales de C orgánico y de N, y la relación C:N del café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las cuatro especies arbóreas. Las relaciones C:N iniciales registradas en el café bajo sombrío de las especies estudiadas fluctuaron entre 28,6 y 47,5 y las finales entre 22,3 y 34,7; en el café a libre exposición solar la relación inicial fue de 47,0 y la final de 28,3. Las relaciones C:N iniciales de las

especies arbóreas *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. Tecunumanii* e *I. densiflora* fueron de 56,4; 35,5; 97,8 y 36,2 y las finales de 35,7; 55,5; 51,3 y 17,7 respectivamente.

Los coeficientes de correlación entre el tiempo de descomposición de la materia seca tanto del café como de las especies empleadas como sombrío, y las relaciones C:N fueron negativas, es decir, que la relación C:N disminuye al incrementarse el tiempo de descomposición de los residuos vegetales, La alta relación C:N en las especies de pino indica una lenta descomposición de sus residuos vegetales.

**Tabla 34.**

Concentración inicial (Ci) y final (Cf) de C orgánico (CO), N y la relación C:N del material remanente del café al sol y bajo sombrío. Finca La Suecia-Cauca.

Especies	CO (%)			N (%)			C:N		
	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Inicial	Final	r
Café/ <i>E. grandis</i>	92,2	77,7	-0,88	3,2	2,2	-0,12	28,6	34,7	-0,28
Café/ <i>P. chiapensis</i>	94,5	85,1	-0,89	2,0	3,5	0,66	47,5	24,7	-0,63
Café/ <i>P. tecunumani</i>	92,8	75,1	-0,81	2,1	2,7	0,05	43,6	27,4	-0,48
Café/ <i>I. densiflora</i>	91,4	91,7	-0,47	2,6	4,1	0,35	35,0	22,3	-0,47
Café al sol	93,0	78,3	-0,88	2,0	2,8	0,25	47,0	28,3	-0,66
<i>E. grandis</i>	96,0	88,1	-0,84	1,7	2,5	0,55	56,4	35,7	-0,65
<i>P. chiapensis</i>	90,2	92,2	-0,39	2,5	1,7	-0,13	35,5	55,5	-0,13
<i>P. tecunumani</i>	94,9	94,7	-0,33	1,0	1,8	0,25	97,8	51,3	-0,39
<i>I. densiflora</i>	91,1	92,3	-0,27	2,5	5,2	0,43	36,2	17,7	-0,40

Handayanto *et al.* (1992), en *Erythrina* sp., estimaron relaciones C:N de 23 en la masa residual, determinado por una inmovilización del N, en los primeros 160 días de descomposición de los residuos vegetales. Farfán y Urrego (2007) determinaron relaciones iniciales C:N para café bajo sombrío de 24,9 y finales de 26,9, en café a libre exposición solar relaciones iniciales de 32,2 y 19,8, en eucalipto y pino relaciones iniciales de 71,7 y 105, y relaciones C:N finales de 37,3 y 73,9. Sariyildiz (2003), para *P. sylvestris*, registró relaciones de 5,3; mientras que para la especie *P. rigida*, White *et al.* (1988) indican relaciones iniciales C:N de 95,0 y finales (863 días) de 0,39.

**Concentraciones iniciales y finales de nutrientes.** Las concentraciones iniciales (0 días) y las finales (365 días) de P, K, Ca y Mg, en las muestras remanentes de café a libre exposición y bajo sombrío, y de las cuatro especies arbóreas, se presentan en la Tabla 35.

**Coffea arabica.** En café bajo sombrío de pinos y la leguminosa, los coeficientes de correlación (r) entre la concentración de nutrientes y el tiempo de descomposición del material vegetal fueron positivos para N, y negativos bajo sombrío de eucalipto; a libre exposición solar el coeficiente fue

negativo. Para las concentraciones de P se determinaron correlaciones negativas en café bajo sombrío de eucalipto, pino y guamo, y positivas en café con *P. chiapensis* y a libre exposición.

Las concentraciones de K tuvieron coeficientes negativos en todos los casos. Para Ca sólo se estimaron relaciones positivas en café con sombrío de *E. grandis* y *P. chiapensis*. Las concentraciones de Mg fueron coeficientes negativos en todos los tratamientos, estas relaciones indican disminución en la concentración del nutriente al aumentar el tiempo de descomposición de los residuos.

**Tabla 35.**

Concentración (%) de nutrientes en la muestra inicial y remanente de café al sol y bajo sombrío, y de los árboles. Finca La Suecia-Cauca.

Especies	P (%)			K (%)			Ca (%)			Mg (%)		
	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r
Café/ <i>E. grandis</i>	0,13	0,09	-0,47	0,93	0,12	-0,64	0,03	1,43	0,23	0,25	0,15	-0,75
Café/ <i>P. chiapensis</i>	0,14	0,12	0,04	0,92	0,06	-0,72	1,36	2,34	0,27	0,19	0,34	-0,28
Café/ <i>P. tecunumani</i>	0,09	0,10	-0,09	1,91	0,11	-0,68	1,33	1,87	-0,15	0,31	0,21	-0,83
Café/ <i>I. densiflora</i>	0,11	0,10	-0,33	2,29	0,05	-0,69	1,46	1,65	-0,38	0,28	0,13	-0,62
Café al sol	0,08	0,10	0,39	2,04	0,08	-0,68	1,20	1,46	-0,23	0,21	0,21	-0,42
<i>E. grandis</i>	0,09	0,13	0,46	0,63	0,30	-0,64	0,88	1,43	0,17	0,23	0,12	-0,89
<i>P. chiapensis</i>	0,15	0,09	-0,15	2,52	0,06	-0,52	1,71	0,88	-0,44	0,37	0,12	-0,51
<i>P. tecunumani</i>	0,06	0,10	0,02	0,41	0,09	-0,63	0,63	1,21	0,26	0,14	0,24	-0,31
<i>I. densiflora</i>	0,13	0,07	-0,84	2,25	0,14	-0,58	1,66	0,11	-0,45	0,32	0,19	-0,90

Se registraron valores inferiores a la concentración final.

***Eucalyptus grandis*.** Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de estos nutrientes indican que las concentraciones N, P y Ca aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal remanente, mientras que las concentraciones de K y Mg disminuyen al reducirse este porcentaje. Resultados similares son reportados por Farfán y Urrego (2007).

***Pinus chiapensis*.** Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de nutrientes indican que las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg disminuyen al aumentar el tiempo de descomposición del material vegetal residual.

***Pinus tecunumani*.** Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de estos elementos indican que las concentraciones de N, P y Ca aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal restante, mientras que las concentraciones de K y Mg disminuyen.

**Inga densiflora.** Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de la muestra residual y las concentraciones de estos nutrimentos valorados indican que las concentraciones de P, K, Ca y Mg disminuyen al incrementarse el tiempo de descomposición del material vegetal, mientras que las concentraciones de N disminuyen.

En la determinación de transferencia de nutrientes al descomponer acículas de *Pinus silvestris*, Vestgarden (2001), observó que en este proceso las concentraciones de N disminuyen. Después de 142 días las reducciones fueron superiores al 60%, siendo evidente la lixiviación de N, y más del 84% del N fue exportado en forma de  $\text{NH}_4^+$ , lo cual puede causar cambios significativos en el ecosistema. Ngao *et al.* (2009) demostraron que durante 3 meses de descomposición de material vegetal de *Eucalyptus ludograndis*, las concentraciones de compuestos fenólicos y los no fenólicos disminuyeron, mientras que las concentraciones de N y lignina aumentaron, también indican que la mineralización del C depende de la época de descomposición (húmeda o seca).

Estudios sobre descomposición de material vegetal de árboles nativos durante 365 días, Wanga *et al.* (2004), determinaron que en las primeras semanas las tasas de mineralización del C correlacionaron positivamente con los contenidos de N y negativamente con los contenidos de ligninas. Alhamd *et al.* (2004) también observaron que los tenores de C decrecen al aumentar el tiempo de descomposición, mientras que las concentraciones de N no se relacionan con la tasa de descomposición, y estimaron un valor crítico al final del período en la relación C:N de 3:1.

**Liberación de nutrientes.** La dinámica en la transferencia de nutrientes ( $k$ ) a los 365 días de descomposición de la hojarasca del café a libre exposición y bajo sombrero, y de las tres especies forestales, se presenta en la Tabla 36.

**Tabla 36.**

Tasas de transferencia de nutrientes ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) de la hojarasca del café al sol y bajo sombrero, y de los forestales. Finca La Suecia-Cauca.

Especies	Tasa de liberación de nutrientes ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ )				
	N	P	K	Ca	Mg
Café/ <i>E. grandis</i>	-1,80	-1,89	-1,87	-0,37	-2,17
Café/ <i>P. chiapensis</i>	-1,08	-1,48	-3,50	-1,26	-1,68
Café/ <i>P. tecunumani</i>	-1,69	-1,78	-2,69	-1,81	-2,39
Café/ <i>I. densiflora</i>	-1,24	-1,69	-3,10	-1,75	-2,38
Café al sol	-0,93	-0,90	-2,67	-1,17	-1,33
<i>E. grandis</i>	-2,28	-2,23	-3,89	-2,25	-3,23
<i>P. chiapensis</i>	-0,70	-0,72	-2,91	-0,96	-1,22
<i>P. tecunumani</i>	-0,95	-1,10	-2,47	-0,98	-1,48
<i>I. densiflora</i>	-0,61	-1,09	-2,63	-1,60	-1,39

**Nitrógeno.** La transferencia de N del café bajo sombrío de las tres especies forestales y la leguminosa fue mayor que en café a libre exposición solar. Resultados similares fueron determinados en las especies arbóreas, sin embargo, la liberación de N fue mayor en *E. grandis*. No se registró inmovilización del N en los residuos de café en los cinco sistemas evaluados. Farfán y Urrego (2007), encontraron mayor transferencia de N en café con eucalipto que en café con nogal y que la dinámica en la transferencia de N fue igual en *C. alliodora* y *E. grandis*, mientras que en *P. oocarpa* se observó inmovilización del N. Munguía (2004), obtuvo tasas de liberación ( $k \cdot \text{día}^{-1}$ ) de N en *E. deglupta* y *C. arabica* de 0,06 y 0,034, respectivamente.

**Fósforo.** Las tasas de liberación constante ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) de P fueron similares en los sistemas de café bajo sombrío, con fluctuaciones entre 1,48 y 1,89; en café al sol la tasa de liberación fue de 0,90. La transferencia anual de P fue mayor en *E. grandis* al compararse con las otras especies de sombrío. Farfán y Urrego (2007), observaron que *C. alliodora* transfiere P en una tasa más alta que *P. oocarpa*. Munguía (2004), obtuvo tasas de liberación ( $k \cdot \text{día}^{-1}$ ) de P en *E. deglupta* y *C. arabica* de 0,12 y -0,035.

**Potasio.** Las tasas de liberación constante ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) de K fueron similares en los sistemas de café bajo sombrío de las dos especies de pino y la leguminosa, y menor en café bajo sombrío de eucalipto; la transferencia anual de K fue mayor en *E. grandis* (3,89) al compararse con las otras especies de sombrío. Las tasas de liberación de K determinadas por Farfán y Urrego (2007) fueron iguales en la hojarasca del café (bajo sombra y a libre exposición) al compararse con las de *C. alliodora*, y los valores de las tasas de liberación de K de la hojarasca producida por *P. oocarpa* y *E. grandis* fueron iguales. En otros estudios, Munguía (2004), obtuvo tasas de liberación ( $k \cdot \text{día}^{-1}$ ) de K en *E. deglupta* y *C. arabica* de -0,49 y -0,56, respectivamente.

**Calcio.** Las tasas de liberación constante ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) de Ca fueron similares en los sistemas de producción de café bajo sombrío de las dos especies de pino y la leguminosa y el café a libre exposición solar, y menor en café bajo sombrío de eucalipto; la transferencia anual de Ca fue mayor en *E. grandis* (2,25) al compararse con las otras especies de sombrío. Farfán y Urrego (2007), registraron las mayores tasas de liberación de Ca en la hojarasca de *C. alliodora* y en la de café bajo sombrío de eucalipto.

**Magnesio.** Las tasas de liberación constante ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) de Mg fueron similares en los sistemas de producción de café bajo sombrío de *P. tecunumanii*, *I. densiflora* y *E. grandis*; y superiores a las registradas en café bajo sombrío de *P. chiapensis* y café a libre exposición solar. La transferencia anual de Mg fue mayor en *E. grandis* (3,23) al compararse con las otras especies de sombrío. Farfán y Urrego (2007), obtuvieron que los residuos de café bajo sombrío de eucalipto presentaban una tasa de liberación de Mg más alta que la hojarasca del café bajo sombrío de nogal y a libre exposición solar y que la tasa de transferencia de Mg más baja se registró en *E. grandis* al compararse con *C. alliodora*. Del estudio se estableció que:

- El promedio de la producción media de hojarasca de *E. grandis* en los tres períodos de evaluación fue de 9.072  $\text{kg} \cdot \text{ha} \cdot \text{año}^{-1}$ , en *P. chiapensis* de 3.316  $\text{kg} \cdot \text{ha} \cdot \text{año}^{-1}$  y *P. tecunumanii* e *I. densiflora* de 5.512 y 4.954  $\text{kg} \cdot \text{ha} \cdot \text{año}^{-1}$ , respectivamente.

- El contenido medio de N en la biomasa producida por *I. densiflora* fue de 92,7 kg.ha<sup>-1</sup>, en *E. grandis* fue de 71,0 kg.ha<sup>-1</sup> de N, en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii* fue de 26,1 y 28,4 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los contenidos de P en *E. grandis* e *I. densiflora* fueron de 3,2 y 2,8 kg.ha<sup>-1</sup>, mientras que en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii* fueron de 1,0 y 1,1 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los contenidos de K en *E. grandis* fueron de 33,6 kg.ha<sup>-1</sup>, en *I. densiflora* de 9,6 kg.ha<sup>-1</sup>, en *P. chiapensis* de 6,2 kg.ha<sup>-1</sup> y de 9,6 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. tecunumanii*. El promedio del contenido de Ca en la biomasa seca producida por *E. grandis* fue de 106,1 kg.ha<sup>-1</sup>, en *I. densiflora* de 4,5 kg.ha<sup>-1</sup>, de 43,0 y 31,6 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*, respectivamente.
- Los promedios de los contenidos de materia orgánica en la biomasa seca producida por *E. grandis* fue de 8.745 kg.ha<sup>-1</sup>, en *I. densiflora* de 4.580 kg.ha<sup>-1</sup>, y de 3.136 y 5.256 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*.
- La tasa relativa de descomposición mensual (*k*) en café a libre exposición solar fue de 1,16, en café bajo sombrío fluctuó entre 1,49 y 2,27, y en *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora* fue de 2,47; 0,68; 1,18 y 0,53, respectivamente.
- Los residuos vegetales de *P. chiapensis* se descomponen más lentamente (*k*=0,68) que los residuos de *P. tecunumanii* y *E. grandis*. La transferencia de N, P K, Ca y Mg al suelo (kg. ha-año<sup>-1</sup>) por el café bajo las diferentes especies de sombrío y por la especies forestales, representan en la Tabla 37.

**Tabla 37.**

Transferencia de N, P K, Ca y Mg (kg.ha-año<sup>-1</sup>) por el café y las diferentes especies de sombrío.

Especies	Transferencia de nutrientes al suelo (kg.ha-año <sup>-1</sup> )				
	N	P	K	Ca	Mg
Café libre exposición solar	2,7	0,1	1,6	1,7	1,7
Café con <i>E. grandis</i>	2,1	0,1	0,6	0,7	0,7
Café con <i>P. chiapensis</i>	11,0	0,9	11,3	6,7	6,7
Café con <i>P. tecunumanii</i>	10,9	0,5	11,3	1,5	1,5
Café con <i>I. densiflora</i>	2,5	0,1	2,8	1,5	1,5
<i>E. grandis</i>	104,6	7,3	55,5	72,6	72,6
<i>P. chiapensis</i>	59,4	3,6	82,7	43,8	26,9
<i>P. tecunumanii</i>	33,6	2,2	21,6	21,5	21,5
<i>I. densiflora</i>	73,3	5,0	108,2	79,8	79,8

### 3.3.3 Las coberturas vegetales, vivas o muertas, pueden tener efecto sobre la producción del café

#### 3.3.3.1 Efecto de la cobertura arbórea y vegetal muerta del componente arbóreo sobre la producción de café

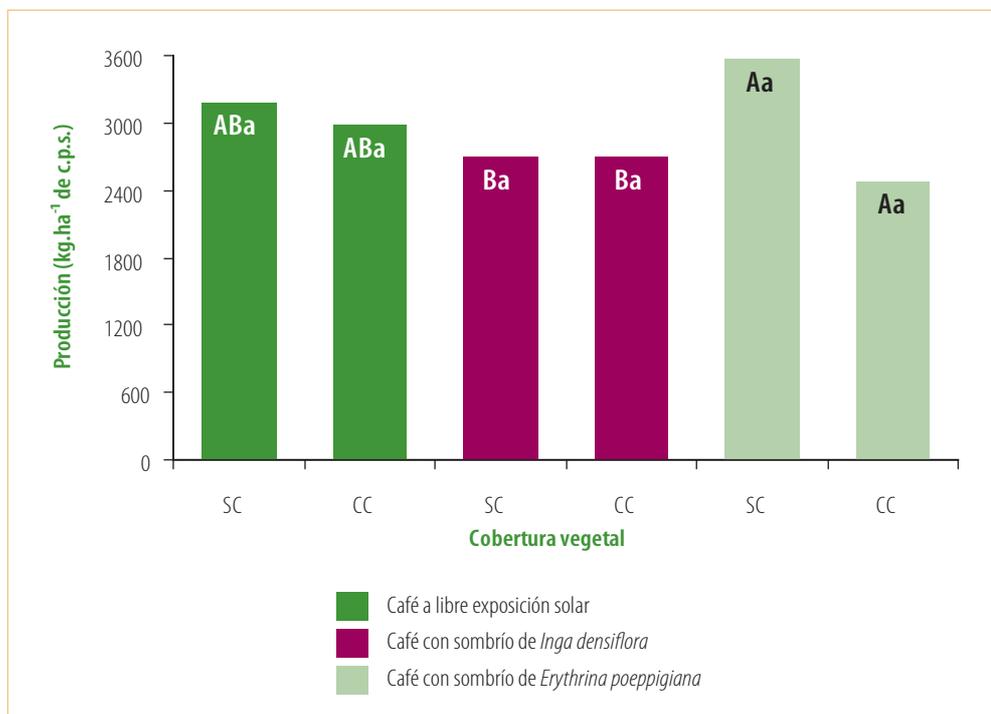
Los efectos benéficos de los árboles sobre la fertilidad de los suelos pueden influir tanto en una mejora en la estructura del suelo como aumentos en la disponibilidad de nutrientes. Estos efectos son consecuencia de la materia orgánica obtenida por medio de la hojarasca, las podas y la descomposición de raíces. Las especies arbóreas pueden influir sobre el pH, cationes, materia orgánica, contenido y disponibilidad de nitrógeno y fósforo; por tanto, la dominancia de áreas de café bajo sombra versus el café a pleno sol, puede ilustrar un ejemplo de un sistema agroforestal exitoso que puede ser sostenible a través del tiempo y, a la vez, generar ingresos y trabajo por los productos múltiples como café, madera, frutos y leña.

Los efectos positivos de los árboles para mantener la fertilidad y estructura del suelo también se notan en una degradación rápida cuando se eliminan los árboles. Para el componente arbóreo se han evaluado aspectos relacionados con producción de biomasa, bajo diferentes sistemas de manejo de podas, densidades de plantación y arreglos espaciales, así como la producción del cultivo asociado (Osorio, 2004); pero poco se sabe sobre el efecto que la cobertura vegetal muerta y el sombrío en su conjunto podrían tener sobre la producción del café.

En las Estaciones Experimentales El Tambo (Cauca) y Pueblo Bello (Cesar), se evaluó el efecto de la aplicación en café de cobertura vegetal muerta (mulch), en dos sistemas agroforestales (SAF), donde los componentes arbóreos fueron *Inga edulis* y *Erythrina poeppigiana* en El Tambo e *I. edulis* y *E. fusca* en Pueblo Bello, plantados a distancias de 9,0 m x 9,0 m (123 plantas/ha). El café fue establecido a una distancia de 1,5 m x 1,5 m (4.444 plantas/ha) en ambos casos.

- **Estación Experimental El Tambo (Cauca).** Los promedios de los porcentajes de interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) registrados durante el período 1998 a 2001, dado por *I. edulis* y *E. poeppigiana* al café, fueron del 62,0% y 25,0%, respectivamente. Beer *et al.* (1998) y Vaz (1967), informan que existe un efecto negativo directo entre el incremento en el porcentaje de cobertura de los árboles y la producción de café y que la incidencia de la luz en la producción de café es sustancial y se debe mantener en límites razonables no mayores al 50,0%. Los resultados de la producción de café (kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), se presentan en la Figura 53.

**Figura 53.**  
Producción media (kg.ha-año<sup>-1</sup>) de seis cosechas (1996 a 2001), café variedad Colombia. Estación Experimental El Tambo-Cauca. SC: Sin Cobertura; CC: Con Cobertura; a: Indica el efecto de la sola cobertura vegetal muerta.



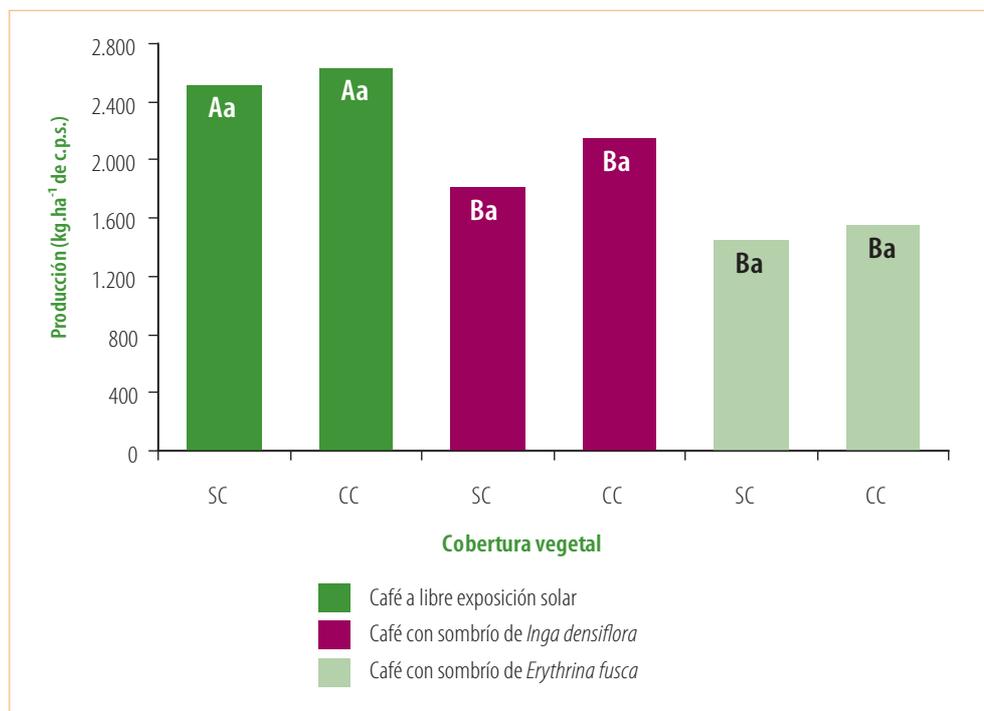
Los análisis indican que la interacción, grado de sombrío x aplicación de mulch no tuvo efecto significativo sobre la producción de café, lo que permite inferir que los factores fueron independientes entre sí. La comparación de los promedios obtenidos en cada sistema de cultivo de café, en el ciclo productivo 1996 a 2001, indican que fueron mayores las producciones obtenidas en café bajo sombrío de *E. poeppigiana* (con y sin cobertura muerta), frente a la producción del café con sombrío de *I. edulis*; esta producción fue 23,5% mayor con sombrío de *E. poeppigiana*. Los promedios de las producciones del café a libre exposición solar fueron similares a las producciones obtenidas bajo las dos especies de sombrío; las diferencias en producción del café solo y bajo sombra fueron del 12,6%.

La variación en la producción depende en gran proporción (70,0% al 80,0%) de las aplicaciones tecnológicas (variedades mejoradas, fertilización, controles fitosanitarios); las condiciones climáticas pueden influir entre el 12,0% y el 18,0% sobre esta variabilidad (Jaramillo *et al.*, 1992); el crecimiento y la producción del cafeto se ven afectados negativamente cuando el porcentaje de sombra en la planta es mayor o igual al 70,0% y se presenta un crecimiento normal con sombra media del 40,0% y la cobertura con árboles de sombrío tiene un efecto positivo sobre la producción de café, si ésta se mantiene entre el 23,0% y el 38,0%, una forma de regular la entrada de luz al café es mediante podas fuertes del sombrío, debido a que permite la entrada de luz entre el 85,0% y el 90,0% (Bull, 1963; Nicholas, 1988; Sylvain, 1977).

- **Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar).** Los promedios de los porcentajes de Intercepción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), registrados durante el período

1998 a 2002, fueron del 72,0% con árboles de *Inga edulis* y del 80,0% con árboles de *Erythrina fusca*. Beer *et al.* (1998) y Vaz (1967), indican que de producirse café bajo árboles de sombrío, su nivel de sombrío debe mantenerse a niveles del 50,0%, pues de lo contrario se presentará un efecto negativo directo entre el incremento en el porcentaje de cobertura de los árboles y la producción de café. Los resultados de la producción de café (kg.ha-año<sup>-1</sup> de café pergamino seco) se presentan en la Figura 54.

**Figura 54.** Producción media (kg.ha-año<sup>-1</sup>) de seis cosechas (1997 a 2002), café variedad Colombia. Estación Experimental Pueblo Bello. SC: Sin Cobertura; CC: Con Cobertura; a: Indica el efecto de la sola cobertura vegetal muerta.



Los análisis indican que no hay efecto de la interacción, grado de sombrío x aplicación de mulch, sobre la producción de café, lo que igualmente confirma que el efecto de los factores fue independiente entre sí. La comparación entre los promedios de las producciones registradas en cada sistema de cultivo, indican que la interceptación de la RFA ejercida por *I. Edulis* y *E. fusca* (72,0% y 80,0% respectivamente), incidió significativamente sobre la producción del café. El promedio de la producción de café a libre exposición solar fue 22,9% mayor que con sombrío de *I. Edulis* y 41,5% más alta que con sombrío de *E. fusca* (Tabla 17). Beer *et al.* (1998), Soto *et al.* (2000) y Nicholas (1988), encontraron que el crecimiento y la producción del cafeto se ven afectados negativamente cuando el porcentaje de sombra en la planta es mayor o igual al 70,0% y se presenta un crecimiento normal con un promedio de sombra del 40,0% y que la cobertura con árboles de sombrío tiene un efecto positivo sobre la producción de café, si ésta se mantiene entre el 23,0% y el 38,0%.

## 3.4 Estrategias 4 y 5. Establecer la densidad de siembra del sombrío adecuada y controlar el porcentaje de sombrío

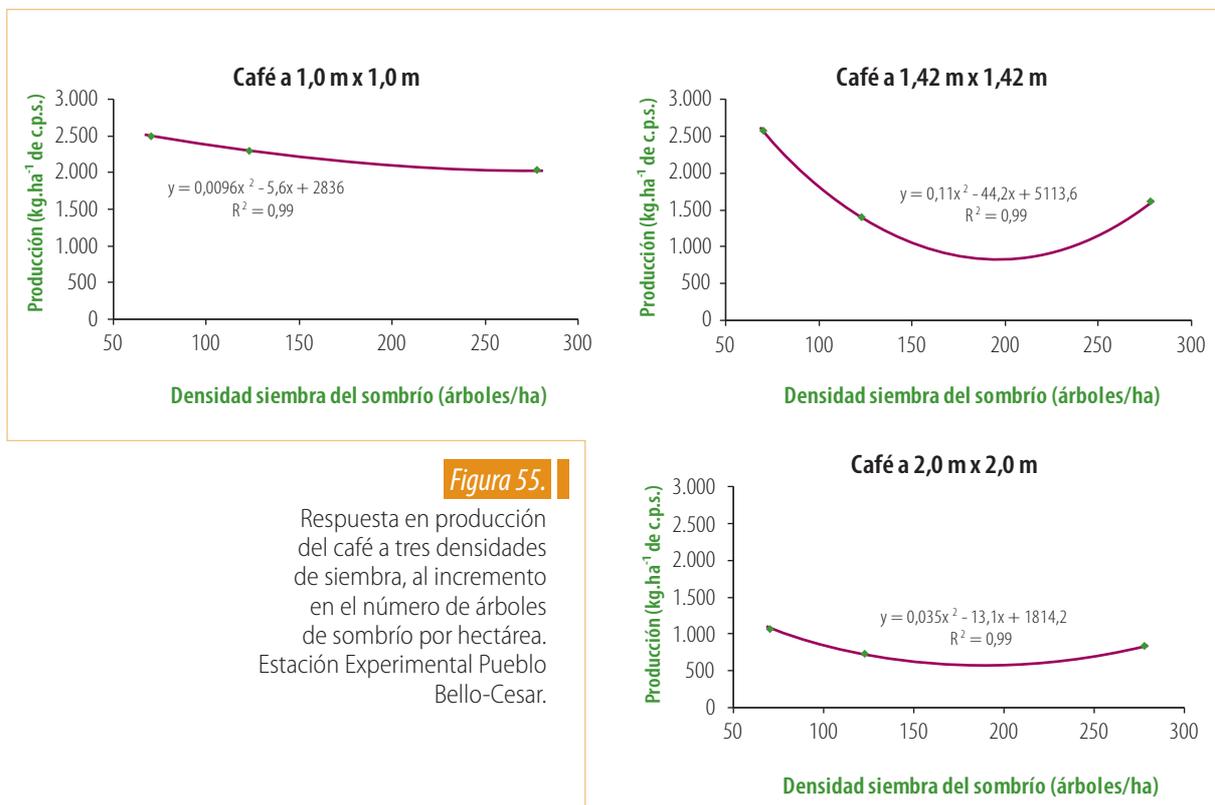
### 3.4.1 Con el café establecido, plantar el número de árboles de sombrío apropiado

#### 3.4.1.1 Densidades de siembra de *Inga edulis*, como sombrío del café

La inclusión de árboles de sombra en el café es controversial y la decisión de cultivar el café con árboles de sombrío depende de muchos factores, entre los que cabe mencionar: Las características del suelo, su relieve, susceptibilidad a la erosión, profundidad, fertilidad natural y las condiciones climáticas. Son diversas las ventajas y desventajas que los árboles de sombra tienen sobre el café, entre las ventajas se pueden citar las siguientes: Los árboles facilitan el manejo del cultivo, por ejemplo en el control de arvenses; tienen efecto benéfico en el ciclo hidrológico; protegen el cultivo de plagas, enfermedades y condiciones climáticas adversas; contribuyen al mejoramiento de la fertilidad del suelo.

Las desventajas indican que los árboles del sombrío reducen la producción del café; demasiada sombra puede promover el desarrollo de patógenos; la caída de ramas y hojas puede afectar el cultivo; pueden tener efectos detrimentales en el ciclo hidrológico; reducción de la fertilidad del suelo e incremento de la erosión, entre otros. En la selección y diseño de sistemas agroforestales con café se deben incluir aspectos como cuál parte de la finca se beneficia más con el asocio de árboles; identificar qué árboles se desarrollan bien en las condiciones de la finca; planificar prácticas de manejo a los árboles seleccionados, entre otros. De las decisiones tomadas con esta información será el fundamento para establecer, por ejemplo, las distancias de siembra apropiadas tanto del café como de los árboles de sombrío; prácticas que tienen como objetivo mantener o incrementar la productividad y la calidad del producto.

Estudios realizados por Farfán y Baute (2009), en la Estación Experimental Pueblo Bello, en los que se determinó cuál sería la densidad de siembra óptima de *I. edulis* (guamo santafereño) al emplearse como sombrío del café establecido a densidades de siembra de 10.000, 5.000 y 2.500 plantas/ha, permitieron concluir que si la densidad del café está con 10.000 y 5.000 plantas/ha, el sombrío debe establecerse con 70 árboles/ha de *I. edulis*, bajo estos arreglos se obtienen las mayores producciones; con bajas densidades de siembra del café (2.500 plantas/ha), la producción es similar bajo cualquiera de las distancias de siembra del sombrío evaluadas (Figura 55). Las estimaciones se realizaron solo para la Estación Experimental Pueblo Bello, bajo las condiciones de clima imperantes durante el tiempo de las evaluaciones y con las características de suelo en las que se estableció el estudio.



**Figura 55.**

Respuesta en producción del café a tres densidades de siembra, al incremento en el número de árboles de sombrío por hectárea. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar.

En SAF con café (var. Catuai) establecido con 1.923 plantas/ha y sombrío de *Grevillea robusta* plantada desde 0 hasta 119 árboles/ha, Baggio *et al.* (1997) indican que las densidades de siembra de 26, 34 y 48 árboles/ha no tienen efecto sobre la producción de café, mientras que con 119 árboles de sombrío por hectárea se produce cerca de 18% menos que a libre exposición solar. Pero en condiciones subóptimas, el sombrío tiene un efecto benéfico sobre el tamaño del fruto; con sombrío de *Erythrina poeppigiana* se ve incrementado el tamaño en un 80%, comparado con los obtenidos en cultivo solo (Muschler, 2001). Derlfsen (1988) reporta reducciones hasta de un 50% en producción de café al aumentar la densidad de siembra del sombrío de *C. alliodora* (114 a 344 árboles/ha) comparada con la obtenida en café a libre exposición.

### 3.4.1.2 Densidades de siembra de especies leguminosas en SAF con café

El grado en que los recursos biofísicos son tomados y utilizados por los componentes de un sistema agroforestal (SAF) son determinados por la naturaleza y la intensidad de las interacciones entre los componentes; el efecto neto de estas interacciones es determinado, a menudo, por la influencia del componente arbóreo sobre los otros componentes o sobre el sistema total, expresado en términos de respuestas cuantificables, tales como: Cambio en la fertilidad del suelo, modificación del microclima, disponibilidad y utilización del recurso (agua, nutrientes, y luz), incidencia de plagas y enfermedades, productividad de la planta, entre otros.

Como alternativa se cultiva el café bajo árboles de sombrío para tratar de conservar la humedad del cultivo en épocas secas; los árboles de sombra producen una cobertura vegetal, la cual puede tener un efecto conservador de la humedad, debido a la reducción del viento y la temperatura de la capa superficial, resultando una menor evaporación. Las interacciones entre árboles y café deben centrarse en explorar diversas especies de árboles a establecer en los SAF, estudiar las interacciones en los sistemas a diversas escalas espaciales, determinar las implicaciones ambientales de los SAF, particularmente en las zonas tropicales secas, manejar los componentes del SAF para maximizar las ventajas; así se crea la posibilidad de contribuir al mejoramiento de las condiciones de producción del café en un área considerable de la zona cafetera colombiana.

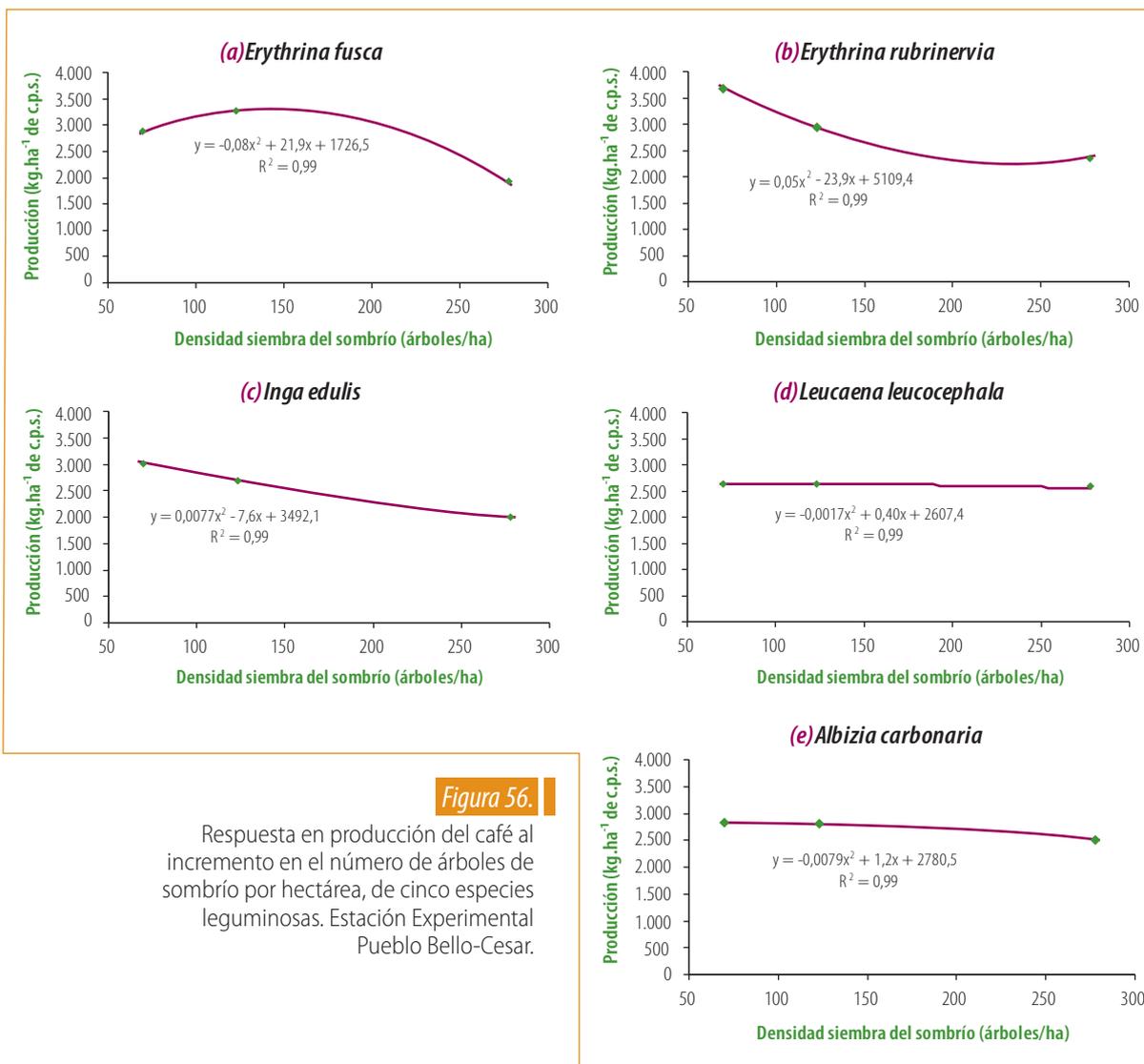
En la Estación Experimental Pueblo Bello, Farfán y Baute (2010) evaluaron el efecto que sobre la producción del café tendría el sombrío proporcionado por cinco especies leguminosas, incrementando simultáneamente la densidad de siembra; el café se estableció a 1,5 m x 1,5 m y las especies de sombrío a 6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha); 9,0 m x 9,0 m (123 árboles/ha) y 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha). De las evaluaciones realizadas durante seis cosechas de café (1998 a 2003), se infiere que la producción disminuye por incremento de la densidad de siembra del sombrío, solo es igual con el sombrío dado por *Leucaena leucocephala*.

El valor estimado de las pendientes mediante polinomios cuadrados indica que en cosechas sucesivas (1998 a 2003), la producción disminuye como respuesta al incremento de la densidad de siembra del sombrío (Figura 56); las máximas producciones se alcanzan entre los 2 y 4 años de establecido el café en todos los SAF y las mayores producciones pueden obtenerse al realizar la siembra del sombrío a 12,0 m x 12,0 m. Toda modificación de los niveles de luz y de las condiciones del suelo, presumiblemente afecta la disponibilidad de nutrientes y la nutrición del cultivo y para los sistemas de producción agroforestales, una vez se alcanzan los requerimientos de nutrientes, la producción depende principalmente de la accesibilidad a la radiación solar (Cunningham y Arnold, 1962). Dentro del cultivo, los árboles de sombrío se disponen en hileras o al triángulo y las distancias varían entre 6,0 m y 9,0 m, según el árbol empleado. Cuando se establecen árboles de un desarrollo tal que requieran distancias de 12,0 m, y que al mismo tiempo sean de lento crecimiento, se pueden plantar a 6,0 m de distancia para entresacarlos después, cuando hayan alcanzado cierto desarrollo (FNC, 1958).

### 3.4.2 *En SAF estratificados, máximo cinco especies, seleccionarlas de manera que proporcionen diferentes porcentajes de cobertura (sombrio diverso)*

#### 3.4.2.1 *Efecto de la distribución espacial de especies leguminosas y su interceptación de la RFA sobre la producción de café*

Los efectos de la sombra sobre los rendimientos de café son difíciles de caracterizar debido a que la premisa de “manejo y diseño de sombra adecuado” es raramente asegurada; además, la ventaja relativa del rendimiento de café sin sombra puede ser limitada. Así, se ha demostrado que



**Figura 56.**

Respuesta en producción del café al incremento en el número de árboles de sombrío por hectárea, de cinco especies leguminosas. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar.

se pueden obtener mayores rendimientos en plantaciones de café manejadas en forma intensiva sin sombra, con resultados inconsistentes, debido probablemente a condiciones de sitio y al manejo de los cafetales. Cuando se compara el manejo con y sin sombra, o cuando se comparan diferentes especies de sombra, varían un grupo de factores y no solamente el factor “especie”; pues para cada caso se debe aplicar el manejo óptimo y éste implica diferentes densidades de siembra del café y los árboles de sombra, poda, fertilización y aplicación de insumos químicos, para poder juzgar cada especie de sombra por su potencial (Beer *et al.*, 1998).

En la Estación Experimental Pueblo Bello, se evaluó el efecto que sobre la producción de café tuvieron las especies leguminosas *Erythrina fusca* (cámbulo), *Erythrina rubrinervia* (fríjol rojo), *Inga edulis* (guamo santafereño) y *Albizzia carbonaria* (carbonero) empleadas como sombrío, y establecidas a distancias de siembra de 6,0 m x 6,0 m, 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m (223, 178 y

70 árboles por hectárea, respectivamente). El café fue establecido a 1,5 m x 1,5 m (4.444 plantas/ha). En la Tabla 38 se presentan los promedios de los porcentajes de sombra en que se desarrolló el cultivo de café, de acuerdo con el estudio de Farfán y Baute (2010).

**Tabla 38.**

Promedios de los porcentajes de sombra para el café, Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (Fuente: Farfán y Baute, 2010).

Especies de sombrío	Densidades de siembra del sombrío (árboles/ha)		
	278	123	70
<i>Erythrina fusca</i>	57,6%	29,9%	25,3%
<i>Erythrina rubrinervia</i>	32,2%	25,3%	20,9%
<i>Inga edulis</i>	60,8%	72,5%	37,4%
<i>Leucaena leucocephala</i>	35,5%	29,8%	24,0%
<i>Albizzia carbonaria</i>	74,6%	65,6%	47,0%

En estudios realizados por Farfán y Mestre (2004b) en la zona cafetera norte de Colombia, obtuvieron que la mayor producción de café se presentó con niveles de sombrío entre el 35% y 40%, empleando *Inga edulis* como sombrío del café. El efecto de la interceptación de la RFA sobre la producción del café (en kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), promedio de seis cosechas (1998 a 2003), se presentan en la Figura 57.

Los porcentajes de sombrío dado por las especies *E. fusca*, *E. rubrinervia*, *I. edulis* y *A. carbonaria*, afectaron significativamente la producción del café ( $p < 0,05$ ), al variar la distancia de siembra del mismo y manteniendo constante la distancia de siembra del café; la función que describió la relación entre el porcentaje de cobertura dado por las especies leguminosas y la producción de café, fue un polinomio cuadrado del orden  $y = ax^2 + bx + c$ . Resultados similares fueron obtenidos por Soto *et al.* (2000).

**Sombrío con *Erythrina fusca*.** El porcentaje de cobertura dado por esta especie afectó positivamente la producción de café, en un rango de sombra entre el 35% y 40%; por debajo del 35% y por encima del 40%, la producción decrece (Figura 57a). Un porcentaje de cobertura del 40% estableciendo *E. fusca* a densidades de siembra de 278, 123 y 70 árboles/ha, se alcanza después de los 2,5 años de establecidos los árboles. La producción de café fue 69,7% superior con densidades de 123 plantas/ha que con 278 árboles de sombrío por hectárea; las producciones de café con densidades de siembra del sombrío de *E. fusca* a 278 y 70 árboles/ha, fueron similares.

Los resultados reportados por Detlefsen (1988), indican reducciones hasta de un 50% en producción de café al aumentar la densidad de siembra del sombrío de *C. alliodora* (114 a 344

árboles/ha) comparada con la obtenida en café a libre exposición solar; Glover (1981), con incrementos en el nivel de sombrero de *Erythrina* + *Cordia alliodora*, al incrementar el número de plantas por hectárea (de 252 a 475), observó que se reduce la producción de café en un 22%, comparada con la producción con bajos niveles de sombra y una sola especie (252 plantas/ha de *Erythrina* sp).

**Sombrío con *Erythrina rubrinervia*.** El porcentaje de cobertura dado por esta especie afectó positivamente la producción de café cuando este porcentaje fue del 22%; por encima del 22% la producción se reduce (Figura 57b). El porcentaje de cobertura del 22% al establecer *E. rubrinervia* a densidades de siembra de 278, 123 y 70 árboles/ha, se obtiene del tercer año de establecidos los árboles. La producción de café fue 56,4% más alta con densidades de 70 árboles/ha que con 278 árboles de sombrero por hectárea. Las producciones de café con densidades de siembra del sombrero de *E. rubrinervia* a 123 y 278 árboles/ha, fueron iguales; Estivarez y Muschler (1998), obtuvieron que con un sombrero homogéneo del 60% de *Erythrina* sp. la producción de café se reduce un 41% comparada con una sombra heterogénea del 20% al 40%.

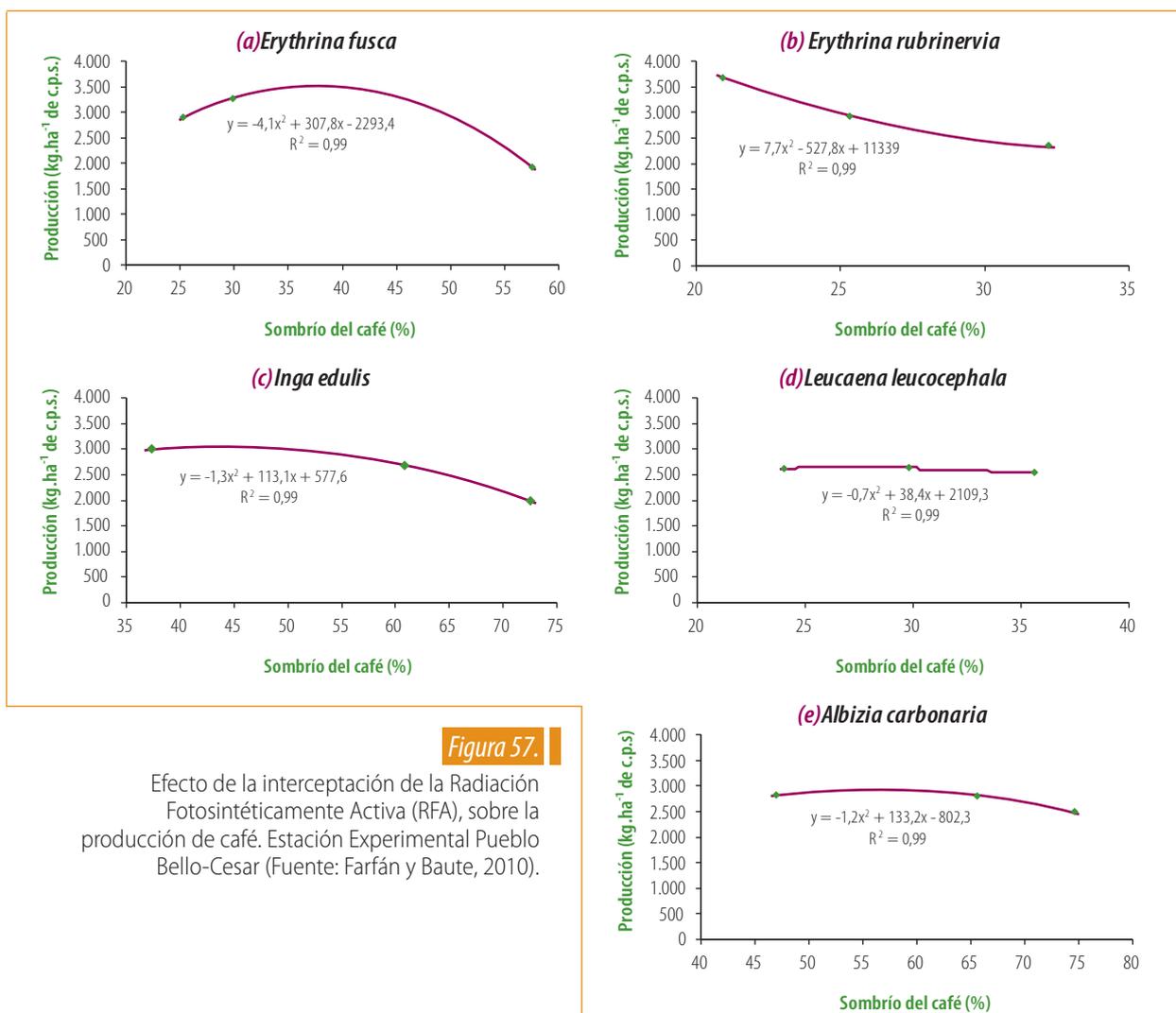


Figura 57.

Efecto de la interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), sobre la producción de café. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (Fuente: Farfán y Baute, 2010).

**Sombrío con *Inga edulis*.** El porcentaje de cobertura dado por esta especie afectó positivamente la producción de café cuando este porcentaje fue del 35%; por debajo de este porcentaje de sombrío afecta negativamente la producción (Figura 57c). Un porcentaje de cobertura del 35% al establecer *I. edulis* a densidades de siembra de 70 plantas/ha, se obtiene a los 3,5 años de establecidos los árboles. A densidades de siembra de 278 y 123 árboles/ha, este porcentaje de sombra se puede alcanzar entre los 1,0 y 2,5 años de establecido el sombrío.

La producción de café fue 50,9% superior con sombrío de *I. edulis* y densidades de 70 plantas/ha que con 278 árboles de sombrío por hectárea; no hubo diferencias entre las producciones de café con densidades de siembra del sombrío de *I. edulis* a 123 y 278 árboles/ha. Baggio *et al.* (1997), evaluaron el efecto de la densidad de siembra de *Grevillea robusta* como sombrío sobre la producción de café, observando que no había efecto de la sombra dada por los árboles establecidos a 26, 34 y 48 plantas/ha sobre la producción, y que se presentaba una reducción significativa de la producción con el asocio de 119 árboles de sombra por hectárea.

Farfán y Mestre (2004a; 2004b), encontraron que en la zona cafetera central de Colombia (4° 59' latitud Norte y 75° 39' longitud Oeste) la producción del café se reducía en 50% cuando se incrementó la densidad de siembra de 70 a 123 árboles/ha de *Inga edulis* y en 41,9% al aumentarla de 123 a 270 árboles/ha; mientras que en la zona cafetera norte (10° 25' latitud Norte y 73° 34' longitud Oeste), observaron que estas reducciones eran del 11,1% y 41,9% en los dos casos.

**Sombrío con *Leucaena leucocephala*.** El porcentaje de sombrío del 25% al 30%, proporcionado por *L. leucocephala*, afecta positivamente la producción de café (Figura 57d). Un porcentaje de cobertura del 30% al establecer *L. leucocephala* a densidades de siembra de 70 árboles/ha, se obtiene después de los 8 años de establecidas las plantas. A densidades de siembra de 123 y 278 árboles/ha, estos porcentajes de sombra se pueden obtener entre los 3 y 4 años de establecidos estos árboles.

**Sombrío con *Albizzia carbonaria*.** El porcentaje de sombrío del 47% y 52%, proporcionado por *A. carbonaria*, influyó positivamente sobre la producción de café; porcentajes de cobertura arbórea por encima del 55% afectan negativamente la producción (Figura 57e). Un porcentaje de cobertura del 47% al establecer *A. carbonaria* a densidades de siembra de 70 árboles/ha, se obtiene a los 3,0 años de establecidas las plantas. A densidades de siembra de 123 y 278 árboles/ha, este porcentaje de sombra se puede alcanzar en los 1,0 y 2,0 años de establecido el sombrío.

Los análisis indicaron que la producción de café no es afectada por el incremento en la densidad de siembra de esta especie de sombrío; los efectos de la sombra de 30%, 50% y 75% dada por árboles de *Leucaena glauca* y *Grevillea robusta*, y una mezcla de ambas, afecta negativamente la producción de café si se compara con la producción registrada en café a libre exposición (Coffee Research, 1975). El cultivo de café con sombrío permanente de *Cordia alliodora* + sombrío transitorio de plátano y siembras de frijol afecta significativamente la producción de materia seca del café (Alpizar *et al.*, 1985).

### 3.4.3 Seleccionar la especie de árbol y la distribución espacial apropiada para las condiciones del sitio de plantación

En sistemas agroforestales los árboles son el componente más grande y dominante. Para evaluar la contribución potencial de los árboles en sistemas agroforestales ecológicamente sostenibles, hay que considerar los atributos sobresalientes de los agroecosistema para ser sostenibles. Son muchos los factores que influyen sobre los beneficios de la asociación entre plantas de café y árboles; cultivar café con sombra no significa solamente dar sombra y reducir el estrés ambiental para el café, significa también que los árboles modifican el ambiente, sus raíces, ramas y hojas (Muschler, 2000); las hojas y ramas en particular pueden formar una capa vegetal en el suelo que junto con la cobertura dada por el árbol pueden tener efectos indirectos sobre el suelo.

Los sistemas agroforestales son específicos del ecosistema y, en ciertos suelos de baja calidad, la elección de especies vegetales apropiadas puede resultar limitante, aún cuando muchos árboles tienen mayor capacidad de adaptarse a suelos pobres que otros cultivos. Los árboles pueden afectar el nivel de nutrientes del suelo al explotar las reservas minerales más profundas en la roca parental y recuperar los nutrientes lixiviados y depositarlos sobre la superficie como hojarasca; esta materia orgánica aumenta el contenido de humus del suelo, el cual a su vez aumenta la capacidad de intercambio catiónico y disminuye la pérdida de nutrientes (Farrel y Altieri, 1997).

Existe un sinnúmero de restricciones o condiciones limitantes para la aplicación de los sistemas agroforestales; es necesario reconocerlas y hacer esfuerzos por superarlas, si se desea aplicar con éxito la agroforestería, pues diversos estudios de campo, por ejemplo, han constatado que la disponibilidad de luz y de agua interactúan, a veces de forma muy compleja, y por tanto la(s) especie(s), su distribución, su densidad y sus respuestas no pueden entenderse sino mediante la combinación simultánea de ambos factores.

#### 3.4.3.1 “La paradoja edáfica”

La competencia interespecífica y la interceptación de la lluvia caída en el verano por parte del dosel de los árboles y del material vegetal depositados por ellos en el suelo, son las explicaciones más plausibles de un mayor estrés hídrico a la sombra que en el sol, durante los períodos secos. Este fenómeno también se ha llamado “paradoja edáfica”, ya que el mayor estrés hídrico se presenta en zonas cuyos suelos son aparentemente más frescos y experimentan una baja demanda evaporativa (Valladares, 2005).

En las Estaciones Experimentales de Cenicafé, ubicadas en Pueblo Bello (Cesar) y en El Tambo (Cauca), Farfán y Jaramillo (2008), evaluaron el efecto de la cobertura vegetal muerta y arbórea sobre la disponibilidad de agua en el suelo, en sistemas agroforestales con café, las especies arbóreas empleadas fueron *Inga edulis* (guamo santafereño) y *Erythrina fusca* (cámbulo) en Pueblo Bello, y en El Tambo se empleó la misma especie de *Inga* y *E. poeppigiana* (písamo), establecidas a 9,0 m x 9,0 m (123 plantas/ha).

De los resultados obtenidos establecieron que en la Estación Experimental Pueblo Bello se presentaron deficiencias hídricas en el suelo en los meses de enero a marzo (43,5 mm a 44,2 mm) y al comparar la disponibilidad de agua en el suelo para cada uno de los tratamientos, durante todo el período de evaluaciones (enero de 1998 a diciembre de 2000), encontraron que en Pueblo Bello se presentaron deficiencias hídricas cuando se cultivó simultáneamente el suelo con café bajo sombrío de *Erythrina fusca* y con cobertura vegetal muerta (tratamiento 6) (Tabla 39).

**Tabla 39.**

Humedad volumétrica (mm). Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar y El Tambo-Cauca.

Localidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Pueblo Bello	43,5	47,8	44,2	52,3	56,8	56,6
El Tambo	79,1	80,8	78,9	82,5	82,4	81,5

Localidad	T1	T2	T3	T4	T5	T6	C.V.
Pueblo Bello	53,7 a	52,7 ab	53,3 ab	52,4 bc	51,7 c	49,4 d	9,0%
El Tambo	79,6 a	80,2 a	80,5 a	80,3 a	79,8 a	80,0 a	4,4%

T1: Café a libre exposición solar, sin mulch. T2: Café a libre exposición solar, con mulch. T3: Café con sombrío de *Inga edulis*, sin mulch. T4: Café con sombrío de *Inga edulis*, con mulch. T5: Café con sombrío de *Erythrina sp*, sin mulch. T6: Café con sombrío de *Erythrina sp*, con mulch.

Sylvain (1958), Bull (1963) y Cassol *et al.* (2004), plantean que la cobertura vegetal producida por los árboles de sombra y el mulch aplicado pueden tener un efecto benéfico en la conservación de la humedad en el suelo, ya que indirectamente disminuyen la acción del viento y la temperatura de la capa superficial, lo que da como resultado una menor evaporación. No obstante, en comunidades arbóreas, el número de especies y la cantidad de biomasa producida por las plantas son un determinante importante de las características del ecosistema, y de estos dos factores dependen en alto grado la cantidad y la distribución espacial de la humedad del suelo disponible para las plantas (Breshears y Barnes, 1999).

### 3.4.3.2 “La sombra seca”

La “sombra seca” se refiere a la falta de disponibilidad de agua en el suelo al ser interceptada por el follaje de los árboles. Se ha observado en bosques templados un mayor grado de estrés hídrico en las plántulas que crecen al abrigo de árboles adultos, que en aquellas que lo hacen en el claro de un bosque o en zonas totalmente desarboladas; el fenómeno puede ser crítico en años excepcionalmente secos (Valladares, 2005).

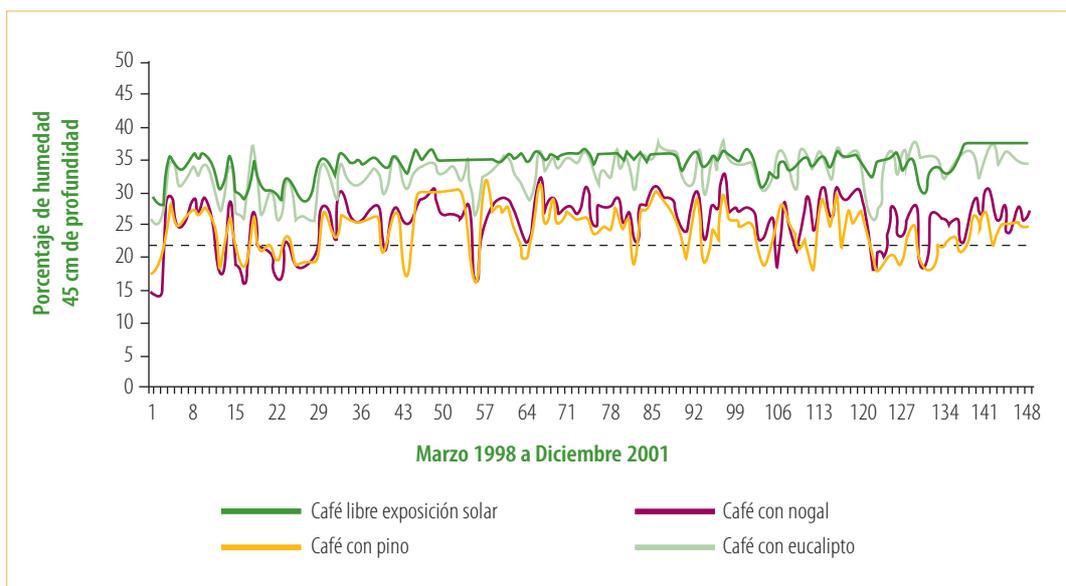
Un estudio realizado por Jaramillo (2003), en el que evaluó la lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales, los cuales incluyeron, entre otros, café a libre

exposición solar y café con sombrío de nogal, pino y eucalipto, obtuvo que la mayor proporción de la lluvia externa interceptada ocurre en plantaciones de café con sombrío del nogal, con un valor del 56% y en menor proporción en cafetales con pino y eucalipto.

Adicionalmente, registró menor disponibilidad hídrica en áreas cultivadas con café y sombrío de *Cordia alliodora* (nogal cafetero) comparado con el café a libre exposición solar (Figura 58), como efecto del alto grado de sombrío (mayor al 45%) dado por el nogal; ya que una cobertura densa del sombrío y del cafetal podría disminuir el agua disponible en el suelo para el desarrollo del cultivo (Jaramillo, 2003).

**Figura 58.**

Efecto de especies forestales sobre la humedad del suelo, a 45 cm de profundidad, Estación Experimental Paraguaicito (Fuente: Jaramillo, 2003).



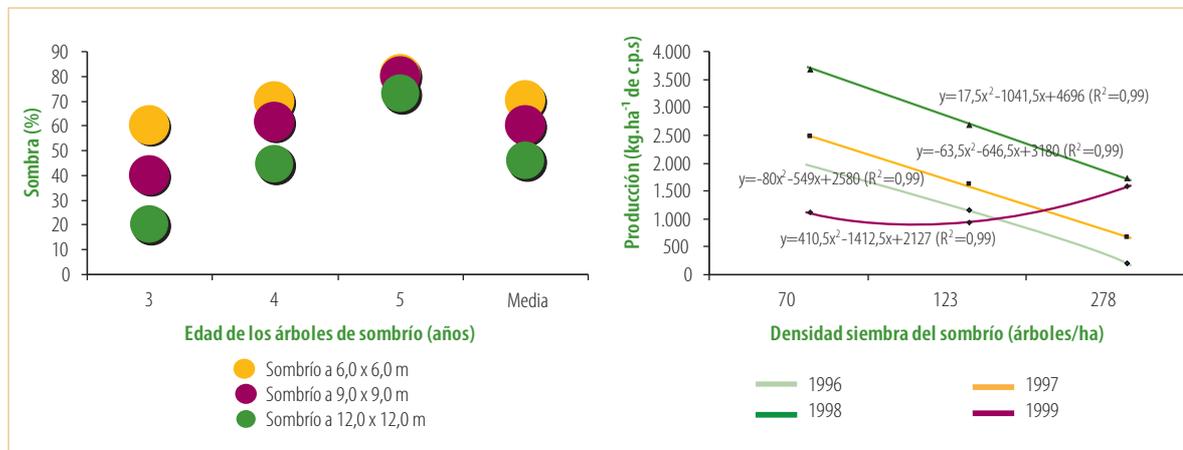
El fenómeno *sombra seca*, es contradictorio en algunos ambientes, como el café creciendo bajo árboles de sombra, debido al concepto general y tradicional de creer que los ambientes más sombreados para el café son los más favorables, desde el punto de vista de la productividad y la biodiversidad. En general, los efectos ambientales de los árboles se pueden dividir en dos grupos. El primer grupo incluye efectos directos que tienen consecuencias inmediatas para el crecimiento y la producción del café. Este grupo comprende, principalmente, el nivel de sombra y cambios microclimáticos (temperatura y humedad) debidos a ella. El segundo grupo de efectos de los árboles consiste en efectos indirectos o secundarios (colaterales) en función de los cambios microclimáticos y cambios a largo plazo en la fertilidad del suelo (Muschler, 2000).

### 3.4.4 Determinar el momento oportuno para iniciar las podas de los árboles o la regulación del sombrío

Un buen manejo agronómico del cultivo asegura las condiciones apropiadas para el desarrollo del cafetal y, consecuentemente, influye en una mayor productividad. Las podas de los cafetos y la regulación de sombra de los cafetales, de manera particular, constituyen labores culturales indispensables para mejorar la capacidad productiva de las plantaciones (Duicela *et al.*, 2003). En estudios realizados por Mestre (1994), concluyó que los cafetales cultivados bajo excesivo sombrío no responden a la aplicación de fertilizantes, y sugiere que la respuesta a la fertilización y, por ende, incrementos sustanciales en la producción se pueden favorecer con un manejo de la densidad del sombrío en la plantación, mediante podas de los árboles que permitan la circulación de aire y una mayor penetración de la luz.

Con densidades altas de siembra de los árboles de sombrío o debido a su mal manejo (sin podas de mantenimiento y sin podas de formación), o una inadecuada distribución de los árboles en el campo, en corto tiempo se presentarán niveles de sombra excesivos (>50%), limitantes para la producción del café (Farfán, 2007). Por tanto, es requisito en los sistemas de cultivo de café con sombrío: (i) Determinar el porcentaje de sombrío óptimo o adecuado para cada localidad; (ii) Determinar el momento en el que, después de establecidos los árboles, se presentan los niveles de sombra adecuados para el cultivo; (iii) Iniciar el plan de manejo los árboles (regulación o podas) para mantener estos niveles dentro de los rangos establecidos. La determinación de la época para el inicio del manejo de los árboles y el inicio del plan de manejo, será el reflejo de las reducciones o incrementos de la producción al establecer el café en asocio con árboles.

En estudios desarrollados por Farfán y Mestre (2004a), en la Estación Central Naranjal, donde se establecieron cafetales con sombrío de *I. edulis* (guamo santafereño), en tres distancias de siembra 6,0 m x 6,0 m, 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m (278, 123 y 70 árboles/ha de guamo), realizando mediciones del porcentaje de sombrío de los árboles desde los 3 hasta los 5 años de edad (Figura 59), obtuvieron que a los 3 años de establecido el sombrío de guamo a 6,0 m x 6,0 m, los niveles de sombra fueron superiores al 50,0% (sombrío denso), mientras que con los árboles establecidos a 9,0 m x 9,0 m (123 guamos por hectárea) el sombrío fue adecuado y a 12,0 m x 12,0 m (70 guamos por hectárea) se observó que éste era ralo o heterogéneo. Al cuarto año de edad de los árboles en los cafetales establecidos con 278 y 123 guamos por hectárea, el grado de sombra fue superior al 50% (sombrío homogéneo), mientras que con 70 plantas/ha el porcentaje de sombra fue adecuado para el café. A los 5 años, el grado de sombra fue homogéneo e igual para las tres densidades de siembra del sombrío (70,0%).



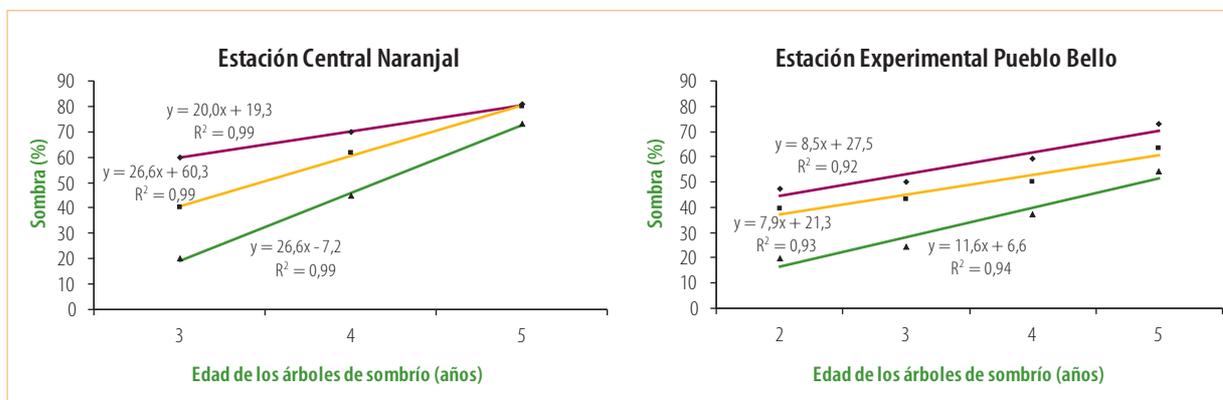
**Figura 59.**

Reducción de la producción por efecto del aumento en el número de árboles de *Inga edulis* por hectárea. Estación Central Naranjal-Caldas (Fuente: Farfán y Mestre, 2004a).

Adicionalmente, se puede inferir que el coeficiente de correlación ( $r = -0,99$ ) entre el grado de cobertura del componente arbóreo y la producción dentro de cada subsistema, muestra que existe una relación lineal inversa, es decir, si aumenta el porcentaje de sombra disminuye la producción (Figura 59). El análisis mediante polinomios cuadrados indica que la estabilización y mínima producción bajo las tres densidades de siembra del sombrío, como efecto de la nivelación de la sombra en los tres sistemas de siembra, ocurrió en el quinto año de establecimiento del sombrío; por tanto, es al cuarto año de plantados los árboles cuando debe realizarse su manejo o regulación de la sombra para las condiciones donde se desarrolló el estudio, con el fin de prevenir reducciones marcadas en la producción del café, como efecto del aumento en el porcentaje de sombra.

### 3.4.4.1 Inicio de la regulación del sombrío con *Inga sp.*

En la Figura 60 se presenta el comportamiento en el porcentaje de sombrío dado por *Inga edulis* (guamo santafereño) establecido a tres densidades de siembra, desde los 3 hasta los 5 años, en la Estación Central Naranjal, y desde los 2 hasta los 5 años en la Estación Experimental Pueblo Bello; en el café establecido con 4.444 plantas/ha en las dos localidades. En la Tabla 40, se presenta la edad óptima de los árboles de *Inga edulis* para dar inicio a su regulación o podas de mantenimiento, para mantenerlo con porcentajes de sombrío entre el 35% y 45% en las dos localidades.



**Figura 60.**

Evolución en el grado de sombrío por *Inga edulis*, en la Estación Central Naranjal y la Estación Experimental Pueblo Bello (Fuente: Farfán y Mestre, 2004).

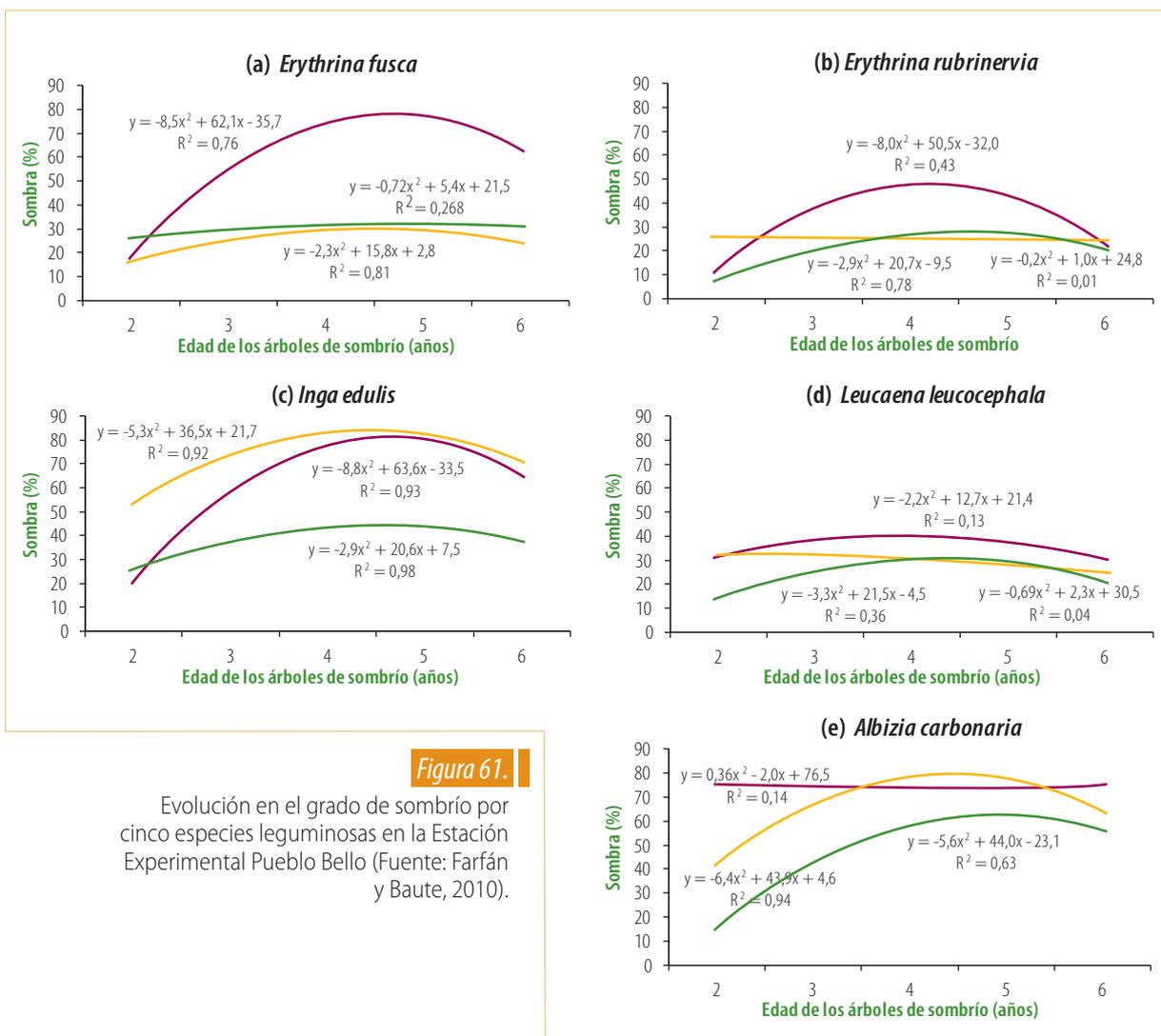
**Tabla 40.**

Edad óptima de *Inga edulis* para dar inicio a su regulación o podas de mantenimiento. Estación Central Naranjal-Caldas y Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (Fuente: Farfán y Mestre, 2004).

Distancia siembra	Edad del árbol de <i>Inga edulis</i> (años)	
	Naranjal	Pueblo Bello
6,0 m x 6,0 m	2,5 – 3,0	< 1,0
9,0 m x 9,0 m	3,5 – 4,0	2,0 – 2,5
12,0 m x 12,0 m	> 4,0	3,5 - 4,0

### 3.4.4.2 Inicio de la regulación del sombrío con *Erythrina sp.*, *Inga sp.*, *Leucaena leucocephala* y *Albizia carbonaria*

En la Figura 61 se presenta el comportamiento en el porcentaje de sombrío dado por cinco especies leguminosas: *E. fusca* (cámbulo), *E. rubrinervia* (fríjol rojo), *I. edulis* (guamo santaferño), *L. leucocephala* (leucaena) y *A. carbonaria* (carbonero), establecidas a tres densidades de siembra, desde los 2 hasta los 6 años en la Estación Experimental Pueblo Bello; sobre el café establecido con 4.444 plantas/ha. En la Tabla 41 se presenta la edad óptima de las especies leguminosas para dar inicio a su regulación o podas de mantenimiento, para mantenerlo con porcentajes de sombrío entre el 35% y 45% en esta localidad.



**Figura 61.**

Evolución en el grado de sombrío por cinco especies leguminosas en la Estación Experimental Pueblo Bello (Fuente: Farfán y Baute, 2010).

**Tabla 41.**

Edad óptima de los árboles de leguminosas para dar inicio a su regulación o podas de mantenimiento. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (Fuente: Farfán y Baute, 2010).

Árboles de sombrío	Edad de los árboles (años)		
	6,0 m x 6,0 m	9,0 m x 9,0 m	12,0 m x 12,0 m
<i>Erythrina fusca</i> (cámbulo)	2,5 – 3,0	5,5 – 6,0	Indeterminado
<i>Erythrina rubrinervia</i> (fríjol rojo)	3,0 – 3,5	Indeterminado	Indeterminado
<i>Inga edulis</i> (guamo santafereño)	< 1,5	1,5 – 2,0	3,0 - 3,5
<i>Leucaena leucocephala</i> (leucaena)	2,5 – 3,5	4,0 – 4,5	8,0 – 8,5
<i>Albizzia carbonaria</i> (carbonero)	< 1,0	1,5 – 2,0	3,0 – 3,5

### 3.4.4.3 Inicio de la regulación del sombrío con especies forestales

En la Figura 62 se presenta el comportamiento en el porcentaje de sombrío dado por tres especies forestales: *Cordia alliodora* (nogal cafetero), *Pinus oocarpa* (pino) y *Eucalyptus grandis* (eucalipto), desde los 4 hasta los 7 años de establecidos a 6,0 m x 6,0 m, en la Estación Experimental Paraguaicito, y tres especies forestales y una leguminosa: *Eucalyptus grandis* (eucalipto), *Pinus chiapensis* (pino), *Pinus tecunumanii* (pino) e *Inga edulis* (guamo santafero), desde los 2 hasta los 6 años, establecidos a 6,0 m x 6,0 m, en la Finca La Suecia. El café se estableció con 4.444 plantas/ha.

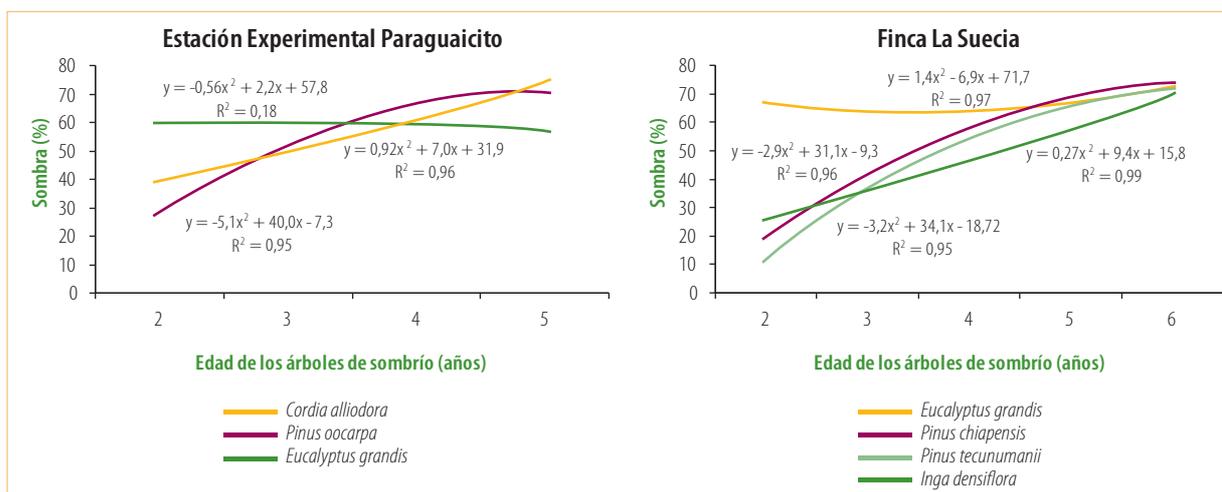


Figura 62.

Evolución del sombrío de tres especies forestales en la Estación Experimental Paraguaicito-Quindío y tres especies forestales y una leguminosa en la Finca La Suecia.

En la Tabla 42 se presenta la edad óptima de las especies empleadas como sombrío en dos localidades, para dar inicio a su regulación o podas de mantenimiento, con el fin de regular los porcentajes de sombrío entre el 35% y 45%.

Tabla 42.

Edad óptima de las especies forestales para dar inicio a su regulación o podas de mantenimiento en la Estación Experimental Paraguaicito-Quindío y finca La Suecia-Cauca.

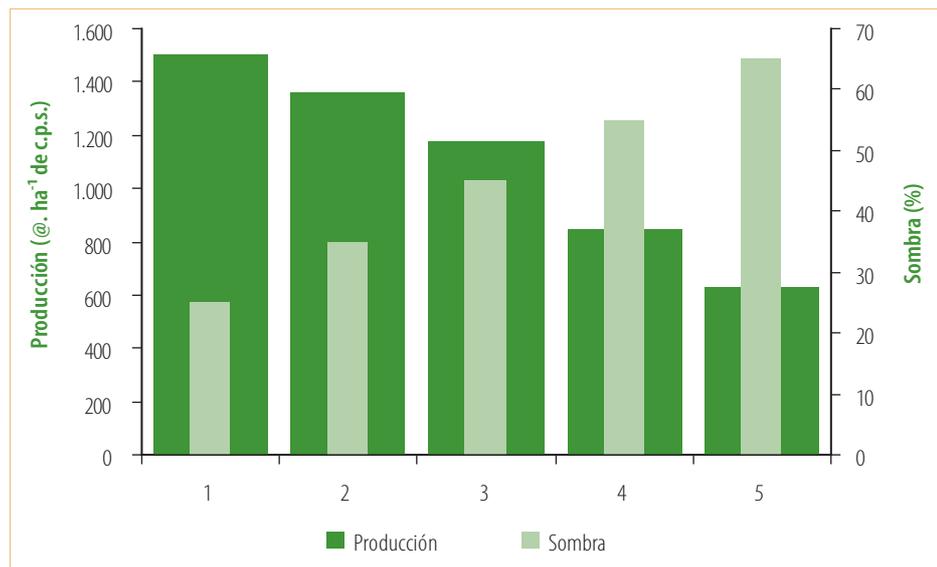
Paraguaicito-Quindío		La Suecia-Cauca	
Árboles de sombrío	Edad de los árboles (años)	Árboles de sombrío	Edad de los árboles (años)
<i>Cordia alliodora</i>	3,5 - 4,0	<i>Eucalyptus grandis</i>	< 1,0
<i>Pinus oocarpa</i>	4,5 - 5,0	<i>Pinus chiapensis</i>	3,5 4,0
<i>Eucalyptus grandis</i>	< 1,0	<i>Pinus tecunumanii</i>	3,5 - 4,0
		<i>Inga densiflora</i>	2,0 - 2,5

### 3.4.5 Regular el sombrío para evitar drásticas reducciones en la producción

#### 3.4.5.1 Incremento de la producción de café por regulación del sombrío o reducción en el porcentaje de sombrío

De acuerdo con Farfán y Jaramillo (2009), el porcentaje de sombrío máximo que debe tener un cafetal en producción, y para que ésta no se vea muy afectada, no debe exceder el 45% (Sierra Nevada de Santa Marta), con un número de horas de brillo solar anual de 2.300 horas. En la cordillera Occidental – vertiente oriental el brillo solar varía entre 1.002 y 2.026 horas, para porcentajes de sombrío que varían entre 19,6% y 39,6%, respectivamente. En la cordillera Central - vertiente occidental, la variación del brillo solar está entre 2.199 horas (43,0% de sombrío) y 1.369 horas (26,8% de sombrío). Para la cordillera Central – vertiente oriental el sombrío estimado varía entre 23,2% y 36,2% de sombrío para valores de 1.187 horas y 1.852 horas, respectivamente. En la cordillera Oriental – vertiente occidental, el brillo solar está entre 1.153 y 2.203 horas para porcentajes de sombrío entre 22,6% y 43,1%.

Desde este punto de vista, cuando se presentan porcentajes de sombra por encima del óptimo o adecuado (>50,0%) y si se realizan podas regulares para la reducción del porcentaje de sombra, simultáneamente se presenta una respuesta en producción del café, estimulada por la disponibilidad de luz. Cuando los niveles de sombrío se llevan hasta los óptimos o adecuados se incrementa sustancialmente la producción de café (Figura 63).



**Figura 63.**

Respuesta en producción del café, a la disponibilidad gradual de luz.

- Un lote de café en producción, con una densidad de siembra aproximada de 4.500 plantas/ha y bajo sombrío regulado de *Inga edulis* (guamo santafereño), establecido a 12,0 m x 12,0 m, a los 3 ó 4 años de sembrado, puede dar al café porcentajes de sombra del 25,0%. Bajo

estas condiciones las producciones pueden ser de 1.500 kg de café pergamino seco por hectárea.

- Si por falta de manejo del sombrío (podas de mantenimiento) se permite un incremento en el porcentaje de sombra del 10,0% (35% acumulado), la producción puede verse reducida en 9,4% (1.359 kg de café pergamino seco por hectárea), y así sucesivamente.
- Finalmente, si los niveles en el porcentaje de sombra superan el 50,0% (sombrío homogéneo o excesivo), la producción puede verse reducida en 58,3%; equivalente a producciones máximas de 626 kg de café pergamino seco por hectárea.

***En regiones cafeteras colombianas, donde por condiciones determinadas por el clima y suelo, el cultivo debe hacerse bajo estricta sombra, por cada 10% de incremento en el nivel de sombra a partir de su nivel óptimo, la producción puede verse reducida entre 15% y 18%***

### ***3.4.6 Determinar y establecer el porcentaje de sombrío adecuado para el café, según la localidad***

#### ***3.4.6.1 Cobertura arbórea según la nubosidad de la región***

La zona cafetera colombiana se caracteriza por presentar una alta nubosidad durante el día, que puede ser estimada a partir de los registros del brillo solar y por la ocurrencia de diversas condiciones en su disponibilidad de agua en el suelo, cuantificada mediante los balances hídricos regionales (Jaramillo, 2005). Estas dos condiciones, determinantes de la producción de café, se deben tener en cuenta para la orientación de las prácticas de cultivo, entre ellas el sombrío. La calidad y la cantidad de radiación solar afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, el funcionamiento de los estomas y las respuestas fisiológicas (Lee *et al.*, 2007); en el café la disponibilidad de radiación solar afecta de forma muy significativa la producción, especialmente si el sistema de producción se hace bajo árboles de sombrío. Las observaciones sobre la cantidad de sombra necesaria para el café en sistemas agroforestales y la variabilidad expresada en su heterogeneidad espacial y temporal es muy escasa, además los resultados de los estudios se han limitado a algunas localidades de las zonas cafeteras de Colombia.

Tradicionalmente se ha pensado que el comportamiento de los árboles de café es igual bajo cualquier nivel de sombra, lo que equivaldría a decir que el café produce lo mismo bajo cualquier cantidad de luz disponible, independiente de las condiciones climáticas de la región, concepto que hay que replantear, ya que las plantas requieren diferentes proporciones de sombrío dependiendo de la ubicación geográfica (latitud, longitud, altitud), de la disponibilidad de radiación solar y de agua en el suelo que presente la zona. La FNC (1958) planteó que la luz del sol puede ser disminuida en un determinado punto terrestre por cuatro causas principales: Por las elevaciones de las colinas y montañas, por la proyección de las hojas y las ramas de la

misma planta y las vecinas, por el follaje de los árboles de sombra y por las condiciones climáticas (nubosidad y su frecuencia).

Se considera como un límite de deficiencia hídrica para el café una cantidad de 150 mm acumulados en 3 meses continuos, asociada a unos altos niveles de radiación solar, condiciones bajo las cuales se recomienda establecer los cafetales con árboles de sombrío (Camargo y Pereira, 1994). Se ha establecido que el nivel de sombrío óptimo fluctúa entre el 35% y 45% (Farfán y Mestre, 2004a; 2004b), dependiendo de la localidad, cuando se emplea una sola especie de árbol y con regulación permanente de la sombra.

Algunas normas de producción de café bajo sombrío como Rainforest Alliance (2008), *Smithsonian Migratory Bird Center* (2004), establecen como porcentaje de sombrío mínimo para el café un 40% y dadas las características variables de las condiciones fisiográficas y climáticas de la región cafetera de Colombia, es difícil generalizar y establecer un único patrón de sombra para el café, por lo cual es necesario plantear ajustes en el grado de sombra de acuerdo a la especie de árbol de sombrío, la densidad de siembra y a las condiciones de sombrío natural (cobertura por nubosidad) presente en la región.

Por tanto, es requisito básico en los sistemas de cultivo de café con sombrío determinar el denominado “porcentaje de sombrío óptimo” o “grado de sombrío adecuado”; este porcentaje de sombra depende básicamente de la localidad, de la radiación solar anual y de las necesidades del cultivo, pues éste será el reflejo de las reducciones o incrementos de la producción al establecer el café con el asocio de árboles.

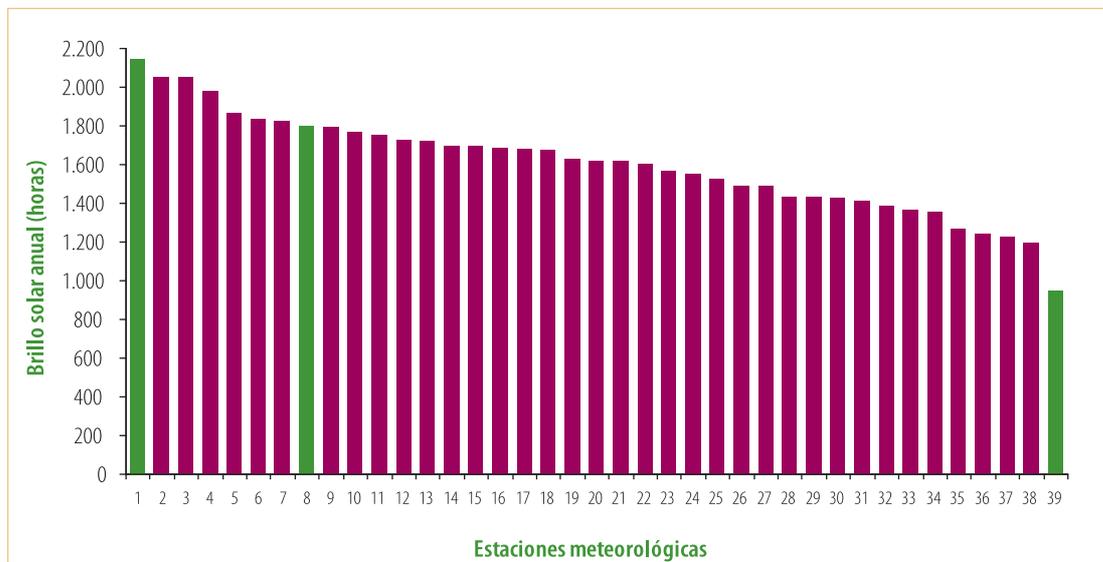
#### 3.4.6.2 Brillo solar y nubosidad de la zona cafetera

En general, el transcurso anual del brillo solar en la zona cafetera colombiana, sigue una onda opuesta a la distribución de las lluvias. La nubosidad está determinada por la presencia de la Zona de Confluencia Intertropical y por los movimientos locales de las masas de aire que se originan dentro de las montañas, denominadas circulaciones valle - montaña - valle. En Colombia, para los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena la distribución del brillo solar presenta sus valores máximos en los meses de menor lluvia, como son enero-febrero y julio-agosto. En las regiones de los Llanos Orientales y la Costa Atlántica la distribución tiende a presentar el valor máximo en diciembre-enero y los valores mínimos en junio-julio. Los mayores valores de brillo solar se registran en la península de La Guajira, con cantidades anuales próximas a las 3.000 horas, y los valores más bajos se observan en el litoral Pacífico con 900 horas al año (Bernal, 1987; Chávez y Jaramillo, 1997).

La mayoría de las localidades de la zona Andina presentan cantidades entre 1.600 y 1.800 horas de brillo solar al año. El promedio del brillo solar anual para la región está próximo a las 1.550

h.año<sup>-1</sup> que representa un 36% del brillo solar máximo astronómico, lo que indica una alta presencia de nubosidad y, en consecuencia, altas proporciones de radiación difusa; se observan valores extremos superiores a las 2.050 horas al año (47% del brillo solar máximo). El menor valor registrado está próximo a 1.050 horas al año (24% del brillo solar astronómicamente posible) (Figura 64).

Para cada vertiente de una cuenca hidrográfica, el brillo solar varía con la altitud por las diferencias en la nubosidad diurna; dependiendo de las condiciones de nubosidad las proporciones de la radiación solar incidente (radiación solar observada/radiación solar astronómica) en la superficie terrestre varían en cada localidad. Para Colombia estas proporciones están entre un valor mínimo del 20% en Bahía Solano-Chocó, y un 68% en Uribia–La Guajira (Jaramillo, 2005).



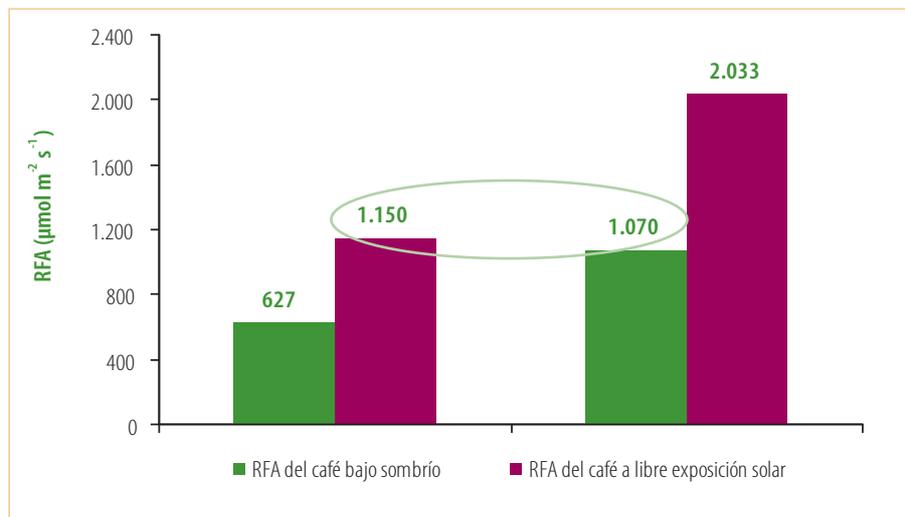
**Figura 64.**

Brillo solar anual (horas), en diferentes localidades de la zona cafetera colombiana. (1) Estación Experimental Pueblo Bello; (8) Estación Central Naranjal; (39) Estación Luis Bustamante (Fuente: Jaramillo, 2005).

En cultivos de café establecidos a 1,5 m x 1,5 m y bajo sombrío de *Inga edulis* a 12,0 m x 12,0 m, en las Estaciones Experimentales Naranjal (Caldas) y Pueblo Bello (Cesar), se evaluó la interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) por parte del cultivo bajo cobertura arbórea y a libre exposición solar en Naranjal y bajo cobertura arbórea y a campo abierto (sin árboles y sin café) en Pueblo Bello. La RFA dentro del cultivo del café bajo sombrío en la Estación Experimental Pueblo Bello ( $1.070 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) fue similar a la RFA registrada en el cultivo del café a libre exposición solar en la Estación Central Naranjal ( $1.150 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ). En la Estación Central Naranjal el sombrío está dado por la nubosidad mientras que en la Estación Experimental de Pueblo se acondiciona con árboles (Figura 65).

Figura 65.

Intercepción de RFA dentro y fuera del cultivo del café en dos localidades de la zona cafetera colombiana.



### 3.4.6.3 Cantidad real de radiación

Los registros cuantitativos sobre el nivel de sombra en plantaciones de café son a menudo escasos o difíciles de comparar, debido a que éstos han sido obtenidos utilizando diferentes equipos (ceptómetros, densiómetros, densitómetros, fotografía digital hemisférica, entre otros) o diversas metodologías (diagnóstico visual, tablas de comparación, conteo de árboles sombreados, observación de problemas fitosanitarios, entre otras). Además de modificar la disponibilidad de luz, los doseles arbóreos también tienen un efecto negativo en la calidad de la luz.

Los efectos de los cambios en la disponibilidad de la luz dependen de los requerimientos específicos de cada cultivo, y éstos varían de acuerdo a la edad y a las condiciones del sitio. Los índices fotosintéticos son máximos a niveles intermedios de sombra en muchas condiciones climáticas tropicales. Mientras que para café con sombra los niveles de saturación de luz son menores a  $300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , el nivel para plantas sin sombra fue de  $600 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . La reducción de la tasa fotosintética a mayores niveles de radiación se explica como una respuesta a la temperatura de las hojas sobre los  $25^{\circ}\text{C}$ , una condición a la cual el café es muy sensible.

Estas mediciones se realizaron en plantas individuales o aisladas, lo que no representa las condiciones que afectan a la mayoría del follaje del café en una plantación con alta densidad sin sombra y donde el autosombrío no es considerado (Muschler, 2000). Soto-Pinto *et al.* (2000), indican que porcentajes de sombra entre el 23% y 38% tienen un efecto positivo sobre la producción de café, porcentajes de cobertura entre el 38% y 48% no tienen efecto en la producción y porcentajes de sombra por encima del 50% son perjudiciales para la producción del cultivo. Muschler (2000), sostiene que el límite máximo de sombra aceptable para café (una planta C3) está entre el 40% y 70% y que las limitaciones de nutrientes o humedad incrementan el grado de sombra necesaria.

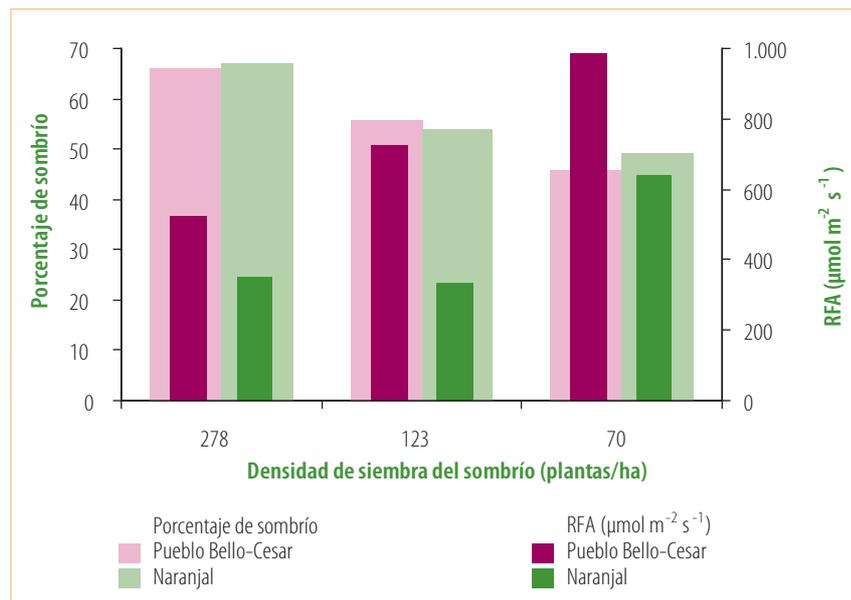
Cuando la radiación se expresa como un porcentaje de la radiación incidente en la parte externa del cultivo, se debe asociar con la cantidad real de radiación medida que ingresa al agrosistema. No es lo mismo una sombra del 10% (de la radiación que llega a un ecosistema) en un hábitat semiseco, que en uno frecuentemente nublado (Varlet-grancher *et al.*, 1993; Valladares y Percy, 1999).

En la Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (10° 25' N y a 1.000 m de altitud), y en la Estación Central Naranjal-Caldas (4° 58' N y a 1.381 m de altitud), se registró la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) en un cultivo del café con sombrío de *Inga edulis* (guamo santafereño) establecido a tres distancias de siembra: 6,0 m x 6,0 m, 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m. El sombrío y el café fueron establecidos en el mismo año en las dos localidades; los cuales dieron porcentajes de sombra promedio de 66,5%, 54,8% y 47,5%, para las densidades de siembra de los árboles de 273, 123 y 70 plantas/ha, respectivamente (Figura 66). El porcentaje de cobertura se calculó con densiómetro óptico y la RFA con el Ceptómetro SunScan Canopy Analysis System.

En la Estación Experimental Pueblo Bello, la RFA registrada dentro del cultivo del café con el 66,5% de sombra fue de 522,2  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , con el 54,8% de 724,4  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y con el 47,5% de sombrío 988,1  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . En la Estación Central Naranjal y con los mismos porcentajes de sombra (66,5%; 54,8% y 47,5%) la RFA registrada dentro del cultivo del café fue de 350,4; 334,0 y 642,3  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente (Figura 66). De los resultados se pudo concluir que con similares porcentajes de cobertura, en la mayor latitud en Colombia (10° 25' Norte), se registraron 32,9%, 55,0% y 35,0% más RFA ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) dentro del cultivo del café al compararse con la RFA registrada en arreglos espaciales similares del cultivo (1,5 m x 1,5 m) y del sombrío (6,0 m x 6,0 m, 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m, respectivamente) a menores latitudes (4° 58' Norte).

**Figura 66.**

Registro de la RFA ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en café con sombrío de *I. edulis* a tres densidades de siembra. Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar y Estación Central Naranjal-Caldas



RFA: Radiación Fotosintéticamente Activa

### 3.4.6.4 Ajustes en la proporción de sombrío según la nubosidad de la región

Bajo condiciones óptimas el café puede establecerse a libre exposición solar, si las propiedades de los sitios para estos sistemas de producción son las presentadas en la Tabla 43 (no se consideran características de suelos). Si se considera que el sombrío para un cafetal sin que disminuya su producción debe tener una cobertura máxima del 45%<sup>9</sup> y que los componentes del sombrío se deben a la suma de un sombrío natural, debido a la nubosidad de la región y a un sombrío de los árboles, en la Tabla 44 se presentan para la zona cafetera de Colombia los porcentajes de sombra (si se debe o quiere establecer sombrío al café) ajustados para cada localidad, de acuerdo a su ubicación geográfica, altitud y brillo solar anual (horas).

**Tabla 43.**

Condiciones óptimas para el establecimiento del café a libre exposición solar (Fuente: Jaramillo, 2000).

Franja altitudinal	1.000 a 2.000 m
Zona óptima	1.200 a 1.800 m
Radiación solar	382 cal.cm <sup>-2</sup> .día <sup>-2</sup> (3,5 kWh.m <sup>-2</sup> )
Brillo solar anual	1.500 a 1.800 horas (4,5 h.día <sup>-1</sup> )
Temperatura	19,0 a 21,5 °C
Lluvia anual	1.800 a 2.000 mm (120 mm al mes)

**Tabla 44.**

Porcentajes de sombrío para cada localidad, de acuerdo al número de horas de brillo solar al año (Fuente: Farfán y Jaramillo, 2009).

Localidad	Municipio	Departamento	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m)	Brillo solar (h)	Sombrío (%)
<b>Sierra Nevada de Santa Marta</b>							
Pueblo Bello	Pueblo Bello	Cesar	10° 25'	73° 34'	1.134	2.147	43,9
<b>Cordillera Occidental vertiente occidental</b>							
J. Fernández	Restrepo	Valle	03° 49'	76° 32'	1.381	1.866	38,2
Albán	El Cairo	Valle	04° 47'	76° 11'	1510	1.547	31,7
<b>Cordillera Occidental vertiente oriental</b>							
La Colonia ITA*	Andes	Antioquia	05° 47'	75° 53'	1.320	1.830	37,4
Tulio Ospina	Bello	Antioquia	06° 19'	75° 35'	1.438	1.964	40,2
Hda. Piunti*	Buriticá	Antioquia	06° 44'	75° 55'	1.540	1.430	29,3
Cañas Gordas*	Cañas Gordas	Antioquia	06° 44'	76° 02'	1.200	1.933	39,6

Continúa...

<sup>9</sup> El máximo sombrío para un cafetal (45%) se establecería para una región con un brillo solar de 2.300 horas al año (Farfán y Jaramillo, 2009).

...Continuación

Piamonte	Fredonia	Antioquia	05° 54'	75° 38'	1.330	1.947	39,8
Ituango*	Ituango	Antioquia	07° 12'	75° 44'	1.575	1.738	35,6
M. Valencia	Jardín	Antioquia	05° 36'	75° 51'	1.621	1.727	35,3
O. Herrera*	Medellín	Antioquia	06° 13'	75° 36'	1.490	1.937	39,6
Guayabito*	Sto. Domingo	Antioquia	06° 33'	75° 08'	1.700	1.973	40,4
Ins. Fundadores*	Riosucio	Caldas	05° 26'	75° 43'	1.820	1.760	36,0
R. Escobar	Supía	Caldas	05° 27'	75° 38'	1.307	1.752	35,9
Bolívar	Bolívar	Cauca	01° 53'	76° 58'	1.510	1.782	36,5
La Salvajina*	Buenos Aires	Cauca	02° 58'	76° 42'	1.100	1.751	35,8
Venta Cajibío*	Cajibío	Cauca	02° 31'	76° 35'	1.800	1.548	31,7
Munchique*	El Tambo	Cauca	02° 31'	76° 58'	1.510	1.350	27,6
La Sierra*	La Sierra	Cauca	02° 10'	76° 46'	1.870	1.462	29,9
Mercaderes*	Mercaderes	Cauca	01° 46'	77° 10'	1.174	2.026	41,5
A. Machangara*	Popayán	Cauca	02° 26'	76° 35'	1.730	1.739	35,6
La Florida	Popayán	Cauca	04° 46'	74° 26'	1.850	1.675	34,3
Tacueyo*	Toribío	Cauca	03° 02'	76° 14'	1.790	1.327	27,2
A. Nariño*	Pasto	Nariño	01° 25'	77° 59'	1.796	2.002	41,0
Ricaurte*	Ricaurte	Nariño	01° 12'	77° 59'	1.181	1.002	20,5
Argelia	Argelia	Valle	04° 42'	76° 11'	1.600	1.579	32,3
M. Mallarino	Trujillo	Valle	04° 13'	76° 19'	1.331	1.599	32,7
A. Palmaseca*	Palmira	Valle	03° 33'	76° 23'	1.320	1.974	40,4
<b>Cordillera Central vertiente occidental</b>							
El Rosario	Venecia	Antioquia	05° 58'	75° 42'	1.495	2.051	42,0
Cenicafé	Chinchiná	Caldas	05° 00'	75° 36'	1.310	1.829	37,4
Naranjal	Chinchiná	Caldas	04° 58'	75° 39'	1.381	1.797	36,8
Agronomía	Manizales	Caldas	05° 03'	75° 30'	2.088	1.435	29,4
La Florida*	Pácora	Caldas	05° 33'	75° 29'	1.851	1.769	36,2
Santágueda	Palestina	Caldas	05° 04'	75° 40'	1.026	1.979	40,5
M. Mejía	El Tambo	Cauca	02° 24'	76° 44'	1.735	1.675	34,3
Ingenio Cauca*	Miranda	Cauca	03° 17'	76° 19'	1.000	1.755	35,9
Miranda*	Miranda	Cauca	03° 15'	76° 14'	1.200	1.570	32,1
O. Pérez	Consacá	Nariño	01° 15'	77° 29'	1.603	1.694	34,7
El Sauce	La Unión	Nariño	01° 37'	77° 07'	1.609	1.490	30,5
Paraguaicito	Buenavista	Quindío	04° 24'	75° 44'	1.203	1.720	35,2
Maracay	Quimbaya	Quindío	04° 36'	75° 44'	1.402	1.619	33,1
El Sena	Armenia	Quindío	04° 34'	75° 38'	1.589	1.396	28,6
La Bella	Calarcá	Quindío	04° 30'	75° 40'	1.449	1.415	29,0
La Bohemia*	Pereira	Risaralda	04° 52'	75° 54'	1.020	2.199	45,0

Continúa...

... Continuación

La Catalina	Pereira	Risaralda	04° 45'	75° 44'	1.321	1.665	34,1
El Jazmín	Santa R. de Cabal	Risaralda	04° 55'	75° 37'	1.625	1.440	29,5
La Camelia*	Santuario	Risaralda	05° 05'	75° 58'	1.670	1.723	35,3
A. Gómez	Alcalá	Valle	04° 40'	75° 47'	1.259	1.691	34,6
Cumbarco*	Sevilla	Valle	04° 10'	75° 47'	1.740	1.412	28,9
H. Uribe	Sevilla	Valle	04° 17'	75° 54'	1.608	1.369	28,0
<b>Cordillera Central vertiente oriental</b>							
Anorí*	Anorí	Antioquia	07° 04'	75° 09'	1.610	1.648	33,7
Llanadas	Manzanares	Caldas	05° 12'	75° 08'	1.463	1.524	31,2
Santa Helena	Marquetalia	Caldas	05° 19'	75° 00'	1.395	1.623	33,2
J. Villamil	Gigante	Huila	02° 20'	75° 31'	1.500	1.187	24,3
E. A. La Plata*	La Plata	Huila	02° 25'	75° 55'	1.070	1.497	30,6
Cajamarca*	Cajamarca	Tolima	04° 26'	75° 26'	1.920	1.706	34,9
El Limón	Chaparral	Tolima	03° 40'	75° 35'	888	1.556	31,8
La Montaña	Dolores	Tolima	03° 33'	74° 54'	1.260	1.852	37,9
Líbano	Líbano	Tolima	04° 55'	75° 03'	1.514	1.796	36,8
La Trinidad	Líbano	Tolima	04° 54'	75° 02'	1.456	1.570	32,1
Chapetón	Ibagué	Tolima	04° 28'	75° 16'	1.353	1.832	37,5
<b>Cordillera Oriental vertiente occidental</b>							
Bertha	Moniquirá	Boyacá	05° 53'	73° 34'	1.677	1.626	33,3
La Laguna*	Robles La Paz	Cesar	10° 16'	73° 04'	1.500	1.945	39,8
La Florida*	Anolaima	C/marca	04° 46'	74° 26'	1.915	1.135	23,2
M. Santa Inés	Cachipay	C/marca	04° 43'	74° 27'	1.340	1.389	28,4
Misiones	M. del Colegio	C/marca	04° 33'	74° 26'	1.540	1.191	24,4
E. Vocacional*	Pacho	C/marca	05° 10'	74° 11'	1.940	1.724	35,3
Tibacuy	Tibacuy	C/marca	04° 22'	74° 26'	1.538	1.485	30,4
Montelíbano	Yacopí	C/marca	05° 27'	74° 20'	1.365	1.687	34,5
P. Vegalarga*	Neiva	Huila	02° 56'	75° 02'	1.100	1.501	30,7
Zuluaga*	Garzón	Huila	02° 16'	75° 32'	1.623	1.177	24,1
J. Villamil	Gigante	Huila	02° 20'	75° 31'	1.420	1.153	23,6
C. A. Abrego*	Abrego	N. de S.	08° 05'	73° 14'	1.430	2.203	45,1
E. Agr Cachira*	Cachira	N. de S.	07° 44'	73° 03'	1.882	1.836	37,6
U.I.S.*	Bucaramanga	Santander	07° 08'	73° 06'	1.018	1.581	32,4
San Antonio	Floridablanca	Santander	07° 06'	73° 04'	1.480	1.575	32,2
A. Palonegro*	Lebrija	Santander	07° 06'	73° 12'	1.189	2.069	42,3
E. A. Mogotes*	Mogotes	Santander	06° 29'	72° 58'	1.667	2.142	43,8
Alberto Santos	Socorro	Santander	06° 29'	72° 58'	1.667	2.142	43,8

Continúa...

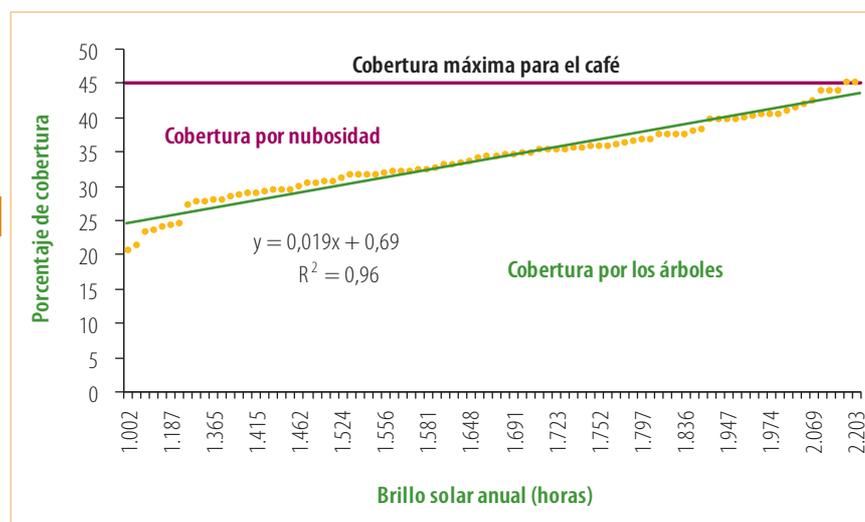
... Continuación

Aguas Blancas	San Vicente	Santander	06° 50'	73° 29'	964	1.423	29,1
Cachirí*	Suratá	Santander	07° 29'	73° 00'	1.850	1.537	31,5
Vivero Suratá*	Suratá	Santander	07° 21'	73° 00'	1.725	1.956	40,0
L. Bustamante	Villarrica	Tolima	03° 54'	74° 34'	1.616	1.048	21,4
<b>Cordillera Oriental vertiente oriental</b>							
Gacheta	Gacheta	C/marca	04° 49'	73° 37'	1.850	1.545	31,6
Blonay	Chinácota	N. de S.	07° 34'	72° 37'	1.235	1.365	27,9
Fco. Romero	Salazar	N. de S.	07° 44'	72° 47'	903	1.351	27,6

\*Bernal (1987)

En términos generales, puede decirse que existe una relación directa entre el porcentaje de sombrío o cobertura del café y el número de horas de brillo solar anual; en la Figura 67, se presenta un resumen de las proporciones de sombrío a utilizar en los cafetales de la zona cafetera de Colombia, de acuerdo con las cantidades de brillo solar disponibles en la región.

**Figura 67.**  
Proporción de sombrío a utilizar en los cafetales de la zona cafetera de Colombia, de acuerdo con las cantidades de brillo solar disponibles en la región (Fuente: Farfán y Jaramillo, 2009).



### 3.4.7.1 Efectos del exceso de sombra sobre la planta de café

Existe gran controversia acerca de los efectos presumiblemente positivos de los árboles sobre la producción y desarrollo del café. Se encuentran muchos ejemplos de resultados experimentales los que indican que presentan incrementos, reducciones o ninguna variación en el rendimiento y producción de las plantaciones de café, en función del grado de sombra, arborización o sombrío (Beer *et al.*, 1998). Sin embargo, bajo condiciones ambientales óptimas y utilización intensiva de insumos, plantaciones a pleno sol frecuentemente presentan mayor rendimiento y productividad cuando son comparadas con plantaciones bajo sombra. Tres factores pueden ser considerados,

al menos teóricamente, para explicar que la producción se reduzca en la medida en que se incrementa el número de árboles o el sombrío en las plantaciones de café: a) Menor asimilación de carbono por la planta entera bajo condiciones de sombra excesiva; b) Mayor estímulo de la emisión de yemas vegetativas y reducción de la formación de yemas florales; y c) Reducción del número de nudos producidos en las ramas (Damatta y Rodríguez, 2007). Valencia (1999) indica que el café que crece bajo árboles de sombrío excesivo posee las siguientes características dadas en la Figura 68.

Los árboles de sombra reducen el estrés en el café al moderar las condiciones climáticas adversas y los desbalances nutricionales, pero también pueden competir por los recursos necesarios para el crecimiento y producción del cultivo; por ejemplo, los árboles de sombra amortiguan hasta en 5°C las temperaturas altas o bajas extremas y pueden producir hasta 14 Mg.ha-año<sup>-1</sup> de hojarasca y residuos de la poda, conteniendo hasta 340 kg.ha<sup>-1</sup> de N al año. La importancia relativa y el efecto de las diferentes interacciones entre los árboles de sombra y el café dependen de las condiciones del sitio (suelo y clima), la selección del genotipo, las características bajo y sobre el suelo de los árboles y las prácticas de manejo (Beer *et al.*, 1998).

Algunas de las investigaciones realizadas en las Estaciones Experimentales de Cenicafé y en fincas de caficultores, con el propósito de estudiar los efectos de la plantación de árboles como sombrío del café y sus efectos en la producción se presentan a continuación.



**Figura 68.**

Características de un árbol de café que crece bajo exceso de sombra (Fuente: Valencia, 1999).

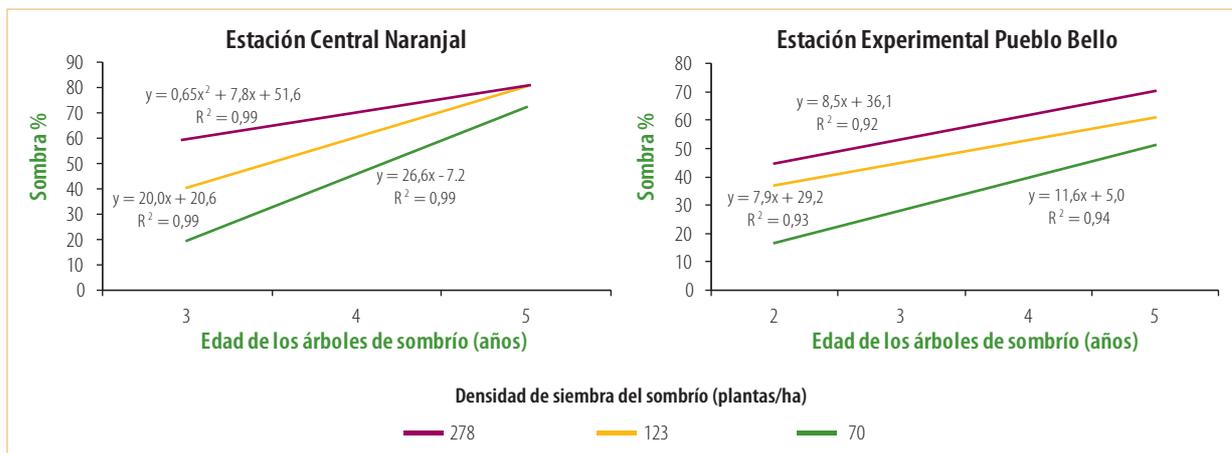
### 3.4.7.2 Efecto del exceso de sombra sobre la producción de café

Una razón para el mantenimiento de árboles de sombra en plantaciones con cultivos perennes es el ingreso generado por sus frutos o madera; estos productos pueden complementar el ingreso

de los agricultores cuando los precios del café son bajos. Es creciente la concientización sobre los costos ambientales asociados con los monocultivos de altos insumos; también existe un interés renovado por el uso de árboles de sombra en las áreas donde habían sido eliminados previamente. Los efectos de mantener árboles de sombra en cultivos como el café, ya fueron descritos y entre éstos se destaca: El mejoramiento de las condiciones microclimáticas del sitio a través de la regulación de las temperaturas extremas del aire y del suelo, reducción de la velocidad del viento, amortiguamiento de la disponibilidad de humedad del aire y el suelo, mejoramiento y mantenimiento de la fertilidad del suelo, reducción de la cantidad y calidad de la luz transmitida, reducción de la sobreproducción y crecimiento vegetativo excesivo, entre otros (Beer et al., 1998).

En la Estación Experimental Pueblo Bello y en la Estación Central Naranjal, Farfán y Mestre (2004a; 2004b), evaluaron el efecto de *I. edulis* (guamo santafereño), establecido a tres densidades de siembra (70, 123 y 278 árboles/ha), sobre la producción de café, establecido a 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha).

**Interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA).** En la Estación Central Naranjal, los promedios del porcentaje de interceptación de RFA registrados en cada una de las distancias de siembra del sombrío, durante 3 años, mostraron que a 6,0 m x 6,0 m la interceptación fue del 70%, a 9,0 m x 9,0 m del 60% y a 12,0 m x 12,0 m del 45% (Figura 69a). Los niveles de sombra a partir del tercer año de establecido el sombrío, empiezan a ser excesivos para las condiciones de la localidad. En la Estación Experimental Pueblo Bello, los registros de interceptación de la RFA indican que el nivel de sombra se incrementa al aumentar la edad del componente arbóreo. El promedio del nivel de sombra (1998 a 2001) en que se desarrolló el cultivo del café fue del 58% con 278 árboles de Inga por hectárea, del 50% con 123 árboles/ha y del 34% con 70 árboles/ha (Figura 69b).



**Figura 69.**

Interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) en la Estación Central Naranjal y la Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar (Fuente: Farfán y Mestre, 2004a; 2004b).

- Estación Experimental Pueblo Bello.** En esta localidad, los mismos autores obtuvieron que en sistemas agroforestales con café, la máxima producción (1.618 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco) se alcanzó con un nivel de sombra del 35% (sombrió de *I. edulis* establecido a 12,0 m x 12,0 m) (Figura 70).

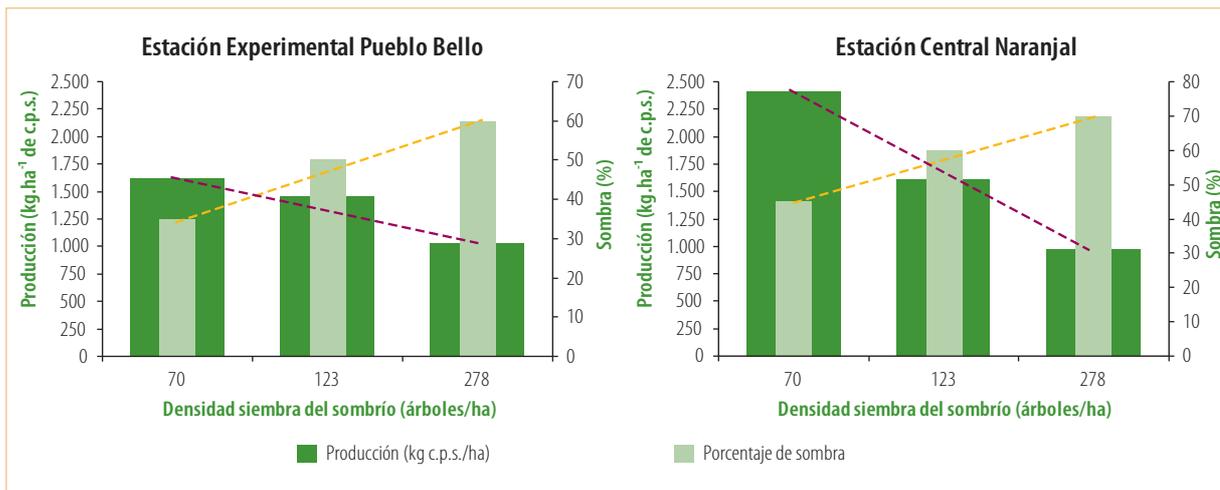


Figura 70.

Relación entre el incremento en el grado de sombrío y la producción del café en la Estación Experimental Pueblo Bello y la Estación Central Naranjal (Fuente: Farfán y Mestre, 2004a; 2004b).

Tomando como base este porcentaje de sombrío y si se deja incrementar en un 15% la sombra, la producción del café se reduce en un 10%. Si a partir de este grado de sombrío (50%) se deja incrementar la sombra en otro 10%, la producción del café se reduce en un 26% adicional. En su conjunto si se permite un incremento en el nivel del sombrío del 25% la producción del café se ve afectada negativamente en un 36% (Figura 70a).

- Estación Central Naranjal.** En esta localidad la máxima producción, 2.419 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco, se presentó cuando el nivel de sombra fue del 45% (sombrió establecido a 12,0 m x 12,0 m). Si se parte de este porcentaje de sombrío y se deja incrementar en un 15%, la producción del café se reduce en un 33,6%. Si a partir de este grado de sombrío (60%) se deja incrementar la sombra en otro 10%, la producción del café se reduce en un 26,9% adicional. En su conjunto, si se permite un incremento en el nivel del sombrío del 25% la producción del café se ve afectada negativamente en un 60,5% (Figura 70b).

En la Estación Central Naranjal, dadas sus condiciones de clima y suelo, se practica la caficultura a libre exposición solar. Duque (2002) indica que la respuesta en producción del café variedad Colombia a libre exposición solar (@.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco), en función de la densidad de siembra por hectárea puede describirse mediante la ecuación de tipo cuadrático (Ecuación <5>).

$$y = 130,73 + 0,052647x - 0,000002359 x^2 \quad <5>$$

De acuerdo con esta función, 4.500 plantas/ha a libre exposición solar tendrían el potencial para producir 300 arrobas<sup>10</sup> por hectárea de c.p.s. (3.750 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s). Al compararse esta producción con el promedio obtenido al establecer el café con el sombrío de *I. Edulis* con 70 árboles/ha, se estimó que el solo establecimiento de los árboles como sombrío reduce la producción en un 35,5%. Al compararse con el promedio de la producción obtenida con el sombrío con 123 árboles/ha, esta producción se ve reducida en un 57,0%.

Se presentaron relaciones lineales inversas entre la densidad de siembra del sombrío y la producción de café, con un valor de  $r = -0,92$  tanto para la Estación Central Naranjal como para la Estación Experimental Pueblo Bello, lo que indica que si se disminuye el nivel de sombra aumenta la producción y viceversa. El sombrío se debe regular permanentemente mediante podas de formación y mantenimiento, que permitan menor interceptación de radiación y aumentar la producción. Dado el número de horas de brillo solar anual para la Estación Experimental de Pueblo (2.300 horas), el café se debe cultivar con un porcentaje de sombra máximo del 45%, y para la Estación Central Naranjal con 1.797 horas, el café debe establecerse a libre exposición solar; de ahí que las pérdidas en producción por efecto del incremento en la sombra más el sombrío proporcionado por la nubosidad, sean mayores en la zona central cafetera que en que en la zona norte del país.

### 3.4.8 Establecer el número adecuado de géneros<sup>11</sup> de árboles por unidad de área

#### 3.4.8.1 Interacción entre la intensidad del sombrío, la distribución de la sombra y la producción del café en sistemas agroforestales

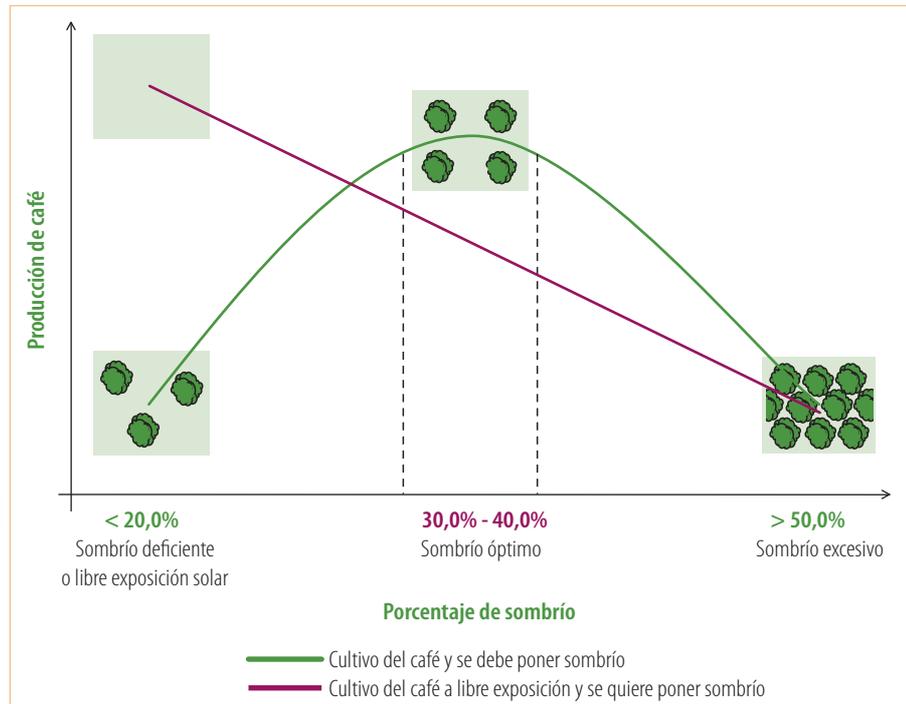
En sistemas de café con sombrío es común observar algunas áreas con muy poca sombra y otras con demasiado sombrío, o que el cultivo en su totalidad presente poco sombrío en su inicio o demasiada sombra en estados avanzados de desarrollo de los árboles. Este hecho está determinado por las dos dimensiones de la sombra: La intensidad del sombrío, relacionada con el grado de sombrío, el nivel de sombra o el porcentaje de cobertura; y la *distribución de la sombra*, la cual depende de la estructura del árbol, de su arquitectura, de la forma y el desarrollo de las copas, la distancias de siembra y del manejo dado a los árboles, entre otros (Beer *et al.*, 1998; Muschler, 2000).

En algunos casos se observa que con bajas densidades de siembra de los árboles o en los primeros años de desarrollo de los mismos o con la selección de una especie inadecuada para el sitio de establecimiento del sombrío del café, o un manejo excesivo de los árboles, o con ataques

<sup>10</sup> Arrobas (@). 1,0 @ de café pergamino seco = 12,5 kg de café pergamino seco

<sup>11</sup> En taxonomía, el género es una categoría taxonómica que se ubica entre la familia y la especie; así, un género es un grupo de organismos que a su vez puede dividirse en varias especies (existen algunos géneros que son monoespecíficos, es decir, contienen una sola especie). Ejemplo, Géneros: *Inga*, *Cordia*, *Erythrina*, *Pinus*, *Albizia*.

de plagas en determinadas épocas del año, pueden obtenerse niveles de sombra deficientes o muy bajos para el desarrollo del cultivo (sombrio del 10% al 20%) en lugares que así lo requieran; igualmente con densidades altas de siembra de los árboles o debido a su mal manejo (sin podas de mantenimiento y sin podas de formación), o una inadecuada distribución de los árboles en el campo, en corto tiempo se presentarán niveles de sombra excesivos (>50%), limitantes para la producción del café (Figura 71).



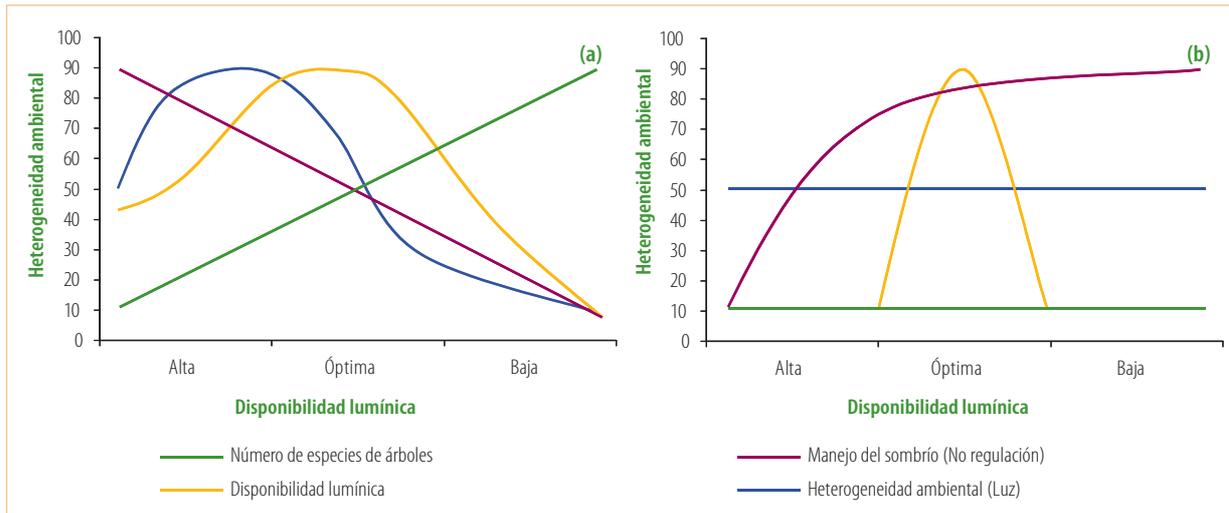
**Figura 71.** Patrón de sombra: Producción hipotética de café bajo diferentes niveles de sombrío.

Por tanto, es requisito básico en los sistemas de cultivo de café con sombrío determinar: (i) El porcentaje de sombrío óptimo o grado de sombrío adecuado, el cual puede fluctuar entre el 0% y 45%, dependiendo de la localidad (altitud, latitud, nubosidad) y de las necesidades del cultivo (discutido en 1.3.3) (Farfán, 2007); (ii) El número de especies a establecer por hectárea; (iii) La densidad de siembra adecuada; y (iv) Su manejo; esto será el reflejo de las reducciones o incrementos de la producción al establecer el café en asocio con árboles.

### 3.4.8.2 Efecto del incremento en el número de géneros de árboles por unidad de área

La supervivencia de las plantas de cultivo al crecer en sistemas agroforestales puede verse comprometida al hacerse más complejas las interacciones suelo-planta-agua-luz, debido

básicamente a la estratificación del sistema (aumento en el número de géneros por unidad de área), abandono en la regulación del sombrero y la disminución de la heterogeneidad ambiental y de la disponibilidad lumínica al cerrarse el dosel (Figura 72).



**Figura 72.**

Variación de la heterogeneidad ambiental o lumínica. **a.** Al incrementarse el número de géneros de árboles y reducción en la regulación de la sombra; **b.** Conservando un solo género como sombrero.

En la Figura 72(a), incrementar el número de géneros de árboles de sombrero hace que los sistemas de producción de café bajo sombra sean más diversos; pero de acuerdo con Valladares *et al.* (2005), el incremento en el número de géneros de árboles (línea verde) contribuye a la disminución en la intervención o mantenimiento de los árboles (regulación del sombrero, línea roja), lo que se traduce en un excesivo sombrero (línea amarilla) por cerramiento del dosel o reducción de los espacios por donde penetra la luz (*Sunflecks*); todo esto da lugar a estructuras más homogéneas o en pérdidas de la heterogeneidad ambiental o reducción en la disponibilidad lumínica al interior del espacio de cultivo (línea azul).

En el segundo caso, Figura 72(b), si sólo se deja un género de árbol (por ejemplo: solo *Inga sp.*) como sombrero del café (línea verde), se incrementan las labores de formación y mantenimiento de los árboles de sombrero (línea roja), pero la disponibilidad lumínica (línea amarilla) se mantiene dentro de los rangos óptimos o adecuados, permitiendo una adecuada y eficiente distribución de la luz o mejor heterogeneidad ambiental, al interior del cultivo (línea azul). Los estudios desarrollados por Percy *et al.* (2005), revelan que al incrementar el número de géneros de árboles por unidad de área, aumenta la diversidad de arquitecturas (forma, altura, diámetro del dosel) pero con una baja eficacia en la interceptación de la luz, debido a la variabilidad en el sombrero.

### 3.4.9 *Ajustar el patrón de sombra o su porcentaje de acuerdo a las variaciones climáticas – Eventos “El Niño” y “La Niña”*

#### 3.4.9.1 *Los sistemas agroforestales y mitigación del cambio climático*

La amenaza del cambio climático global ha causado preocupación, ya que los factores climáticos indispensables para el crecimiento de los cultivos, como son la precipitación y la temperatura, se verán afectados e impactarán sobre la producción agrícola. Estos impactos ya se sienten en algunos países, donde también se espera un aumento en las precipitaciones que producirán daños en los cultivos por erosión de los suelos o, en algunos casos, por inundaciones. En estas zonas se espera una mayor frecuencia y severidad de sequías y calor excesivo, condiciones que pueden limitar significativamente el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Altieri y Nicholls, 2009).

En muchos países, la población rural más pobre vive en áreas expuestas y marginales, y en condiciones que los hacen muy vulnerables a los impactos negativos del cambio climático. Para estas personas, aun los menores cambios en el clima pueden tener un impacto en sus vidas y medios de sustento. Las consecuencias pueden ser grandes para los agricultores de subsistencia ubicados en ambientes frágiles, donde se esperan cambios en su productividad, pues estos agricultores dependen de cultivos que potencialmente serán afectados; por ejemplo, alimentos básicos como maíz, frijol, papas o arroz. Muchos investigadores expresan mayor preocupación por aquellas zonas donde la agricultura de subsistencia es la norma, pues la disminución de tan solo una tonelada de productividad podría llevar a grandes desequilibrios en la vida rural (Altieri y Nicholls, 2009).

Investigaciones recientes (Altieri y Nicholls, 2009) sugieren que muchos agricultores se adaptan e incluso se preparan para el cambio climático, minimizando las pérdidas en productividad mediante adopción de estrategias como:

**Sistemas agrícolas adaptados a las condiciones locales**, que les permiten una producción continua necesaria para subsistir, a pesar de cultivar en ambientes marginales de tierra, con variabilidad climática no predecible y un uso muy bajo de insumos externos.

**Sistemas de cultivos múltiples o policultivos**. Los policultivos exhiben una mayor estabilidad y menor declinación de la productividad durante una sequía que en el caso de monocultivos.

**Biodiversidad**. Parte de este desempeño está relacionado con el alto nivel de agrobiodiversidad que caracteriza a los agroecosistemas tradicionales, lo cual tiene efectos positivos en el funcionamiento del agroecosistema.

**Uso de la diversidad genética local.** Muchos agricultores pobres explotan la diversidad intraespecífica mediante la siembra simultánea y en el mismo campo, de diversas variedades locales que, en general, son más resistentes a la sequía.

**Recolección de plantas silvestres.** En muchos países, el sector campesino todavía obtiene una parte significativa de su subsistencia a través de la recolección de plantas silvestres alrededor de los cultivos.

**Sistemas de agroforestería y mulching.** Muchos agricultores aplican mulch sobre el suelo o siembran plantas de cobertura para reducir los niveles de radiación y calor en las superficies recién plantadas, también lo hacen para conservar la humedad y para absorber la energía cinética de la lluvia y del granizo que cae.

Otros agricultores siembran sus cultivos en arreglos agroforestales, utilizando la cobertura de los árboles para proteger los cultivos contra fluctuaciones extremas en microclima y humedad del suelo. La presencia de árboles en las parcelas agroforestales constituyen una estrategia clave para la mitigación de los efectos impredecibles debidos a las variaciones microclimáticas, especialmente en sistemas de agricultura minifundista.

**El Café Bajo Presión (CUP).** El CUP, por sus siglas en inglés, se refiere a los cultivos alternativos para sustituir o asociar con el cultivo de café en lugares donde éste pierde aptitud y se deben buscar posibles opciones de diversificación. Según las predicciones de cambio climático, la precipitación anual disminuirá y las temperaturas máximas y mínimas mensuales se incrementarán moderadamente; el clima se volverá más estacional en términos de la variación a través del año, con un aumento en la temperatura en las zonas cafeteras de 0,9°C para el 2020 y 2,2°C en el 2050, y será más estacional en precipitación con un número acumulativo de meses secos que se mantiene en 5 meses y una reducción de 72 mm en la precipitación anual (Läderach *et al.*, 2012).

Las implicaciones de estos cambios serán que la distribución de la aptitud dentro de las tierras actualmente productoras de café disminuirá seriamente para el año 2050. Las áreas aptas migrarán hacia arriba en el gradiente altitudinal (trashumancia), por tanto, el cambio de aptitud como consecuencia del cambio climático ocurrirá en sitios específicos. Habrá áreas que se convertirán en no aptas para el café, donde los productores necesitarán identificar cultivos alternativos (calabaza, maíz, frijol, tomate, naranja, plátano, café robusta). Los productores exitosos serán quienes estén preparados para el cambio y sepan cómo adaptarse (Läderach *et al.*, 2012).

En la “trashumancia” de la caficultura planteada por los autores, no se analizan las implicaciones ambientales, económicas y sociales que traería el establecimiento del café en áreas donde por uso del suelo, cultura y tradición, entre otros, no fue común su cultivo. Condiciones que podrían ser mitigadas al cultivar el café con el socio de árboles.

De otro lado, la diferencia anual histórica de brillo solar en épocas de “La Niña” respecto a “El Niño” en la zona cafetera varía entre 71,6 horas por año en el departamento de Santander y 304,7 horas en el Cauca, con porcentajes de reducción anual entre 4,2% y 16,%. En el sur y centro del país es donde se presentan los mayores porcentajes de reducción, superiores al 10%, con valores que oscilan entre 200 y 300 horas, lo que equivale a estar entre 45 y 65 días sin brillo solar (Ramírez *et al.*, 2012). Debido a estas variaciones o reducciones en el brillo solar anual es necesario hacer ajustes a los porcentajes de sombra que debe dejársele al café en cada región específica.

### 3.4.9.2 Ajuste del nivel de sombrío

A continuación se ilustra con un ejemplo la manera cómo debe hacerse este procedimiento. Para la ilustración el brillo solar anual histórico y en épocas de La Niña y El Niño para una Estación Meteorológica ubicada en el departamento de Nariño-Colombia se tomó la estación Luis Bustamante – Municipio de Consacá (Figura 73a); en la Figura 73b se presentan los porcentajes de sombra en épocas normales de brillo solar y los mismos porcentajes ajustados para las épocas de El Niño y La Niña, de acuerdo a la función lineal  $y = 0,019x + 0,69$  ( $R^2 = 0,99$ ).

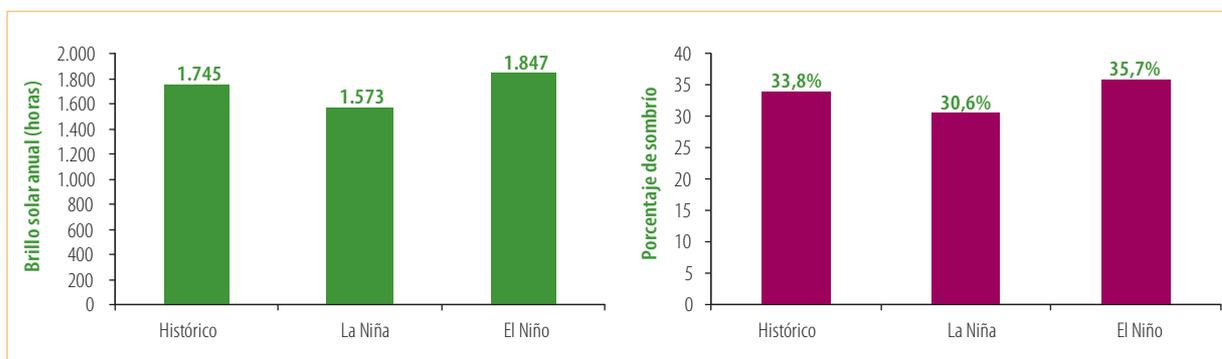


Figura 73.

Ajuste en el porcentaje de sombra en las épocas El Niño y La Niña, en dos localidades del departamento de Nariño-Colombia.

Para las condiciones del sitio seleccionado como ejemplo, en situaciones normales el porcentaje de sombrío máximo debería ser del 33,8%; en condiciones del evento La Niña el porcentaje de sombrío se reduce al 30,6% y en eventos de El Niño este porcentaje se incrementa al 35,7%.

### 3.4.10 Determinar la cobertura arbórea por su porcentaje empleando herramientas prácticas

Varios cultivos perennes tropicales importantes como el café, se cultivan bajo un dosel de sombra; un dosel es el conjunto de hojas y ramas, ubicado a cierta altura sobre el piso de la plantación. El dosel puede estratificarse a voluntad, para representar una gran variedad de sistemas multiestrato (Somarriba, 2002). Para no permitir una reducción drástica en la producción por no regular el

sombrío o mantener los niveles de sombra en un rango óptimo adecuado, es necesario evaluar periódicamente el porcentaje de sombra que recibe el café, para determinar el momento de su intervención. Sin embargo, los caficultores se ven abocados a la problemática de no contar con metodologías rápidas, precisas y económicas para cuantificar el grado de sombrío del café y poder fijar el momento y el grado de intervención de los árboles para mantener el nivel de sombra dentro de los rangos adecuados.

#### **3.4.10.1 Evaluación de la cobertura arbórea o disponibilidad de la luz, mediante la medición directa de la radiación incidente dentro del cultivo del café**

Una de las mayores dificultades para determinar el efecto de la competencia por radiación entre las especies, ya sea en sistemas naturales o agroforestales, es la medida de las fracciones interceptadas por cada uno de los componentes del sistema. La interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) puede estimarse con base en modelos de desarrollo de la fronda, relacionándola con mediciones diarias de interceptación, tasa de crecimiento del cultivo y factores climáticos (Somarriba, 2002).

Los equipos empleados en esta metodología miden directamente la radiación incidente a nivel del dosel de los árboles o encima de las copas del cultivo principal; medición que regularmente se expresa en términos absolutos, por ejemplo:  $W.m^{-2}$ ;  $J.m^{-2}$ ;  $cal.cm^{-2}.min^{-1}$ ;  $langleys.min^{-1}$ ;  $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ ; lux. Normalmente se evalúa la radiación solar global o solamente parte del espectro, por ejemplo, la RFA en el espectro entre los 400 y 700 nm (Somarriba, 2002), en un rango determinado de tiempo, usualmente entre las 11:00 y 13:00 horas. Son diversos los equipos y las metodologías que pueden ser empleadas en la evaluación de la interceptación de la radiación solar por parte de los árboles de sombra, equipos y métodos que pueden ser o muy costosos o muy complejos, entre los que se encuentran: SunScan Canopy Analysis System + Sunshine Sensor type BF2; CID Plant Canopy Image; GRS Densiometer; LAI-2200 Plant Canopy Analyzer; Digital Hemispherical Photography, fotografías que deben ser procesadas e interpretadas mediante programas como WinSCANOPY - Canopy Analysis With Fish-Eye Imaging, y GLA - Gap Light Analyzer, entre otros.

Para estimar el porcentaje de cobertura o sombrío dado al cultivo por parte de los árboles, esta información debe ser transformada a porcentaje de sombrío; el procedimiento establecido para estos propósitos, es el siguiente:

- **Procedimiento metodológico en la evaluación de la interceptación de la RFA y posterior transformación a porcentaje de sombrío**

En la Estación Experimental Paraguaito, Farfán *et al.* (2003) cuantificaron el grado de sombrío que producen especies arbóreas que podrían asociarse al cultivo del café, y relacionar de manera directa la radiación disponible, con el crecimiento, desarrollo, producción y calidad de la cosecha, entre otros. Las evaluaciones se hicieron en *Coffea arabica* L. variedad Colombia, a distancias de

1,5 m x 1,5 m (4.444 plantas/ha), sembrado en 1995, un año después de establecer las especies de sombrío. Como componentes forestales del sistema se emplearon las especies *Cordia alliodora* (nogal cafetero), *Eucalyptus grandis* (eucalipto) y *Pinus oocarpa* (pino), establecidas en 1994 a distancias de 6,0 m x 6,0 m (278 plantas/ha).

Las parcelas de evaluación fueron: Café a libre exposición, café con sombrío de nogal, café con sombrío de pino y café con sombrío de eucalipto. Éstas estuvieron conformadas por 16 árboles de sombrío y 289 plantas efectivas de café; cada parcela ocupó un área de 650 m<sup>2</sup>. Para estandarizar la metodología y medir la sombra en cada parcela, ésta se dividió en 16 unidades de medición (Figura 74); cada unidad de medición la conformó un árbol de sombrío y 25 plantas de café.

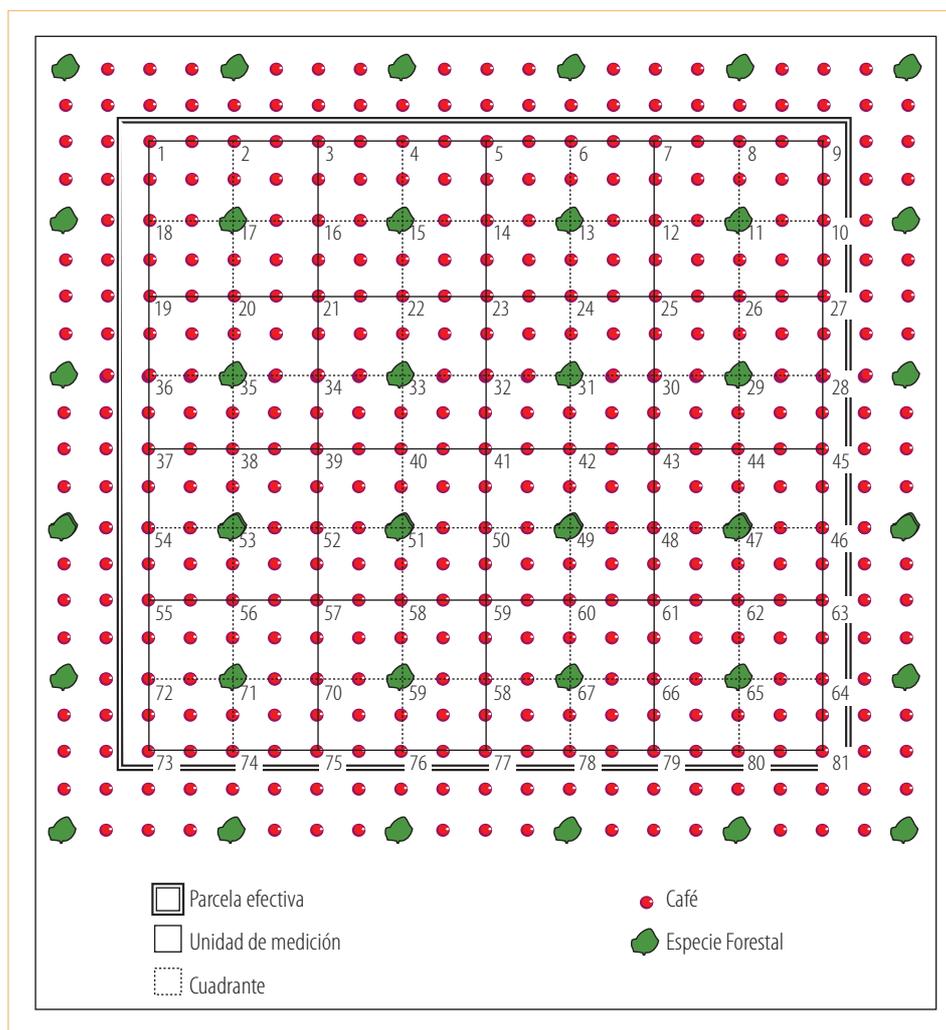


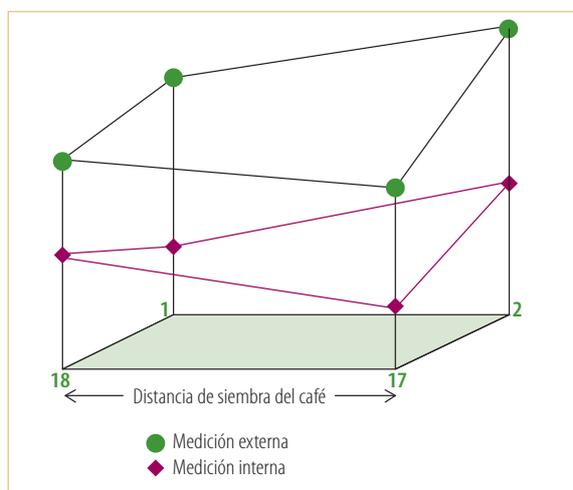
Figura 74.

Disposición de las plantas de sombrío y café en el campo y numeración secuencial para su medición (Fuente: Farfán *et al.*, 2003).

**Medición de la radiación.** Midieron la radiación fotosintéticamente activa (RFA – radiación entre 400 – 700 nm de longitud de onda) incidente en cada una de las parcelas. Para medir la cantidad de RFA incidente libre de interferencias, que es la misma que llega a la parte superior de la fronda de las especies forestales, colocaron un sensor LI-190SA (Quantum Sensor LICOR, Lincoln, NE, USA) en un área descubierta adyacente a la parcela y lo conectaron a un registrador automático de datos LI-1000 (LICOR, Lincoln, NE, USA), almacenando información de la RFA cada minuto (información externa). Los datos obtenidos con este sensor corresponden al 100% de la radiación incidente sobre la fronda del componente arbóreo. Para medir la fracción de la RFA incidente sobre la fronda de las plantas de café, utilizaron una barra integradora de medición LI-191SA (Line Quantum Sensor LICOR, Lincoln, NE, USA), conectada al colector de datos LAI-2000. La barra integradora la colocaron por encima de la planta de café, perpendicular al tallo, efectuando una medición instantánea (información interna).

Las plantas de café sobre las cuales se midió la RFA incidente, fueron numeradas secuencialmente para precisar el punto dónde realizar el registro y facilitar los cálculos (Figura 74). Los equipos registradores de datos fueron ajustados con la misma hora, de tal manera que uno de los valores promedio almacenados por el LI-1000 coincidiera con uno de los valores almacenados por el LAI-2000. Las mediciones las llevaron a cabo entre las 11:00 y las 13:00 horas, momento en el cual el ángulo de inclinación solar es cercano o igual a los 90°; se tomaron dos orientaciones de los recorridos para el registro de la información, de Oriente a Occidente, más un recorrido de verificación Sur – Norte. La información contenida en cada uno de los registradores de datos fue transferida a un PC con la ayuda del software LI-1900.

Para estructurar la metodología, cada unidad de medición se dividió en cuatro cuadrantes (Figura 74), cada uno de los cuales estuvo delimitado por los puntos 1-2-17 y 18; 2-3-16 y 17; 17-18-19 y 20; 16-17-20 y 21, y así sucesivamente, hasta 64-65-80 y 81. Para cada punto del cuadrante obtuvieron dos valores medidos de RFA, uno externo y otro interno. Con los cuatro valores externos calcularon el total de la RFA incidente sobre el tope superior del cuadrante, que correspondió al 100% y con los cuatro valores internos se calculó la RFA incidente sobre las plantas de café, bajo la influencia de los árboles de sombrío. La figura formada por las mediciones externas e internas corresponde a un paralelepípedo recto (Figura 75).



**Figura 75.**

Diagrama para visualizar la forma cómo se toma la información en cada uno de los puntos del cuadrante.

Por lo tanto, para cada cuadrante se aplicó la ecuación <6>, para hallar el volumen de éste, así:

$$V = A \left( \frac{h1 + h2 + h3 + h4}{4} \right) \quad <6>$$

Donde: V es el volumen del paralelepípedo recto formado; A es el área del cuadrante, para todos los casos es 9;  $h1, h2, h3, h4$  corresponden a los valores de RFA externa o interna obtenidos.

**Radiación incidente en la unidad de medición.** El total de radiación incidente sobre el tope superior de la unidad de medición fue la sumatoria de los volúmenes de cada uno de los cuatro cuadrantes, calculada con los valores de RFA externos y la RFA recibida por las plantas de café, calculada con los valores de RFA interna.

**Sombrío en la parcela (fracción de la RFA transmitida).** De igual forma, el valor de la fracción de la RFA transmitida sobre el café calculado, en términos porcentuales, para toda la parcela se obtiene a partir de la ecuación <7>:

$$PRT = \left[ \frac{\sum V (\text{unidad de medición interna})}{\sum V (\text{unidad de medición externa})} \right] \times 100 \quad <7>$$

PRT = Proporción de radiación RFA transmitida dentro del dosel

$$\% \text{ Sombra} = 1 - PRT$$

**Validación.** La metodología estandarizada se validó en dos campos experimentales, donde se tenían sistemas agroforestales con café, el primero de ellos ubicado en la Estación Central Naranjal en Chinchiná (Caldas), donde se determinó el sombrío asociado con la disposición de guamo, *Inga edulis*, en arreglos espaciales de 6,0 m x 6,0 m, 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m, en un sistema agroforestal guamo – café.

La segunda validación se realizó en la Estación Experimental de Consacá (Nariño), donde se evaluó el nivel de sombrío dado por cinco especies leguminosas: *Inga spectabilis*, *I. Edulis*, *Erythrina poeppigiana*, *Albizia carbonaria* y *Leucaena leucocephala*, en arreglos espaciales 6,0 m x 6,0 m, 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m, en un sistema agroforestal café – especies arbóreas. En los dos casos se aplicó la misma metodología, pero ajustando el número de cuadrantes y su área, así como el número de puntos de registros totales por parcela (Tabla 45); las mediciones se realizaron en marzo de 1998 y en abril de 1999, en el primer caso, y en mayo de 1999 en el segundo.

**Tabla 45.**

Características de las unidades de medición para la validación.

Localidad	Distancia de siembra de los árboles (m)	Unidades de medición	Número de cuadrantes por unidad	Área del cuadrante (m <sup>2</sup> )	Número de puntos de medición
Estación Central Naranjal	6,0 x 6,0	1	16	2,25	25
	9,0 x 9,0	1	36	2,25	49
	12,0 x 12,0	1	64	2,25	45
Estación Consacá	6,0 x 6,0	1	8	2,25	15
	9,0 x 9,0	1	18	2,25	28
	12,0 x 12,0	1	32	2,25	45

D.S. Distancia de siembra de los árboles de sombrío

Los resultados de las mediciones realizadas, en términos del porcentaje de la RFA incidente sobre el tope de la fronda las plantas de café (sombrió), se presentan en la Tabla 46. Las especies *Pinus oocarpa* y *Cordia alliodora*, presentaron gran variabilidad entre parcelas en la primera fecha de medición, lo cual está asociado con la edad de las plantas, su homogeneidad y la ubicación de la parcela, mientras que *Eucalyptus grandis* presentó un alto grado de homogeneidad. Para la segunda fecha de medición, *Pinus oocarpa* disminuyó su variabilidad mientras *Cordia alliodora* mantuvo su alta variabilidad, los coeficientes de correlación entre la edad del cultivo y su nivel de sombrío determinados para cada especie fueron de  $r = 0,779$  y  $0,996$  para *P. oocarpa* y *C. alliodora*, respectivamente, lo que indica un aumento del nivel de sombra al aumentar la edad del cultivo.

**Tabla 46.**

Fracción de RFA incidente sobre el café con sombrío de tres especies forestales. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío (Fuente: Farfán *et al.*, 2003).

Especie forestal	Repetición	Fracción de RFA incidente sobre el café		Coeficiente de correlación (r)
		Enero 1998	Octubre 1998	
<i>Pinus oocarpa</i>	1	45 ± 9,5	56 ± 9,6	0,779
	2	13 ± 4,1	46 ± 12,9	
	3	31 ± 6,1	45 ± 10,9	
<i>Eucalyptus grandis</i>	1	64 ± 15,2	72 ± 7,4	0
	2	62 ± 12,2	66 ± 6,4	
	3	66 ± 9,5	66 ± 6,9	
<i>Cordia alliodora</i>	1	81 ± 10,9	80 ± 7,9	0,996
	2	43 ± 10,7	51 ± 9,7	
	3	12 ± 5,4	34 ± 9,1	

*Eucalyptus grandis* presentó valores homogéneos de la RFA interceptada entre las parcelas medidas y la menor variabilidad dentro de la parcela. El coeficiente de correlación determinado para esta especie ( $r = 0$ ), indica que no hay aumento en el nivel de sombra al aumentar la edad del cultivo.

Para verificar si existían diferencias en los valores de sombrío, dependiendo de la posición de la parcela en el sentido Norte - Sur y del recorrido realizado para la toma de la información, en la segunda fecha de evaluaciones, se procedió a hacer dos recorridos, el primero tal como se describió anteriormente (sentido Oriente – Occidente), y el segundo iniciando en el mismo punto pero con orientación Sur – Norte. Los resultados obtenidos mostraron que no hubo efecto del recorrido sobre la determinación de los porcentajes de sombra, de tal manera que obtuvo una correlación ( $r=0,996$ ) en los valores de las dos mediciones.

Los resultados obtenidos de la primera validación se presentan en la Tabla 47, la determinación del coeficiente de correlación dio como resultado valores  $r = -0,979$  en la primera medición y de  $-0,910$  en la segunda medición, lo que indica una relación inversa entre la distancia de siembra del sombrío y el nivel de sombra, es decir, al aumentar la distancia de siembra disminuye el nivel de sombrío; al correlacionar el nivel de sombrío a través del tiempo, el valor  $r$  fue de  $0,975$  lo que indica que a mayor edad de las plantas de *Inga edulis* mayor es el sombrío que afecta al café; sin embargo, debe tenerse en cuenta que los valores registrados de interceptación de radiación y los análisis derivados de él pueden cambiar dependiendo de la escala en el tiempo en que fueron tomados. Igual como se observó en el primer experimento, con *Inga edulis* se presenta la misma variabilidad (altos coeficientes de variación,  $> 50\%$ ) lo que indica que el sombrío está determinado por la arquitectura, la disposición de las hojas en la fronda y el arreglo espacial utilizado.

**Tabla 47.**

Fracción de RFA incidente sobre las plantas de café, asociado con *I. Edulis*. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Especie Leguminosa	Fracción de RFA incidente sobre el café			Coeficiente Correlación ( $r$ )
	6,0 x 6,0	9,0 x 9,0	12,0 x 12,0	
<i>Inga edulis</i> (1ª medición)	69,7	61,7	44,7	-0,979
<i>Inga edulis</i> (2ª medición)	80,7	79,9	73,1	-0,910

Los resultados obtenidos de la segunda evaluación, se presentan en la Tabla 48, se observa una baja correlación ( $r = 0,277$ ), cuando se emplea *Albizia carbonaria* como sombrío; esto indica que dada su arquitectura, el grado de sombra de esta especie es muy homogéneo en cualquier

arreglo espacial. Las otras especies, *L. leucocephala*, *Erythrina rubrinervia*, *E. fusca* e *I. edulis* en sus diferentes arreglos espaciales, presentaron valores *r* negativos (-0,990; -0,831; -0,627 y -0,880, respectivamente) y alta correlación, lo que indica que al ampliar la distancia de siembra de la especie arbórea disminuye el nivel de sombrío.

**Tabla 48.**

Fracción de RFA incidente sobre plantas de café asociado a cinco especies leguminosas, Estación Experimental Pueblo Bello-Cesar.

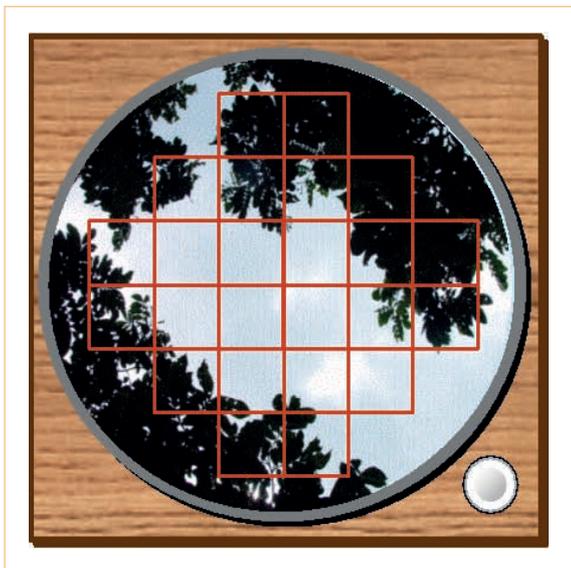
Especie leguminosa	Fracción de RFA incidente sobre el café			Coeficiente Correlación ( <i>r</i> )
	6,0 x 6,0	9,0 x 9,0	12,0 x 12,0	
<i>Albizzia carbonaria</i>	78,16	72,61	80,37	0,277
<i>Leucaena leucocephala</i>	37,04	22,25	13,41	-0,990
<i>Erythrina rubrinervia</i>	33,86	6,84	8,82	-0,831
<i>Erythrina fusca</i>	28,43	37,24	13,10	-0,627
<i>Inga edulis</i>	50,21	49,11	16,51	-0,880

Con base en la información presentada se puede concluir que la metodología evaluada permite cuantificar el grado de sombrío generado por diversas especies arbóreas como componentes de sistemas agroforestales con café y de esta forma es posible relacionar su efecto sobre las variables fisiológicas y de productividad del cafeto y asegurar recomendaciones para los agricultores con alto grado de certidumbre.

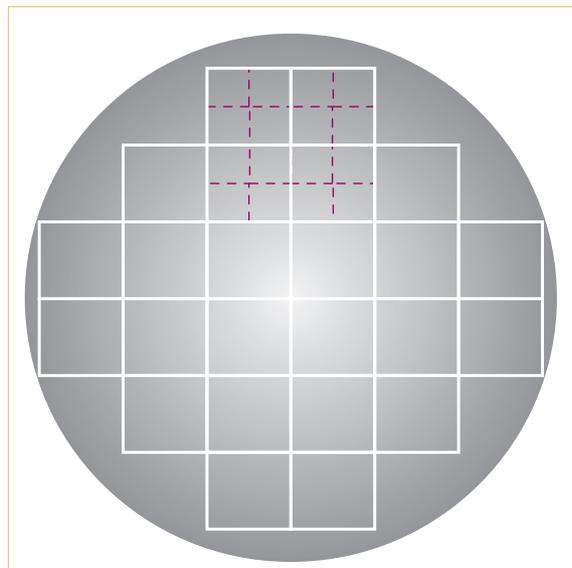
### 3.4.10.2 Valoración o evaluación de la apertura del dosel de sombra, mediante métodos indirectos

- Estimación del porcentaje del sombrío mediante herramientas prácticas. En este grupo se incluyen los métodos que miden la oclusión o la apertura del dosel de sombra, el cual bloquea o permite el paso de la radiación (Somarriba, 2002). En esta sección se describen algunas metodologías para estimar el porcentaje de cobertura que recibe el cultivo basadas en algunos casos en la oclusión, el diámetro de la copa, la densidad de los árboles, entre otras.

**El densiómetro óptico o esférico.** El densiómetro es un instrumento que valora el porcentaje de follaje en el dosel del árbol. Es un espejo cóncavo montado sobre una base de madera (Figura 76); el espejo está dividido en 24 cuadrículas y cada cuadrícula se divide imaginariamente en cuatro cuadros pequeños (96 cuadros pequeños) (Figura 77).

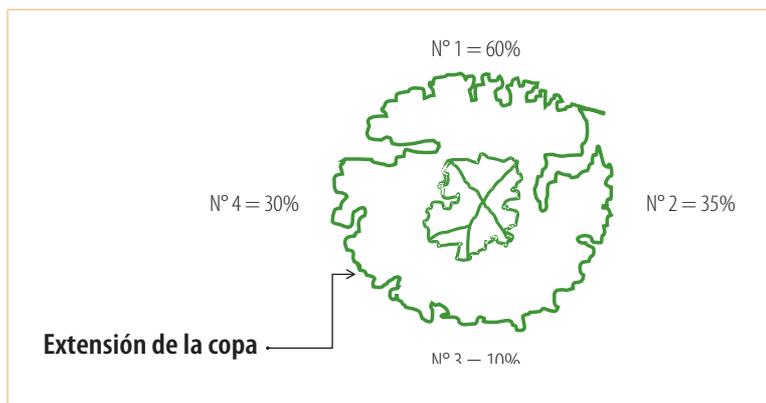


**Figura 76.**  
Densiómetro esférico u óptico.



**Figura 77.**  
Divisiones del densiómetro óptico.

El espejo se proyecta hacia el follaje de los árboles, y se cuenta el número de cuadros pequeños en el espejo ocupados por el follaje. El número de cuadros pequeños se multiplica por 1,04 y se obtiene el porcentaje aproximado de cobertura. Para realizar un cálculo exacto, tomar cuatro medidas por punto de referencia (Figura 78).



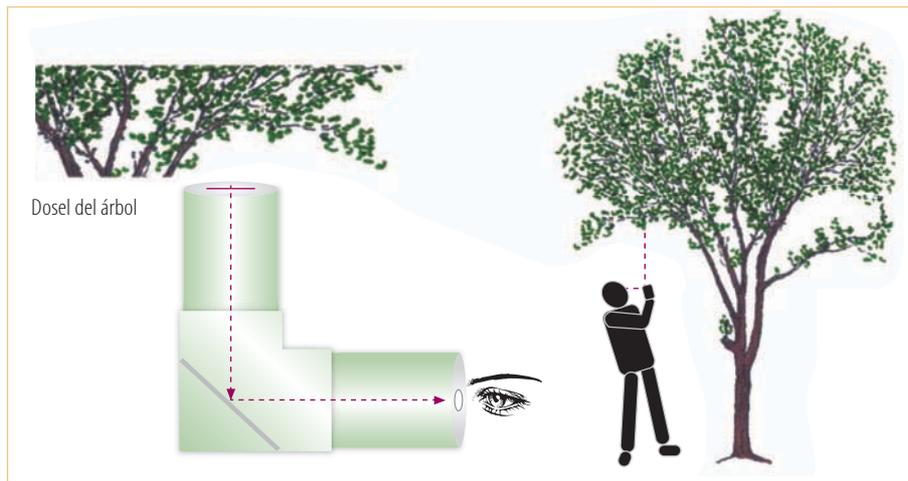
**Figura 78.**  
Medidas tomadas fuera de la copa del árbol de referencia.

Cada medida debe ser tomada afuera de la influencia de la copa del árbol de referencia

**Cálculo:**  $135/4 = 35\%$  de sombra  $(60 + 35 + 10 + 30)/4$  es el promedio para el punto

Este método requiere de mucha experiencia en el manejo del densiómetro. Se deben tomar puntos al azar, evaluar mínimo 100 puntos por hectárea y tomar cuatro medidas en cada punto de referencia (árbol).

**El densiómetro de punto.** Es una herramienta para estimar la cubierta arbórea. Es empleado en el muestreo de transectos lineales, combinando estimaciones puntuales de la cobertura vegetal horizontal y verticalmente en sistemas agroforestales. El densiómetro de punto utiliza un espejo para proyectar el follaje del árbol solo en el punto del transecto donde se realiza la evaluación y localizado por encima de la persona que hace la valoración en tierra (Figura 79).



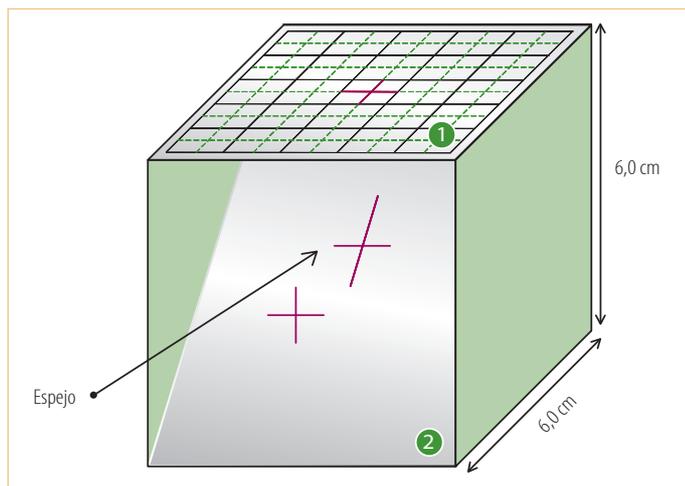
**Figura 79.**

Densiómetro de punto.

El densiómetro debe estar alineado para hacer una estimación exacta de la cobertura, luego simplemente se determina si hay o no follaje del árbol reflejado en el espejo interno del densiómetro. Los transectos, de longitudes variables, deben seleccionarse aleatoriamente y preferiblemente formando figuras geométricas (triángulos, cuadrados, etc.). Si en un transecto de 50,0 m de longitud, se muestrean 100 puntos y en 29 de ellos se determina follaje del árbol, entonces el porcentaje de cobertura es del 29%, solo para este transecto; el porcentaje de cobertura total del área evaluada se determina calculando el promedio de los porcentajes de cobertura de cada transecto sobre el número de transectos estimados.

**El densiómetro modificado.** Desarrollado en la disciplina de Fitotecnia en Cenicafé; es un instrumento artesanal con el cual se puede realizar una estimación aproximada del porcentaje de cobertura o de sombrío que proporcionan los árboles al café. El instrumento es un cubo cuyas caras miden 6,0 cm x 6,0 cm, cuatro de ellas elaboradas en láminas de PVC de 0,3 mm. La cara superior (No. 1) y la frontal (No. 2) se elaboraron en lámina acrílica de 0,3 mm (Figura 80); La cara No. 1 está dividida en 25 cuadrículas, de 1,0 cm de lado, cada una (líneas continuas negras en la Figura 80) y cada cuadrícula, a su vez está subdividida en cuatro cuadrantes, de 0,5 cm cada uno (líneas punteadas verdes en la Figura 80), para un total de 100 cuadrantes. Nótese el centro de la cara resaltado con líneas rojas. En la cara No. 2 sólo está demarcado su centro (líneas rojas),

el cual se debe hacerse coincidir con el centro de la cara No. 1, para dar nivel al instrumento. En el interior del instrumento (cubo) se instaló un espejo de vidrio formando un ángulo de 45°, de manera tal que el reflejo del follaje de los árboles sea proyectado sobre la cara No. 2 y poder hacer una fácil lectura.



**Figura 80.**

Densiómetro modificado (Diseñado por el autor).

**Modo de empleo.** Se proyecta el densiómetro sobre la copa de los árboles y se cuenta el número de cuadrantes ocupados por el follaje, éste será el porcentaje de cobertura dado por el árbol en ese punto. De ser muy alto el número de cuadrantes ocupados por el follaje, se cuenta el número de éstos donde se refleja el cielo abierto y se resta de 100, éste será el porcentaje de cobertura. Se deben realizar mínimo 16 lecturas por hectárea, ocho al interior del árbol y ocho en la intersección de las copas de los árboles. El instrumento debe colocarse sobre una base sólida de manera que éste fijo al hacer la lectura, el instrumento debe quedar a la altura del ojo de la persona que hace la medición (Figura 81).

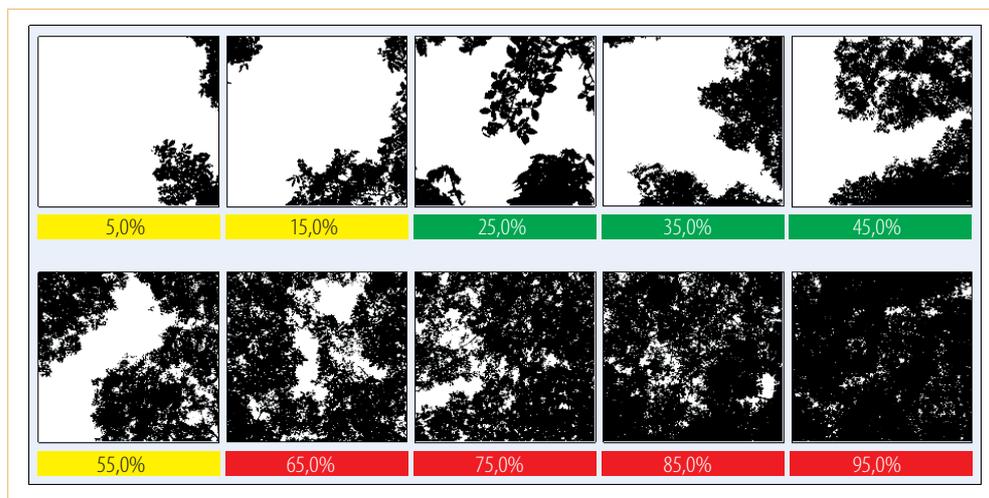
**Estimación visual de la sombra.** La sombra en el cultivo puede ser estimada mediante metodologías empíricas, consistentes en la comparación de la cobertura del dosel de los árboles con guías o plantillas elaboradas a partir de coberturas evaluadas, utilizando imágenes digitales (Figura 82). Se deben seguir los siguientes pasos (metodología propuesta por el autor):



**Figura 81.**

Ubicación del densiómetro modificado sobre una base sólida (madera).

**Figura 82.**  
Guía visual para  
valorar porcentaje  
de sombra en el  
café.



*Fotografía: Cámara digital SONY DSC-F707. Lente Zoom 10X, 2-2,4/9,7 - 48,5*  
*Cultivo: Café con sombrío de guamo macheto (Inga densiflora) establecido a 6,0 m x 6,0 m. Estación Experimental El Tambo (Cauca)*  
*Análisis de imágenes: Gap Light Analyzer (GLA), Version 2,0*  
*Elaborado por: Fernando Farfán Valencia, Disciplina de Fitotecnica, Cenicafé.*

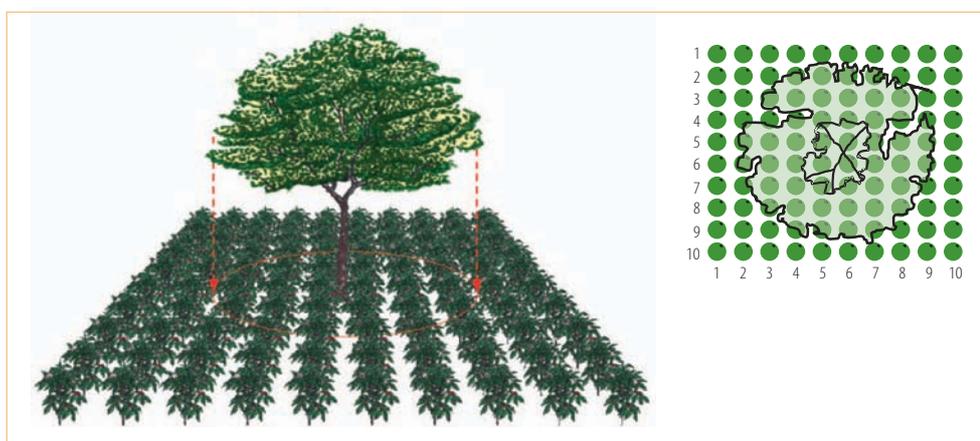
1. Ubicarse en diferentes puntos dentro de la parcela; en la base del árbol y en la intersección entre dos copas de árboles.
  2. Observar inicialmente el cielo abierto.
  3. En cada punto observar hacia arriba el dosel o copa, del o los árboles.
  4. Posteriormente, hacer un estimativo del porcentaje de cielo abierto que está cubierto por el follaje. Comparar este porcentaje con los porcentajes dados en la guía.
  5. La aproximación encontrada será el porcentaje de sombrío dado en ese punto.
  6. Repetir la operación en diferentes puntos del lote o finca (14 a 16 puntos por hectárea); a mayor número de determinaciones mayor precisión en la evaluación.
  7. Obtener un promedio entre el número de evaluaciones hechas para tener un solo porcentaje general de sombrío para la finca.
- **Alternativa de evaluación.** Mediante fotografía digital del dosel, especialmente con cámara fotográfica, puede compararse esta fotografía con las dadas en la plantilla visual y ubicar el porcentaje de cobertura correspondiente (Figura 83).



**Figura 83.**

Comparación de fotografías digitales del dosel con la plantilla visual.

- Proyección de la sombra.** Para evaluar el grado de cobertura mediante el método de la proyección de la sombra de los árboles, se delimitan parcelas de diez hileras de café con diez cafetos cada una (100 plantas de café en total). En cada parcela se dibuja la proyección vertical de la copa de cada árbol de sombrío con respecto a los cafetos (Figura 84); luego, se cuenta el número de cafetos por debajo de la copa de cada árbol. La suma de los cafetos sombreados da el porcentaje aproximado de sombra en cada sitio; entre más sitios se delimiten en la finca mayor precisión hay en el porcentaje de cobertura a evaluar (Haggar *et al.*, 2001). Este método es muy impreciso cuando el grado de sombrío es muy alto por el desarrollo del follaje o por el número de árboles establecidos por hectárea, es decir, puede ser práctico en árboles aislados.

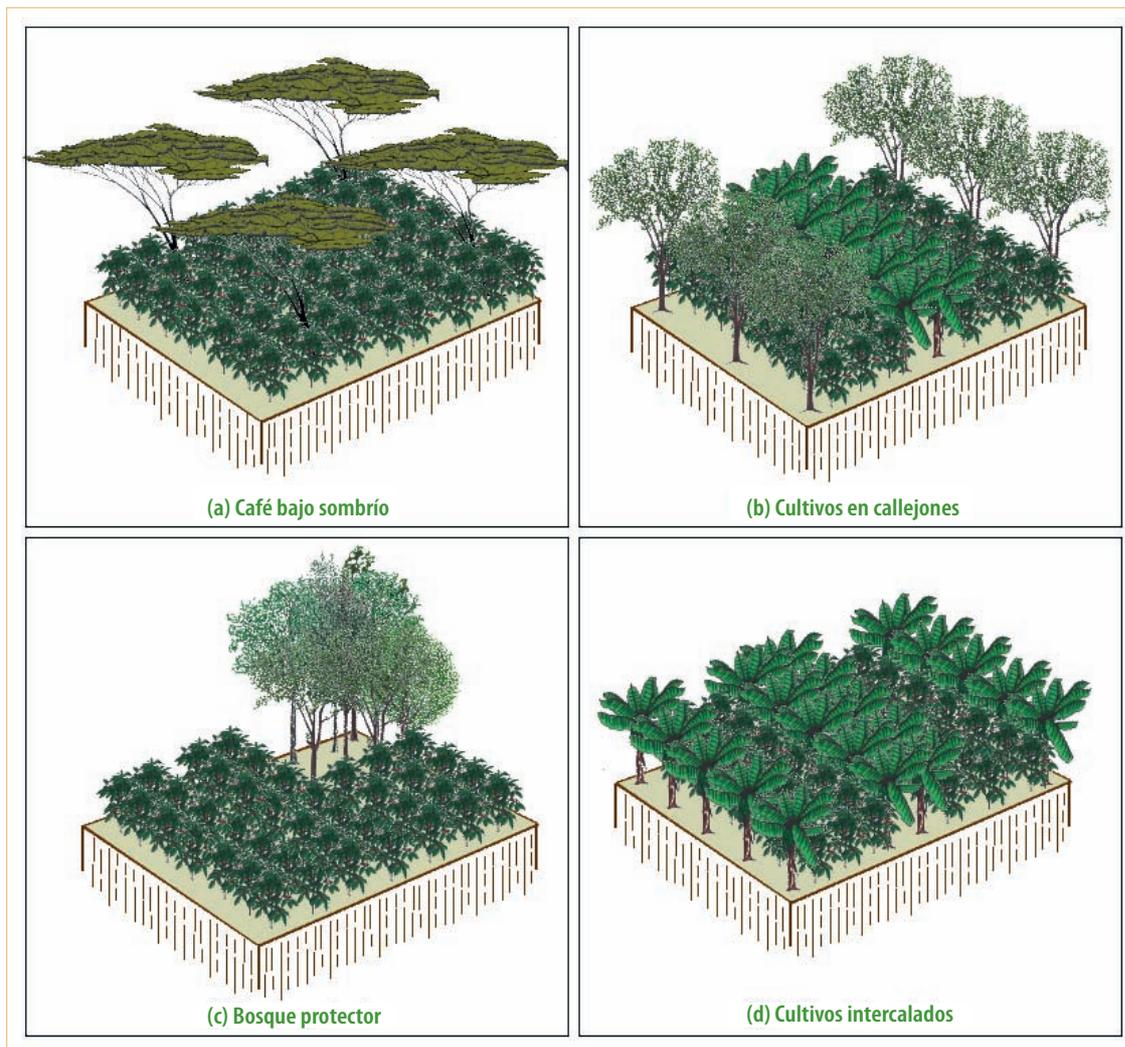


**Figura 84.**

Proyección de la copa de los árboles sobre los cafetos.

### 3.4.11 Posibles errores al estimar la cobertura por el número de árboles o herbáceas establecidas

Las recomendaciones técnicas como porcentaje de sombrío máximo o regulación del sombrío, producto del diagnóstico de los sistemas agroforestales, debe hacerse apoyado en la cuantificación o valoración del porcentaje de la cobertura y no por el número de árboles o plantas de plátano establecidas; esto podría conducir a apreciaciones erróneas, se citan algunos ejemplos (Figura 85):



**Figura 85.**

Sistemas de producción de café.

**Ejemplo 1.** Un árbol de carbonero (*A. carbonaria*) de 17 años de establecido, con un diámetro de copa de 30,0 m, podría dar sombra a 441 cafetos establecidos a 1,5 m x 1,5 m; es decir, 10 árboles/ha serían suficientes para dar entre el 35% y el 45% de sombra a 4.500 cafetos. Por porcentaje de cobertura se tendría un cultivo de café bajo sombrío; de acuerdo a la clasificación por el número de árboles observados se tendría café a libre exposición solar, Figura 85(a).

**Ejemplo 2.** Al establecer barreras dobles de nogal cafetero (*C. alliodora*) de 20,0 m de altura, con distancia entre barreras de 30,0 m y 3,0 m entre plantas, se establecerían 110 árboles de nogal por hectárea. De acuerdo a la clasificación por el número de árboles presentes se hablaría de un cultivo de café con sombra; por el contrario, éste sería un cultivo de café a libre exposición solar en un SAF clasificado como cultivos en callejones, Figura 85(b).

**Ejemplo 3.** En el 25,0% de una hectárea (2.500 m<sup>2</sup>) puede establecerse un bosque protector diverso (5 a 12 especies de árboles), a 6,0 m x 6,0 m, obteniendo una densidad de 70 árboles/ha; en el 75,0% del área restante se establecería café a 1,2 m x 1,2 m (5.200 plantas/ha). Éste sería un sistema de producción de café a libre exposición solar (Figura 85, c); según la clasificación por el número de árboles, se hablaría de un cultivo de café con sombrío.

**Ejemplo 4.** En un cultivo de café establecido a 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha), se podrían establecer barreras de plátano a 15,0 m entre las barreras y a 2,1 m entre plantas (318 plantas de plátano por hectárea) sin que se afecte la producción de café (Moreno *et al.*, 2005), Figura 85(d). Este arreglo sería un típico cultivo de café a libre exposición solar con intercalamiento de plátano, y no un cultivo con semisombra, de acuerdo con el número de sitios de plátano establecidos.

### 3.5 Estrategia 6. En las renovaciones por siembra o en nuevas siembras establecer variedades resistentes a la roya del cafeto

Las investigaciones en Cenicafé han permitido obtener nuevos componentes que han mejorado las características iniciales de las variedades, tales como el tamaño del grano, conservando la resistencia a la roya del cafeto. La selección de nuevos componentes de porte bajo han permitido el desarrollo de la Variedad Castillo® (resistente a la roya del cafeto).

Para obtener la variedad se utilizaron como progenitores la variedad Caturra y el Híbrido de Timor (resistente a la roya del cafeto), recursos genéticos ampliamente conocidos. La variedad Caturra, por el porte bajo de sus plantas permite el establecimiento en altas densidades de siembra, favoreciendo la obtención de mayores producciones por unidad de superficie; sin embargo, es altamente susceptible a la roya del cafeto y a la enfermedad de las cerezas, causadas por hongos patógenos que limitan la producción y afectan notablemente la calidad del café obtenido (Alvarado *et al.*, 2005).

### 3.5.1 Café Variedad Castillo® y Caturra en SAF estratificados

De los estudios sobre evaluación productiva de café de porte bajo, con y sin resistencia a la roya del cafeto y bajo sombrío de cuatro especies leguminosas, que se realizan en la Estación Central Naranjal, se presentan los siguientes resultados: Las densidades de siembra evaluadas fueron las presentadas en la Tabla 49. Las especies de sombrío fueron *Inga densiflora* (guamo macheto), *Inga edulis* (guamo santafereño), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Albizzia carbonaria* (carbonero). Establecido a 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha).

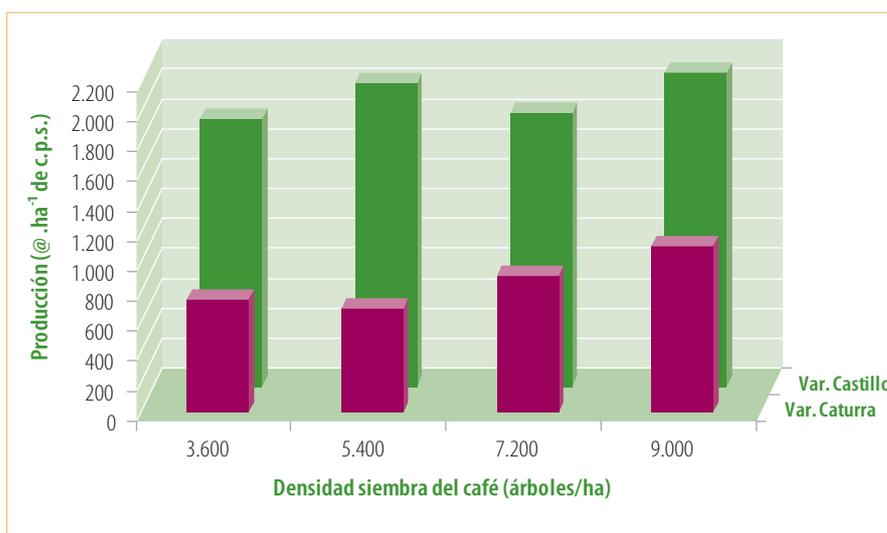
Los resultados de producción (2008 – 2012) se presentan en la Figura 86. En la Variedad Castillo® (de porte bajo), resistente a la roya del cafeto, se produjeron en promedio (cinco cosechas), 1.786, 2.027, 1.828 y 2.097 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s. en las densidades de siembra de 3.600, 5.400, 7.200 y 9.000 plantas/ha. La variedad Caturra (de porte bajo) susceptible a la roya, con las mismas densidades de siembra, produjo 57,0%; 65,5%; 50,0% y 46,0% menos, que las obtenidas con la variedad resistente.

**Tabla 49.**

Tratamientos. Café Variedad Castillo® y Caturra. Estación Central Naranjal-Caldas.

Tratamiento	Densidad (plantas/ha)	Distancias de siembra (m)
1	3.600	1,65 x 1,65
2	5.400	1,35 x 1,35
3	7.200	1,18 x 1,18
4	9.000	1,05 x 1,05

**Figura 86.**  
Café Variedad Castillo®  
y Caturra en SAF  
estratificados. Estación  
Central Naranjal,  
Chichiná-Caldas.



### 3.5.2. Café variedades Tabi, Borbón, Típica y Maragogype en SAF estratificados

En la década de 1970 se inició en Cenicafé un programa para desarrollar variedades de porte alto con resistencia a la roya, que pudiera constituirse en alternativa para los caficultores. Para este propósito se efectuaron cruzamientos entre ejemplares del Híbrido de Timor, usados como progenitores resistentes a la roya y plantas de las variedades Típica y Borbón (Moreno, 2002); las progenies obtenidas se identificaron con atributos sobresalientes como variedades mejoradas y con resistencia a la roya del cafeto. Esta variedad fue denominada Tabi.

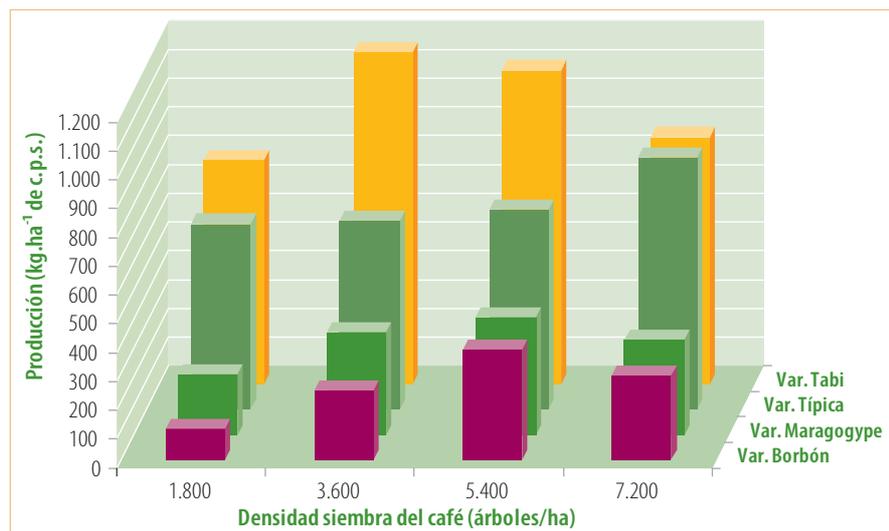
De los estudios sobre evaluación productiva de café de porte alto, con y sin resistencia a la roya del cafeto y bajo sombrío de cuatro especies leguminosas, se desarrollaron en la Estación Central Naranjal. En la Tabla 50 se presentan los resultados de las densidades de siembra evaluadas. Las especies de sombrío fueron *Inga densiflora* (guamo macheto), *Inga edulis* (guamo santafereño), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Albizzia carbonaria* (carbonero), establecido a 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha).

**Tabla 50.**

Tratamientos café variedades Tabi, Borbón, Típica y Maragogype. Estación Central Naranjal-Caldas.

Tratamiento	Densidad (plantas/ha)	Distancias de siembra (m)
1	1.800	2,35 x 2,35
2	3.600	1,65 x 1,65
3	5.400	1,35 x 1,35
4	7.200	1,10 x 1,10

Los resultados de producción se presentan en la Figura 87.



**Figura 87.**

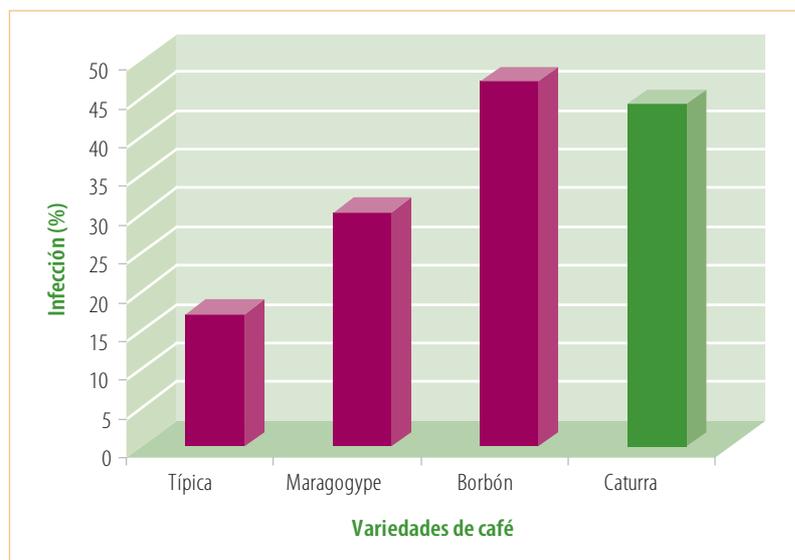
Café variedades Tabi, Típica, Maragogype y Borbón en SAF estratificados. Estación Central Naranjal, Chichiná-Caldas.

La variedad Tabi, resistente a la roya del cafeto, establecida a las densidades de 1.800, 3.600, 5.400 y 7.200 plantas/ha, produjo en promedio 778, 1.152, 1.089 y 856 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s., respectivamente (Tabla 51). Las reducciones (%) en la producción de las variedades susceptibles a la roya, en las mismas densidades de siembra respecto a la producción obtenida con la variedad resistente, se presentan en la Figura 88.

**Tabla 51.**

Reducción porcentual de la producción en las variedades susceptibles, respecto a la producción de la variedad resistente a la roya del cafeto.

Variedades	Densidades de siembra del café (plantas/ha)			
	1.800	3.600	5.400	7.200
Borbón	86,0%	78,9%	64,7%	65,7%
Maragogype	73,3%	69,0%	62,6%	61,3%
Típica	17,2%	43,0%	36,3%	-



**Figura 88.**

Porcentaje de infección por roya registrado en las variedades susceptibles.

Las reducciones en la producción en las variedades susceptibles a la roya se favorecieron posiblemente por la alta incidencia del patógeno, determinado por las altas precipitaciones registradas en los años de evaluación 2008 a 2011 (3.926 - 3.292 - 3.568 y 3.799 mm, respectivamente). La precipitación es quizás el factor ambiental más estudiado en relación con la evolución de la roya del cafeto. La disponibilidad de agua o balance hídrico es otro factor que indirectamente influye sobre el desarrollo de la enfermedad. La formación del follaje, el crecimiento de las ramas, la floración y la maduración de los frutos está estrechamente relacionada con la disponibilidad de agua para la planta. A su vez, el desarrollo de la planta, principalmente la cantidad de hojas, está relacionada con la mayor o menor intensidad de la

enfermedad, en función de la cantidad de tejido susceptible y disponible a la infección. La lluvia es un factor muy importante en el desarrollo de una epidemia (incremento en la intensidad y severidad), la lluvia actúa como factor determinante en la germinación de las esporas, en su dispersión e indirectamente sobre otros factores ambientales tales como la humedad relativa, la temperatura y la luminosidad; también parece ejercer un efecto detrimental sobre el incremento de la enfermedad cuando la intensidad y frecuencia de las lluvias son excesivas (Subero, 2011).

Es de anotar que los estudios se realizaron en lotes destinados a la producción orgánica, por tanto, las estrategias para la prevención y control de la enfermedad, se limitaron solo a aplicaciones de oxiclورو de cobre, como único insumo permitido para estos propósitos por la normativa internacional para la producción orgánica.

### 3.6 Estrategia 7. Identificar otras potencialidades y factores limitantes de la producción - prácticas complementarias

#### 3.6.1 De ser posible, en nuevas siembras establecer los surcos del café y del sombrío de Oriente a Occidente

##### 3.6.1.1 La orientación de las hileras de los árboles

Si se considera un sistema agroforestal ubicado en un área en la cual el cultivo principal está separado por hileras de árboles (por ejemplo, cultivos en callejones), con una separación del espacio abierto entre calles de los árboles, casi igual al diámetro de la copa de los árboles, la radiación solar que llega al centro de la fila o del cultivo dependerá de la orientación de las filas. En la Figura 89 se muestra en esquema la radiación solar que entraría al sistema, así: (1) Árboles y cultivo establecidos de Norte a Sur; (2) Árboles y cultivo establecidos de Oriente a Occidente; y (3) Árboles y cultivo establecidos aleatoriamente; asumiendo la densidad del dosel igual en todos los casos.

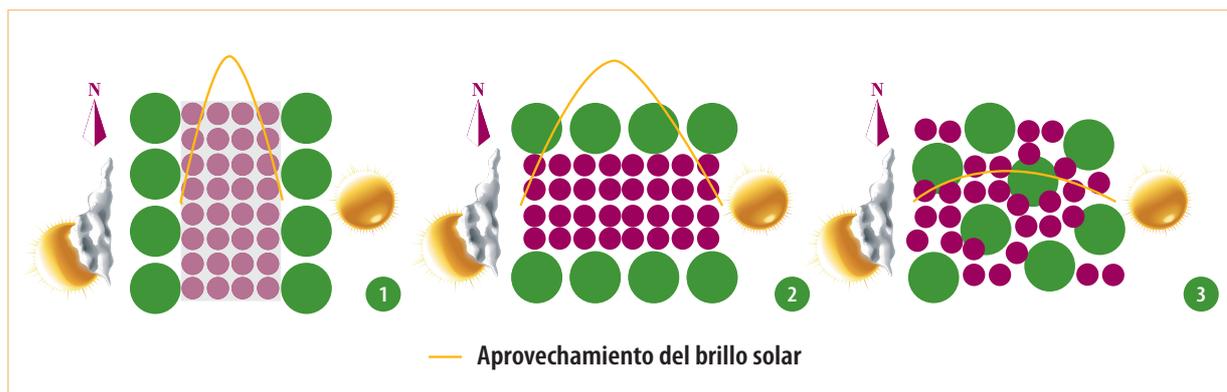


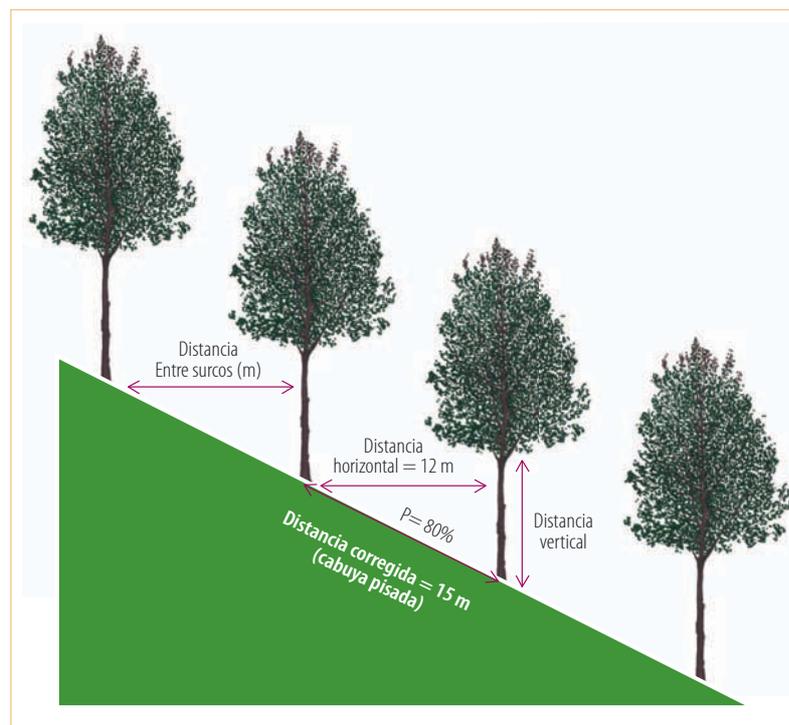
Figura 89.

Diagrama representativo del aprovechamiento del brillo solar en sistemas agroforestales.

Con las filas de los árboles establecidos de Norte a Sur (caso 1), el centro del espacio abierto recibirá más luz directamente, en el período comprendido entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m., y su duración exacta estará en función de la relación entre la altura del árbol y el espacio entre las filas de árboles. Con las hileras de árboles establecidos de Oriente a Occidente (caso 2), el punto central entre dos hileras estaría casi expuesto durante todo el día a los rayos solares, y la sombra solo será determinada por los espacios libres de los árboles cercanos. Por el contrario, cuando los árboles se establecen aleatoriamente dentro del lote (caso 3) los rayos solares (*sunfleck*) y la sombra se distribuirán de una manera irregular dentro del lote. Las filas pueden establecerse en cualquier dirección, pueden estar en una pendiente y puede variar la amplitud del dosel de los árboles; todo esto puede hacer cambiar el curso de la radiación solar recibida en un lugar en particular (Reifsnnyder, 1989).

### 3.6.2 Al realizar el trazado de los árboles de sombrío en suelos pendientes, hacer las correcciones de la distancia entre los surcos de los árboles

Los caficultores deben conocer la cantidad de árboles de sombrío a establecer en una hectárea con pendiente, debido a que en el trazado de siembra (distancia entre árboles) pueden cometerse errores, por ejemplo: Cuando el caficultor realiza el trazado a “cabuya pisada”, superpone la distancia horizontal (12,0 m, por ejemplo) sobre la pendiente del terreno y no sobre la distancia horizontal (área real a sembrar). Otros caficultores trazan de forma correcta, teniendo en cuenta que la distancia real entre los árboles es la distancia entre surcos y no la formada en la pendiente; de ahí, que se ignore que la cantidad de árboles a sembrar en terrenos con iguales superficies pero con diferente pendiente sea distinto (Figura 90), por lo que al hacer el trazado, es necesario hacer las correcciones pertinentes de la distancia entre los surcos de los árboles (Farfán, 2012).



**Figura 90.**

Distancia corregida para una distancia horizontal del sombrío de 12,0 m y pendiente del 80%.

En la Figura 90, para el establecimiento del sombrío del café, a una distancia horizontal de 12,0 m entre surcos y en un suelo con pendiente del 80,0%, en el trazo a “cabuya pisada” o haciendo la medición a nivel del suelo, la distancia corregida a la que se deberán establecer los árboles será de 15,4 m. En la Tabla 52, se presenta la distancia corregida para el establecimiento del sombrío del café en pendientes desde 30% hasta el 100%. La corrección se hace para la distancia entre surcos del sombrío y a “cabuya pisada”. Para pendientes inferiores al 30% no es necesario hacer correcciones (Farfán, 2012).

**Tabla 52.**

Distancias corregidas para el establecimiento del sombrío en suelos pendientes.

Pendiente (%)	Distancia entre los surcos del sombrío (m)		
	6,0	9,0	12,0
30	6,3	9,4	12,5
40	6,4	9,6	12,8
50	6,6	9,9	13,2
60	6,9	10,4	13,9
70	7,3	11,0	14,6
80	7,7	11,6	15,4
90	7,8	11,7	15,7
100	8,5	12,7	17,0

### 3.6.3 Establecer sombríos transitorios si las condiciones climáticas lo exigen

En Colombia se acostumbra establecer sombrío en los cafetales en sus primeros años, con plantas de corta duración, formando lo que se llama “sombrío transitorio”; posteriormente, se establece el sombrío permanente. En los primeros años de vida del cafeto su producción es escasa y por eso los caficultores tratan de compensar esta diferencia estableciendo plantas de sombrío que produzcan algún fruto útil; así se obtiene una utilidad y a la vez se da tiempo al sombrío permanente para su establecimiento. La planta comúnmente empleada como sombrío transitorio, tanto por su desarrollo rápido como por su producto, es el plátano (Federacafé, 1958).

#### 3.6.3.1 Respuesta en producción del café a la aplicación de fertilizante, al intercalamiento de plátano y a la aplicación de la biomasa seca de plátano

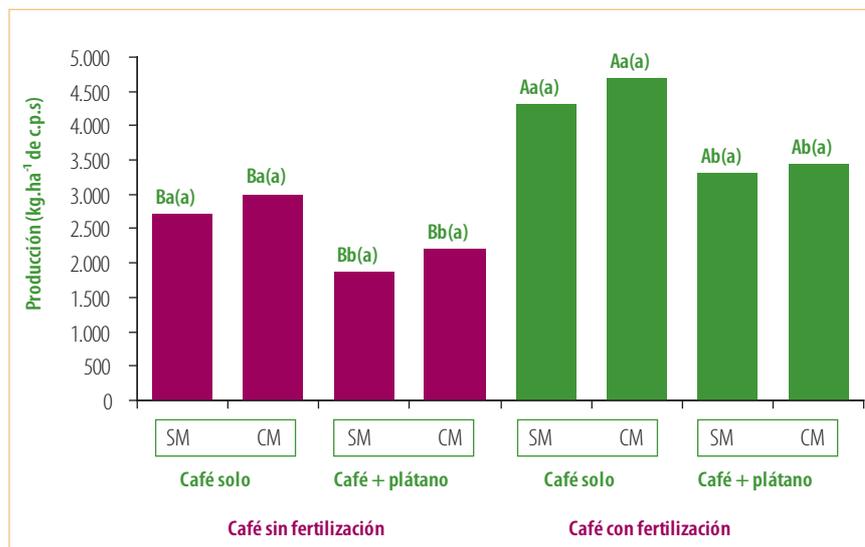
En la Estación Experimental La Catalina se evaluó el efecto del intercalamiento de plátano (*Musa AAB*) cultivariedad (cv) dominico hartón y de su biomasa seca producida sobre la producción de café, en dos sistemas de cultivo (sin aplicación y con aplicación de fertilizante); el café se estableció a una densidad de 5.000 plantas/ha y el plátano de 278 plantas/ha. Los resultados de la producción de café (kg.ha-año<sup>-1</sup> de café pergamino seco), se presentan en la Figura 91.

- **Efecto de la aplicación de mulch de plátano sobre la producción de café.**

Las diferencias estadísticas se representan con letras minúsculas entre paréntesis en la Figura 91. Los resultados de estos análisis indican que la cobertura vegetal muerta (mulch) producida por el plátano (cv. dominico hartón), no tuvo efecto sobre el promedio de la producción de las cuatro cosechas de café. Robinson y Mitchel (1964), indican que con una dosis de 30,0 t.ha<sup>-1</sup> de residuos de banano, aplicada como cobertura vegetal en café (*Coffea arabica* de 20 años, plantada a 2,5 m x 2,5 m), aumenta los rendimientos en un 33,0% en los primeros 10 años, comparado con el testigo, e incrementando esta producción en 63,0% en los 10 años siguientes; además los niveles de N, Mg y K, así como los contenidos de agua en el suelo son mayores en suelos donde se aplica mulch de banano (Ssali, 2003).

**Figura 91.**

Producción de café. Estación Experimental La Catalina-Risaralda (2000 a 2003).



SM: Sin Mulch.  
CM: Con Mulch.

- **Efecto del intercalamiento de plátano sobre la producción de café.** Las diferencias estadísticas se representan con letras minúsculas en la Figura 91. Los resultados de los análisis indican que en el promedio de la producción de cuatro ciclos productivos, hubo efecto del intercalamiento de plátano sobre la producción de café, siendo mayores las producciones en el café solo. El promedio de la producción del café sin intercalamiento de plátano fue 28,7% mayor que en el sistema café con plátano y el café sin fertilizar, en los dos casos; esta diferencia fue del 25,2% en el café solo comparada con el café con plátano y el café fertilizado en ambos casos. Mitchel (1965) y Robinson (1962), en África, obtuvieron que el crecimiento, la altura y el rendimiento del café (*Coffea arabica* y *C. robusta*), plantados a razón de 494 árboles/ha, son afectados por el intercalamiento de 988 plantas de plátano por hectárea.

Moreno y Hernández (2003), determinaron que las distancias entre barreras de plátano para que no se afecte la producción de café deben ser de 16 m para café sembrado a 1,0 m x 1,0 m; de 14

m para café establecido a 1,5 m x 1,5 m y a 2,0 m x 1,0 m; y de 12 m para café establecido a 2,0 m x 2,0 m. Machado (1959), comparó la producción de café, variedad Típica, bajo tres condiciones de sombrero, entre los que incluyó plátano, registrando un promedio de producción de café bajo sombra de plátano de 812 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s., durante 5 años, la cual fue superior a la obtenida bajo sombra de las dos especies arbóreas empleadas (422 y 965 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco).

- **Efecto de la fertilización sobre la producción de café.** Las diferencias estadísticas se representan con letras mayúsculas en la Figura 91. La fertilización tuvo un efecto significativo sobre la producción del café, tanto en los años de evaluación 2001 a 2003 como en el promedio de la producción de los 4 años estudiados. El promedio de la producción general del café sin fertilizar fue de 2.448 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s. y la del café fertilizado de 3.941 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s., la fertilización incrementó la producción en un 61,0%.

### 3.6.3.2 Efecto de las especies leguminosas *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida* empleadas como abonos verdes, sobre el desarrollo del cafeto durante su primer año de vida

En la Estación Central Naranjal de Cenicafé, Jiménez *et al.* (2005), evaluaron el potencial de *C. cajan* (guandul), *C. juncea* (crotalaria) y *T. candida* (tefrosia) como abonos verdes, y su efecto sobre el desarrollo del cafeto durante el primer año de vida. Las leguminosas se establecieron en densidades de 172.000, 86.000 y 60.000 plantas/ha y se emplearon 5.000 plantas/ha de café (dos tallos por sitio). En la Tabla 53 se presentan los resultados de la Interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) ejercida por las leguminosas.

**Tabla 53.**

Interceptación de RFA (%), en plantas de café, tres especies leguminosas, tres densidades de siembra y cuatro épocas de evaluación. Estación Central Naranjal-Caldas.

Densidad (plantas/ ha)	Evaluación (Días después de siembra)														
	<i>C. cajan</i>					<i>C. juncea</i>					<i>T. candida</i>				
	90	150	270	360	<i>r</i>	90	150	270	360	<i>r</i>	90	150	270	360	<i>r</i>
172.000	30,2	94,9	94,5	94,1	0,70	38,3	97,6	17,4	55,1	-0,22	36,0	98,8	0	0	ND
86.000	20,8	95,5	86,1	83,5	0,59	27,9	90,7	32,6	59,2	0,05	26,7	97,8	0	0	ND
60.000	19,2	92,6	82,0	74,2	0,52	10,8	87,8	42,3	49,0	0,17	33,0	98,2	0	0	ND

- **Café intercalado con *C. cajan*.** Los coeficientes de correlación (0,52 a 0,70) entre la edad de siembra de la leguminosa y el porcentaje de interceptación de RFA indican una relación lineal positiva entre estas dos variables, es decir, que el nivel de sombrero aumenta al incrementarse el número de días de siembra de *C. cajan*.
- **Café intercalado con *C. juncea*.** El coeficiente de correlación (*r*) entre la edad de la crotalaria (días después de la siembra) y el porcentaje de interceptación de RFA en la

máxima densidad de siembra (172.000 plantas/ha) fue de  $-0,22$ ; evidenciándose una relación inversa entre estas dos variables, lo cual indica que el porcentaje de interceptación de RFA disminuye al incrementarse la edad del cultivo, así como el número de cortes afecta negativamente el desarrollo del follaje, disminuyendo el porcentaje de la RFA interceptada (Tabla 53).

- **Café intercalado con *T. candida*.** Debido al deficiente rebrote de *T. candida* después del primer corte, sólo se registró el porcentaje de interceptación de RFA por esta especie al intercalarse con café al inicio del experimento y 150 días después de establecida.

### Efecto de la interceptación de la RFA por las leguminosas sobre el desarrollo del cafeto

**Sobre el número de días a la floración del café.** El efecto de la interceptación de RFA por cada especie leguminosa para cada densidad de siembra, sobre el número de días a la primera y segunda floración del café, se presenta en la Tabla 54.

Las plantas de café presentaron un período de floración entre los 364 y los 367 días después del trasplante (primera floración), y una segunda floración entre los 455 y los 457 días; sin embargo, según estudios realizados por Arcila (2002), la floración del cafeto se ve influenciada por la fecha de siembra y las condiciones ambientales de cada localidad y, suele ocurrir aproximadamente a los 330 días después de la siembra definitiva en el campo.

**Tabla 54.**

Días a floración del café intercalado con *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida* en tres densidades de siembra. Estación Central Naranjal-Caldas.

Tratamientos	Densidad (Plantas/ha)	Número de días de siembra a floración del café			
		Primera floración	Dunnet 5%	Segunda floración	Dunnet 5%
Café// <i>C. cajan</i>	172.000	367	***	457	***
Café// <i>C. cajan</i>	86.000	367	***	457	***
Café// <i>C. cajan</i>	60.000	367	***	458	***
Café// <i>C. juncea</i>	172.000	366	***	457	***
Café// <i>C. juncea</i>	86.000	366	***	456	***
Café// <i>C. juncea</i>	60.000	366	***	456	***
Café// <i>T. candida</i>	172.000	364		455	
Café// <i>T. candida</i>	86.000	364		457	***
Café// <i>T. candida</i>	60.000	364		456	
Café sin leguminosa		364		455	

// Intercalado; \*\*\* Tratamientos que presentan diferencia estadística (Dunnet 5%), comparados con el testigo

Las pruebas efectuadas entre el café sin intercalar (testigo) y el café intercalado con las leguminosas, indicó que intercalar *C. cajan* y *C. juncea* en cualquiera de las tres densidades de siembra estudiadas, tuvo un efecto negativo sobre el número de días a primera floración del café, mostrando una diferencia de 2 a 3 días, entre la floración del testigo y los tratamientos con leguminosas. En la segunda floración se presentó un comportamiento similar y la diferencia fluctuó entre 1 y 3 días. Suárez de Castro *et al.* (1961), afirman que no ocurren diferencias significativas en el número de días después de siembra a floración cuando el café se cultiva al sol o bajo sombrío.

**Sobre la altura de las plantas de café.** El efecto de la interceptación de RFA ejercido por cada especie leguminosa en cada densidad de siembra, sobre la altura de las plantas de café, se presenta en la Tabla 55.

Los análisis indican que intercalar *C. cajan* en cualquiera de las tres densidades de siembra estudiadas, tuvo un efecto negativo sobre la altura de las plantas de café, mientras la altura del café sin intercalar fue de 79,8 cm, y el promedio de la altura de los cafetos intercalados con *C. cajan* fue de 62,6 cm. El intercalar *C. juncea* con café no tuvo efecto sobre la altura de los cafetos y sólo cuando se intercaló *T. candida*, a una densidad de 172.000 plantas/ha, se tuvo un efecto negativo sobre la altura del cultivo, con una diferencia de 18,4 cm a favor del testigo. Suárez de Castro *et al.* (1961), sostienen que en los primeros años de vida del café la altura de la planta es menor en cafetales al sol que bajo sombrío.

**Sobre el número de ramas primarias de café.** Las pruebas realizadas entre el testigo y café intercalado con las leguminosas indican que al intercalar *C. cajan* y *T. candida* en cualquiera de las tres densidades de siembra evaluadas se obtuvo un efecto negativo sobre el número de ramas primarias de las plantas de café (Tabla 55), observándose que el número de ramas en el cultivo de café solo fue de 14,6 mientras que en aquellos lotes de café intercalados con *C. cajan* presentaron en promedio 9,2 ramas y aquellos con *T. candida* un número de 11,1 ramas.

**Tabla 55.**

Altura de la planta y días de siembra a floración del café intercalado con *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida*, en tres densidades de siembra. Estación Central Naranjal-Caldas.

Tratamientos	Densidad (Plantas/ha)	Altura plantas de café		Ramas primarias	
		cm	Dunnet 5%	N°	Dunnet 5%
Café// <i>C. cajan</i>	172.000	56,8	***	8,5	***
Café// <i>C. cajan</i>	86.000	63,8	***	9,1	***
Café// <i>C. cajan</i>	60.000	67,3	***	10,2	***
Café// <i>C. juncea</i>	172.000	73,3		12,3	
Café// <i>C. juncea</i>	86.000	77,5		12,2	
Café// <i>C. juncea</i>	60.000	77,8		13,1	
Café// <i>T. candida</i>	172.000	61,4	***	10,1	***
Café// <i>T. candida</i>	86.000	69,5		11,5	***
Café// <i>T. candida</i>	60.000	71,3		11,7	***
Café sin leguminosa		79,8		14,6	

// Intercalado; \*\*\* Tratamientos con diferencia estadística (Dunnet 5%), comparados con el testigo

El intercalar *C. juncea* en las tres densidades de siembra no tuvo efecto sobre el número de ramas primarias del cafeto. En los primeros años de vida del café el número de ramas primarias y su longitud son menores en cafetales al sol que bajo sombrío, según las observaciones de Suárez de Castro *et al.* (1961). En general, Kimemia *et al.* (2000) sostienen que la altura de la planta, el diámetro al nivel del pecho (DAP), el número de ramas y los nudos primarios en café, no se ven afectados significativamente cuando se intercalan *Leucaena leucocephala*, *Sesbania sesban*, *Calliandra calothyrsus*, *Medicago sativum* y *Cajanus cajan*, como abonos verdes.

### 3.6.4 Analizar los efectos del estrato arbóreo sobre otros componentes de los Sistemas Agroforestales (SAF) con café

Es evidente el incremento de las plantaciones forestales, motivadas especialmente por el deseo de incrementar las áreas a reforestar, la protección de los recursos naturales, la biodiversidad y por los incentivos que se derivan de esta práctica. No obstante, la expansión causa polémicas sobre los efectos sociales, económicos, físicos y biológicos, específicamente cuando la reforestación se hace con especies de coníferas; sin embargo, son escasos los estudios que existen para precisar el efecto real de las plantaciones, especialmente en los aspectos físicos y biológicos. Con base a los conocimientos existentes pueden indicarse como los puntos más críticos del efecto del cultivo sobre el medio físico y biológico, los siguientes: El balance hídrico, la diversidad biológica de la flora y fauna, la estructura y las características químico-nutritivas del suelo.

Los resultados de estudios en sistemas forestales naturales indican diferencias en la dinámica químico-nutritiva, lo que ha motivado a desarrollar la hipótesis que “los bosques de árboles plantados en general causan una mayor acidificación del suelo que los bosques naturales”, sin embargo, la dinámica afecta al suelo mineral y depende además de las condiciones climáticas del sitio, la fertilidad del suelo, la composición química de los tejidos vegetales y de los organismos del suelo (Schlatter y Otero, 1995).

En los siguientes estudios se analizarán cuáles son los potenciales efectos que el componente forestal tendría sobre otros componentes de los SAF, como cambios químicos del suelo y disponibilidad de agua, entre otros.

#### 3.6.4.1 Cambios en la fertilidad del suelo

Diversos estudios confirman las bondades de especies leguminosas para ser empleadas como sombrío para el café, pero muy poco se ha estudiado sobre las interacciones biofísicas de sistemas agroforestales, los cuales involucran especies como pinos y eucaliptos en el componente arbóreo, que pueden tener potencial biológico y económico para ser empleadas con los mismos propósitos. Son muchas las especulaciones sobre los efectos que estas especies tendrían sobre los suelos y los cultivos, en este sentido, autores como Chang *et al.* (2002) y Dijkstra (2001), afirman que éstas utilizan toda el agua del suelo, acidifican y esterilizan el suelo, reducen la biodiversidad y son inhóspitas para la fauna, afectando además el clima.

Con el propósito de estudiar cómo interactúan los componentes de un sistema agroforestal, café - especies forestales, y su efecto en los cambios químicos del suelo, en el Centro Nacional

de Investigaciones de Café (Farfán, 2010), se estableció un estudio que permitió analizar estos cambios al plantar el café bajo sombrío de tres especies forestales de valor comercial. El estudio se localizó en la Estación Experimental Paraguaicito, otras características se presentan en la Tabla 56. El componente arbóreo del sistema fue *Cordia alliodora* (nogal cafetero), *Eucalyptus grandis* (eucalipto) y *Pinus oocarpa* (pino), establecidos a 6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha). El café se estableció a 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha).

**Tabla 56.**

Características químicas y físicas del suelo, Estación Experimental Paraguaicito-Quindío.

Características químicas	Rangos óptimos para café	Registrados <sup>10</sup>	
		0-30 cm	>30 cm
pH	5,0 – 5,5	5,7	6,1
Materia Orgánica (%)	8,0 – 14,0	6,8	1,9
Nitrógeno (%)		0,3	0,1
Fósforo (ppm)	6,0 – 14,0	2,0	4,6
Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,38 – 0,40	0,8	0,9
Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,8 – 2,4	6,9	2,9
Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,6 – 0,8	1,1	0,3
Aluminio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,0 – 1,1	0,1	0,04
Características físicas	Horizonte Ap	Horizonte AB	
Profundidad (cm)	0 - 54	54 - 80	
Textura horizonte	Franco Arenosa (FA)	Arenosa Franca (AF)	
Densidad aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	0,75	0,97	
Ecotopo	211A		
Unidad cartográfica	Consociación Montenegro (MN)		
Grupo taxonómico	Typic Hapludands		
Material parental	Cenizas volcánicas		

<sup>10</sup> Valor medio registrado entre 0-30 y >30 cm, al iniciar el estudio (1995).

Los cambios químicos en el suelo fueron evaluados en los sistemas de cultivo: (I) Café a libre exposición; (II) Café con sombrío de nogal; (III) Café con sombrío de pino; (IV) Café con sombrío de eucalipto. Adicionalmente, se realizaron comparaciones entre los requerimientos del café versus valores encontrados hasta el año 2005 en los sistemas evaluados. Los valores para cada variable evaluada al inicio del estudio (1995) y al final de éste (2005), así como los rangos óptimos reportados por Valencia y Carrillo (1983) para el café, se comparan en la Tabla 57. Los resultados analizados indican que:

- El pH disminuye en cualquier sistema de cultivo del café. Al final del período, el pH no es limitativo para la productividad del café y, por el contrario, se mantiene dentro de los rangos óptimos definidos para el cultivo.

- Los valores iniciales de materia orgánica y fósforo se encontraron por debajo de los rangos óptimos establecidos para el desarrollo del café, condición que no obedece al cultivo del café, sólo o en asocio con las especies forestales, sino a las propiedades químicas naturales de los suelos donde se realizó el estudio.
- Los niveles de potasio en el suelo, al final del período, disminuyeron sus concentraciones significativamente (entre el 42% y 59%) en las parcelas establecidas con café y sombrío de especies forestales, y esta disminución fue más crítica con sombrío de pino, donde los valores de potasio estuvieron por debajo del nivel mínimo establecido para café; condición preocupante, dadas las funciones que este elemento cumple en la planta (Por ejemplo, participa en procesos fotosintéticos, mayor asimilación de CO<sub>2</sub>, formación de glucósidos, aumenta la elaboración de prótidos a partir del nitrógeno mineral permitiendo una mejor utilización de los abonos nitrogenados, reduce la transpiración y contribuye a mantener la turgencia celular) (Valencia, 1999; Van Noordwijk, 2000).
- Las concentraciones de calcio y magnesio disminuyeron en el período de evaluación (10 años), tanto en los suelos establecidos con café sólo como en aquellos con café y especies forestales; sin embargo, al final del período las concentraciones registradas no indicaron limitación aparente para el desarrollo del café.
- Si bien las concentraciones de aluminio aumentaron, éstas en ningún caso llegaron a estar por encima de los niveles máximos tolerables.

**Tabla 57.**

Condiciones físico-químicas de suelos aptos para café (Valencia y Carrillo, 1983), y condiciones medias registradas en los primeros 30 cm de profundidad del suelo (Farfán, 2010).

Característica	CP	CA	PA	Condición registrada*							
				Café		Nogal		Pino		Eucalipto	
				Ini.	Fin.	Ini.	Fin.	Ini.	Fin.	Ini.	Fin.
pH (unidades)	4,0–4,9	5,0–5,5	>5,6	5,73	5,50	5,80	5,40	5,70	5,40	5,70	5,30
Materia orgánica (%)	9,0–11,4	>11,5		6,48	6,10	6,53	6,80	6,65	7,30	7,50	6,00
Fósforo (ppm)	0,0–6,0	6,0–14,0	>14,0	1,25	10,0	2,50	6,0	1,25	5,0	3,00	5,00
Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,0–0,29	0,30–0,40	>0,41	0,54	0,58	1,07	0,46	0,45	0,26	1,04	0,43
Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,0–1,6	1,6–4,2	>4,2	7,95	5,40	7,68	4,80	5,98	4,20	6,10	4,30
Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,0–0,5	0,–1,4	>1,4	1,20	1,00	1,28	1,00	0,90	0,60	1,18	0,90
Aluminio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )		0,0–1,0	>1,1	0,10	0,20	0,05	0,30	0,08	0,30	0,05	0,30
C.I.C. (cmol <sub>(c)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	2,0–5,0	6,0–10		18,0	17,0	16,5	17,0	18,3	15,0	18,3	19,0

CP: Condición de alerta. CA: Condición apta. PA: Problema aparente

De los análisis se concluye:

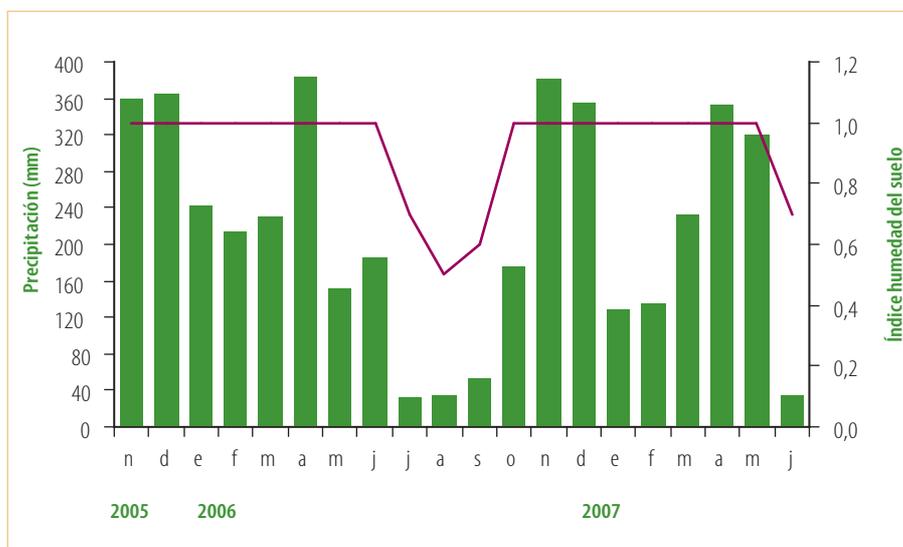
- Para los suelos donde se realizó el estudio, de alta fertilidad natural, las concentraciones de nutrientes observados después de 10 años, a excepción de la parcela en asocio con pino, no afectan las necesidades nutricionales del café.
- Basados en los cambios observados en las concentraciones de las bases cambiables ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ), al final del período, se pone de manifiesto que las especies forestales son grandes consumidoras de nutrientes, principalmente de  $K^+$ . La solución a esta situación de competencia impuesta por las especies forestales por el potasio, es mantener con ayuda de los análisis de suelos, por lo menos cada 2 años, los contenidos del potasio en el suelo, en unos niveles que no afecten los requerimientos nutricionales del café.

#### 3.6.4.2 Disponibilidad de agua en el suelo en sistemas agroforestales con café

Para minimizar los efectos que los períodos secos prolongados causan al cultivo del café, una de las alternativas es hacer su cultivo bajo árboles de sombra, con el propósito de conservar la humedad del suelo; el sistema de raíces en particular, junto con la cobertura dada por el árbol pueden tener efectos indirectos sobre el suelo, como es la disponibilidad de agua para el cultivo principal. Pero como lo plantean Franco e Inforzato (1950) y Franco (1952), los árboles de sombra consumen agua por transpiración y, por tanto, pueden competir con la disponibilidad de agua para el cafeto, en vista que la transpiración de una planta de *Inga* sp. es equivalente a la transpiración de diez plantas de café. En comunidades arbóreas, el número de especies y la cantidad de biomasa producida por las plantas es un determinante de las características del ecosistema y estos dos factores dependen en un alto grado de la cantidad y la distribución espacial de la humedad del suelo disponible para las plantas (Breshears y Barnes, 1999).

En la Finca La Suecia, Farfán y Menza (2010), realizaron un estudio como contribución al mejoramiento de las condiciones de producción en muchas áreas de la zona cafetera colombiana, específicamente en aquellas que presentan períodos secos prolongados. La precipitación y el Índice de Humedad del Suelo (IHS) durante el período de análisis (2005-2007) se presentan en la Figura 92. La precipitación tiene un comportamiento monomodal, caracterizado por un período seco entre junio y septiembre, seguido de un período lluvioso el resto del año; la distribución de la cantidad de lluvia en esta región se registra así: 40% en el primer semestre y 60% en el segundo semestre del año (Jaramillo, 2005); este patrón de distribución de lluvias se presentó en la zona de estudio.

**Figura 92.**  
Valores mensuales de precipitación e Índice de Humedad del Suelo (IHS). Finca la Suecia-El Tambo, Cauca.



Los sistemas agroforestales estructurados para la evaluación fueron, café con sombrío de *Eucalyptus grandis*, café con sombrío de *Pinus chiapensis*, café con sombrío de *Pinus tecunumanii*, café con sombrío de *Inga densiflora* y café a libre exposición solar. Cada unidad de evaluación contó con 36 árboles de sombrío plantados a 6,0 m x 6,0 m; al interior de este arreglo espacial se plantó el café a 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha); cada parcela ocupó 1.296 m<sup>2</sup>.

**Cuantificación y registro de la humedad del suelo.** El agua disponible para las plantas se refiere al nivel de humedad del suelo comprendido entre los porcentajes de la humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP); la CC corresponde al contenido de humedad después de que el agua drene libremente por los poros grandes del suelo, y el PMP es el contenido mínimo de agua del suelo, en el cual las plantas la pueden extraer. La humedad en el suelo depende de sus propiedades físicas e hidráulicas y de la dinámica hidrológica del sitio (Li, 2003).

Para cuantificar la humedad del suelo se utilizó el método de Bouyoucos o de bloques de resistencia eléctrica, con sensores tipo "Soil Block, Model 6450WD". El sensor consiste en un bloque de yeso que contiene dos electrodos, localizados en el interior del material poroso. Los electrodos van unidos a cables eléctricos, los cuales se entierran en el suelo a diferentes profundidades. El principio de su funcionamiento se basa en la resistencia eléctrica, a mayor humedad en el suelo menor resistencia eléctrica, por ejemplo, un suelo saturado tiene una resistencia que varía entre 440 y 450 ohm, para la humedad a la capacidad de campo es de 650 ohmios y para el punto de marchitez permanente está próximo 25.000 ohmios (Challenge Agriculture, 1998). Para registrar y almacenar la información de humedad de suelo se empleó un medidor de corriente alterna

“Digital Soil Moisture Meter, Model A-75”; los registros se expresaron en porcentaje de agua en el suelo.

**Instalación de los bloques de resistencia eléctrica.** Los bloques de resistencia se instalaron en cada unidad experimental a tres profundidades del suelo (5, 10 y 20 cm) y a una distancia de 1,5 m, 3,0 m y 4,5 m del árbol de sombrero, cuando los árboles tenían 5 años aproximadamente. Por cada unidad experimental se instalaron tres bloques, en diez unidades experimentales, para un total de 70 bloques. Las medidas de humedad se realizaron cada 10 días, desde noviembre de 2005 hasta noviembre de 2007.

**Determinación de la humedad gravimétrica (H).** Los registros obtenidos en el campo con el Digital Soil Moisture Meter (como porcentaje de humedad de 0% a 100%), se transformaron a humedad gravimétrica (H%), aplicando la Ecuación <8>:

$$H (\%) = 29,5 + 0,14 (\text{lectura}) \quad <8>$$

Las expresiones se estimaron a partir de los gráficos de calibración registrados con el equipo Soil Moisture Meter, Model A-75 (ELE, 1998).

**Humedad volumétrica del suelo ( $\theta$ ).** La humedad volumétrica ( $\theta$  mm), se estimó mediante la Ecuación <9>:

$$\theta(\text{mm}) = [(H \%) (\text{Densidad aparente}) (\text{Profundidad en el suelo})] / 10 \quad <9>$$

Los registros de  $\theta$  se obtuvieron del promedio de 10 días, de los datos recopilados en el período 2005 al 2007, los cuales se llevaron a gráficos para interpretar la dinámica de la humedad en el suelo para cada uno de los tratamientos. Posteriormente, la  $\theta$  se correlacionó, mediante modelos lineales, con el IHS (cada 10 días) para el mismo período, con el fin de determinar el intercepto o volumen de agua crítico (mm) en el suelo, cuando el IHS fuera 0,5 (como límite inferior para café). Los resultados del estudio fueron:

- **Agrosistema café con *Eucalyptus grandis*.** En la Tabla 58 se presenta el volumen crítico y las deficiencias hídricas estimadas, y en la Figura 93 se presenta la humedad volumétrica (mm) decadal a 5, 10 y 20 cm de profundidad del suelo (2005 a 2007). Finca La Suecia, El Tambo-Cauca.

Los niveles críticos establecidos a las tres profundidades fueron 10,0; 21,1 y 42,5 mm respectivamente, es decir, registros de humedad por debajo de estos valores indican deficiencias

hídricas que podrían tener efectos detrimentales en el desarrollo del café. De los análisis realizados en el período noviembre de 2005 a julio de 2007, pudo establecerse que a 5 cm de profundidad la disponibilidad de agua en el suelo en el mes de septiembre de 2006 fue de 10,4 mm; a 10 cm fue de 21,0 mm y a 20 cm de 41,7 mm, indicando deficiencias hídricas en el suelo. A 5 cm de profundidad desde junio de 2006 y hasta mayo de 2007, y a 10 y 20 cm, para los meses de julio de 2006 y enero y mayo de 2007, se registraron valores de humedad volumétrica del suelo cercanos a los límites inferiores establecidos para el café en este sistema de producción.

**Tabla 58.**

Volumen crítico y deficiencias hídricas estimadas a una profundidad del suelo de 5, 10 y 20 cm. Finca La Suecia, El Tambo-Cauca.

Especies	Funciones	R <sup>2</sup>	Volumen crítico (mm)	Deficiencia hídrica mm.mes <sup>-1</sup> (2006)*	
<b>5,0 cm de profundidad en el suelo</b>					
<i>E. grandis</i>	$y = 2,25IHS + 9,57$	0,99	10,6	10,4	sep
<i>P. chiapensis</i>	$y = 2,14IHS + 9,73$	0,99	10,8	10,4	sep
<i>P. tecunumanii</i>	$y = 2,78LHS + 9,12$	0,24	10,5	10,5	sep
<i>I. densiflora</i>	$y = 2,71IHS + 9,56$	0,19	10,9	10,7	sep
Café al sol	$y = 2,43IHS + 9,48$	0,19	10,7	10,4	sep
<b>10,0 cm de profundidad en el suelo</b>					
<i>E. grandis</i>	$y = 6,23IHS + 17,96$	0,99	21,1	21,0	sep
<i>P. chiapensis</i>	$y = 5,65IHS + 18,18$	0,19	21,0	20,7	sep
<i>P. tecunumanii</i>	$y = 5,70IHS + 18,14$	0,26	21,0	21,3	sep
<i>I. densiflora</i>	$y = 4,94IHS + 19,51$	0,18	22,0	21,3	sep
Café al sol	$y = 4,76IHS + 19,15$	0,18	21,5	21,0	sep
<b>20,0 cm de profundidad en el suelo</b>					
<i>E. grandis</i>	$y = 12,69IHS + 36,15$	0,28	42,5	41,7	sep
<i>P. chiapensis</i>	$y = 12,68IHS + 35,55$	0,21	41,9	41,4	sep
<i>P. tecunumanii</i>	$y = 12,06IHS + 36,09$	0,28	42,1	41,7	sep
<i>I. densiflora</i>	$y = 11,42IHS + 37,31$	0,99	43,0	42,4	sep
Café al sol	$y = 12,06IHS + 36,74$	0,23	42,8	41,8	sep

\*En los años 2005 y 2007 no se presentaron deficiencias hídricas o fueron no significativas; IHS: Índice de Humedad del Suelo

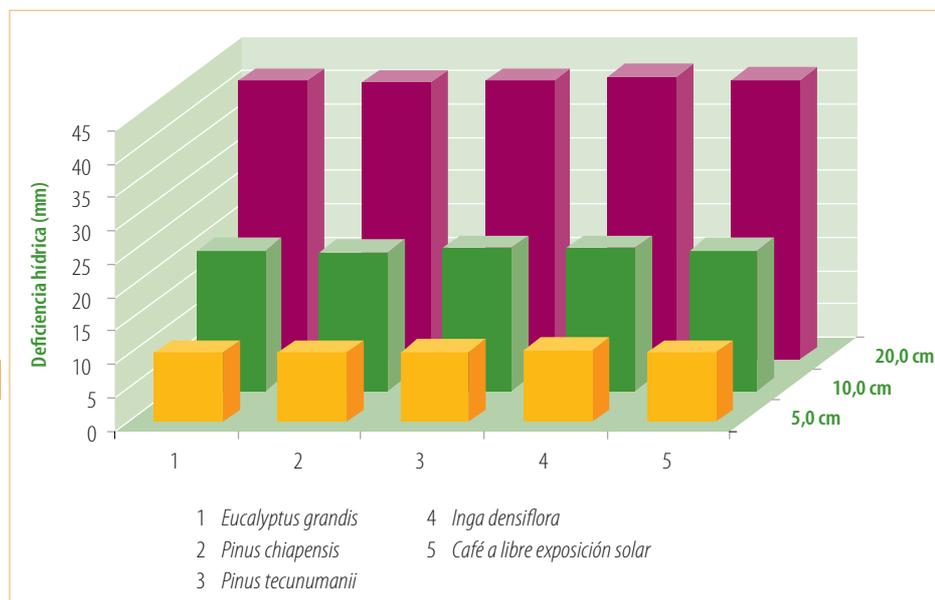
Bharati *et al.* (2002), Li (2003) y Rodríguez *et al.* (2001), afirman que el agua disponible en el suelo es controlada por la lluvia, por los cambios en la temperatura, por las características del suelo y por los procesos de infiltración. Jaramillo (2003) y Villegas (2004), indican que parte de la precipitación incidente en un área determinada es interceptada por la vegetación, lo que provoca una disminución de la cantidad de agua que llega al suelo; esta interceptación está relacionada

con la precipitación total, la densidad de la cobertura, la estratificación de los árboles y el manejo silvicultural, entre otros aspectos.

- **Agrosistema café con *Pinus tecunumanii*.** Los niveles críticos establecidos a las tres profundidades de 5, 10 y 20 cm fueron 10,5; 21,0 y 42,1 mm, respectivamente, es decir, registros de humedad por debajo de estos valores indican deficiencias hídricas en el suelo que podrían tener efectos detrimentales en el desarrollo del café.

**Figura 93.**

Humedad volumétrica (mm) (2005 a 2007) en tres profundidades del suelo. Finca la Suecia, El Tambo-Cauca.



De los análisis realizados en el período noviembre de 2005 a julio de 2007, pudo establecerse que a 5 cm de profundidad la disponibilidad de agua en el suelo en el mes de septiembre de 2006 fue de 10,5 mm, a 10 cm fue de 21,3 mm y a 20 cm de 41,7 mm, indicando deficiencias hídricas en el suelo. A 5 cm de profundidad desde junio de 2006 y hasta mayo de 2007, y a 10 y 20 cm para los meses de julio de 2006 y enero y mayo de 2007, se registraron valores de humedad volumétrica del suelo cercanos a los límites inferiores establecidos para el café en este sistema de producción.

- **Agrosistema café con *Inga densiflora*.** Los niveles críticos a las profundidades del suelo a 5, 10 y 20 cm fueron 10,9; 22,0 y 43,0 mm, respectivamente, es decir, registros de humedad por debajo de estos valores indican deficiencias hídricas en el suelo que podrían tener efectos detrimentales en el desarrollo del café. De los análisis realizados en el período noviembre de 2005 a julio de 2007, pudo establecerse que a 5 cm de profundidad la disponibilidad de agua en el suelo en el mes de septiembre de 2006 fue de 10,7 mm, a 10 cm fue de 21,3 mm y a 20 cm de 42,4 mm, indicando deficiencias hídricas en el suelo; también fue evidente esta deficiencia en el mes de julio de 2006 a 5 cm de profundidad (10,9 mm). Livesley *et al.* (2004), registraron mayor cantidad de agua almacenada en el

suelo con maíz en monocultivo, que en sistemas agroforestales con *Grevillea robusta* y *Senna spectabilis*. Powell y Bork (2007), observaron que en épocas secas la humedad del suelo era 5,2% más alta en parcelas con *Populus tremuloides* que en parcelas solas, y le atribuyeron este efecto a la cobertura dada por la fronda de los árboles y a la cobertura muerta producida por ellos.

- **Café a libre exposición solar.** La humedad volumétrica del suelo a 5, 10 y 20 cm de profundidad y los niveles críticos estimados se presentan en la Tabla 58. Los niveles fueron de 10,7; 22,5 y 42,8 mm respectivamente, es decir, registros de humedad por debajo de estos valores indican deficiencias hídricas en el suelo que podrían tener efectos detrimentales en el desarrollo del café. De los análisis realizados en el período noviembre de 2005 a julio de 2007, pudo establecerse que a 5 cm de profundidad la disponibilidad de agua en el suelo en el mes de septiembre de 2006 fue de 10,4 mm, a 10 cm de 21,0 mm y a 20 cm de 41,8 mm, indicando deficiencias hídricas en el suelo; también fue evidente esta deficiencia en el mes de enero de 2007 a 5 y 10 cm de profundidad (10,7 mm y 21,4 mm). No obstante y prácticamente a 5 cm de profundidad, desde junio de 2006 y hasta mayo de 2007, y a 10 y 20 cm, para los meses de julio de 2006 y enero y mayo de 2007 se registraron valores de humedad volumétrica del suelo cercanos a los límites inferiores establecidos para el café cultivado sin árboles de sombrío.

Vidhana y Liyanage (2003), sostienen que las pérdidas de agua en la superficie del suelo (0 a 20 cm de profundidad) en los cultivos intercalados, son menores que las registradas en suelo desnudo. Además, estos autores afirman que las especies leguminosas extraen agua principalmente entre los 20 y 100 cm, con mayor disponibilidad de agua en el suelo en cultivos con especies arbóreas interplantadas que en los monocultivos. Radersma *et al.* (2006), en cultivos de *Eucalyptus grandis*, *Grevillea robusta* y *Cedrella serrata* encontraron mayor cantidad de agua disponible en el suelo con *G. robusta*, debido posiblemente al extenso sistema de raíces de los árboles y a los suelos arcillosos profundos, que proveen suficiente agua para los árboles. En sistemas agroforestales, la cantidad y la distribución espacial de la humedad del suelo disponible para las plantas depende en alto grado del número de árboles y de la cantidad de biomasa producida (Breshears y Barnes, 1999).

En general, a 5 y 10 cm de profundidad del suelo y en el mes de mayo de 2007 fue menor la disponibilidad de agua en suelo en el agrosistema café con sombrío de *P. chiapensis*, al compararse con los otros sistemas de cultivo; si bien no se presentaron deficiencias hídricas en el suelo a 20 cm de profundidad y en este mismo período, la humedad volumétrica en el suelo tuvo el mismo comportamiento anterior, es decir, menor en el agrosistema café y *P. chiapensis*. En plantaciones de *Cocos nucifera* intercalados con *Calliandra calothyrsus*, *Leucaena leucocephala*, *Acacia auriculiformis* y *Gliricidia sepium*, Vidhana y Liyanage (2003), observaron que el contenido de agua es mayor en las asociaciones *Cocos*/leguminosas comparado con el monocultivo. En sistemas agroforestales *Zea mays* y *Vigna unguiculata* en rotación con el componente arbóreo

de *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium*, Lal (1989) encontró que la humedad en la capa superior del suelo (0-5 cm) en las estaciones secas, generalmente era más alta en los sistemas agroforestales que en maíz y caupí, solos.

En el mes de septiembre de 2006, época en la que se registran las deficiencias hídricas en los sistemas de cultivo, se conservó más humedad en el suelo a 5 cm de profundidad en el sistema *café + I. densiflora*, a 10 cm en el sistema *café + P. chiapensis* y a 20 cm en el sistema *café + I. densiflora*. De acuerdo con Bohlman *et al.* (1995), el mulch producido por los árboles, en bosques tropicales, tiene un efecto conservador de la humedad, debido a que en estos sistemas los suelos forestales son húmedos (70% de humedad) en las épocas lluviosas y esta humedad sólo se reduce en un 19% durante las épocas secas.

No obstante, González *et al.* (2001), observaron que el mulch provoca una disminución entre el 5,0% y 10,0% de la evaporación anual asociada a un aumento de la transpiración, lo cual es responsable de una humedad superficial más alta en el suelo. Livesley *et al.* (2004), indican que el contenido de agua del suelo depende básicamente de la distancia de siembra y especie de árbol; en sistemas agroforestales con cultivos de *Sorghum bicolor* e *Hibiscus sabdariffa* en rotación, con *Acacia senegal* (266 a 433 árboles/ha), Gaafar *et al.* (2006) observaron que esta asociación afecta negativamente la disponibilidad de agua en el suelo y recomiendan para estos sistemas de cultivo una baja densidad de árboles.

### 3.6.4.3 Efecto de la sombra sobre la distribución de la cosecha del café

Desde la floración hasta la maduración de los frutos transcurren de 7 a 8 meses, pero debido a que en nuestras condiciones ambientales se favorece el desarrollo sucesivo de las flores sobre los nudos, esto trae como consecuencia que en las ramas se encuentren frutos en diferentes estados de desarrollo en forma simultánea. Además, la distribución de la cosecha depende de los patrones de floración de cada región. Frecuentemente se tiene la inquietud acerca de la variación de la distribución de la cosecha según la variedad de café. Este fenómeno está estrechamente ligado con las condiciones ambientales, específicamente, con la distribución de las lluvias. Es decir, para un cultivo de la variedad Colombia de la misma edad, sembrado simultáneamente en 17 localidades, la variación de la distribución de la cosecha es muy amplia y el comportamiento es específico para cada localidad (Arcila, 2007).

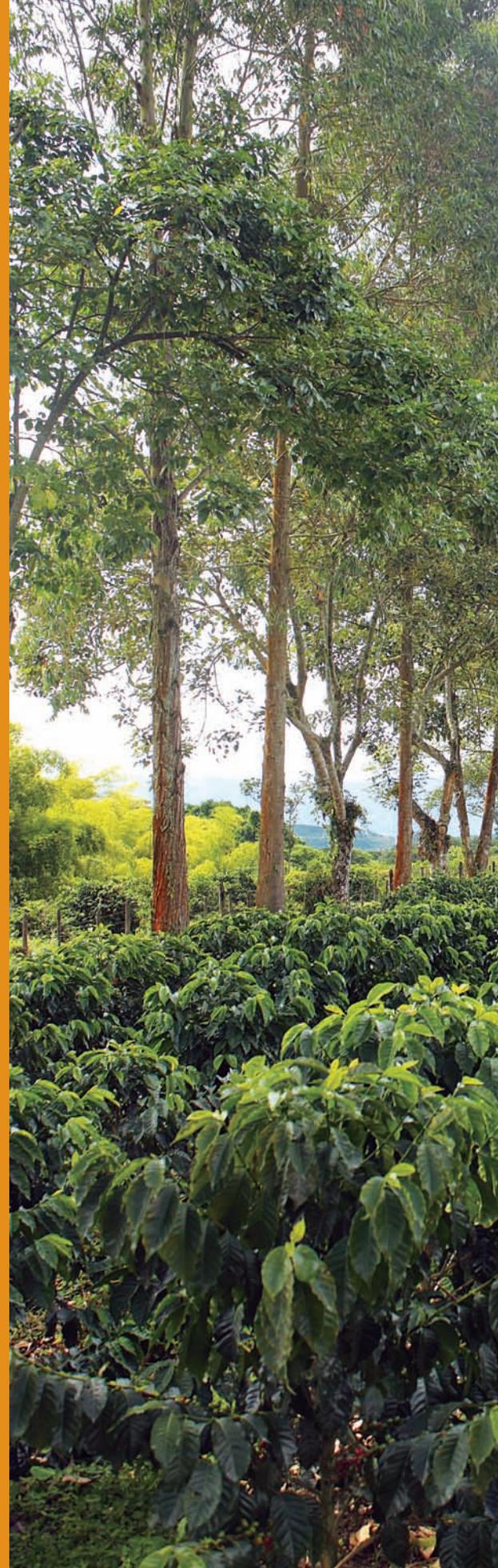
En la Figura 94 se presenta la distribución de la cosecha en tres localidades de la zona cafetera colombiana (Norte, centro y sur). En estos estudios, el sombrío fue establecido a 6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha), 9,0 m x 9,0 m (123 árboles/ha) y a 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha); el café fue establecido a 1,5 m x 1,5 m (4.444 plantas/ha) en todas las localidades.

- **Pueblo Bello (Cesar)**, zona cafetera norte. El promedio del nivel de sombra (1998 a 2001) en que se desarrolló el cultivo del café fue del 58% con 278 árboles de *Inga edulis*

por hectárea, del 50% con 123 árboles/ha y del 34% con 70 árboles/ha (Farfán y Mestre, 2004b). La distribución anual de la cosecha en los tres subsistemas estudiados, en el ciclo 1997 a 2003, se presenta en la Figura 94. En el Subsistema con sombrío a 6,0 m x 6,0 m, el 95% de la cosecha se concentra en el segundo semestre del año. En los subsistemas con sombrío a 9,0 m x 9,0 m y 12,0 m x 12,0 m, se concentra el 93% y 92% de la cosecha respectivamente, en este mismo período, y es en los meses de octubre a noviembre donde se distribuye toda la cosecha.

Por encima de los 9° de latitud Norte, los cafetales presentan tendencia a florecer hacia los meses de marzo y abril; en este patrón se ubica principalmente la caficultura de los departamentos de Cesar, Magdalena y La Guajira (Arcila y Jaramillo, 2003; Jaramillo, 2005). Estas floraciones son responsables por lo menos del 90% de la cosecha que se recolecta en la zona entre noviembre y enero. Los rangos de distribución de la cosecha de café en la zona norte de Colombia (departamentos cafeteros de Cesar, La Guajira y Magdalena), se ubican entre el 88% y el 97% en el segundo semestre del año y entre el 12% y 3% en el primer semestre (Bedoya *et al.*, 1997). En la zona de estudio se obtuvo que la distribución media anual de la cosecha de los tres subsistemas fue del 93% en el segundo semestre y del 7% en el primero.

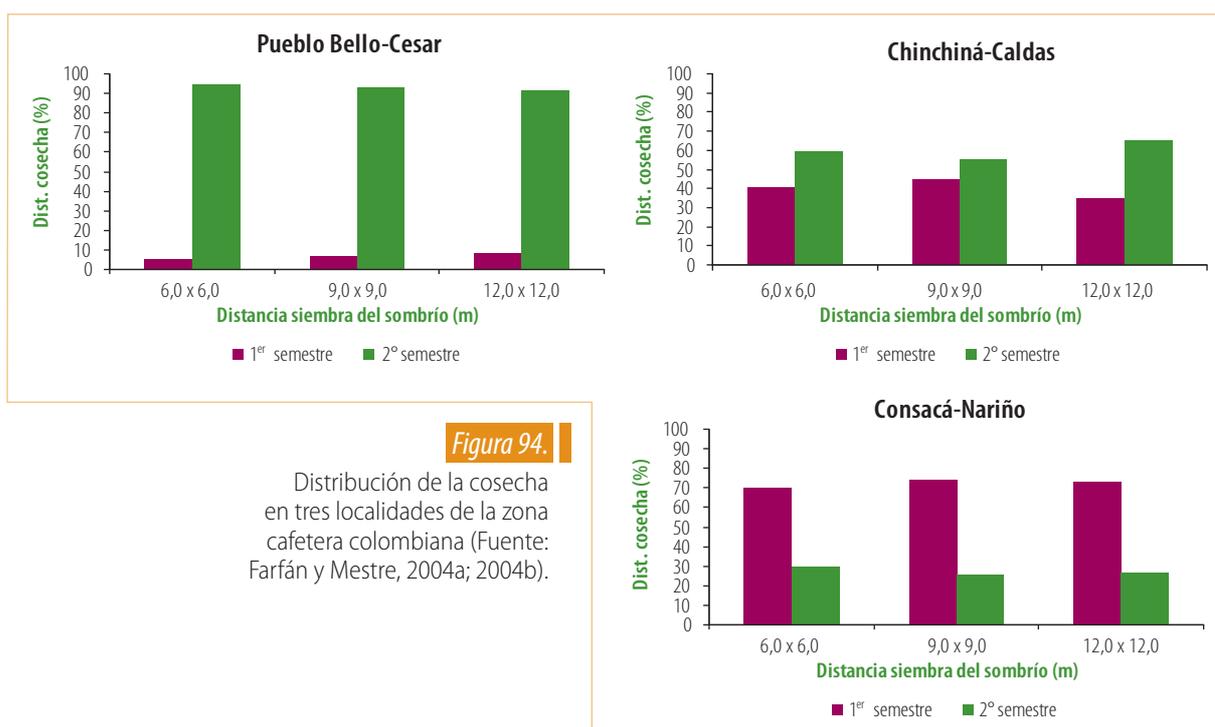
- **Chinchiná (Caldas), zona cafetera central.** El promedio del porcentaje de interceptación de RFA registrado en cada una de las distancias de siembra del sombrío, durante 3 años, mostró que a 6,0 x 6,0 m el promedio fue del 70%, a 9,0 x 9,0 m del 60% y a 12,0 x 12,0 m del 45% (Farfán y Mestre, 2004a). La distribución anual de la cosecha en los tres subsistemas estudiados, en el ciclo 1996 a 1999, se presenta en la Figura 94. En el subsistema con sombrío a 6,0 x 6,0 m en los meses de enero a junio se concentra el 41% de la cosecha y en el período julio a diciembre el 59%. En el subsistema con sombrío a 9,0 x 9,0 m, en el primer semestre se concentra el 45% de la cosecha y en el segundo semestre el 55%, y en el subsistema con sombrío a 12,0 x 12,0 m, en el período



enero a junio se concentra el 35% de la cosecha y el 65% en el período julio-diciembre. Uribe (1977) obtuvo que en estos mismos períodos (enero-junio y julio-diciembre) se concentra el 20% y el 80% de la cosecha (café variedad Caturra a libre exposición) en la Estación Central Naranjal, y Alvarado y Moreno (1999), reportan para café variedad Colombia al sol concentraciones del 27,5% en el primer semestre y del 72,5% en el segundo, en la misma localidad.

Al comparar la distribución anual de la cosecha de dos sistemas de cultivo de café (bajo sombrío y a libre exposición) se obtiene que bajo sombrío la cosecha se distribuye así: 40% en el primer semestre del año y 60% en el segundo; a libre exposición esta distribución es 24% y 76% en el primero y segundo semestre del año; lo que permite inferir que en la zona central cafetera, el sombrío altera los patrones de distribución de la cosecha (Farfán y Mestre, 2004a).

- Consacá (Nariño), zona cafetera sur.** El promedio del porcentaje de interceptación de RFA registrado en cada una de las distancias de siembra del sombrío, durante 3 años, mostró que a 6,0 x 6,0 m este nivel de sombrío fue del 53%, a 9,0 x 9,0 m del 40% y a 12,0 x 12,0 m del 27%. La distribución anual de la cosecha en los tres subsistemas estudiados en el ciclo 1997 a 1999, se presenta en la Figura 94. De ésta se observa que en el subsistema con sombrío a 6,0 x



6,0 m el 70% de la cosecha se concentra en el primer semestre del año y 30% en el segundo. En los subsistemas con sombrío a 9,0 x 9,0 m y 12,0 x 12,0 m, se concentra el 74% y el 73% en este mismo período, respectivamente, y en el segundo semestre del año se concentra el 26% y 27% de la cosecha en estos dos subsistemas. Bedoya *et al.* (1997), informan que la distribución anual de la cosecha para el departamento de Nariño se ubica en rangos del 83% al 91% en el primer semestre del año y entre el 17% y 9% en el segundo semestre.

### 3.6.5 Establecer un plan de formación y mantenimiento de los árboles de sombrío

De acuerdo a lo planteado, se considera que el sombrío para un cafetal sin que disminuya su producción debe fluctuar entre 0% y 45%, dependiendo de la zona de cultivo, ya que sus componentes son la suma de un sombrío natural, debido a la nubosidad de la región y al sombrío de los árboles; por tanto, los porcentajes de sombrío (si se debe o quiere establecer sombra al café) deben ajustarse para cada localidad. El ajuste del nivel de sombrío se hace interviniendo cada especie de árbol en particular y cada especie de sombra debe tener un manejo diferenciado del resto de las especies que se utilizan para dar sombra al cultivo (Beer *et al.*, 2003). El manejo del árbol depende de la fisiología del cultivo asociado y sus necesidades microclimáticas, la fenología de la especie de sombra, el clima y suelo local, las características de crecimiento del árbol de sombra y su tolerancia a podas y las percepciones de los agricultores sobre las diferentes especies de sombra y cultivos asociados.

Las condiciones de sombra óptimas pueden obtenerse con doseles de diferente diseño, por ejemplo, con un dosel monoespecífico de *Inga edulis* o con un dosel estratificado de *Erythrina poeppigiana* plantado y *Cordia alliodora* de regeneración natural. Si el diseño del dosel es diferente, el manejo de las especies debe serlo también para obtener el patrón de sombra deseado. Así, se puede podar *Erythrina poeppigiana* dos a tres veces e *Inga edulis* solo una vez por año. De esta forma se manipulan las densidades y patrones de plantación de cada especie, se seleccionan especies maderables que pierden el follaje en los meses en que el cultivo necesita mucha luz, entre otros aspectos. Por el contrario, debe evitar imponerse un mismo ritmo de podas, pues favorecerá a unas especies y afectará desfavorablemente a otras. En maderables, la selección de la especie (forma de su copa, densidad del follaje, fenología, etc.) y su manejo (espaciamiento inicial, arreglo de plantación, raleos), son vitales para mantener la sombra de cultivos perennes como café dentro de niveles aceptables (Beer *et al.*, 2003).

De acuerdo con la FNC (1958), el manejo del sombrío en el café, debe contemplar:

- Si se trata de árboles “resecadores” y la región es de lluvias escasas, se debe aconsejar otros árboles para sombrío que además de no ser agotadores del agua reúnan los demás requisitos necesarios.

- Con “suelos poco profundos” y distancias largas para sombrero es necesario recomendar siembras intercaladas para cubrir mejor el cafetal.
- Si la plantación muestra demasiada sombra, se deben analizar y corregir los factores responsables de la disminución de la luz. Los factores son: (a) Elevaciones de colinas y montañas; (b) Proyección de las hojas y ramas de las mismas plantas o las vecinas; (c) El follaje de los árboles de sombra; (d) Condiciones climáticas.
- Se puede sembrar más sombrero, según las condiciones del suelo, la lluvia y la altitud.
- Si se observan ciertos árboles perjudiciales dentro de la plantación, es necesario cambiarlos y se debe practicar el descumbre metódico cada año o cuando la regulación lo requiera.

### 3.6.5.1 Podas de formación de los árboles

Estas labores corresponden a la poda realizada sobre especies arbóreas desde los primeros años de vida hasta que alcanzan su madurez, con el fin de obtener: Una estructura fuerte, facilitar el crecimiento según su localización, obtener una estética determinada, o bien, dirigir su crecimiento según el fin deseado. La estructura del árbol puede ser mejorada mediante la eliminación de ramas, asegurando una buena estructura de éstas cuando el árbol envejezca; para ello es fundamental el reconocimiento de la especie, su modelo de crecimiento y sus fases de desarrollo; se debe evitar hacer cortes demasiado pronto, puesto que se limita el crecimiento en grosor del tronco y cortes demasiado tardíos, porque se ocasionarían heridas de mayor tamaño. Existen una serie de pasos que deben cumplirse para la formación de los árboles, independiente del porte final deseado para el árbol (Llorens, 1999) (Figura 95):

**Paso 1.** Eliminar ramas rotas, enfermas, moribundas o muertas. Parte o toda la rama.

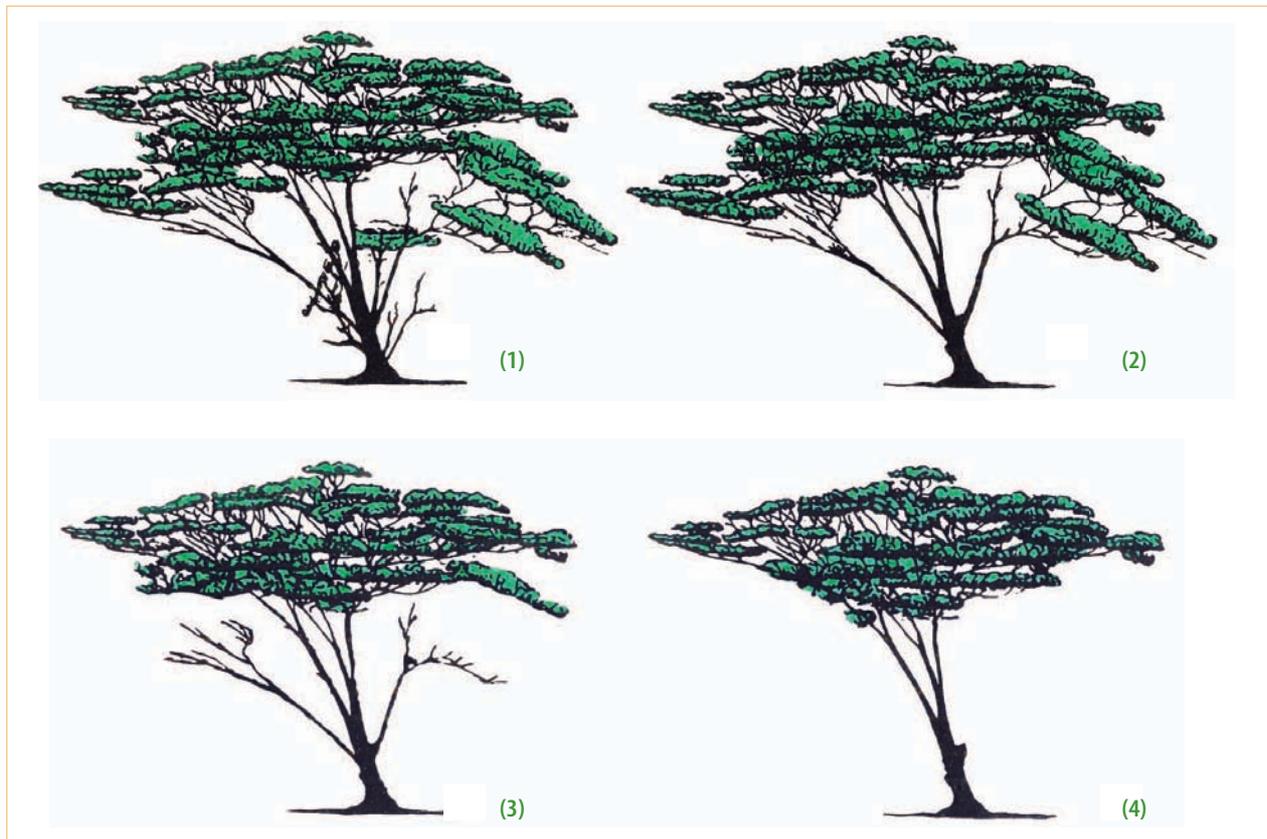
**Paso 2.** Seleccionar una guía, la más vertical y vigorosa, y eliminar otras ramas que compitan con ella. Este paso se aplica para reconstrucciones de copa, especies de porte pequeño, mediano y grande.

**Paso 3.** Seleccionar la rama permanente más baja.

**Paso 4.** Seleccionar las ramas que formarán el esqueleto definitivo y reducir o eliminar aquellas que sean competidoras.

**Paso 5.** Respetar ramas temporales, por debajo de la permanente más baja

El árbol adecuadamente podado y formado, se presenta en la Figura 96.

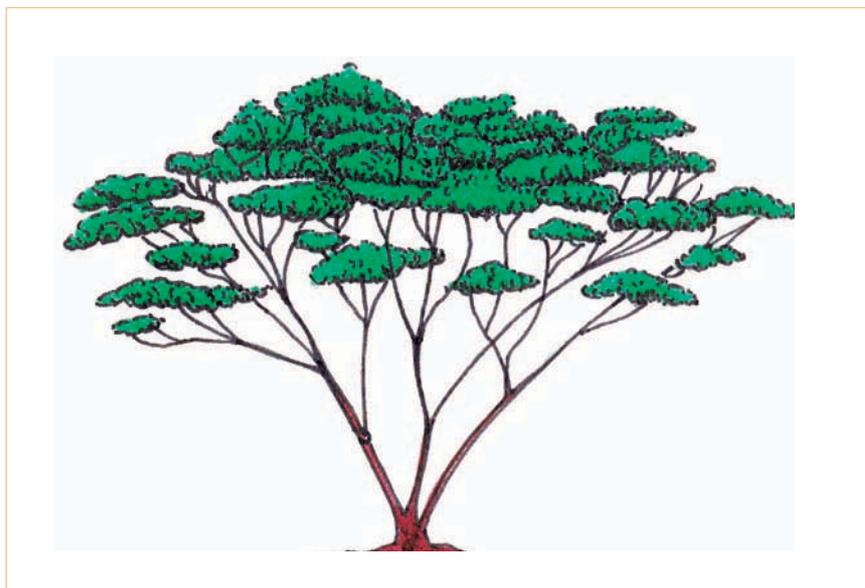


**Figura 95.**

Secuencia en la poda y formación de un árbol. (1) Antes de la poda; (2) Poda de limpieza; (3) Poda de aclareo; (4) Poda de formación.

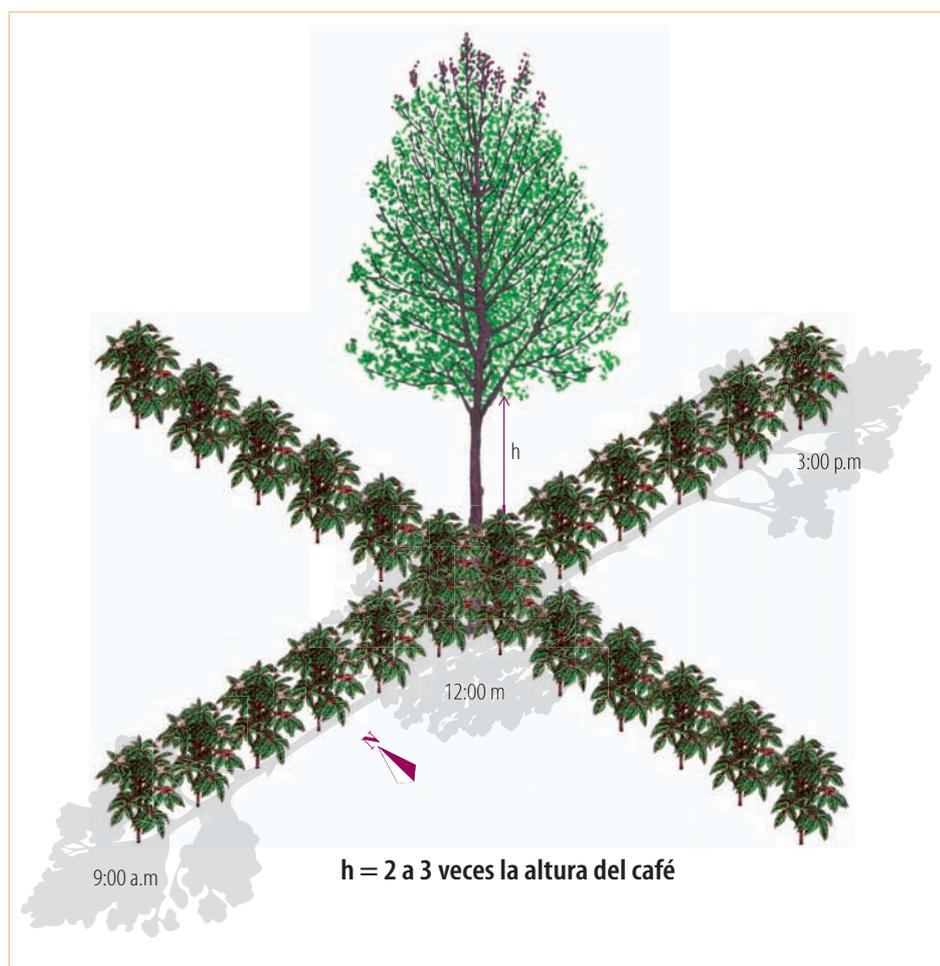
**Figura 96.**

Árbol de *Inga edulis* (guamo santafereño), adecuadamente podado y formado.



### 3.6.5.2 Podas de mantenimiento de los árboles de sombra

En los primeros años de establecimiento de los árboles debe iniciarse la poda para formar un solo tronco de 2 a 4 m, y a partir de allí, la copa necesaria. Posteriormente debe efectuarse la poda de “mantenimiento o aclareo”, una vez al año, para permitir la entrada de luz necesaria y garantizar una adecuada distribución en el cafetal. Se deben escoger las ramas que estén a una altura conveniente alrededor del árbol, eliminando con la poda aquellas ramas que se encuentren sobre o debajo de ésta, o sea, evitar tener sombra sobre la sombra. El estrato del ramaje del árbol para la sombra debe estar tres veces por encima de la altura del café, es decir, si el café tiene 2,0 m de altura el ramaje del árbol debe estar a 6,0 m (Figura 97). El propósito de podar los árboles de sombra en el café (Procafé, 2004) es: (i) Obtener mejor productividad; (ii) Lograr una maduración uniforme; (iii) Mayor aprovechamiento de los fertilizantes; (v) Disminuir la incidencia de plagas y enfermedades; (vi) Proporcionar luz cuando es necesaria.



**Figura 97.**

Árbol con un tronco podado y bien formado, para mantener la sombra lejos del cultivo en un un SAF con café.

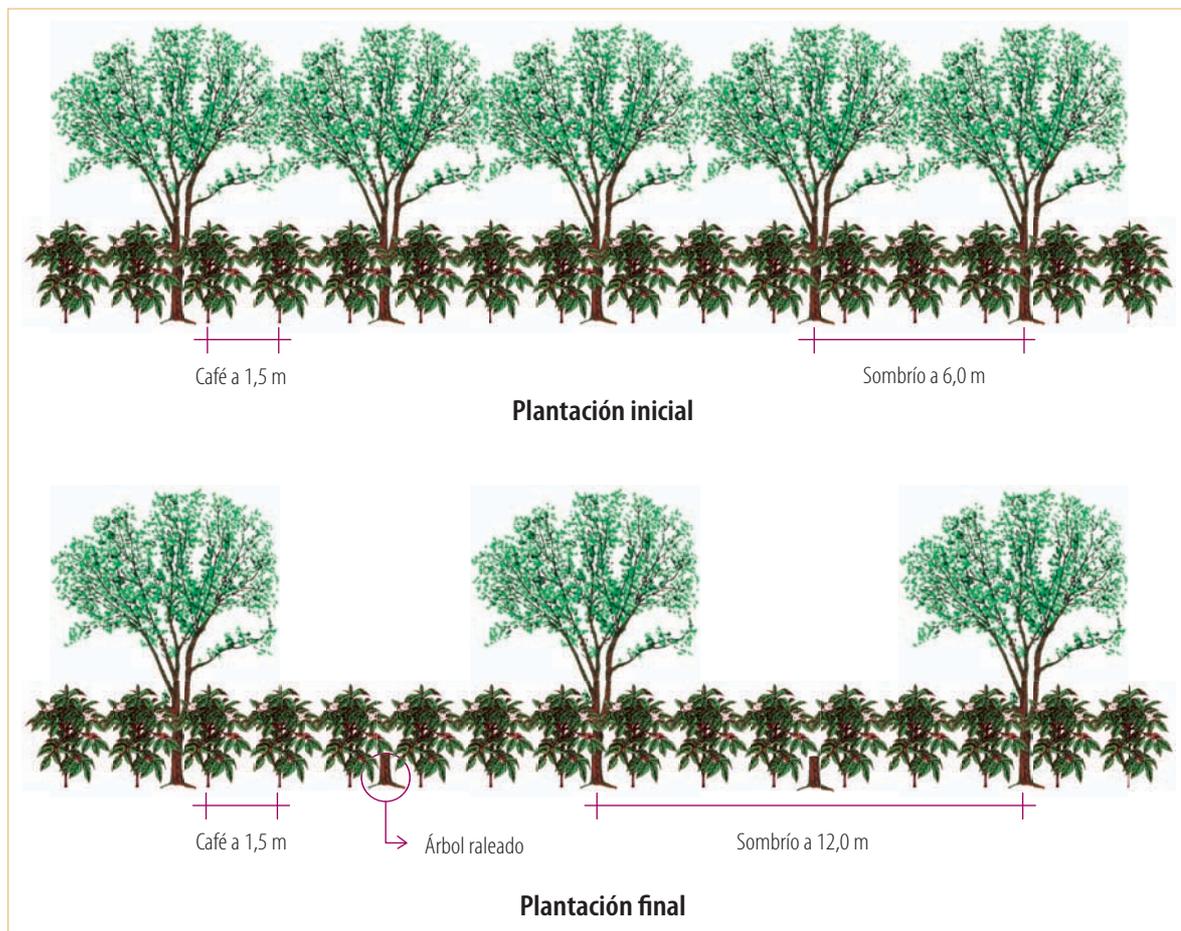
Los árboles en sistemas agroforestales tienden a ramificar más que en las plantaciones en bloque, debido a los mayores espaciamientos que dan menor competencia lateral, y por tanto, necesitan podas más frecuentes e intensivas. La época para realizar las podas depende de las condiciones climáticas del sitio (por ejemplo, no podar en época seca en el caso de combinaciones con cultivos que necesitan protección del sol en verano) y los períodos de desarrollo de los árboles (Beer *et al.*, 2003).

Una poda prematura podría provocar mala forma, por lo cual se recomienda buscar recomendaciones técnicas antes de iniciar podas fuertes. Las podas de árboles maderables, especialmente en sistemas agroforestales, también podrían cumplir un papel importante en la mejora de la calidad de la madera, además de dar productos adicionales para el agricultor (por ejemplo, forraje, leña, postes). Es importante que las podas se realicen a nivel de la corteza del fuste pero sin dañarlo; si se dejan proyecciones de ramas (una práctica común entre los agricultores), éstas se convertirán en nudos muertos, los cuales reducirán la calidad de la madera y hasta son puntos de infección de enfermedades o para la entrada de comején.

La necesidad de poda (intensidad, frecuencia) varía con la especie y depende de la naturaleza del cultivo asociado; algunos maderables (como *Cordia alliodora*), tienen copas ralas y se “autopodan” (dejan caer sus ramas), por lo que necesitan menos atención que otros árboles como los pinos. Muchas veces los agricultores cortan las ramas a lo largo del tallo del árbol, sin embargo, aunque esta práctica favorece los cultivos, puede retrasar bastante el crecimiento del árbol. Muchos agricultores dicen que la poda sirve para “enderezar” el árbol, no obstante, sólo aplica cuando se elimina un lado de una bifurcación, para favorecer el desarrollo de un solo eje y la poda de otras ramas laterales no tiene ningún efecto sobre la rectitud del fuste (Beer *et al.*, 2003).

### 3.6.5.3 Raleos de los árboles de sombra

La regulación de la sombra por raleo consiste en eliminar un porcentaje de la población establecida originalmente. Es una práctica común cuando se establecen árboles leguminosos a una alta densidad, para usarlos como sombra temporal y después como sombra permanente (Figura 98).



**Figura 98.**

Sistema de raleo de los árboles de sombrío en café.

Cuando se procede así, el raleo puede hacerse eliminando una hilera de por medio, en una sola dirección o en ambas. También puede practicarse el raleo eliminando árboles seleccionados previamente en las áreas más oscuras, o por alguna característica particular como el tamaño, forma o edad del árbol en cuestión. La sombra debe mantenerse baja y abierta, con el fin de que su manejo sea sencillo y no se den condiciones excesivas que propicien la humedad favorable para el desarrollo de enfermedades. La sombra disminuye la actividad metabólica de la planta y con esto el consumo de nutrientes y el empobrecimiento del suelo. Existe una relación inversamente proporcional entre la producción de cacaoales sin sombra y la longevidad de los árboles (Musalen, 2001).

Los raleos permiten mantener las poblaciones arbóreas dentro de los límites aceptables para la producción de los cultivos asociados. Además, son una oportunidad para sacar algunos productos arbóreos y decidir sobre la ubicación de los árboles que quedan para limitar la sombra sobre los cultivos (por ejemplo, dejando más árboles en los linderos que en medio de las parcelas

agrícolas). Además de la densidad y la ubicación, en el raleo se toma en cuenta la forma y sanidad de los árboles, eliminando los enfermos, torcidos o bifurcados (Beer *et al.*, 2003).

**Razones para ralear.** El raleo se hace para (Wadsworth, 1997):

- Acelerar el crecimiento en diámetro y altura de los árboles y aumentar el porcentaje de árboles que alcanzan la madurez.
- Mejorar la calidad del árbol.
- Obtener rendimientos intermedios.
- Aumentar la penetración de la luz y para desarrollar copas más grandes.
- Aumentar la temperatura del piso agrícola para acelerar la descomposición.
- Aumentar las corrientes internas de aire.
- Reducir la humedad dentro del cultivo.
- Fomentar el desarrollo de raíces.
- Mantener la cobertura herbácea para controlar la erosión.
- Reducir el porcentaje de sombra e incrementar la producción.
- En sistemas que involucren especies forestales (nogal, pino, eucalipto), el raleo puede ofrecer beneficios económicos. Los productos intermedios, si son comerciales, pueden cubrir los gastos que la plantación acarrea. El crecimiento más rápido que resulta de ralear, debería reducir el plazo de la rotación. La calidad y el precio de venta de la cosecha final deberían estar muy próximos al máximo.

**Cómo reducir daños al cultivo perenne, al raleo o aprovechar árboles maderables de sombra** (Beer *et al.*, 2003)

- Al cortar los árboles en años de precios bajos del cultivo perenne, pues las consecuencias económicas del daño son menores, y es cuando hay más necesidad de ingresos alternativos.
- Al seleccionar los sitios (por ejemplo, linderos) donde se van a establecer los maderables, pensando en las posibilidades, para luego tumbar los árboles hacia caminos o espacios no plantados, lo que además reduce los costos de extracción.



- Al cortar los árboles inmediatamente después de la cosecha principal del café.
- Cortar los árboles inmediatamente después de realizado el zoqueo del árboles de café, o después de su renovación.
- Al seleccionar especies maderables con copas pequeñas y de poca ramificación, ya que la mayoría del daño al cultivo lo causan las copas de los árboles. Además, tumbando especies caducas después de la caída anual de las hojas (cuando la copa es más liviana).
- Al desramar los árboles con machete antes de cortarlos.
- Para reducir el daño a los cultivos asociados durante la caída, los árboles a cortar (especialmente los maderables) se deben amarrar de sus vecinos inmediatos.
- En terrenos inclinados (común en cafetales), se deben tumbar lo árboles hacia arriba, para que caiga con menos fuerza sobre el cultivo.
- Al plantar o dejar árboles de regeneración natural en las calles y no en las hileras del cultivo, lo que permite dirigir la caída del tronco a lo largo de la calle. Aunque el tronco no daña muchas plantas, provoca daños severos que obligan a replantar.

Antes de podar un árbol debe tenerse en cuenta que:

- Cada corte tiene el potencial de cambiar el crecimiento del árbol.
- Siempre se debe tener un propósito antes de realizar un corte.
- La técnica adecuada es esencial. Una poda deficiente puede causar daños que durarán toda la vida del árbol.
- Debe conocer dónde y cómo realizar los cortes antes de realizar las podas.
- Los árboles no "cicatrizan" de la forma que lo hacemos las personas. Cuando un árbol es herido, este tejido crece por encima de la herida.

- Como regla general, los cortes pequeños causan menos daño al árbol que los grandes; este es el motivo por el que es importante realizar una poda adecuada (de formación) de los árboles jóvenes.
- Esperar a podar un árbol cuando es adulto puede crear la necesidad de hacer cortes grandes, que el árbol no cerrará fácilmente.

**Costo de mantenimiento de los árboles de sombrero.** Los costos por labores de mantenimiento (podas de formación, podas de mantenimiento, fertilización, control de enfermedades, etc.) de un árbol de sombrero como guamo santafereño, puede estimarse en promedio en 0,5 jornales por árbol/año, realizando esta actividad dos veces por año. Los costos de mantenimiento del componente arbóreo según la densidad de siembra serían:

70 árboles de guamo por hectárea	35 jornales/ha/año
123 árboles de guamo por hectárea	62 jornales/ha/año
278 árboles de guamo por hectárea	139 jornales/ha/ha

### 3.6.6 Seleccionar las especies de árboles que mejor se adapten a las condiciones locales

#### 3.6.6.1 Árboles para el componente arbóreo en SAF con café

Hay una gran diversidad de tipos de sombra en el café. En América Central se pueden encontrar cafetales bajo sombra de bosque o una mezcla de árboles, cafetales bajo unas pocas especies escogidas, cafetales bajo sombra de una sola especie arbórea o un solo género como *Erythrina* sp. o *Inga* spp. En países de América Latina también hay cafetales a libre exposición solar donde se han eliminado los árboles asociados. Si cada sistema representa una respuesta a la pregunta ¿Cuáles árboles son mejores?, hay muchas respuesta a las mismas y es probable que todas sean correctas para una situación en particular (Muschler, 2000).

La radiación disponible influye en numerosos procesos fisiológicos, morfológicos y reproductivos de plantas y animales, y afecta de forma significativa el funcionamiento del ecosistema. Sin embargo, la información sobre la luz disponible en ecosistemas y su gran heterogeneidad espacial y temporal es escasa y los estudios sobre las respuestas de las plantas a la luz en ocasiones son incompletos; en otros, la clasificación de las especies vegetales según su tolerancia a la sombra se apoya en gran parte en observaciones carentes de datos cuantitativos, por ejemplo, hojas delgadas, mayor superficie foliar por unidad de biomasa, poca biomasa en raíces, baja tasa de respiración, entre otros (Raintree, 1996; Valladares *et al.*, 1997). Pero los efectos que se pueden identificar son variables y dependen de la ecofisiología de la planta, tasas de crecimiento, interacción entre especies, de las características climáticas, etc. La supervivencia de las plantas de cultivo al crecer en sistemas agroforestales se puede ver comprometida al hacerse más complejas las interacciones suelo-planta-agua-luz, debido básicamente a la estratificación

del sistema (aumento en el número de especies por unidad de área), abandono en la regulación del sombrío y la disminución de la heterogeneidad ambiental y de la disponibilidad lumínica al cerrarse el dosel.

**Selección de las especies de árboles a plantar.** Los árboles poseen características que los convierten en plantas útiles o inútiles, adoptables o no adoptables, provechosas o perjudiciales, convenientes o inconvenientes, etc., para diferentes usuarios, en diferentes regiones y con diferentes propósitos. Este punto tiene por objeto orientar hacia una comprensión acertada de los atributos que poseen los árboles a ser empleados como sombrío en el café y su relación con las prácticas de selección durante el diagnóstico y diseño de Sistemas Agroforestales (SAF).

Un mismo árbol puede tener distintos atributos socioeconómicos para diferentes personas, por tanto hay que considerar la forma en que se podría “errar” en la selección de determinada especie en el contexto de cierta comunidad; así la selección de una especie podría ser: 1) Errada para la comunidad en su totalidad; 2) Errada para ciertos segmentos de la comunidad. Es probable que la selección de una especie arbórea sea errada cuando se inicia un proyecto, si no se tienen ideas claras de los propósitos que se persiguen y qué tipo(s) de árbol(es) se necesitan, además sin haber consultado con toda la comunidad sobre sus propias percepciones de lo que desean o necesitan (Raintree, 1996).

**¿Cuándo un árbol es inadecuado?** Un árbol o grupo de árboles seleccionados para un SAF son inadecuados para un grupo de agricultores o usuarios específicos (Raintree, 1996), si:

- **El árbol cumple una función inadecuada.** Si el árbol no es conveniente para las necesidades del grupo de agricultores o para los objetivos de producción en general (por ejemplo, mantenimiento de la fertilidad del suelo, conservación de la humedad del suelo, aporte de materia orgánica, entre otras).
- **Una orientación comercial inadecuada.** Selección de especies comerciales (por ejemplo, forestales), donde se requieren árboles para la subsistencia; selección de un árbol comercialmente aprovechable donde los costos del transporte o la falta de infraestructura para comercializarlo imposibilitan una ganancia.
- **Terrenos inadecuados.** Selección de especies que no se adaptan o desarrollan bien en suelos con características especiales o árboles exigentes en suelo (fertilidad, pendiente, etc.).
- **Mano de obra y conocimientos inadecuados.** Los árboles de sombrío deben manejarse como un cultivo más, por tanto, requieren de cuidados culturales intensivos y si no se dispone de mano de obra ni de conocimientos prácticos para ello, o cuando los agricultores están ocupados atendiendo otras necesidades de la finca se “abandona” su manejo.

- **Necesidades de capital inadecuadas.** Selección de árboles que necesitan inversiones especiales de capital que difícilmente se podrán conseguir; por ejemplo, especies mejoradas que requieren alta inversión en insumos o que requieran equipos especiales para su mantenimiento.

## Atributos e ideotipos de los árboles en SAF

**Árbol dominante.** Los árboles dominantes son significativamente mayores en diámetro a la altura del pecho, espesor de la corteza, área basal, altura y volumen que los árboles codominantes e intermedios. No presentan diferencia significativa en el espesor de corteza y altura total con los árboles codominantes, y en longitud de copa viva con los árboles codominantes e intermedios. Las especies de árboles dominantes tienden a ser: Bien adaptadas al sitio, diseminadoras de semilla abundante y frecuente, relativamente capaces de tolerar la sombra en su juventud, capaces de aprovechar aperturas del dosel, de gran estatura y de copas bastante densas.

**Árbol codominante.** La diferencia de altura con los dominantes es pequeña o inexistente, pero sus copas se encuentran más comprimidas lateralmente, siendo menos vigorosas y menos equilibradas, denotando un alto grado de competencia lateral.

**Árbol intermedio.** Árbol cuya copa recibe luz directa en su parte superior y su copa es relativamente pequeña y comprimida lateralmente, copa compacta a medio compacta.

**Árbol suprimido.** Árbol cuya copa no recibe luz directa, es pequeña y de baja densidad foliar, copa transparente.

**Árboles “Dominantes, Codominantes, Intermedios y Suprimidos”.** Si se establece como 100 cm el promedio de la tasa de crecimiento diamétrico de los árboles dominantes, las especies codominantes podrían crecer a una tasa relativa de 90 a 110 cm, las intermedias entre 50 y 70 cm y muchos árboles suprimidos sólo de 10 a 30 cm. Bajo estas condiciones un árbol de 30 cm de DAP, que ha vivido gran parte de su vida suprimido y que a lo sumo ha alcanzado el nivel intermedio, quizás tenga 180 años de edad o más (Wadsworth, 1997). De acuerdo con Baur (1964), el tamaño y la forma de las copas de los árboles influye en la productividad. Los árboles del dosel superior tienen copas horizontales poco densas, los del estrato inferior, por el contrario, tienen copas verticales y profundas. En un bosque de Puerto Rico, con 1.566 árboles de 5,0 cm de DAP por hectárea, sólo el 4% eran dominantes, 10% codominantes, 32% intermedios y 54% suprimidos. Las tasas relativas de crecimiento diamétrico en estas cuatro clases ilustran, en parte, el significado de la iluminación (Wadsworth, 1997).

La composición final de una comunidad agroforestal no perturbada se puede atribuir tanto a la oportunidad como a la competencia; la primera selecciona entre las especies pioneras potenciales, y la segunda establece un equilibrio dinámico en la estructura y el patrón del

bosque. La distribución natural de una especie vegetal no sólo resulta de las condiciones físicas prevalentes en el hábitat. En los trópicos, la competencia más que el ambiente físico controla la selectividad de los organismos (Baur, 1964).

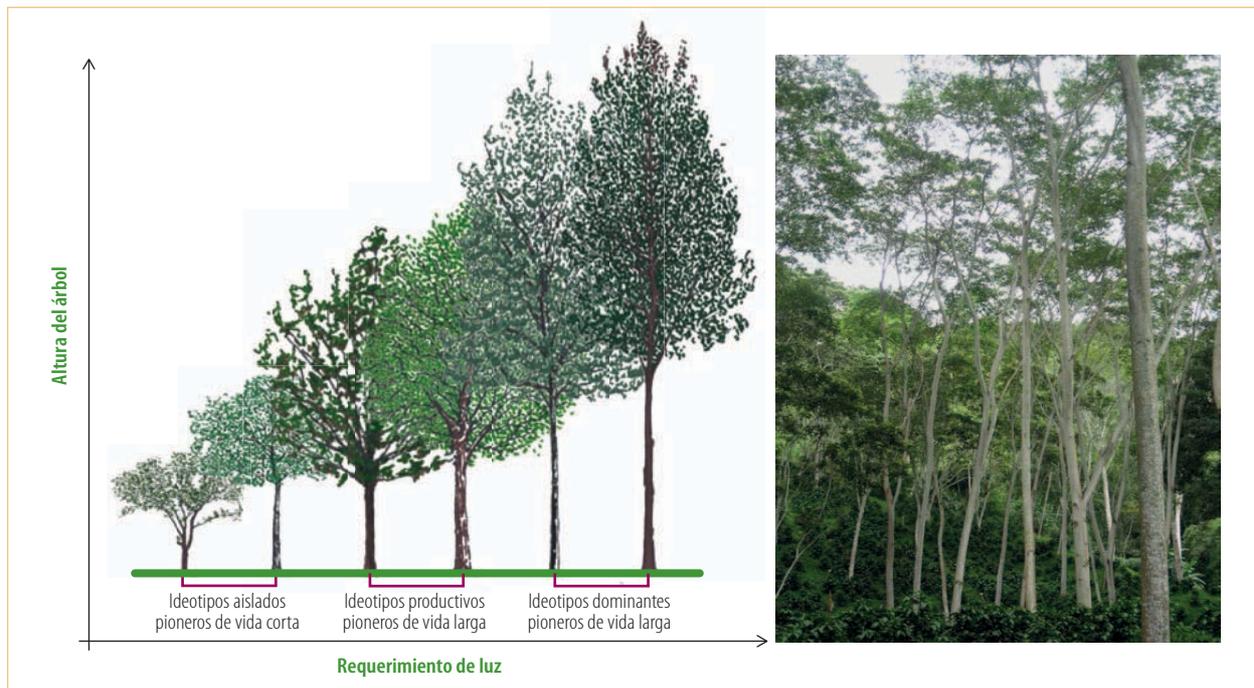
**Árboles “tolerantes e intolerantes” a la sombra.** La forma en la cual los árboles interactúan recíprocamente y con otras plantas, puede influir considerablemente en su compatibilidad con las oportunidades espaciales, al dividir las especies en ‘tolerantes’ e ‘intolerantes’, lo que se hace es reflejar el nicho competitivo de las especies (Raintree, 1996).

Dentro del dosel de un SAF se presenta un gradiente vertical fiable a lo largo del cual la luz aumenta; el aumento de la luz dentro del dosel puede ser entre el 1% y 2% en el suelo y hasta del 100% encima de la copa de los árboles. En el suelo también se presenta una variación sustancial, en la cual la luz puede llegar a ser hasta del 30%, dependiendo de la superficie abierta (GAP) presentada en algunos puntos del dosel. Las diversas especies de árboles pueden distribuir vertical y horizontalmente estos gradientes de luz, las especies que tienen la capacidad de distribuir verticalmente la luz son especies pequeñas o especies con un dosel de gran tamaño; las especies que distribuyen horizontalmente la luz reduciendo este gradiente son especies tolerantes a la sombra, que requieren poca luz, y especies pioneras que exigen alta cantidad de luz para su establecimiento y supervivencia (Poorter *et al.*, 2006).

Por tanto, las diferentes especies ocupan diversas posiciones a lo largo de estos gradientes, y por ende, adquieren diferentes rasgos, donde se combina la altura máxima alcanzada por el árbol y la demanda de luz. La combinación de estas dos variables forma un esquema de clasificación que da lugar a cuatro diversos grupos de árboles (Figura 99) (Poorter *et al.*, 2006).

- **Árboles pequeños y tolerantes** que pueden sobrevivir bajo sombra (**TS**).
- **Árboles grandes y parcialmente tolerantes** que pueden establecerse bajo sombrío (**PTS**), pero que necesitan de grandes entradas de luz en el dosel.
- **Pioneros de vida corta (PVC)**, árboles pequeños pero que requieren altas cantidades de luz, son árboles que suelen vivir menos de 30 años.
- **Pioneros de vida larga (PVL)**, árboles de gran altura, que tienen altas exigencias de luz y pueden vivir más de 30 años.

La arquitectura o la forma presentada por las diversas especies en un SAF y su ubicación espacial y por tanto su acceso a la luz, está determinada por la cantidad y distribución del follaje, lo que a su vez está determinado por la longitud y anchura del dosel (Poorter, 2006).



**Figura 99.** Clasificación del componente arbóreo basado en los requerimientos de luz.

**Clasificación de los árboles por ideotipos.** Un ideotipo especifica las características ideales de una planta para un fin determinado. En su sentido más amplio, un ideotipo es un modelo de planta que rendirá una mayor cantidad de productos útiles que los cultivares convencionales o las plantas silvestres. La formulación de un ideotipo es un paso práctico, porque establece un objetivo claro y viable hacia cuyo logro se puede trabajar al diseñar los SAF. Raintree (1996), Nair (1985, 1993) y Valladares y Percy (1999), propusieron una clasificación, basada en la metodología D&D (*Diagnosis & Design*), para el efecto dividieron las plantas en los siguientes ideotipos: Aislamiento, competencia (que aquí se denomina dominancia) y producción. Cada uno de ellos está caracterizado por una estrategia competitiva propia, y cada uno de ellos correspondería a un sistema cultural específico (Figura 99, derecha).

**Ideotipo aislado.** Es un árbol independiente que trata de explotar su entorno al máximo posible. Son de copa alta densa y amplia, proporcional a su tamaño; tiende a extender su follaje en anchura y a tener un sistema de enraizamiento profundo y horizontalmente expansivo. El crecimiento y desarrollo de un ideotipo aislado puede estar limitado por el medio, es un fuerte competidor y tiene capacidad para suprimir la vegetación circundante.

**Ideotipo dominante o de "competencia."** Árbol que tiende a sobresalir por encima de las copas de los árboles circunvecinos y se va agrandando a expensas de éstos. Los SAF que tienen

este tipo de árboles pronto se dividen en estratos y subestratos, según su copa, los cuales toman denominaciones como: Dominantes, codominantes, intermedios y oprimidos, y ostentan una gran variedad de diámetros de fuste. El ideotipo dominante sería el modelo más adecuado para plantaciones de especies con mucho valor económico tales como guayacán, pino colombiano y nogales, entre otras.

**Ideotipo productivo.** En SAF con café sería el modelo adecuado para una cobertura de árboles cuyo propósito sea la producción de biomasa, transferencia de nutrientes, protección del suelo y del cultivo, entre otros. Estos árboles no son fuertes competidores y aprovechan eficientemente aquella parte de los recursos básicos del sitio, a los cuales tienen acceso en el sistema. Se caracterizan por una copa densa y angosta, con un fuerte control apical; producen masa con una gama muy reducida de diámetros de fuste. La mortalidad y la pérdida concomitante de la biomasa acumulada no son excesivas y la productividad por hectárea es potencialmente alta. Es posible que, una vez establecidos los árboles, los recursos no sean un factor limitante en SAF estratificados porque podrían estancarse reduciendo la producción notablemente, por lo cual podría ser necesario el raleo cuando las densidades son altas.

En agroforestería, Huxley (1984) ha ampliado la clasificación para incluir lo que denomina los ideotipos asociativos:

**Ideotipos asociativos.** Son selecciones de plantas perennes leñosas o gramíneas y herbazales, perennes o estacionales, cada uno de los cuales puede contribuir al logro de los objetivos del sistema, a la vez que utiliza al máximo los recursos del medio ambiente, integrando y compartiendo los recursos en el espacio y en el tiempo. En un sistema semejante, cada tipo de planta puede idealizarse de acuerdo con una “especificación”, basada en las necesidades del sistema y los requisitos técnicos de los tipos de plantas disponibles.

### Atributos deseables de un árbol para ser empleado como sombrío en café

- Elegir árboles de sombrío que sean de la familia de las leguminosas, ya que extraen y fijan nitrógeno del aire (Fassbender *et al.*, 1988) y recirculan nutrimentos. El N aportado al suelo es producto de la descomposición de ramas, hojas y muerte de raíces y nódulos. Los nódulos encontrados en las raíces son el resultado de la asociación simbiótica entre la planta y las bacterias del género *Rhizobium*, estas estructuras son especializadas en fijar el N del aire (N<sub>2</sub>) (Ramírez, 1990). Otro ejemplo, son las hojas de *Erythrina* sp. en un sistema de sombrío en café, que contribuyen con 80,0 kg.ha-año<sup>-1</sup> de N principalmente en los meses de febrero y marzo, la florescencia del café ocurre en el mes de marzo y principios de abril, por lo que los incrementos de N en el suelo ocurren en la época de mayor demanda en las plantas. Un segundo pico de ingreso de N por el sombrío ocurre durante el período de fructificación en junio-agosto (Aranguren *et al.*, 1982).

- Elegir especies que permitan limitar su altura para que se reduzca el impacto de las gotas contra el suelo.
- Especies con sistema radical fuerte, profundo, que no se desarrollen en el mismo espacio de las raíces del café (Fassbender *et al.*, 1988).
- Especies que produzcan abundante biomasa, que tiendan a aumentar la materia orgánica por la descomposición de hojas y ramas que los árboles dejan caer sobre el suelo (CATIE, 1986).
- Árboles que permitan su establecimiento con otras especies (sombrios mixtos o estratificados).
- Árboles con resistencia o baja susceptibilidad a plagas y enfermedades.
- Árboles que no compitan por nutrientes o por los mismos nutrientes y en las mismas cantidades que el café, es decir, que tengan diferentes exigencias (FNC, 1958).
- Árboles que tengan follaje a diferentes alturas, así se previene mejor el ataque de plagas y enfermedades.
- Las especies de sombrero que se establezcan deben dejar pasar buena cantidad de luz, es decir, que su sombra sea rala (FNC, 1958).
- Árboles que en lo posible cumplan una función económica.

Existe gran diversidad de tipos de dosel de los árboles para emplearlos como sombra del café (Figura 100), y cada una representa una respuesta a preguntas como: ¿Cuáles árboles son mejores?; ¿Cuál es la densidad de siembra apropiada?; ¿Cuál es el manejo adecuado?; ¿Cuáles brindan mayor beneficio económico o ecológico?; entre muchas otras. Las condiciones ambientales específicas pueden determinar la necesidad o utilidad por mayores o menores niveles de sombra en el



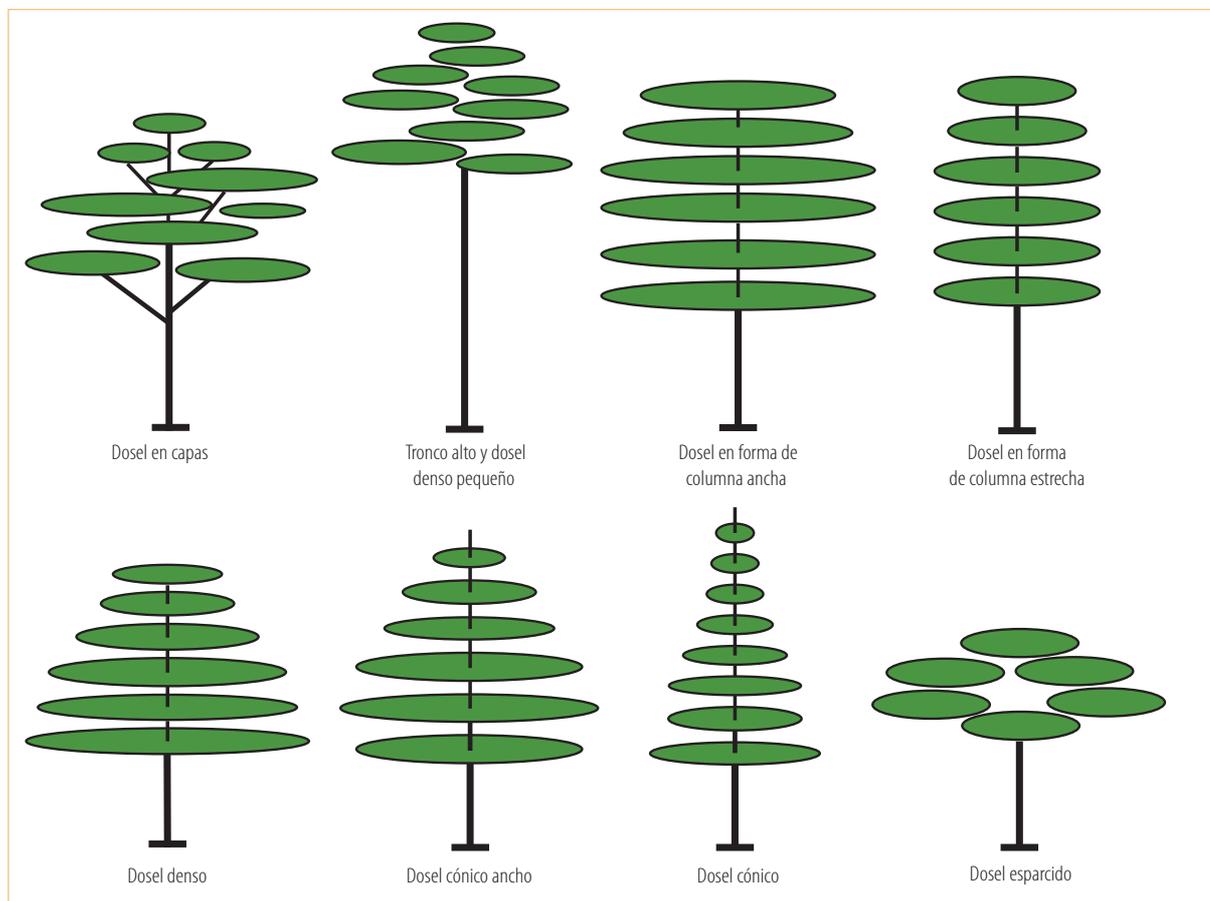
café. Para satisfacer las diferentes necesidades de sombra pueden utilizarse diferentes especies arbóreas con sus características específicas de competitividad o compatibilidad (Muschler, 2000). Los atributos de un ideotipo de producción como *Inga edulis* (guamo santafereño) e *I. densiflora* (guamo macheto) empleados como sombrío en café, podrían ser:

**Hábito:** Alcanza alturas hasta de 30 m.

**Tallo:** Recto cilíndrico con corteza marrón claro.

**DAP:** 30-60 cm.

**Copa:** Densa, ancha, aparasolada. Alcanza diámetros de 15 m.



**Figura 100.**

Clasificación del componente arbóreo basado en los requerimientos de luz.

**Hojas:** Compuestas, de 15 a 25 cm de longitud, de ápice agudo y base obtusa, haz glabro y verde oscuro, envés pubescente y amarillento.

**Flores y frutos:** Flores blancas. Frutos en legumbres de 40 a 80 cm de largo, de color café verdusco, profundamente estriados, carnosos, con numerosas semillas negras en su interior, rodeadas por un arilo blanquecino, algodonoso y comestible.

**Otros caracteres:** Las semillas no requieren tratamiento pregerminativo.

**Distribución geográfica:** Especie originaria de la Amazonía y se distribuye desde los 26° Sur en Brasil y Ecuador, hasta los 10° Norte en Honduras (América Central). Su distribución altitudinal varía de 0 a 1.800 m, precipitaciones de 800 a 1.200 mm por año, con una estación seca de hasta 4 meses y temperaturas de 20 a 26°C.

**Otros usos:** Maderable, construcción, artesanal y combustible.

**Aspectos etnobotánicos:** Es común encontrarlo a la orilla de caminos y ríos en formaciones de bosque secundario. Tolera suelos semipermeables y con altos contenidos de aluminio. Floración abundante cada 4 meses. Fructifica en la estación húmeda. El período óptimo para la recolección de frutos es entre julio y agosto. Los frutos se recolectan directamente del árbol o del suelo. Es difícil de trabajar. Se usa en construcciones rurales, cajas, muebles, postes y leña. Este ideotipo se basa principalmente en los atributos morfológicos pero también incluye algunos atributos fisiológicos y fenológicos.

**Sistema agroforestal:** Usado principalmente como árbol de sombra en cultivos perennes, como en café y cacao, también es seleccionado como buen árbol para sombra por su fácil germinación por semilla, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos, incluyendo ácidos y mal drenados, producción de abundante materia orgánica, lo que contribuye al control de arvenses, transferencia de nutrientes y conservación de la humedad del suelo; atrae hormigas que defienden la planta contra herbívoros y tiene la posibilidad de ser combinada con otras especies del género, lo que contribuye a la diversidad genética. Además, tiene gran potencial para su cultivo en callejones, plantaciones energéticas y para madera de pequeñas dimensiones. Esta especie en este sistema ha demostrado ser una de las más adaptables y productivas del género.

**Producción de biomasa:** El guamo santafereño en asociaciones con café como sombrío y establecido a 12,0 x 12,0 m, pueden aportar cerca de 11,0 t.ha-año<sup>-1</sup> de materia seca, 199,0 kg.ha-año<sup>-1</sup> de N, 7,7 kg.ha-año<sup>-1</sup> de P, 48,9 kg.ha-año<sup>-1</sup> de K, 158 kg.ha-año<sup>-1</sup> de Ca y 27,3 kg.ha-año<sup>-1</sup> de Mg.

### 3.6.7 Determinar otros limitantes de la producción y aplicar Manejo Integrado

#### 3.6.7.1 Identificar los lotes de mayor y menor producción en la finca

**Agricultura de precisión (AP).** Es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de variabilidad en el campo. Requiere el uso de las tecnologías como: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores, satélites e imágenes aéreas junto con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. La información recolectada puede ser usada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar fertilizantes y otras entradas necesarias, y predecir con más exactitud la producción de los cultivos (Cenicaña, 2003).

**Agricultura específica por sitio (AEPS).** Se define como el arte de realizar las prácticas agronómicas requeridas por una especie vegetal, de acuerdo a las condiciones espaciales y temporales del sitio donde se cultiva, para obtener de ella su rendimiento potencial. Es un área definida por el productor y se diferencia claramente de otras por sus características ambientales, prácticas agronómicas o características del cultivo establecido en ella (Cenicaña, 2003).

**Variabilidad espacial de la producción del café en SAF.** En la Finca el Roble, municipio Mesa de los Santos-Santander, se analizó la producción de café por sitio (parcela) como respuesta del café a la variabilidad espacial en el contenido y concentración de nutrientes del suelo. En la Tabla 59 se presentan las concentraciones de nutrientes en el suelo de cada parcela de establecimiento de los sistemas, en la Figura 101 se presenta la producción de café pergamino seco bajo cada tratamiento analizado y en la Figura 102 se muestra la distribución espacial de la producción en las 16 parcelas del área total del estudio.

**Tabla 59.**

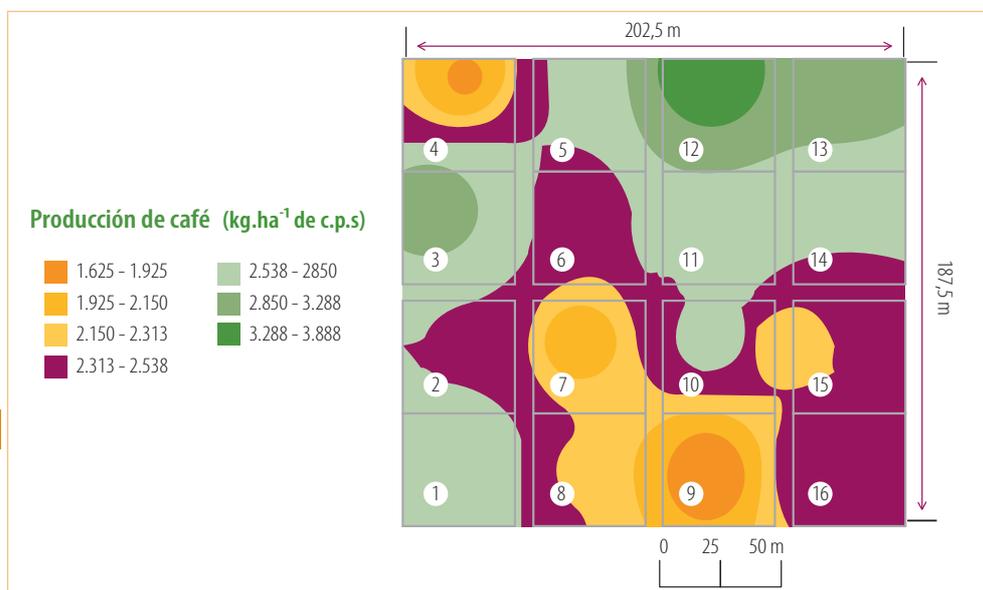
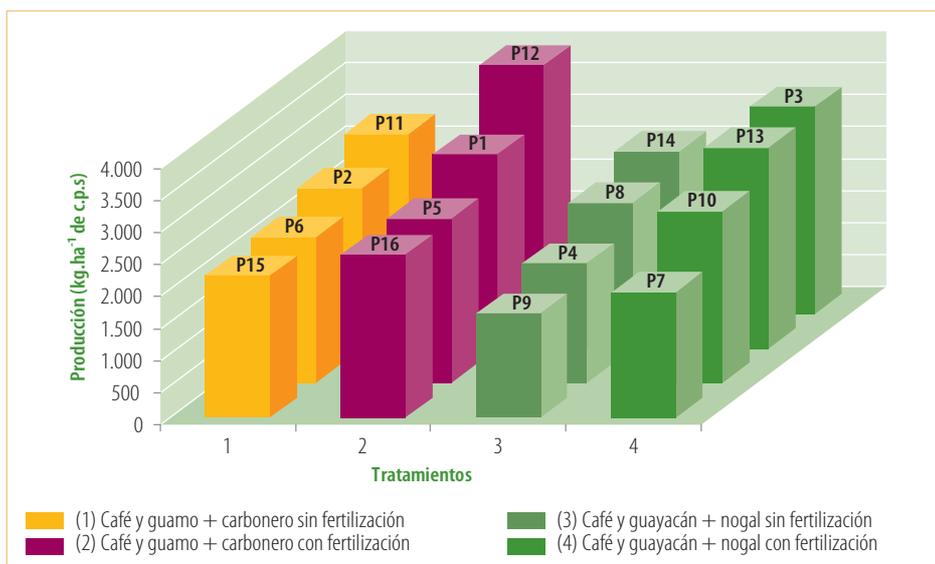
Concentración de nutrientes de las parcelas con cada sistema de producción. Finca El Roble-Santander.

Parcelas	Concentración de nutrientes					
	N (%)	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	K (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	Ca (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	Mg (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	Materia orgánica (%)
<b>Café + guamo + carbonero sin fertilización</b>						
2	0,32	1	0,65	8,3	2,13	7,6
6	0,30	196	0,74	7,8	1,95	6,9
11	0,37	282	0,78	10,4	2,49	9,0
15	0,24	100	0,48	5,5	1,37	5,3
<b>Café + guamo + carbonero con fertilización</b>						
1	0,37	737	2,31	10,9	3,37	9,0
5	0,32	281	2,77	8,8	2,42	7,6
12	0,43	723	2,63	12,7	3,69	10,7

Continúa...

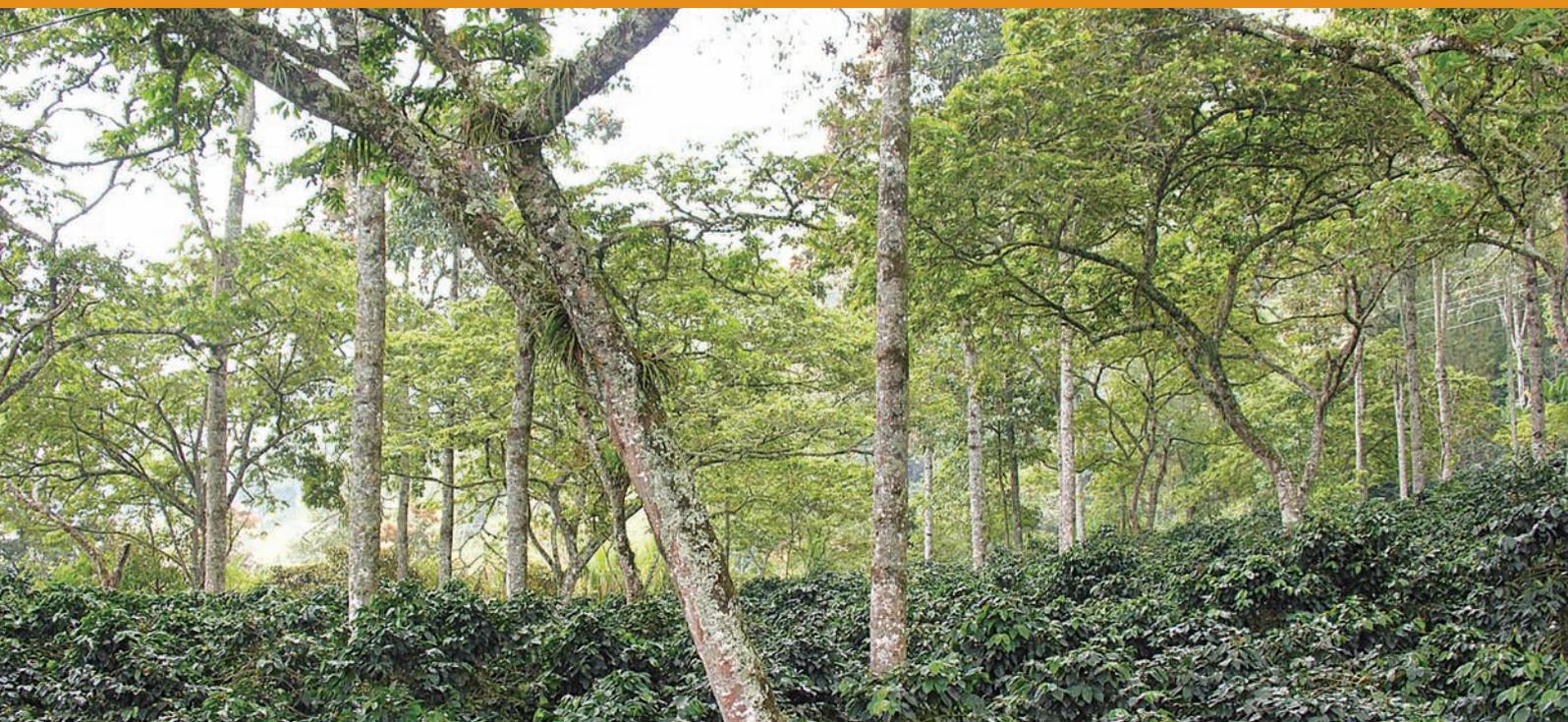
... Continuación

16	0,34	819	2,81	10,7	2,73	8,0
<b>Café + guayacán + nogal sin fertilización</b>						
8	0,29	262	0,84	6,7	1,76	6,8
4	0,39	624	1,35	11,7	3,13	9,7
14	0,43	710	1,42	12,3	3,20	10,7
9	0,31	335	0,73	7,8	1,98	7,1
<b>Café + guayacán + nogal con fertilización</b>						
7	0,35	588	2,52	11,2	2,78	8,4
3	0,44	1.160	2,58	14,1	4,21	11,1
13	0,45	1.124	3,21	12,8	3,52	11,5
10	0,43	1.242	2,80	15,4	3,90	10,9



- Sistema de producción café + guamo + carbonero sin fertilización. Para el mismo tratamiento o sistema de producción, establecido en cuatro unidades experimentales o parcelas de producción, se obtuvo que la diferencia entre la parcela de máxima y mínima producción fue de 593 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.
- Sistema de producción café + guamo + carbonero con fertilización. Para el mismo tratamiento o sistema de producción, establecido en cuatro unidades experimentales o parcelas de producción, se obtuvo que la diferencia entre la parcela de máxima y mínima producción, fue de 1.344 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.
- Sistema de producción café + guayacán + nogal sin fertilización. Para el mismo tratamiento o sistema de producción, establecido en cuatro unidades experimentales o parcelas de producción, se obtuvo que la diferencia entre la parcela de máxima y mínima producción, fue de 915 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.
- Sistema de producción café + guayacán + nogal con fertilización. Para el mismo tratamiento o sistema de producción, establecido en cuatro unidades experimentales o parcelas de producción, se obtuvo que la diferencia entre la parcela de máxima y mínima producción, fue de 1.273 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s.

De acuerdo a la Figura 103, las altas producciones observadas en la parcela 12 están asociadas a unas adecuadas concentraciones de materia orgánica, óptimas concentraciones de N y moderados contenidos de P y K. Mientras que las producciones más bajas (parcela 9) están relacionadas con altos contenidos de materia orgánica y bajos contenidos de P y K. Los planes de fertilización deberán ser enfocados a la fertilización específica de parcelas y no al área en general, para hacer un uso óptimo del recurso económico.



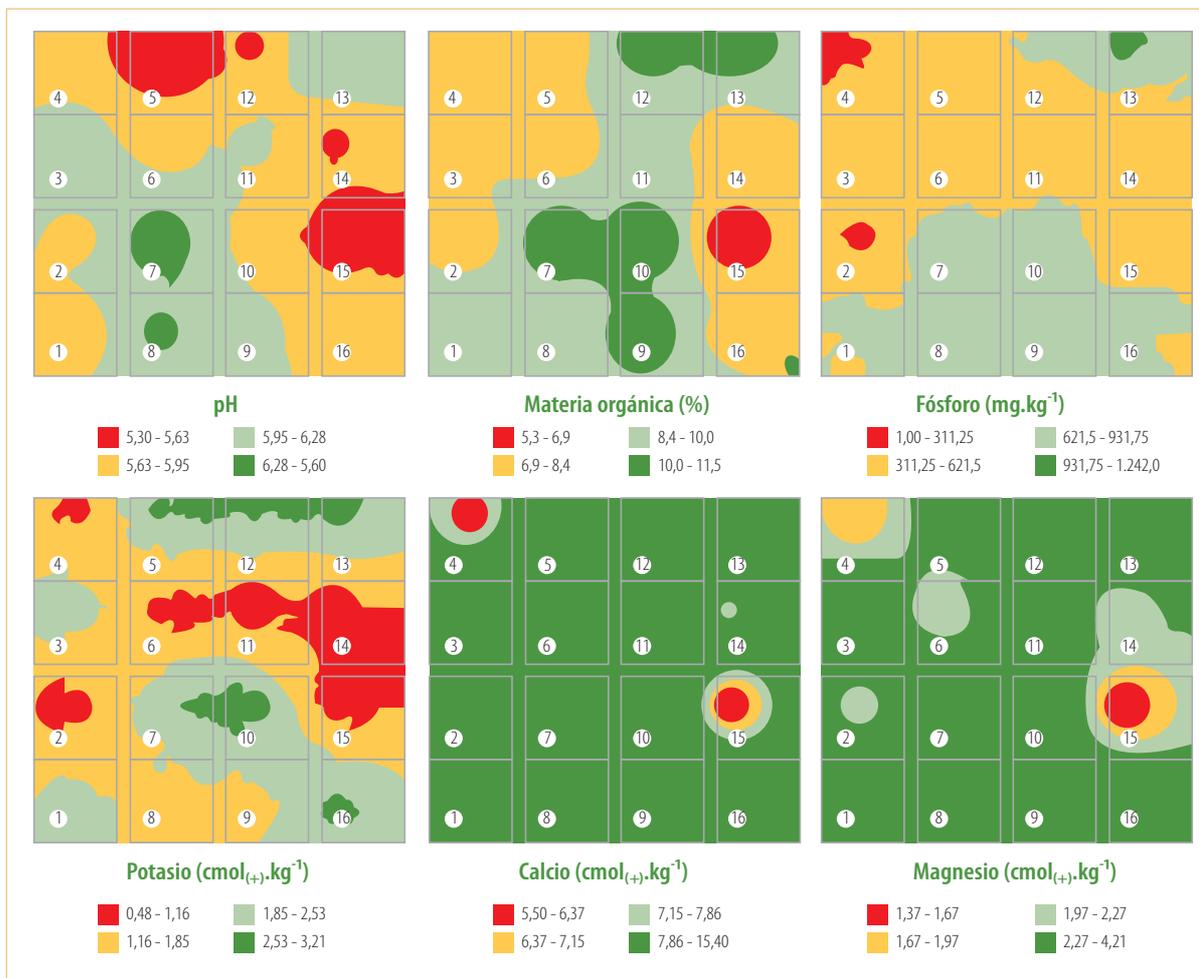


Figura 103.

Distribución espacial de materia orgánica y macronutrientes.

### 3.6.7.2 Principales plagas y enfermedades del café en SAF

**Broca del café.** *Hypothenemus hampei* es una plaga que inicia su ataque en los frutos verdes del cafeto, entre los 3 y 4 meses después de la florescencia. Para su control hay diferentes métodos, de los cuales el más utilizado es el conocido como manejo integrado de la broca. Éste consiste en un control cultural, que incluye el manejo en el beneficio, la recolección oportuna de los frutos en el momento de su maduración y el control biológico con la utilización de avispas y de hongos. Las avispas se crían y luego se liberan en los cafetales para que se establezcan y se alimenten de la población de broca, buscándola dentro de los frutos. El hongo es un moho blanco que se espolvorea en los cafetales para que se reproduzca y elimine parte de la población de la broca. Este método ha permitido que los niveles de infestación de broca en los cafetales se mantengan bajos (FNC, 1995). La broca se expande a otras plantaciones por varias vías: En las semillas y frutos atacados; cuando el hombre los lleva de un lugar a otro; en la ropa, sombrero o calzado de las

personas que transitan por las plantaciones; en herramientas y equipos, tales como machetes, costales y canastos; en los vehículos; en el agua que se usa durante el lavado del café, entre otros.

**Roya del cafeto.** Es un hongo conocido como *Hemileia vastratix*, se distingue fácilmente por la presencia de un polvillo amarillo en el envés de las hojas enfermas. Es una enfermedad cíclica que afecta principalmente el follaje, produce defoliación y el daño conocido como “paloteo”, el cual está ligado a los años de alta producción, con epidemias severas. En cultivos susceptibles, la enfermedad ha causado pérdidas hasta del 23,0% de la producción acumulada de cuatro cosechas (Mariño y Gil, 1976). Para su control en caficultura con asocio de árboles, se deben seguir las recomendaciones dadas por Rivillas *et al.* (1999).

**Ojo de gallo (*Omphalia flavida*).** El ojo de gallo se produce bajo condiciones de alta humedad y baja temperatura, muy comunes en cafetales donde predomina el sombrío y en lugares de permanente nubosidad. Para su control se debe realizar buen drenaje del suelo, podas que permitan la aireación de los cafetales y utilizar distancias de siembra adecuadas. Además, se debe establecer el cultivo de café con una distribución racional del sombrío, de manera que éste no afecte la disponibilidad de luz para las plantas de café ni intercepte la radiación solar, sin afectar los procesos fotosintéticos de la planta ni aumentar la humedad relativa interna. Así mismo, el exceso de sombra reduce la velocidad del viento e incrementa la duración de la humedad en las hojas, lo que facilita el desarrollo del micelio de este hongo, por lo que se debe establecer una distribución racional del sombrío para que no se afecte la disponibilidad de luz. Si es necesario se debe aplicar control químico (Rivillas y Castro, 2011).

### 3.6.7.3 Manejo de arvenses en SAF con café

**Establecimiento del café.** Manejo de arvenses tanto al café como las especies arbóreas. Realizar plateos manualmente o con preemergentes, y en las calles realizar un manejo manual mecánico y con herbicidas postemergentes por parches, sobre arvenses agresivas.

**Primer año.** De seis a ocho parcheos con herbicida en casos con alta presión de arvenses agresivas, combinados con dos a tres cortes rápidos con machete o guadañadora. Permitir el establecimiento de coberturas nobles.

**Segundo año.** Se espera que las labores y los costos disminuyan cerca del 50% dado el establecimiento de coberturas nobles y de los árboles. En este período aumentan las labores manuales-mecánicas ligeras (cuatro a cinco) y disminuyen los parcheos con herbicida (dos a tres).

**Tercero y más años.** El control se debe centrar en los focos de mayor entrada de luz y en la eliminación oportuna de arvenses enredaderas y parásitas. La presencia de arvenses nobles es mayor y éstas se deben mantener con podas rápidas, a 5 cm del suelo, cada 90 a 120 días. Los platos del café y los árboles pueden mantener con hojarasca seca o arvenses nobles (Salazar e Hincapié, 2012).

### 3.6.8 Los sistemas de producción sostenible, no están limitados al asocio de árboles de sombrío

#### 3.6.8.1 Cultivo de café en un sistema agroforestal y al sol, con prácticas orgánicas

El café es originario de Abisinia y Etiopía (Noreste de África), zonas montañosas de bosques húmedos tropicales, y sus distintas variedades crecen bien donde quiera que encuentren este ambiente, con pequeñas variaciones climáticas; por tanto, es una especie que puede cultivarse bajo sombrío. En gran parte del área cafetera colombiana, el café se encuentra plantado con sombra o en sistemas agroforestales, pero debido a la oferta ambiental y a las características de los suelos, el café también puede cultivarse a plena exposición solar.

Estudios han mostrado que la producción de café bajo sombrío es menor que a libre exposición solar; no obstante, si el sombrío se establece con la especie y la distancia adecuada, el café puede producir igual que a libre exposición. La caficultura a libre exposición solar en la cual se produzca café con prácticas orgánicas, puede ser una alternativa interesante de producción, desde el punto de vista ambiental, social y económico, pues no se contamina el medio ambiente, se protege la salud humana y animal, y se puede agregar valor al café producido en monocultivo (Farfán, 2010; Botero y Farfán, 2004).

En la Estación Central Naranjal y en la Estación Experimental El Tambo, Farfán (2010) evaluó la capacidad productiva del café, en cantidad y calidad, aplicando las prácticas y principios de la agricultura orgánica en café establecido a libre exposición solar y bajo sombrío. Las especies de sombrío fueron las leguminosas *Inga edulis* (guamo santaferense), *Erythrina edulis* (chachafruto), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Leucaena leucocephala* (leucaena) en la Estación Central Naranjal y leucaena, chachafruto y cámbulo en El Tambo. El sombrío se estableció a 12,0 x 12,0 m (70 árboles/ha) y el café a 1,5 x 1,5 m (4.500 plantas/ha). El SAF se comparó con un sistema de cultivo de café a libre exposición solar establecido a 1,0 m x 1,0 m, (10.000 árboles/ha). Los dos sistemas de cultivo, en las dos localidades, se manejaron con prácticas orgánicas (sin aplicación de productos químicos de síntesis) y sin el propósito de obtener la certificación como producto 100% orgánico.

- **Estación Central Naranjal-Caldas.** En la Tabla 60 se presentan los resultados de producción de café cereza por planta y de café pergamino seco en café a libre exposición solar y bajo sombrío.

En café a libre exposición solar, el promedio de la producción por planta, durante cinco cosechas y en el primer ciclo de cultivo (de siembra), fue de 2,2 kg de café cereza, y en el segundo ciclo (de zoca), el promedio de la producción por planta, durante tres cosechas, fue de 2,0 kg de café cereza. En café con sombrío, el promedio de la producción por planta durante nueve cosechas fue de 2,4 kg de café cereza.

En cuanto a la producción de café pergamino seco, en el sistema de café a libre exposición solar, el promedio de la producción de cinco cosechas, en el primer ciclo (de siembra), fue de 4.304 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s., y en el segundo ciclo (de zoca), el promedio de la producción de tres cosechas

fue de 3.755 kg.ha<sup>-1</sup> de c.p.s. El promedio de la producción de los dos ciclos (siembra y zoca), indica que en caficultura a libre exposición solar, con densidades de siembra de 10.000 plantas/ha, aplicando tecnologías que no implican el uso de productos químicos de síntesis, se puede producir en promedio 4.030 kg.ha-año<sup>-1</sup> de c.p.s.

**Tabla 60.**

Producción de café cereza por planta y de café pergamino seco por hectárea (1995 a 2003) en dos sistemas de producción de café. Estación Central Naranjal-Caldas (Fuente: Farfán, 2010).

Años	Producción por sistema					
	Café cereza por planta (kg)			Café pergamino seco (kg.ha <sup>-1</sup> )		
	Café libre exposición solar		Café bajo sombrío	Café libre exposición solar		Café bajo sombrío
	Ciclo siembra	Ciclo renovación	Ciclo siembra	Ciclo siembra	Ciclo renovación	Ciclo siembra
1995	0,2	-	0,2	463	-	187
1996	3,1	-	3,1	614	-	2.765
1997	2,7	-	3,5	5.384	-	3.136
1998	2,7	-	3,5	5.394	-	3.092
1999	2,1	-	2,9	4.137	-	2.585
2000	-	-	2,1	-	-	1.875
2001	-	1,3	2,5	-	2.538	2.205
2002	-	2,7	2,0	-	5.128	1.785
2003	-	1,9	1,5	-	3.600	1.361
Promedio	2,2	2,0	2,4	4.304	3.755	<b>2.110</b>

El promedio de la producción por hectárea, de nueve cosechas, indica que en la zona central de Colombia y caficultura bajo sombrío no superior al 35%, con densidades de siembra de 4.500 plantas/ha y aplicando prácticas que excluyen el empleo de productos químicos de síntesis, se puede producir en promedio 2.110 kg de café pergamino seco por hectárea y por año.

- **Estación Experimental El Tambo-Cauca.** En esta localidad se evaluó un solo ciclo de cultivo. En la Tabla 61 se presentan los resultados de producción de café cereza por planta y la producción de café pergamino seco, en los lotes semicomerciales de observación. En café a libre exposición solar, el promedio de la producción por planta, en el ciclo de cinco años, fue de 0,4 kg de café cereza y bajo sombrío el promedio de la producción por planta, en el mismo ciclo, fue de 1,9 kg de café cereza por planta.

La producción por hectárea en la Estación Experimental El Tambo, indica que en caficultura a libre exposición, con densidades de siembra de 10.000 plantas/ha y aplicando tecnologías que no implican el uso de productos químicos de síntesis, no es conveniente dado que el promedio

de la producción sólo fue de 708 kg.ha.año<sup>-1</sup> de c.p.s. El promedio de la producción por hectárea, obtenida en el ciclo de cinco años en el sistema agroforestal, indica que bajo sombrío, con densidades de siembra de 4.500 plantas/ha y aplicando tecnologías que no implican el uso de productos químicos de síntesis se puede producir en promedio 1.722 kg.ha.año<sup>-1</sup> de c.p.s.

En sistemas de cultivo de café a libre exposición solar y bajo sombra manejados con prácticas orgánicas, Ricci *et al.* (2006), con 5.714 plantas/ha, registraron en la primera cosecha una mayor producción de café a libre exposición solar, pero en la segunda cosecha la producción tanto a pleno sol como bajo sombrío fueron iguales.

**Tabla 61.**

Producción de café cereza por planta y de café pergamino seco por hectárea (1996 a 2000) en dos sistemas de producción de café. Estación Experimental El Tambo-Cauca (Fuente: Farfán, 2010).

Años	Producción por sistema			
	Café cereza por planta (kg)		Café pergamino seco (kg.ha <sup>-1</sup> )	
	Café al sol	Café bajo sombrío	Café al sol	Café bajo sombrío
	Ciclo siembra	Ciclo siembra	Ciclo siembra	Ciclo siembra
1996	0,33	0,51	651	458
1997	0,40	2,56	792	2.279
1998	0,40	2,41	791	2.140
1999	0,36	2,02	714	1.797
2000	0,30	2,18	593	1.939
<b>Promedio</b>	<b>0,35</b>	<b>1,94</b>	<b>708</b>	<b>1.722</b>

En términos de productividad se encuentran resultados contrastantes, por ejemplo Lyngbaek *et al.* (1999) indican que el promedio de la productividad por hectárea es 23% menor en fincas de producción de café orgánico, comparada con la producción de fincas convencionales; mientras que Villarreal *et al.* (2002) afirman que el promedio de la producción en los sistemas de producción orgánica de la finca Mesa de los Santos (Santander), fue 20% mayor si se compara con la producción de fincas convencionales tecnificadas.

### 3.6.9 En suelos con vocación forestal, establecer café asociado a especies de valor económico

#### 3.6.9.1 Efecto de la interceptación de la RFA de *Eucalyptus grandis*, *Pinus chiapensis*, *Pinus tecunumanii* e *Inga densiflora* sobre la producción de café

El uso tradicional de especies leguminosas como sombrío para el café está cambiando, debido a las condiciones de mercado y costos de producción, entre otros, por lo que se está perfilando la necesidad de utilizar especies arbóreas que además de ofrecer servicios para el cultivo, también aporten productos comerciales para los productores (Aguilar, 2001). Conocer cómo responde

la planta de café asociada con especies forestales de valor económico puede contribuir a dar respuesta a muchos interrogantes planteados y favorecer el desarrollo de criterios metodológicos que permitan una evaluación más eficiente y un mejor entendimiento de los sistemas de café con especies forestales.

En la finca La Suecia se evaluó el efecto que sobre la producción de café tendría el sombrío dado por tres especies forestales y una especie leguminosa. Los sistemas agroforestales diseñados fueron: (I) Café con sombrío de *Eucalyptus grandis*; (II) Café con sombrío de *Pinus chiapensis*; (III) Café con sombrío de *Pinus tecunumanii*; (IV) Café con sombrío de *Inga edulis*; (V) café a libre exposición solar. Las especies empleadas como sombrío se establecieron en el año 2000 a distancias de 6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha) y el café se plantó dos años después a distancias de 1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha), tanto bajo sombrío como a libre exposición solar.

Los análisis del grado de cobertura arbórea durante los años 2003 a 2006, cuando los árboles tenían 3 hasta 6 años de edad, se realizaron mediante fotografía digital, procesadas con un analizador de imágenes digitales. Con *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *Inga edulis*, los porcentajes de cobertura entre 40% y 43% se alcanzaron a los 5 años de edad, con un promedio del porcentaje de sombra del 44,0%, dado por las tres especies. El promedio del porcentaje de cobertura con *E. grandis* fue del 64% y siempre fue constante durante el período de las valuaciones. Morais *et al.* (2006) indican que el incremento en el grado de sombra causa una significativa reducción en la radiación global incidente y en la radiación fotosintéticamente activa.

Los resultados obtenidos por Soto *et al.* (2000) muestran que la alta densidad o cobertura arbórea del café afecta significativamente la producción; así mismo, afirman que porcentajes de cobertura entre el 23% y 38% afectan positivamente la producción, pero cuando el sombrío se incrementa por encima del 50% la producción decrece. El efecto de este nivel de sombra sobre la producción del café durante cuatro cosechas (2004 a 2007) se presenta en la Tabla 62.

**Tabla 62.**

Producción de café (kg.ha-año<sup>-1</sup> de c.p.s.) bajo sombrío de tres especies forestales, una leguminosa y al sol, Finca La Suecia. Estación Experimental El Tambo-Cauca.

Años	Tratamientos				
	1	2	3	4	5
2004	459 b	923 ab	640 ab	436,5 b	1.242 a
2005	1.402 a	1.346 a	1.324 a	1.196 a	1.621 a
2006	1.812 b	1.300 b	1.691 b	1.461 b	3.152 a
2007	1.747 bc	548 d	1.251 c	2.327 b	3.239 a
Promedio	1.355 b	1.029 b	1.227 b	1.355 b	2.314 a
c. v.	0,40	0,31	0,31	0,50	0,39

1. Café con sombrío de *E. grandis*; 2. Café con sombrío de *P. chiapensis*; 3. Café con sombrío de *P. tecunumanii*; 4. Café con sombrío de *P. chiapensis*; 5. Café a libre exposición solar

El análisis de varianza del promedio de la producción de cuatro cosechas, para cada uno de los cinco tratamientos, indicó que no hay diferencia significativa entre las producciones obtenidas en café bajo cobertura arbórea de eucalipto, pino y guamo santafereño. Además, fue evidente esta diferencia entre la producción registrada en café a libre exposición y café bajo sombra.

El promedio de la producción del café bajo sombrío fue de 1.241 kg.ha<sup>-1</sup> de café pergamino seco, la cual fue 46,3% menos que la registrada en el café a libre exposición solar. Hernández *et al.* (1997), en estudios de la producción de café variedad Caturra, a 2,0 x 2,0 m, a libre exposición y bajo sombrío de *Cordia alliodora* y *Erythrina poeppigiana*, concluyeron que la producción de café por unidad de superficie fue mayor a libre exposición que bajo sombrío, y un aumento de 100 a 300 árboles de nogal por hectárea provoca una disminución del 29% en la producción de café. Las plantas con sombrío producen mejores frutos en virtud a su maduración más lenta, pero emiten menos ramas plagiotrópicas, con menor número de nudos por rama y con pocos frutos por nudo, lo que resulta en una reducida producción de café (Morais *et al.*, 2006).

Toman (1991), reporta incrementos hasta del 24% a favor del café (*Coffea liberica*) plantado a 3,0 x 3,0 m a libre exposición, frente al cultivado a igual distancia y bajo sombrío de *Pinus mercusii* a 7,0 x 7,0 m. Estivariz y Muschler (1998) obtuvieron que con un sombrío homogéneo del 60,0% de *Erythrina* sp. la producción de café se reduce un 41%, comparada con una sombra heterogénea del 20% al 40%. Beer *et al.* (1985) encontraron que la producción de café (5.000 plantas/ha) se reduce en un 28% con sombrío de nogal (278 árboles/ha) comparada con sombra de *Erythrina* sp. (555 árboles/ha), y atribuyen esta reducción al alto y permanente grado de sombra suministrado por el nogal. Matoso *et al.* (2004) compararon la producción de café (4.000 plantas/ha) en sistemas agroforestales y en monocultivo (5.000 plantas/ha), encontrando que la producción a libre exposición solar fue de 2.443 kg.ha<sup>-1</sup>, 515 kg.ha<sup>-1</sup> más que lo que produjo en el sistema agroforestal.

### 3.6.9.2 Efecto de la interceptación de la RFA por *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* sobre la biomasa aérea total del café

En la Estación Experimental Paraguaicito (Quindío), Farfán y Urrego (2004), evaluaron el efecto de las especies forestales *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, sobre la producción del café. El sombrío fue establecido en 1994 a distancias de 6,0 x 6,0 m (278 árboles/ha) y después de un año se sembró el café a 1,5 x 1,5 m (4.500 plantas/ha). Sobre la interceptación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), los autores encontraron que el porcentaje de interceptación registrado en cada uno de los sistemas agroforestales evaluados, en el período 1998 a 2001, fluctuó entre el 61,0% y el 75,7% (68,4% promedio) con *Cordia alliodora*, entre el 29,3% y el 69,0% (49,2% promedio) con *Pinus oocarpa*, y entre el 58,7% y 58,5% (58,6% promedio) con *Eucalyptus grandis*.

Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de cobertura de *Cordia alliodora* ( $r = -0,30$ ), *Pinus oocarpa* ( $r = -0,98$ ) y la producción del café registrada, indican una relación lineal negativa entre estas dos variables, de tal manera que si el nivel de sombrío aumenta o disminuye, disminuye

o aumenta la producción de café. Para *E. grandis* este coeficiente de correlación ( $r = 0,06$ ) indica que no hubo una relación, positiva o negativa, del sombrío sobre el aumento o disminución de la producción de café y que el nivel de sombra con eucalipto fue constante durante el período de evaluación.

- **Efecto del sombrío sobre la producción del café.** El análisis del efecto del sombrío sobre la producción del café mostró los siguientes resultados: No hubo diferencias entre los promedios de las producciones obtenidas en café bajo cobertura arbórea de nogal, pino y eucalipto, ni entre el promedio de la producción registrada en café a libre exposición y café bajo sombrío de pino y eucalipto. Se presentó diferencia significativa entre el promedio de la producción del café a libre exposición y la producción del café en el sistema café con nogal, con un 39% de diferencia en producción a favor del primero (Tabla 63).

**Tabla 63.**

Promedios de la producción de café pergamino seco (seis cosechas), la biomasa seca de tallo y la biomasa seca del follaje del café, bajo cuatro sistemas de cultivo. Estación Experimental Paraguaicito-Quindío (Fuente: Farfán y Urrego, 2004).

Sistemas de producción	Producción (kg.ha <sup>-1</sup> )		
	Café pergamino seco	Tallos	Follaje
Café libre exposición solar	2.200 a	18.400 a	21.400 a
Café con sombrío de nogal	1.400 b	7.400 d	11.000 b
Café con sombrío de pino	1.900 ab	12.100 c	12.700 b
Café con sombrío de eucalipto	1.900 ab	16.300 b	11.100 b

C.P.S. = Café pergamino seco

- **Efecto del sombrío sobre la biomasa aérea del café.** Sobre este mismo estudio se evaluó el efecto del sombrío ejercido por estas especies forestales, sobre la producción de biomasa aérea (hojas, ramas y tallos) del café. Este análisis se realizó al momento de efectuar la renovación del café por zoqueo (abril de 2003).

La biomasa seca de tallos de café, establecido a libre exposición solar y 4.500 plantas/ha, se presenta en la Tabla 63. Al comparar la biomasa seca producida y registrada en los tallos de café a libre exposición solar con la producida bajo sombra, se presentaron diferencias estadísticas; la biomasa seca de tallos del café bajo sombrío de nogal, pino y eucalipto se reduce en 59,8%, 34,2% y 11,4%, respectivamente al compararse con la producida en café a libre exposición solar. Farfán (1994) reporta producciones de biomasa seca de tallos de 17,0 t.ha<sup>-1</sup> en café establecido a libre exposición solar, 5.000 plantas/ha y a los 7 años de edad.

Al comparar la biomasa seca producida y registrada en el follaje de café a libre exposición solar con la producida bajo sombra, hubo diferencias estadísticas a favor del café al sol. La biomasa seca del follaje del café bajo sombrero de las tres especies forestales se reduce un 45,8% promedio, si se compara con la biomasa producida en café sin sombrero (Tabla 63).

Glover y Beer (1986), reportan producciones de 3,4 t.ha-año<sup>-1</sup> de hojas y ramas de café, con 3.700 plantas en un sistema agroforestal con *Erythrina poeppigiana* como sombrero, y Cardona y Sadeghian (2005), evaluaron el ingreso de materia orgánica y nutrientes del material vegetal (hojas, tallos, flores, frutos y otros órganos) de plantas de café y guamo en un sistema agroforestal, estudios en los que se estableció que los residuos vegetales como materia seca de café y guamo, que ingresan al sistema, fueron de 10,5 t.ha-año<sup>-1</sup> en Naranjal, con café establecido a 4.500 plantas/ha.

### 3.6.10 Evaluar la posibilidad de agregar valor al SAF con café - Producción de cafés especiales

**Valor agregado.** En términos de marketing, es una característica que se le da a un producto o servicio, con el fin de darle un mayor valor comercial; generalmente, se trata de una característica o servicio poco común o poco usado por los competidores, y que le da al negocio o empresa cierta diferenciación.

#### Comercialización sostenible y con valor agregado - Objetivos estratégicos (FNC, 2009):

- Transferir el mejor precio posible al productor a través de la garantía de compra, en el contexto del mercado internacional.
- Continuar el ascenso en la cadena de valor y ofrecer a clientes y consumidores un portafolio innovador que se adapte a las necesidades del consumidor.
- Penetrar y consolidar nuevos mercados y fomentar el consumo de café en el mercado interno.

#### 3.6.10.1 Los sistemas agroforestales con café y certificados ambientales

Con el propósito de incrementar el posicionamiento del Café de Colombia en altos segmentos que agreguen valor a los productores, desde 1996, la Federación Nacional de Cafeteros lidera el Programa de Cafés Especiales de Colombia, con el objetivo de identificar y seleccionar cafés de características excepcionales, provenientes de regiones específicas. Además, se integran tres conceptos fundamentales: Conservación del medio ambiente, equidad económica y responsabilidad social. Para la Federación Nacional de Cafeteros, los cafés especiales son aquellos

valorados por los consumidores por sus atributos consistentes, verificables y sostenibles, por los cuales están dispuestos a pagar precios superiores, que redunden en un mejor ingreso y un mayor bienestar de los productores. En esta definición claramente destacamos que los cafés especiales deben tener atributos que los diferencien pero, que para considerarlo especial, el productor debe ser retribuido por su esfuerzo. Las categorías que clasifican los cafés especiales son Cafés de Origen, Cafés de Preparación y Cafés Sostenibles.

**Cafés Sostenibles.** Son los cultivados por comunidades que tienen un serio compromiso con la protección del medio ambiente, a través de la producción limpia y la conservación de la bioriqueza de sus zonas. También promueven el desarrollo social de las familias cafeteras que los producen. Los clientes los prefieren porque cuidan la naturaleza y promueven el mercado justo con los países en vía de desarrollo. Dentro de éstos se encuentran los cafés Utz Certified, Fair Trade, Familias Guardabosques, 4C, Relationship Coffees, los Cafés orgánicos, Rainforest Alliance.

Entre otros cafés especiales, adicionales a los orgánicos y Rainforest Alliance, que se cultivan bajo sombra están los Amigables de las Aves y los de Conservación, que también contribuyen a incrementar las poblaciones de epífitas y aumentar la diversidad de las especies de aves. Sin embargo, el cultivo bajo sombra es una iniciativa relativamente reciente de certificación de café o muchos de ellos exigen una certificación en Café Especial.

**Certificación.** Los procesos de certificación de café tienen como objetivo asegurar al consumidor que el producto ha sido cultivado, beneficiado y tostado bajo exigentes normas de calidad, que incluyen prácticas culturales limpias para todas sus etapas. Para asegurar esto, la certificación no sólo observa el cultivo y el producto durante su transformación, sino que las personas que intervienen deben seguir unas normas de sanidad, calidad y cuidado ambiental. El productor debe cambiar la forma en que maneja los residuos del beneficio, mitigando el daño ambiental, al agua y suelo, por concepto de lavado y material de desecho. Debe modificar su vivienda y área de trabajo, cumpliendo estrictas prácticas de organización e higiene. Por último, requiere de un registro permanente de las acciones realizadas en el cultivo, de las cantidades recolectadas, procesadas y vendidas, cuidando la trazabilidad del producto y el impacto económico de la certificación. El esfuerzo es compensado en términos económicos en el mediano plazo y la calidad de vida mejora a cada instante (Farfán, 2000; Farfán y Sánchez, 2007).

Recientemente, se ha llegado a un consenso entre participantes del negocio (ubicados en países consumidores principalmente) sobre un conjunto común de “Principios de Conservación para Producción de Café”, los cuales proporcionan un fundamento a los programas de certificación basados en la conservación – incluyendo recomendaciones de sombra. Los “principios de conservación” han sido publicados por el Centro de Aves Migratorias del Smithsonian Migratory Bird Center Institution (SMBC) para café “amigable con las aves” (desde 1997); la Alianza para el Bosque Tropical para café “Alianza para el Bosque Tropical certificado o Rainforest Alliance” (desde

1996) y Conservación Internacional (Conservation International), para el café de conservación. Los productores de café pueden usarlos como una guía de selección o como un código de conducta y pueden referirse a estas recomendaciones y publicitar su contenido a los consumidores sin recurrir necesariamente a una certificación de tercera parte. En teoría, los “principios de conservación” delimitan las condiciones y prácticas de procesamiento.

Los criterios relativos sólo al componente arbóreo en el cultivo del café se resumen seguidamente.

**Criterios para café “Amigable con las aves”.** Los criterios de café Amigable con las aves (Bird Friendly) han sido desarrollados por el Smithsonian Migratory Bird Center (SMBC, 2001; 2004):

- Cualquier persona o grupo productivo que quiera contratar la certificación de café “Bird Friendly” deberá contar con certificación ecológica.
- En cuanto al método de producción, procesamiento y comercialización rigen las normas internacionales vigentes para la producción ecológica.
- Garantizar la sostenibilidad ambiental, favoreciendo los indicadores ecológicos de la salud ambiental.
- Proteger la biodiversidad estructural así como de especies, con el fin de garantizar cobijo y alimentación a las aves, especialmente a las migratorias.
- El cultivo de café debe ser parte integral de los sistemas agroforestales.
- El bosque transformado para la producción cafetera no debe ser parte de ninguna zona protegida o reserva natural.
- La aplicación de técnicas de producción debe respetar ecosistemas específicos y contribuir a la conservación y uso sostenible de los recursos naturales.
- Establecer una documentación que describa la unidad y permita demostrar el manejo del cafetal y la sombra.
- El cafetal debe tener un mínimo de 40% cubierta forestal (porcentaje de sombrío), incluso después de la poda.
- La sombra debe tener unos estratos obvios: Un estrato inferior que ocupa el espacio debajo del dosel principal y un estrato superior conformado de árboles que tengan como mínimo 15 metros de altura. El estrato superior debe estar compuesto por árboles nativos.

- La cubierta vegetal debe estar constituida de diferentes estratos: El estrato inferior debe representar el 20% del volumen del follaje total de la sombra. Lo mismo vale para el estrato de las especies emergentes.
- La sombra debe estar compuesta de varias especies de árboles, incluyendo algunas que proporcionen otra utilidad (sombra diversa y riqueza biológica).
- La sombra necesita proveer suficiente cubierta vegetal arbórea durante todo el año, a fin de crear un microclima que proteja el cafetal de la lluvia y de los vientos secos.
- Las especies *Gliricidia sepium*, *Grevillea robusta*, *Erythrina* spp, *Albizia* spp. y *Pinus* spp., son inaceptables como columna vertebral<sup>12</sup>.
- La altura mínima de la columna vertebral debe ser de 12 m. Para que los árboles alcancen esta altura se debe evitar la poda apical o el descope de los mismos.
- El tipo de árbol dominante que conforma la columna vertebral (*Inga* u otra) no debe ocupar más del 60% de todos los árboles de sombra. El 40% restante de los árboles de sombra debe estar compuesto como mínimo, por diez especies diferentes. Cada una de las cuales debe representar al menos 1% de los árboles de sombra presentes.
- La columna vertebral debe estar constituida por especies nativas y de preferencia perennes.
- Las diferentes especies de árboles del dosel deben estar bien distribuidas en todo el cafetal.
- En los árboles del dosel se debe fomentar el crecimiento de las plantas epífitas, como bromeliáceas, orquídeas, helechos y parásitas.
- En el cafetal han de dejarse algunas ramas y troncos muertos con el fin de brindar hábitat para ciertos insectos y aves.
- La selección de especies de árboles de sombra y prácticas de poda deben tener el mínimo impacto en las plantas epífitas, musgos y líquenes. Está prohibida la poda que da un aspecto laminar delgado al dosel.
- Las franjas de amortiguamiento deben tener un ancho de 5 m a cada lado de los arroyos y 10 m a lo largo de los ríos y deben estar constituidas por vegetación natural, para brindar hábitat a diferentes especies de animales.

---

<sup>12</sup> La mayor población de árboles de sombra debe estar dominada por una o dos especies, especialmente *Inga* sp., a esta población se le denomina "columna vertebral". La altura mínima de la columna vertebral debe ser de 12 m.

**Criterios para café “Aliado de los bosques”.** El sello de certificación de Rainforest Alliance (RA, 2010), es una garantía de que el café es cultivado en fincas donde los bosques, los ríos, los suelos y la vida silvestre son protegidos. La estructura de este sistema agroforestal debe cumplir con los siguientes requisitos (Rainforest Alliance, 2010):

- Las fincas con cultivos agroforestales y que se ubican en áreas cuya vegetación natural original es bosque deben establecer y mantener un sistema agroforestal permanente y distribuido de forma homogénea por la plantación.
- La comunidad de árboles en la tierra cultivada consiste de un mínimo de 12 especies nativas por hectárea, en promedio.
- El dosel de árboles se compone como mínimo de dos doseles o estratos de copas de árboles.
- El promedio mínimo de la densidad del dosel de árboles dentro del cultivo es de 40%.
- Aquellas fincas que se ubican en áreas cuya vegetación natural no sea bosque, deben destinar mínimo del 30% del área a la conservación o recuperación de los ecosistemas típicos del área. Estas fincas deben implementar un plan de establecimiento o de recuperación de la vegetación natural a lo largo de un período de 10 años.
- La finca debe tener un programa de fertilización de suelos o cultivos fundamentado en las características y propiedades de los suelos, el muestreo y análisis periódicos de suelos.
- La finca debe usar y expandir el uso de coberturas verdes de vegetación para reducir la erosión y mejorar la fertilidad, estructura y contenido de materia orgánica de los suelos, así como para minimizar el uso de herbicidas.
- Debe existir una separación mínima entre las áreas de producción y los ecosistemas naturales terrestres donde no se utilicen agroquímicos. Se debe establecer una zona de protección con vegetación mediante la siembra o la regeneración natural entre áreas de diferentes cultivos permanentes o semipermanentes, o entre diferentes sistemas de producción. Se deben respetar las distancias entre áreas de producción y ecosistemas naturales terrestres definidas en la Figura 104.



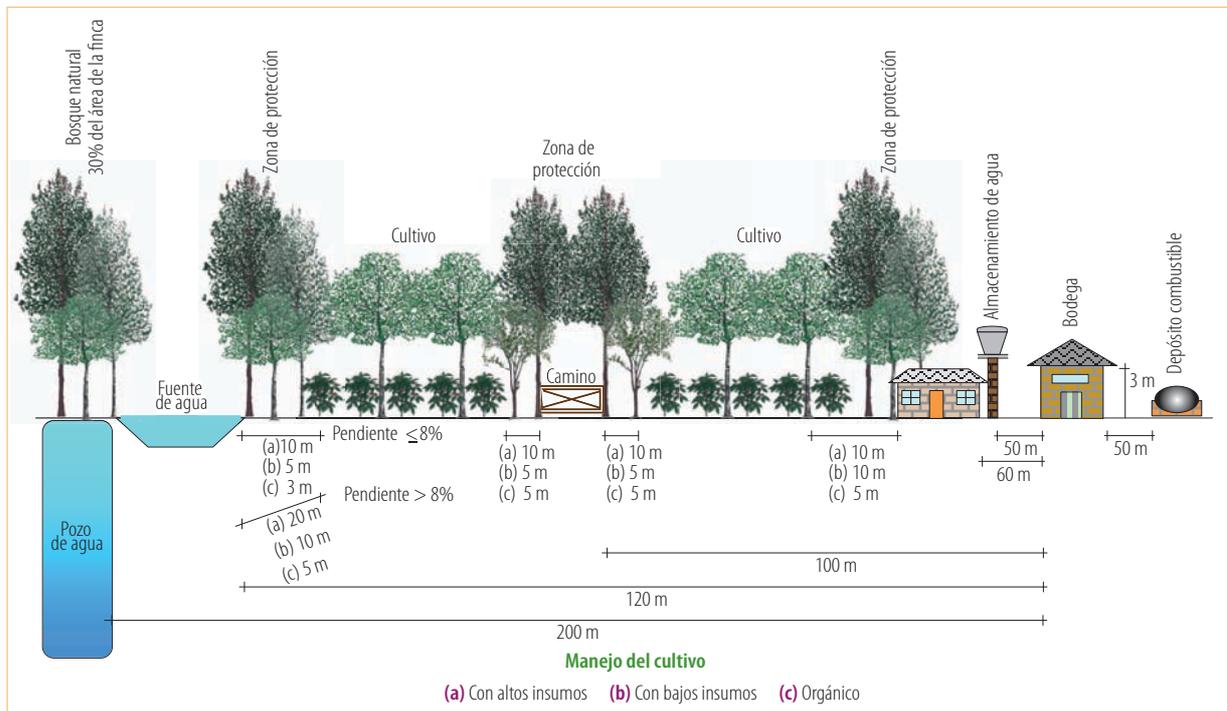


Figura 104.

Distancias de separación (m) entre sistemas de producción y ecosistemas.

**Criterios para café “De conservación”.** Los principios y criterios de conservación para la producción cafetera en Colombia (Federacafé, 2001), se plantean como una herramienta que busca responder de una manera realista al deterioro y fraccionamiento de los ecosistemas de las laderas andinas. Para ello, los principios y criterios propuestos buscan promover la conectividad entre fragmentos de bosque andino a través de la promoción de agroecosistemas cafeteros de alta diversidad biológica.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y Conservación Internacional, han coordinado la formulación y han estimulado la creación de unos principios y criterios de conservación para la producción cafetera del país, como:

- No se altera el bosque natural. Se evitará la deforestación.
- Las especies y hábitats amenazados o en peligro están protegidos con medidas que limitan la caza y la extracción comercial de flora y fauna.
- En las fincas cafeteras y en las zonas aledañas se ha incorporado una cubierta forestal diversificada de especies de árboles nativos que proporciona una sombra eficaz y realza la biodiversidad local y endémica.

- Las áreas de gran valor ecológico ubicadas en las fincas y sus alrededores, incluidos los humedales y las áreas de bosques, están protegidas.
- La poda de los árboles se realiza cuidadosamente con el fin de preservar sus procesos reproductivos y de proteger el hábitat que éstos le proporcionan a las plantas, animales e insectos.
- Las fincas cafeteras y sus alrededores crean un mosaico paisajístico diversificado, que sirve de hábitat a la vida silvestre y como corredores migratorios entre las áreas protegidas.
- En los terrenos degradados por las prácticas insostenibles de cultivo se aplican programas de restauración biológica y reforestación.
- Una parte importante de los nutrientes del suelo la suministran las fuentes de la finca mediante fertilizantes orgánicos, cubiertas para los cultivos, materia orgánica y abonos.
- En los terrenos pendientes o especialmente en las áreas adyacentes a los cursos de agua y los humedales se toman medidas apropiadas para controlar la erosión y mejorar la calidad del suelo.
- Se desarrollan sistemas de coberturas vegetales y se establecen prácticas culturales para el control de arvenses.
- Para conservar los suelos se fomenta el manejo integrado de arvenses.
- Existen zonas de amortiguación de vegetación nativa adyacentes a todas las fuentes de agua.
- La leña proviene de fuentes manejadas apropiadamente, que evitan la tala del bosque natural y hacen uso de medidas de protección ambiental.

**Lineamientos para C.A.F.E. Practices - Starbucks Coffee Company.** Los criterios de evaluación ambiental y que hacen alusión a la producción de café bajo cubierta arbolada se mencionan:

**Conservación de la diversidad biológica.** Fomentar prácticas de producción cafetera que mantengan e incluso aumenten y mejoren, la biodiversidad natural y el funcionamiento de los ecosistemas, en las áreas de producción de café y en las zonas adyacentes.

**Mantenimiento de la cubierta forestal que le da sombra al café.** Lograr que las plantaciones de café en áreas originalmente cubiertas de bosque incorporen árboles nativos, para mantener, así, la biodiversidad endémica.

- Al menos del 25% al 50% de las áreas productivas que tienen pendientes entre 10% y 20% se encuentran cubiertas por árboles de sombra o por vegetación/cultivos de cobertura.
- Todas las áreas productivas que tienen pendientes entre 10% y 20% se encuentran cubiertas por árboles de sombra o por vegetación/cultivos de cobertura.
- Además de contar con árboles de sombra o por vegetación/cultivos de cobertura, al menos del 25% al 50% de las áreas productivas con pendientes entre 20% y 30%, siembran en líneas de contorno y terrazas a intervalos apropiados a las condiciones del sitio.
- Además de contar con árboles de sombra y/o por vegetación/cultivos de cobertura, todas las áreas productivas con pendientes entre 20% y 30%, siembran en líneas de contorno y terrazas a intervalos apropiados a las condiciones del sitio.
- Al menos un 25% del área productiva tiene árboles leguminosos que fijan nitrógeno.
- Como promedio, al menos el 10% de la finca (incluyendo área productiva y no productiva) tiene un dosel de sombra.
- El dosel de sombra está compuesto por diversas especies de árboles nativos.
- El dosel de sombra muestra valores biológicos significativos.
- No se utilizan especies introducidas invasoras como dosel de sombra.
- Como promedio, al menos el 40% del área productiva de la finca tiene un dosel de sombra.
- Al menos el 75% del dosel de sombra está compuesto por especies autóctonas, o el dosel de sombra tiene al menos diez especies, que son autóctonas, o que es evidente que contribuyen a la conservación de la biodiversidad nativa.
- Donde las condiciones ecológicas del lugar lo permitan, el dosel de sombra está compuesto al menos por dos estratos bien definidos.

### Otras verificaciones<sup>13</sup>

**Nespresso AAA.** Conduce criterios similares a Rainforest Alliance. El criterio de sombra ha dejado de ser crítico.

**UTZ Certified.** En su criterio 11.C.5, el cual se debe cumplir a partir del primer año así: “El productor usa árboles de sombrío si es compatible con las prácticas locales de producción de café y toma en cuenta la productividad”. De esta manera no es de estricto cumplimiento.

**Fairtrade Labelling Organization Internacional (FLO).** En el criterio 3.1.2.9 establece: “La organización investiga e implementa proyectos de diversificación agrícola dentro de las fincas de sus miembros (incluyendo reforestación y establecimiento de cubierta de sombra si aplica) de manera práctica para la situación particular, y los debe dejar por escrito. Progresos en este punto deberían hacerse a lo largo del tiempo”. Tampoco es de estricto cumplimiento.

**Código Común para la Comunidad Cafetera (4C).** Dentro de sus criterios no contempla lo relativo a la producción de café bajo árboles de sombra.

#### 3.6.10.2 El mercado de los cafés bajo sombra

Según la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), en el país funcionan 56 programas de cafés especiales, de los cuales 51 son sostenibles, en 13 departamentos cafeteros. Los cafés sostenibles son los cultivados por comunidades que se comprometen con la protección del medio ambiente a través de la producción limpia y la conservación de la biodiversidad de sus zonas.

El mercado de los cafés especiales registra un incremento significativo en la última década, tanto en la producción como en la demanda de productos diferenciados. Es notorio que, cada vez más, los consumidores esperan tomar una bebida con características especiales y se preocupan por la procedencia y las condiciones de beneficio del café, así como del entorno agronómico, social, comercial y ambiental del cultivo. De acuerdo con los datos de la Federación Nacional de Cafeteros, en Colombia hay 920.000 hectáreas de café, de las cuales alrededor de 13.387 están dedicadas a la producción de cafés especiales, con certificación Rainforest Alliance; este tipo de café es producido estrictamente bajo sombra, en 13 departamentos cafeteros y 2.913 fincas.

El auge por los cafés de alta calidad se ha incrementado en los últimos años y se espera que el crecimiento en el país sea del 1,3% anual, pasando del 20,0% en 2010 a un 28,0% en 2020; así la oferta de café Rainforest Alliance (convencional y orgánico) puso a disposición para el consumo mundiales el año 2008, cerca de 27.000 sacos de 60 kg, de los cuales fueron exportados alrededor de 16.000. La Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) ha contribuido considerablemente para que este incremento se dé a través de la implementación de sus programas de Cafés Especiales (ACDI/VOCA), Más Inversión para el Desarrollo Alternativo

---

<sup>13</sup> Calderón C., R. *División de Mercadeo Estratégico. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Comunicación personal, agosto de 2011).*

Sostenible (MIDAS) y Áreas de Desarrollo Alternativo Municipal (ADAM), trabajando en 173.536 hectáreas y beneficiando a 110.140 familias, con una inversión de US\$27,2 millones entre 2002 y 2010.

**El “verdadero café de sombra”.** Son muchas las propuestas hechas para enmarcar un sistema de producción agroforestal como “Verdadero café de sombra”. En México fueron elaboradas una serie de categorías con el fin de establecer criterios para el establecimiento del café de sombra y que pueda ser considerado como generador de beneficios ambientales. Algunos de los beneficios son de naturaleza agronómica; otros tienden a ser de enfoque más ecológico o ambiental. Tomados en su conjunto como una serie de normas, estos criterios se consideran como el mejor equilibrio entre exigencias de producción, por una parte, y preocupaciones ambientales, por otra, para el café que se cultiva en el actual contexto centroamericano (SMBC, 2008). La matriz de criterios biofísicos para el café de sombra propuesta, se presenta en la Tabla 64. En capítulos anteriores se discutió sobre la inconveniencia o consecuencias de establecer un gran número de especies y un gran número de sitios por hectárea, los efectos sobre la producción de café al cultivar muy denso el componente arbóreo (plantas/ha) y sobre el nivel de sombra adecuado u óptimo para cada localidad de producción de café.

El objetivo de establecer estos criterios fue crear un conjunto mínimo de normas que definan al café de sombra, y luego un conjunto de criterios considerados como los que representan la mejor manera de manejar la tierra desde una perspectiva ecológica (SMBC, 2008).

**Tabla 64.**

Matriz de criterios biofísicos para el café de sombra (Fuente: SMBC, 2008).

Tema	1. Criterios	2. Recomendaciones	3. Categoría Plus
A. Cubierta vegetal de árboles de sombra	a. Un mínimo de 40% de cubierta de sombra después de podar		a. Café rústico (según la clasificación de la Universidad Autónoma de Chapingo) con 60% de cubierta de sombra (luego de podar, si es pertinente)
B. Diversidad estructural	a. Borde superior de la bóveda con una altura promedio de 12 m, descontando las especies emergentes obvias  b. Diversos árboles más altos por hectárea, que alcancen los 15 m de altura; si esto no se satisface, pero se cumple con el criterio C.d, la plantación será considerada en fase de transición durante un período de 3 a 5 años.		a. Un estrato obvio de árboles de sombra definidos por especies emergentes de 20 m de altura

Continúa ...

<p>C. Diversidad florística</p>	<p><b>a.</b> El tipo de árboles “eje” utilizado para sombra (el género dominante) es nativo y no constituye más del 70% de la densidad total de árboles</p> <p><b>b.</b> Del 30% (o más) de los árboles restantes, todos deberán estar distribuidos en el cafetal, y cuando menos una tercera parte (ó 10% de la cantidad total) deberá ser de especies forestales nativas del área local</p> <p><b>c.</b> Deben utilizarse para sombra cuando menos 15 especies distintas de árboles</p> <p><b>d.</b> Hay evidencia visual que tiene lugar la regeneración de especies grandes y longevas (en particular especies forestales), con base en prácticas de propagación de tales especies, cuidado de semillas, retoños o la creación y cuidado de viveros de estas especies</p> <p><b>e.</b> Se dejan las plantas epífitas (bromelias, orquídeas, helechos, etc.) en los árboles de sombra, y no se permite eliminarlas como práctica de manejo de las plantaciones</p>	<p><b>a.</b> Presencia de especies de gran altura y crecimiento lento asociadas con bosques nativos locales</p> <p><b>b.</b> Mantener especies de árboles “fundamentales”, como <i>Ficus</i> spp.</p>	<p><b>a.</b> Presencia de especies de gran altura y crecimiento lento asociadas con bosques locales</p> <p><b>b.</b> El tipo de árboles de sombra “eje” comprende no más del 50% de la densidad total</p>
<p>D. Manejo del suelo</p>	<p><b>a.</b> El suelo tiene una cubierta durante todo el año, ya sea una cubierta viva o un mantillo de estiércol, paja y hojas descompuestas</p> <p><b>b.</b> En los casos de terrenos muy inclinados y de alta precipitación, se requieren prácticas de conservación del suelo</p>		<p><b>a.</b> Uso de fertilizante(s) orgánico(s)</p>

...Continuación

<p><b>E.</b> Uso de agroquímicos</p>	<p><b>a.</b> Se prohíbe estrictamente el uso de cualquier tipo de plaguicida. En casos extremos, se permite el uso controlado de sulfato de cobre y sus derivados, para inhibir la propagación de enfermedades provocadas por hongos</p>	<p><b>a.</b> Utilizar métodos de control biológico cuando sea necesario y posible</p> <p><b>b.</b> Utilizar fertilizantes orgánicos, en vez de fertilizantes sintéticos</p>	<p><b>a.</b> Ausencia de fertilizantes sintéticos/ inorgánicos</p>
<p><b>F.</b> Fauna</p>	<p><b>a.</b> Protección y aumento de la diversidad de la fauna, y cumplimiento de las leyes nacionales de protección ambiental relacionadas con la diversidad</p>	<p><b>a.</b> Mantener troncos muertos y tocones en el cafetal</p>	
<p><b>G.</b> Conservación de vías acuáticas y vegetación natural</p>	<p><b>a.</b> Aplicación de medidas de conservación del agua, de conformidad a las leyes nacionales</p> <p><b>b.</b> Cumplimiento de las normas que rijan sobre efluentes; los productores no pueden verter en las vías acuáticas o manantiales los productos secundarios del método húmedo</p>		
<p><b>H.</b> Mosaico del paisaje</p>	<p><b>a.</b> Se requiere en grandes unidades de producción (&gt;50 ha) y mantener &gt;10% de la superficie de reserva y de vegetación que proteja las vías acuáticas</p>	<p><b>a.</b> Actividades conjuntas de los productores locales para preservar áreas naturales contiguas o cercanas a los cafetales</p>	<p><b>a.</b> Pruebas de actividades comunitarias de los productores para preservar áreas naturales, como documentos, proyectos reconocidos</p>



# Cuarto Componente - Recursos Económicos

## 4.

Los recursos económicos son los medios materiales o no materiales que permiten satisfacer necesidades dentro de los procesos productivo y procesamiento del café (Beneficio, empaçado, selección, etc.) o la actividad comercial de la empresa cafetera. Estos recursos, por tanto, son necesarios para el desarrollo de las operaciones económicas o comerciales. Acceder a un recurso económico implica una inversión de dinero, lo importante es que dicha inversión pueda ser recuperada con la utilización o la explotación del recurso. Por ejemplo: un lote de terreno es un recurso económico que permite el desarrollo de la caficultura; dicho recurso puede volverse inviable desde el punto de vista económico si se deja abandonado, en rastrojo o inutilizado, entre otros.

### 4.1 Recuperación de áreas

#### 4.1.1 *No dejar áreas con café abandonadas o inexploradas, en barbechos<sup>14</sup>, rastrojos o potreros sin uso en la finca*

##### 4.1.1.1 *La sostenibilidad ambiental*

Como conclusión general del estudio de valoración de la sostenibilidad ambiental de sistemas de producción de café, mediante indicadores de calidad del suelo (5.1.1), se plantea que desde el punto de vista ambiental, en las localidades donde se realizó el estudio, para las unidades de análisis y bajo las condiciones climáticas y épocas de muestreo, es más benéfico cultivar los suelos en sistemas agroforestales con o sin intervención (aplicación de prácticas de manejo), que mantener suelos en rastrojos o barbechos; pues la incorporación de estas áreas a los sistemas productivos requerirán de altas inversiones económicas y de manejo o acondicionamiento del suelo.

##### 4.1.1.2 *Beneficios de recuperar una hectárea con café en SAF*

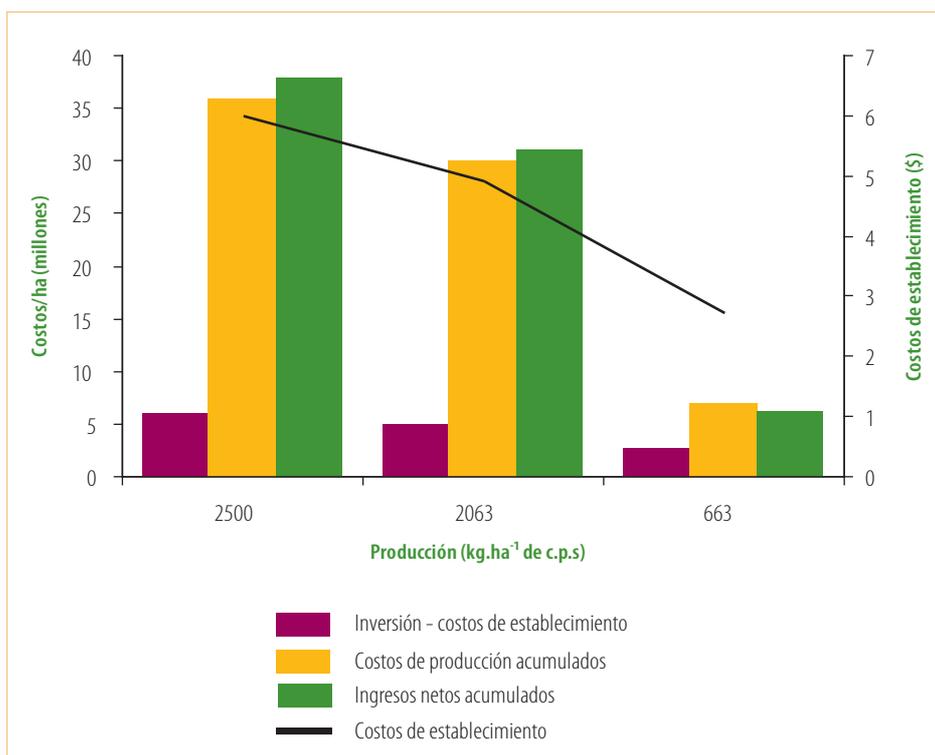
Es frecuente observar en fincas cafeteras que el caficultor no posea el 100% del área cultivada con café, o que posea áreas con café demasiado viejo (café abandonado), o simplemente áreas que se

<sup>14</sup> Barbecho, Rastrojo, Baldío: Período en el que no se siembra la tierra y se la deja descansar por varios años para su recuperación.

han dejado en rastrojos (barbechos), áreas con suelos de muy poco uso o áreas dejadas con muy pocos animales, entre otros; los cuales requieren grandes recursos ambientales y económicos para reincorporarlos a las áreas productivas de la finca cafetera.

La Disciplina de Economía<sup>15</sup> de Cenicafé realizó el siguiente ejercicio práctico con el fin de resaltar la importancia o beneficio económico de incorporar estas áreas a sistemas productivos con café (Figura 105). Se analizaron tres sistemas consistentes en el establecimiento de una hectárea con café con 5.000, 4.500 y 2.500 plantas/ha, y con el propósito de obtener producciones cercanas a 2.500, 2.063 y 663 kg de café pergamino seco por hectárea, respectivamente. Los costos de establecimiento de cada área se estimaron en \$ 6.000.000, \$ 4.909.091 y \$ 2.727.273 para cada densidad de siembra, en su orden. Con costos de producción acumulados de 36, 30 y 7 millones de pesos, respectivamente.

En el primer sistema, una vez deducidos los costos de establecimiento y producción, el caficultor obtendría ingresos equivalentes al 93,0% de un SMMLV<sup>16</sup> durante 8 años; para el segundo sistema este ingreso sería del 76,0% del SMMLV y en el tercer sistema del 15,0% del mismo salario. Con la producción y los ingresos netos acumulados calculados en el tercer sistema, no se alcanzaría a recuperar los costos de establecimiento (línea negra continua).



**Figura 105.**

Beneficios económicos de incorporar áreas para la producción de café en SAF, en fincas cafeteras<sup>17</sup> (Fuente: Serna, 2012<sup>18</sup>)

<sup>15</sup> Serna G., C. A. *Disciplina de Economía, Cenicafé. Agosto de 2012*

<sup>16</sup> *Salario Mínimo Mensual Legal Vigente*

<sup>17</sup> *Número de cosechas analizadas: 6- Valor carga de café: \$ 832.641 (promedio últimos 12 meses a julio de 2012)*

<sup>18</sup> Serna G., C. A. *Beneficios económicos de incorporar áreas para la producción de café en SAF. Cenicafé, 2012 (Ejercicio práctico)*

Datos básicos	
Variedad de café	Variedad Castillo® Naranjal
Distancias de siembra	1,35 x 1,35 m
Densidad de siembra	5.400 plantas/ha
Área cubierta por un árbol de café	1,83 m <sup>2</sup>
Promedio de la producción (2008 - 2012)	3.682 kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s.
Análisis <sup>19</sup>	
Producción calculada por planta	0,25 kg de c.p.s.
Precio por kilogramo de c.p.s	\$ 3.765
Pérdidas de sitios estimados	10%
Pérdidas de sitios por hectárea	540 sitios o plantas
Pérdidas en producción	135 kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s.
Ingresos dejados de percibir	\$ 508.275
Equivalentes en SMMLV	Cerca del 90% de un salario mínimo
Equivalente en jornales	Costo de aproximadamente 26 jornales, alrededor de un mes de labores en la finca
Equivalente en fertilizante	Cerca de diez bultos de fertilizante (17-6-18-6-7)
Este análisis se presenta para situaciones de precios bajos como los del año 2013. En condiciones normales estas cifras se pueden duplicar y en bonanza de precios hasta triplicar	
En relación con la inversión en la tierra, las pérdidas de un 10% de sitios representan para el caficultor	
Área dejada de cultivar o improductiva	999 m <sup>2</sup>
Precio comercial promedio la tierra (m <sup>2</sup> ) (Referente Estación Central Naranjal)	\$ 5.000
Valor de la inversión improductiva sin generar ingreso y ninguna rentabilidad	\$ 4.995.000
Costo de oportunidad si esa inversión se colocara en un CDT o en el mercado financiero <sup>20</sup>	\$ 249.750
Esto sólo para pérdidas estimadas de sitios del 10%. En el campo se registraron pérdidas efectivas del 18% de los sitios, lo cual casi duplica las cifras estimadas anteriormente	
Si adicionalmente a las pérdidas anteriores, se le suman las pérdidas por el incremento en los costos del Manejo Integrado de Arvenses (MIA)	El costo puede ser del orden de \$130.000 por hectárea

<sup>19</sup> Serna G. C. A. *Disciplina de Economía-Cenicafé. Discusión en Noviembre de 2013*

<sup>20</sup> Fuente: Banco de la República. *Tasas de captación semanales y mensuales. En [http://www.banrep.gov.co/es/series-estadisticas/see\\_tas\\_inter\\_capt\\_sem\\_men.htm](http://www.banrep.gov.co/es/series-estadisticas/see_tas_inter_capt_sem_men.htm) (consultado noviembre de 2013)*

# Quinto Componente - Sistema de indicadores

## 5.

Un indicador es un valor o número que indica el estado y desarrollo de un sistema y las condiciones que afectan al mismo; el objetivo de un indicador es suministrar información y representar de forma simple la complejidad del sistema que se quiere conocer, además de servir de guía para la toma de decisiones prácticas o técnicas. Por regla general, se consideran de gran utilidad como complemento de los agregados económicos convencionales. Las principales funciones de los indicadores son: Apreciar condiciones y tendencias; comparar entre lugares y situaciones; evaluar proyecciones en relación con metas y objetivos; permitir una alerta temprana; anticipar condiciones y tendencias futuras (Bautista *et al.*, 2004; Marín, 2006).

### 5.1 Valorar la sostenibilidad de los SAF con café

Los sistemas agroforestales buscan objetivos tanto ecológicos como económicos y sociales, porque se orientan a facilitar actividades productivas en condiciones de alta fragilidad, incluso donde los recursos naturales se encuentran degradados, mediante una gestión económica eficiente, alterando al mínimo la estabilidad ecológica, lo cual contribuye a alcanzar la sostenibilidad de los sistemas de producción y, en consecuencia, mejorar el nivel de vida de la población rural; adicionalmente, promueven una serie de beneficios como aumentos de la producción, del nivel de empleo y del ingreso de los productores rurales, siempre velando por el desarrollo sostenible, es decir, por la producción con respeto por el ambiente. Los sistemas agroforestales presentan interacciones ecológicas y económicas entre los diferentes componentes, el propósito es lograr un sinergismo entre ellos, lo que conduce a mejoras en uno o más rangos de características, tales como productividad y sostenibilidad, beneficios ambientales y no comerciales. En los SAF, árboles y arbustos son cultivados de forma interactiva con cultivos agrícolas, con múltiples propósitos, constituyéndose en una opción viable para mejor utilización del suelo, para revertir los procesos de degradación de los recursos naturales, para aumentar la disponibilidad de madera, de alimentos y de servicios ambientales (Risbaski, 2009; ECOSAF, 2010), venta de bonos de carbono, aumento en cantidad y calidad del agua, aumento de la biodiversidad de los sistemas productivos y participación en nichos de mercados de productos amigables con el medio ambiente, entre otros. En esta unidad se expondrán algunos aspectos relativos a la sostenibilidad ambiental donde están involucrados los sistemas agroforestales con café.

### 5.1.1 Valoración de la sostenibilidad ambiental de sistemas de producción de café, mediante indicadores de calidad del suelo

La sostenibilidad hace referencia al uso que los humanos le dan a un ecosistema, la forma en que éste produzca un beneficio continuo, siempre que se mantenga su potencial para satisfacer las necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras. El término desarrollo sostenible, sustentable o perdurable se aplica al desarrollo socioeconómico y fue formalizado por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland (WCED, 1987). Dicha definición se asumiría en el Principio 3º de la Declaración de Río 1992 (PNUMA, 1992): “Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”.

La sostenibilidad ambiental es “la capacidad de mantener las cosas o cualidades que son valoradas en el entorno físico; es el manejo sostenible de los recursos naturales, lo cual se traduce en rentabilidad (Doran y Zeiss, 2000; Rodrigues *et al.*, 2003). En el medio rural, el entorno físico se compone de fincas y zonas de vida, de los agricultores, el suelo, las aguas, la atmósfera y el componente biológico (variedades utilizadas para la agricultura, plagas y enfermedades, especies nativas, y comunidades ecológicas, tanto de origen antropogénico y natural).

Uno de los desafíos que enfrentan tanto caficultores como extensionistas e investigadores es saber cuándo un agroecosistema es saludable, o más bien en qué estado de salud se encuentra después de iniciado el cultivo; aunque se han desarrollado indicadores para alcanzar esta determinación, generalmente estos consisten en observaciones o mediciones que se realizan a nivel de finca para ver si el suelo es fértil y conservado, o si las plantas están sanas, vigorosas y productivas. En otras palabras, los indicadores sirven para caracterizar al agroecosistema. Hasta el momento, se habla de la importancia de la sostenibilidad ambiental en términos de la calidad del suelo y las posibles recomendaciones para lograrlo, pero no se han identificado los indicadores con los cuales se pueda evaluar, con un respaldo estadístico en su construcción.

Con el propósito de valorar la sostenibilidad de sistemas de producción apoyada en indicadores de calidad del suelo, en las zonas cafeteras de los departamentos de Santander-Mesa de los Santos; Cauca-Piendamó y Caldas-Chinchiná, Farfán (2010) realizó respectivos estudios.

En el departamento de Santander la unidad de análisis fue la Finca El Roble; se seleccionaron dos lotes con sombrío de *Inga edulis* (guamo santafereño) y *Albizia carbonaria* (carbonero) uno fertilizado orgánicamente y otro sin fertilización; otros dos con sombrío de *Tabebuia rosea* (guayacán rosado) y *Cordia alliodora* (nogal cafetero) con y sin fertilización y un lote donde no se ha realizado ninguna siembra por más de 10 años. La densidad de siembra del café fue de 4.500 plantas/ha y la del sombrío 78 árboles/ha; el café se ha manejado por más de 7 años bajo prácticas orgánicas.

En el departamento del Cauca las unidades de análisis fueron las fincas Jardín de Oriente, Vista Hermosa, La Margarita y La Verónica; la primera se maneja con prácticas orgánicas por más de 7

años y en las tres siguientes se realiza una producción convencional. La densidad de siembra del café fue de 5.000 plantas/ha; en las fincas convencionales se cultiva café a libre exposición solar y en la orgánica bajo sombrío de *Inga densiflora* (guamo macheto) y plátano.

En el departamento de Caldas el estudio se realizó en la Estación Central Naranjal. En esta Unidad se seleccionaron cuatro lotes: Uno con café y manejo orgánico por más de 7 años, otro con café y manejo convencional, otro con café sin algún tipo de intervención (orgánico o convencional) y otro donde no se ha realizado algún tipo de siembra (barbechos). La densidad de siembra del café es de 10.000 plantas/ha en todos los casos y a libre exposición solar.

- **Selección inicial de variables.** De acuerdo al criterio de expertos se preseleccionaron para el análisis, las variables físicas, químicas y biológicas presentadas en la Tabla 65.

**Tabla 65.**

Variables físicas, químicas y biológicas preseleccionadas para el análisis

Variables físicas	Variables químicas	Variables biológicas
Contenido de arena	Nitrógeno	Arvenses agresivas
Estabilidad de agregados	Magnesio	Arvenses nobles
Contenido de arcilla	Manganeso	Materia orgánica
Densidad real	Fósforo	Población de lombrices
Retención humedad (30kPa)	Calcio	Macroinvertebrados
Ret. humedad (100 kPa)	Cinc	Cobertura de arvenses
Ret. humedad (1.500 kPa)	Potasio	
Densidad aparente	Sodio	
Resistencia a la penetración	Boro	
Humedad del suelo	pH	
Conductividad hidráulica	Azufre	
	Conductividad eléctrica	
	Cobre	
	CIC	
	Hierro	
	Aluminio	

Con las variables seleccionadas se realizó un Análisis de Componentes Principales. Este análisis mostró que en general las 11 variables físicas en los dos primeros componentes explican el 75,0% de la variabilidad total. Para las 16 variables químicas, las tres primeras componentes explican el 80,8% de la variación total. Para las seis variables biológicas, las tres primeras componentes explican el 80,3% de la variación total.

- **Selección del Conjunto Mínimo de Variables (CMV).** El criterio aplicado para la selección del CMV de calidad del suelo, con los que se valoró la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas, fue seleccionar solo aquellas variables que por su mayor valor propio o peso

hubiesen quedado ubicadas sólo en el componente 1; así, el conjunto mínimo de variables físicas estuvo constituido por la retención de humedad a 30, 100 y 1.500 kPa, densidad aparente, resistencia a la penetración, humedad del suelo y conductividad hidráulica. El conjunto mínimo de variables químicas lo conformaron las variables Mg, Mn, P, Ca, Zn, K, Na, B, pH, S, Conductividad eléctrica y Cu; adicionalmente y aunque su ubicación fue en el componente dos se incluyó el N, dada su importancia como indicador de la calidad del suelo. Las variables cobertura de las arvenses nobles y agresivas y contenido de materia orgánica, conformaron el CMV biológicas.

Karlen *et al.* (2003), USDA (1999), Murage *et al.* (2000), Glover *et al.* (2000), Brejda *et al.* (2000), Nortcliff (2002), Wander *et al.* (2002), Van Dang (2007), Mastro *et al.* (2008) y Zobeck *et al.* (2008), entre otros, afirman que las variables físicas que mejor indican la calidad del suelo son la densidad aparente, resistencia a la penetración, estabilidad de agregados, porosidad total, velocidad de infiltración del agua, capacidad de retención de humedad, humedad del suelo, contenido de arena, distribución de poros y profundidad del suelo; dentro de las químicas reportan al pH, contenidos de N, K, Ca, Mg, S y Na, la CIC, el C orgánico y la conductividad eléctrica; y dentro de las biológicas la materia orgánica, población de macroinvertebrados, biomasa microbiana del suelo, porcentaje de cobertura de arvenses productividad del cultivo, tasa de respiración y población de lombrices.

- **Índice descriptivo.** El Índice General (Ecuación <10>), para valorar la Sostenibilidad Ambiental (IGSA) de sistemas de producción con café en tres localidades de la zona cafetera colombiana, fue:

$$IGSA = \left( \left( \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \right) * 0,28 \right) + \left( \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \right) * 0,58 \right) + \left( \left( \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \right) * 0,14 \right) <10>$$

IGSA = Índice General de Sostenibilidad Ambiental

$F_i$  = Variables físicas

$Q_i$  = Variables químicas

$B_i$  = Variables biológicas

$n$  = Número de variables físicas, químicas o biológicas

Rodríguez y Jiménez (2007), diseñaron un conjunto de variables en tres dimensiones de análisis y lo denominaron Índice Aproximado de Sostenibilidad, el cual permite evaluar el nivel de aporte de las fincas (alto, medio y bajo) a la sostenibilidad; éste además facilita el monitoreo de las actividades y permite corregir y orientar oportunamente las medidas necesarias para elevar la sostenibilidad de una región o finca. Amacher y O'Neill (2003), desarrollaron un índice para reducir los valores de las propiedades químicas y físicas del suelo en un solo valor "crítico" para

esas características; el método suma todos los valores para establecer un “índice aditivo”; el que, finalmente indicará el estado de la calidad del suelo por aumento o disminución del resultado, expresado como un porcentaje del número total de características evaluadas.

Karlen y Andrews (2000) plantean que el concepto de calidad del suelo puede ser definido analizando sus componentes físicos, químicos y biológicos integrados en un índice, el cual incluye identificación de los indicadores apropiados seleccionados con el uso y funciones en el suelo; selección de un conjunto mínimo de datos y desarrollo de funciones que permitan integrar las variables físicas químicas y biológicas en una sola función o índice. Enfatizan además que este tipo de indicadores pueden ser usados para la evaluación de la sostenibilidad.

## **Comparación prospectiva de los sistemas de producción con café**

### ***Aplicación de redegramas de la sostenibilidad***

- **Departamento de Santander, Finca El Roble.** Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides, área verde (AC), del área total de la figura, de los cuatro sistemas de producción de café y el barbecho (rastrajo), en la finca El Roble, departamento de Santander, se presentan en la Figura 106.

Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides en las figuras de redes, fueron de 47,07% y 40,47% para los sistemas de producción café + guamo + carbonero sin y con fertilización; las áreas ocupadas por los centroides en los sistemas de producción de café + guayacán + nogal con y sin fertilización fueron de 41,67% y 30, 29% y el control o barbecho abarcó un área de 19,41%. Canu y Zucca (2006), evaluaron el impacto sobre el suelo causado por la conversión de barbechos a sistemas agropastoriles, de sus resultados obtuvieron diferencias en las características físicas y químicas del suelo y que las actividades agropastoriles tuvieron un efecto marcado sobre el suelo traduciéndose en una degradación severa.

De las figuras en redes, se pudo inferir que la retención de humedad a 30 kPa, se encontró cercana a su límite inferior en los sistemas de producción café + guamo + carbonero sin fertilizar y en los dos sistemas de producción de café con sombríos de guayacán y nogal. Solo el sistema café + guamo + carbonero con fertilización, presenta la retención de humedad a 1.500 kPa cercano a su límite inferior; y a excepción del primer sistema analizado (café + guamo + carbonero sin fertilizar) la conductividad hidráulica fue muy lenta o cercana a los valores mínimos registrados para la localidad, lo cual relaciona directamente con la resistencia a la penetración. El no tener valores cercanos a cero en las figuras de redes, denota que las variables físicas no comprometen la estabilidad o sostenibilidad ambiental de los sistemas estudiados.

Las variables químicas más determinantes en la reducción de la sostenibilidad ambiental (contribución a la reducción del área sombreada) para el sistema de producción café + guamo + nogal sin fertilización fueron S, N y Mn, los contenidos de S se encontraron por debajo del rango inferior adecuado para el café. En el mismo sistema, pero con fertilización, las variables



Figura 106.

Redegrana con las variables físicas, químicas y biológicas para cuatro sistemas de producción de café y un testigo-Santander.

determinantes fueron S, Mg, Ca y K; no obstante, el S se valoró con niveles superiores a los aceptables para el café.

En el sistema café + guayacán + nogal sin fertilizar se registraron las variables conductividad eléctrica, Mg y Ca, y en el mismo sistema pero con fertilización orgánica fueron más críticas las variables Mg, Mn, P, Ca, K y pH, con contenidos muy superiores a los recomendados para el cultivo del café y menor proporción el Zn, Na, B y S.

La reducción en el centroide o área sombreada en la figura de redes y que es indicativo de la baja estabilidad ambiental del testigo (barbecho o rastrojo), fue determinada por el Mg, Mn, Ca, Zn, B, pH, S y Cu; caso contrario, estos contenidos se encontraron en niveles inferiores a los contenidos mínimos recomendados para el café. En sistemas de manejo alternativos de suelos y convencionales y teniendo cultivos autosostenibles como testigos Valarini *et al.* (2006), obtuvieron en este último mejorías en las propiedades físicas y químicas del suelo.

La gran mayoría de las variables biológicas estuvieron dentro de los rangos óptimos para el cultivo del café, haciendo una gran contribución a la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas, no obstante, se pudo inferir que los contenidos de materia orgánica correlacionaron inversamente con el porcentaje de cobertura de las arvenses agresivas y positivamente con el de las arvenses nobles. Zagal y Córdova (2005), determinaron que la materia orgánica del suelo es la más sensible al manejo agronómico del suelo, ubicándose como una de las variables biológicas apropiadas para determinar los cambios tempranos en su calidad.

Gulser (2004), observó que al comparar suelos cultivados con diferentes especies con aquellos no cultivados, en los primeros se incrementan los contenidos de materia orgánica, la estabilidad estructural, la porosidad, la velocidad de infiltración y el contenido de N total; mientras que se reducen la resistencia a la penetración, la densidad aparente y el pH del suelo. Diack y Stott (2001), observaron mediante el índice de calidad del suelo construido para evaluar suelos con diferentes manejos, que la estabilidad de agregados decrece a medida que es menor la intervención del suelo, mientras que la tasa de infiltración aumenta. Los contenidos de C y N totales, la biomasa microbiana y la actividad enzimática fueron relativamente mayores en sistemas de cultivo sostenibles que en los convencionales.

De lo anterior se puede deducir que desde el punto de vista ambiental, en esta localidad, en esta unidad de análisis y bajo las condiciones climáticas y épocas de muestreo, sólo para este estudio, es más benéfico cultivar los suelos en sistemas agroforestales con o sin intervención (aplicación de fertilizantes orgánicos), que mantener suelos en rastrojos o barbechos.

- **Finca orgánica y fincas convencionales, departamento del Cauca.** Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides, áreas color amarillo en el Redegramas (AC) de la finca de producción de café orgánico y tres de café convencional, en el departamento del Cauca, se presentan en la Figura 107.

Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides en las figuras de redes fueron de 30,50% para el sistema de producción de café orgánico y de 30,50%, 32,83% y 36,38% en los sistemas de producción de café convencional, para las fincas La Verónica, Vista Hermosa y La Margarita respectivamente. Dada la similitud en las áreas ocupadas por los centroides de los redegramas se puede presumir que los sistemas de producción de café donde se hacen prácticas y aplicaciones de productos de síntesis química, son ambientalmente sostenibles como aquellos sistemas de producción donde no se hace ningún uso de ellos; siempre que estas prácticas sean las técnicamente recomendadas.

La conductividad hidráulica es la única variable y para los sistemas de siembra de café bajo sombrío, que se encuentra debajo de los límites mínimos establecidos para esta variable, lo cual contribuye significativamente a la estabilidad ambiental de los sistemas de producción; Aoki y Sereno (2006), observaron que la velocidad final del proceso de infiltración se comporta como un indicador de calidad de suelo válido para detectar diferencias significativas en las propiedades del horizonte superficial de un suelo Haplustol típico, en condiciones de bosque nativo y en un agroecosistema manejado con labranza convencional.

Sin embargo variables como la retención de humedad a 30 y 100 kPa, sugieren que están muy cerca a los límites inferiores de retención de humedad establecidos; variables que en su conjunto están contribuyendo marcadamente a la reducción de la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas evaluados. Solo en la Finca La Margarita (producción de café convencional), a excepción de la conductividad hidráulica, todas las variables físicas del suelo analizadas se encuentran cercanas a los rangos óptimos establecidos para esta localidad.

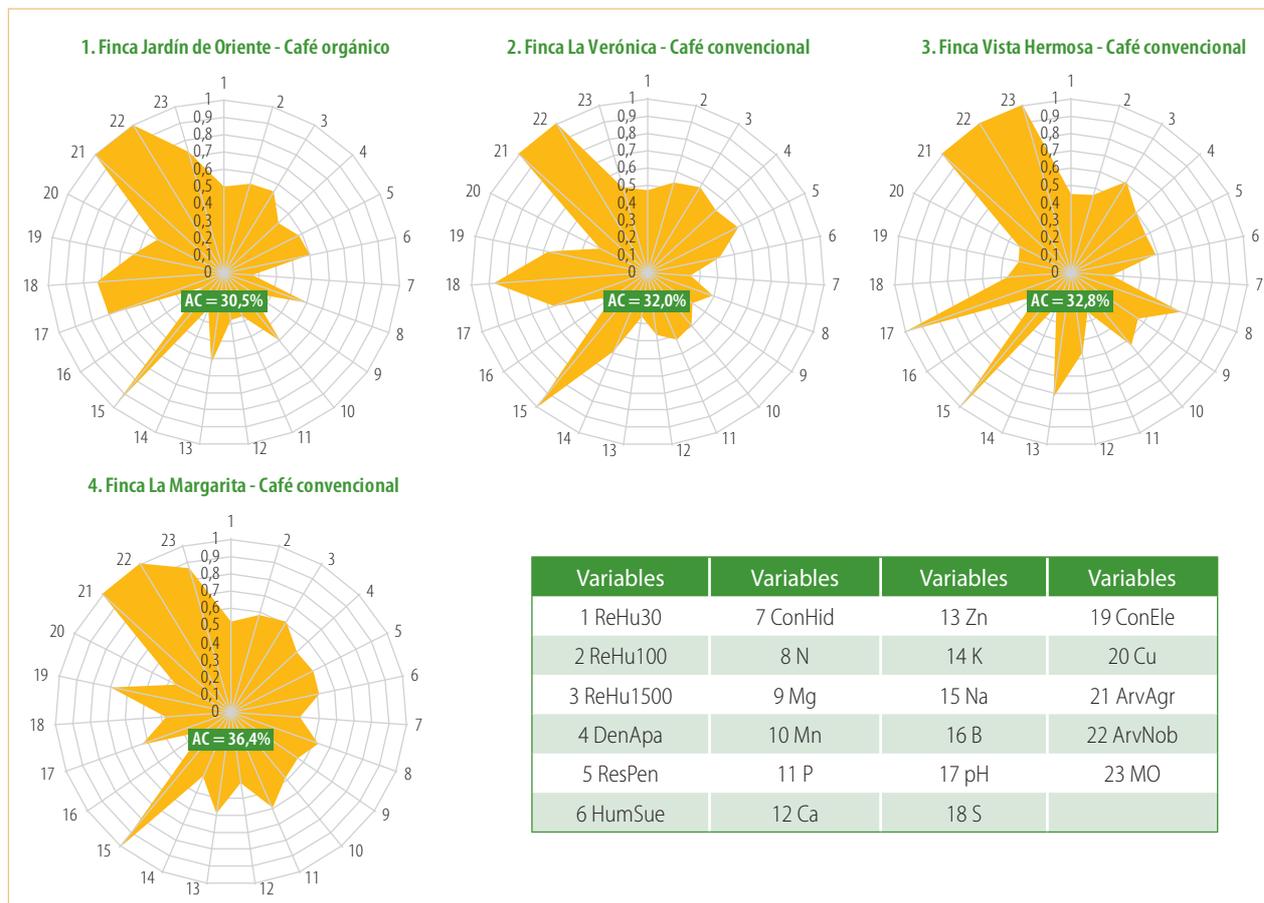


Figura 107.

Redegrana con las variables físicas, químicas y biológicas para una finca de producción de café orgánico y tres de café convencional-Cauca.

Lister *et al.* (2004), compararon suelos no disturbados, suelos compactados y suelos en barbecho, registrando que en los suelos compactados se incrementa la densidad aparente y decrece la macroporosidad y conductividad hidráulica, comparado con los otros dos tipos de suelo. Paz y Sánchez (2007), observaron que en suelos bajo sombrero medio fue mayor el contenido de materia orgánica, la densidad aparente y la capacidad de retención de humedad, mientras que en suelos a libre exposición fue mayor el índice de estabilidad estructural. Glover *et al.* (2000), mediante indicadores de calidad del suelo que incluyeron propiedades físicas, químicas y biológicas en sistemas de cultivo de manzana convencionales y orgánicos, obtuvieron que en los sistemas orgánicos se incrementa la estabilidad de agregados, la biomasa microbiana y la abundancia de lombrices al compararse con los convencionales, y en los orgánicos disminuye la densidad aparente.

Las variables químicas de mayor valor o peso en la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción evaluados en el departamento del Cauca (contribución a la reducción del área sombreada en la Figura 104) fueron: Mg, K y B en el sistema de producción de café orgánico (finca Jardín de Oriente), pues sus niveles se encontraron por debajo de los límites inferiores establecidos para el cultivo del café. En el sistema de producción de café convencional (finca La Violeta), los niveles de Zn y B se encontraron por abajo del límite inferior. En la finca Vista Hermosa (producción de café convencional), fueron determinantes el P, K y B, el primero se encuentra por debajo del rango inferior para el cultivo y los otros dos por encima de estos límites. El B fue la variable química que se presentó por debajo de los niveles mínimos establecidos para café, en la finca La Margarita.

Es de notar que las variables Mg, P, Ca y K, en todos los sistemas de producción evaluados, están por debajo del límite inferior adecuado para el cultivo del café o se encuentran muy cercanos a éste, lo cual indica que están contribuyendo marcadamente a la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas valorados. Las variables biológicas evaluadas no comprometen notoriamente la estabilidad ambiental de los sistemas de producción de café, convencional u orgánicos estudiados; siendo notable la contribución de la dominancia de arvenses nobles a esta estabilidad. Torres *et al.* (2006), sostienen que el estado conservacionista de sistemas de producción, en cuanto a pérdidas de suelo, es debida a las coberturas de arvenses más que a cambios en las propiedades químicas y físicas.

Aromolo y Francaviglia (2006), en dos sistemas de cultivo, uno intensivo con aplicación de fertilizantes químicos y otro con fertilización orgánica, encontraron que la fertilidad global era alta en ambos suelos, que la fertilidad química era mayor en suelos con fertilización mineral y que la fertilidad intrínseca era igual; sin embargo Motta *et al.*, (2002), obtuvieron que al intensificar el manejo del suelo se afecta negativamente las variables químicas y sugieren limitar o reducir el disturbio del suelo.

George (2006), observó que en fincas orgánicas y convencionales, las variables actinomicetes, lombrices de tierra, densidad aparente y resistencia a la penetración, fueron diferentes, pero no las variables pH del suelo, acidez, N, materia orgánica, Ca, Cu, Zn, Mn y Fe; además, Matoso *et al.* (2007), al comparar café cultivado en un sistema agroforestal con uno a libre exposición

solar, observaron en el sistema agroforestal mayores tenores de humedad del suelo, CIC, suma de bases, mayores niveles de K, Ca, Mg, Cu y Zn, y menores contenidos de saturación de Al y Al intercambiable y que el cultivo al sol solo presentó mayor tenor de P y materia orgánica. Carvalho *et al.* (2004), también encontraron que los sistemas agroforestales presentan una calidad del suelo superior cuando es comparado con el suelo cultivado en un sistema convencional, presentando menor densidad aparente, mayor porosidad, menor resistencia a la penetración y mayor agregación de partículas.

- Estación Central Naranjal, departamento de Caldas.** Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides (sombra rosada en la figura), del área total de la figura, del sistema de producción de café orgánico, dos convencionales y el control o barbecho, en la Estación Central Naranjal, se presentan en la Figura 108.

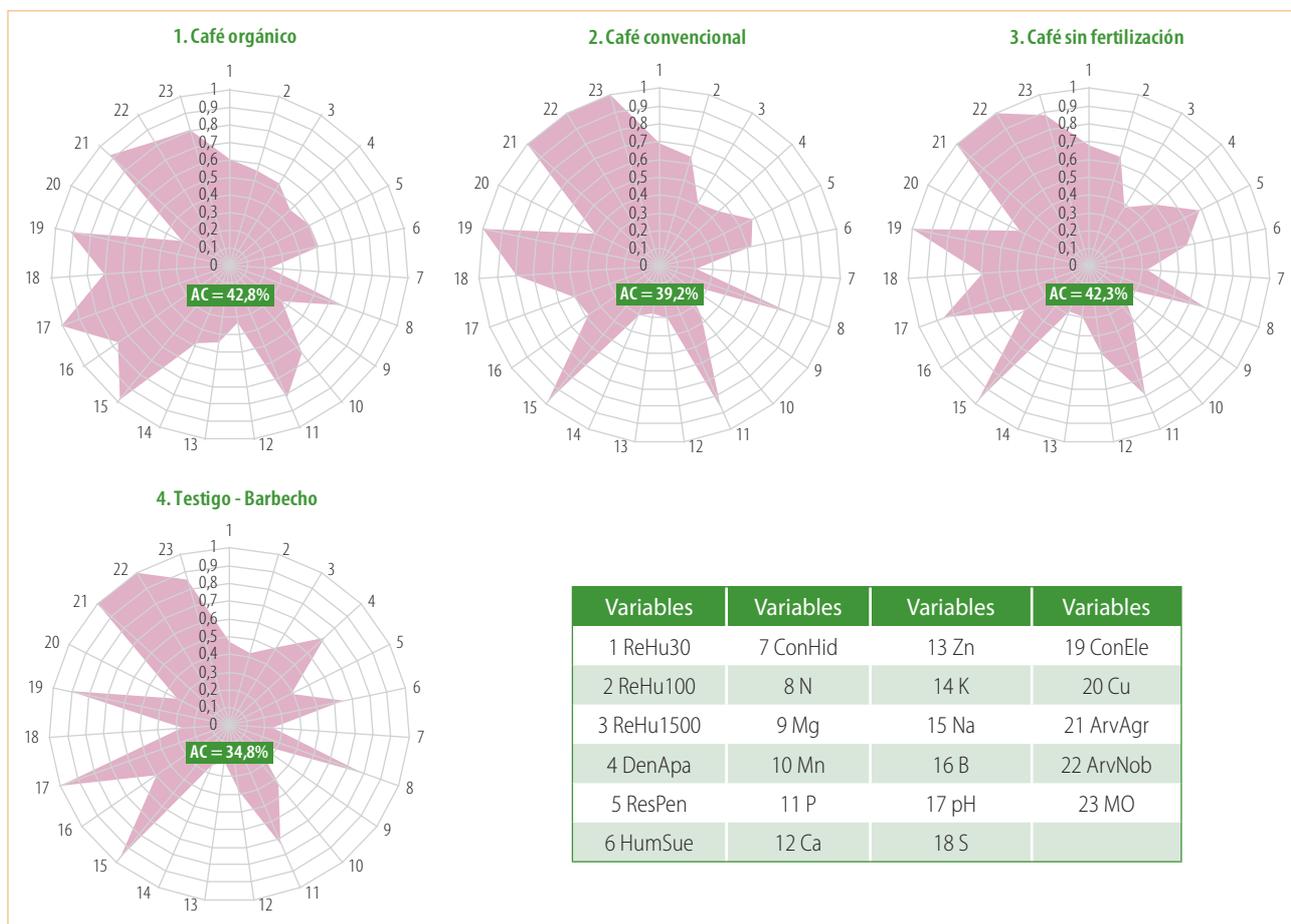


Figura 108.

Redegrama con las variables físicas, químicas y biológicas para cuatro sistemas de producción de café y un testigo-Caldas.

Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides en las figuras de redes fueron de 42,8% para el sistema de producción de café orgánico, 39,2% para el sistema de producción de café convencional con aplicación de fertilizante químico, 42,3% para el sistema de producción de café sin aplicación de algún tipo de fertilizante y 34,8% para el control o barbecho. De estos resultados se puede inferir que los sistemas de producción de café donde se hacen prácticas y aplicaciones de productos de síntesis química, son tan ambientalmente sostenibles como aquellos sistemas de producción donde no se hace ningún uso de ellos y que desde el punto de vista ambiental, son más sostenibles los sistemas de producción de café (con aplicación de fertilizantes orgánicos o sin fertilización ninguna), que mantener áreas en barbechos o rastrojos.

La conductividad hidráulica es la única variable y específicamente para los sistemas de siembra de café orgánico y convencional junto con el barbecho, que se encuentra debajo de los límites mínimos establecidos para esta variable. No obstante, variables como la densidad aparente y la retención de humedad a 1.500 kPa, en los sistemas de producción convencional, sugieren que están muy cerca a los límites inferiores; variables que en su conjunto están contribuyendo marcadamente a la reducción de la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas evaluados. Murage *et al.* (2000), evaluaron mediante indicadores de calidad del suelo y percepción de los agricultores, suelos productivos y de baja productividad en Kenya Central, los estudios mostraron que los agricultores relacionaron la productividad del suelo con baja compactación, buena humedad, color, presencia de arvenses e invertebrados del suelo. Todos los agricultores le atribuyeron la baja fertilidad al uso inadecuado de fertilizantes, remoción de los residuos de cultivo y a la falta de rotación de cultivos.

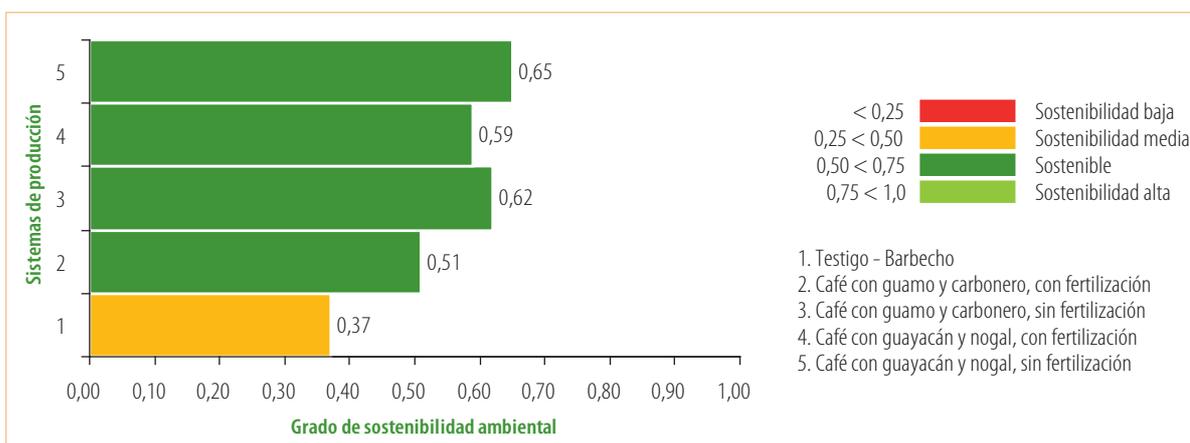
La productividad del suelo relacionó significativamente con el pH, capacidad de intercambio catiónico y P y N intercambiable en los suelos no productivos; en suelos productivos fue superior el C orgánico, biomasa microbiana, mineralización del N, respiración y biomasa microbiana. Han *et al.* (2006), observaron que la aplicación de fertilizantes (N, P, K solos o en mezclas) afectan la dinámica del carbono y que los fertilizantes retrasan la tasas de descomposición de la materia orgánica, además indican que los fertilizantes químicos deben ser aplicados en mezcla con abonos orgánicos. George (2006), determinó que las variables biológicas son asociadas positivamente con suelos cultivados con café orgánico y que variables como densidad aparente, resistencia a la penetración, contenidos de P, K, Cu, Zn y Mn están asociadas negativamente con bosques, pero que a su vez están positivamente asociadas a cultivos convencionales.

Las variables biológicas evaluadas no comprometen notoriamente la estabilidad ambiental de los sistemas de producción de café, convencional u orgánicos, estudiados. Porras (2006), estudió comparativamente los sistemas de producción orgánica y convencional de café y su impacto en la calidad de suelos; el análisis de componentes principales mostró que la biomasa microbiana y carbono orgánico correlacionaron con suelos bajo bosques; la población de lombrices tuvo correlación con suelos bajo producciones orgánicas; la densidad aparente y el contenido de potasio correlacionaron con los suelos bajo producciones convencionales. Alcántara y Ferreira

(2001), evaluaron la materia orgánica del suelo, densidad aparente, porosidad total y la estabilidad de agregados observando que estas variables se relacionan directamente con el contenido de la materia orgánica.

**Aplicación del índice general de sostenibilidad ambiental (IGSA) a los sistemas de producción.** El índice general de sostenibilidad ambiental representa la situación de todo el sistema, y su valor puede variar entre 0 y 1. Conforme el valor asumido por el índice se va acercando a 1, el sistema tiene un mejor desempeño de desarrollo. Situación contraria pasa si el índice se va acercando a 0, ya que el desempeño del sistema va empeorando. Al ser el índice un valor numérico específico, realizar análisis comparativos se convierte en un proceso sencillo. Debido a que el índice de sostenibilidad ambiental se elabora a partir de la situación de los diferentes grupos de variables, es posible determinar la contribución de cada una de ellos al índice general, lo que ayuda a la determinación de los posibles desequilibrios entre los mismos. El cálculo de índices individuales (por grupos de variables) facilita la identificación del desempeño en cada grupo. Mediante esta información es posible hacer recomendaciones tendientes al mejoramiento de los sistemas de producción.

- **Departamento de Santander.** En la Figura 109, se presenta la valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en una escala de 0 a 1, de los agrosistemas estudiados en el departamento de Santander.



**Figura 109.**

Escala de valoración de la sostenibilidad ambiental en los agrosistemas evaluados en el departamento de Santander

De acuerdo al índice de sostenibilidad ambiental construido con los conjuntos de variables físicas, química y biológicas del suelo, se ha propuesto que los sistemas de producción café con sombrío de guamo + carbonero con y sin fertilización, y el de café con sombrío de guayacán + nogal con y sin fertilización se pueden ubicar en la categoría de sostenibles, con valores de IGSA de 0,65; 0,59; 0,62 y 0,51 respectivamente, no obstante son calificaciones muy cercanas a las de la categoría de medianamente sostenibles, y por tanto, deberán implementarse las prácticas agronómicas necesarias para incrementar el grado de sostenibilidad ambiental de todos los sistemas. El barbecho o testigo se ubica en la categoría de medianamente sostenibles con un valor de IGSA de 0,37.

Desde el punto de vista de su valoración, los sistema agroforestales contribuyen más al mejoramiento y mantenimiento de la calidad de los suelos y éstos a su vez a la sostenibilidad ambiental de los sistemas, que si se dejan en rastrojos o barbechos; Navas *et al.* (2008), estudiaron la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de nutrientes, la retención y velocidad de infiltración del agua, el pH y contenido de carbono como indicadores de la recuperación de suelos abandonados, después de haber sido plantados con especies forestales, obteniendo que estas variables son indicadores de la recuperación de la calidad de los suelos degradados y Obando *et al.*, (2004), mediante un Índice Acumulativo de nueve variables de Calidad del suelo (IAC), encontraron diferencias significativas del IAC al comparar sistemas agroforestales con cultivos a libre exposición de *Rubus glaucus*.

- **Departamento del Cauca.** En la Figura 110 se presenta la valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en una escala de 0 a 1, de los agrosistemas estudiados en el departamento del Cauca.

De acuerdo al índice de sostenibilidad ambiental construido con los conjuntos de variables físicas, química y biológicas del suelo, se ha propuesto que los sistemas de producción de café orgánico (finca Jardín de Oriente) y convencionales (fincas La Violeta, Vista Hermosa y La Margarita) se pueden clasificar en la categoría de sostenibles, con valores de pertenencia (escala de valor) de 0,52; 0,52; 0,56 y 0,57 respectivamente. No obstante, son calificaciones muy cercanas a las de la categoría de medianamente sostenibles y, por tanto, deberán implementarse las prácticas agronómicas necesarias para incrementar el grado de sostenibilidad ambiental de todos los sistemas.

En las fincas convencionales y en la orgánica fue evidente un alto grado de tecnificación caracterizado por la adopción de prácticas recomendadas para el cultivo del café, lo cual permitió inferir que de aplicarse adecuada y oportunamente estas prácticas, tanto los sistemas de producción convencional como los orgánicos son ambientalmente sostenibles; no obstante, George (2006) indica que las fincas bajo el manejo orgánico son más propensas para sostener mayor producción biológica y mantener las funciones básicas del ecosistema que las fincas bajo el manejo convencional y de pleno sol.

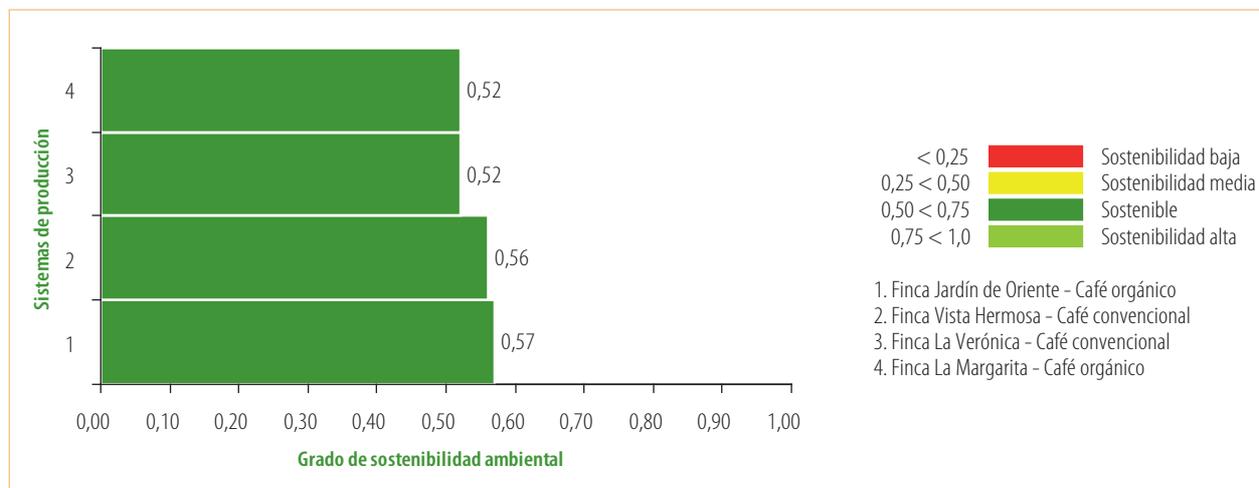


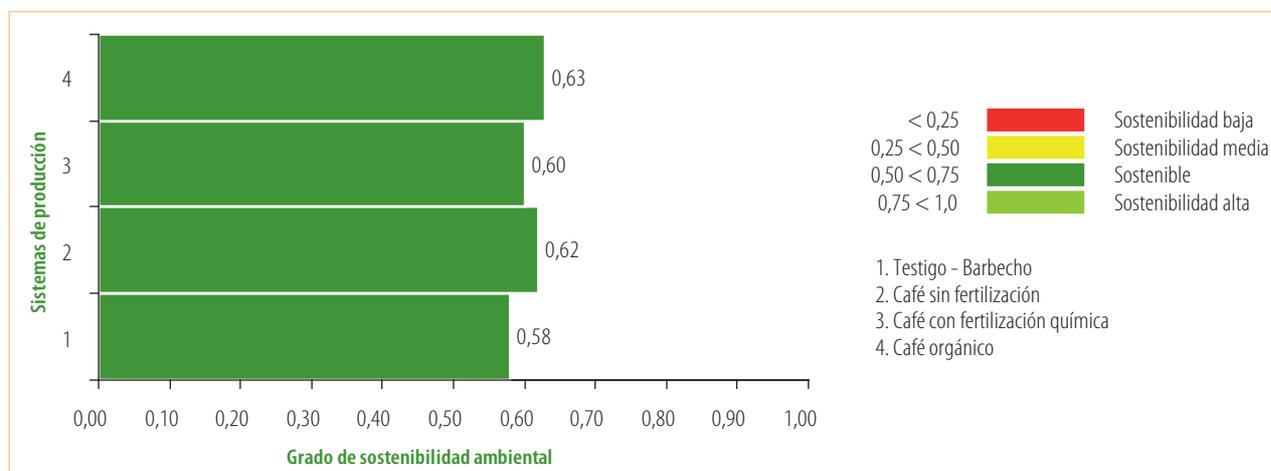
Figura 110.

Escala de valoración de la sostenibilidad ambiental en los agrosistemas evaluados en el departamento del Cauca.

Perie y Munson (2000), construyeron indicadores para valorar la sostenibilidad ambiental de los sistemas, obtuvieron que la aplicación de herbicidas y fertilizantes químicos tienen un efecto negativo sobre las variables del suelo C orgánico, disponibilidad de N, actividad de la fosfatasa, la masa microbiana, afectando negativamente la calidad del suelo. Para analizar diferencias en la calidad del suelo cultivado con manzanas orgánicas y convencionales, Glover *et al.* (2000) establecieron una escala de valoración de la calidad entre 0 y 1, al integrar variables físicas, químicas y biológicas en un solo índice y relacionándolo con la productividad asignaron un valor de 0,92 a los sistemas orgánicos y de 0,78 a los convencionales; siendo los primeros suelos significativamente de calidad superior.

- Departamento de Caldas.** En la Figura 111, se presenta la valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en una escala de 0 a 1, de los agrosistemas estudiados en el departamento de Caldas.

Dada la unidad de análisis seleccionada, son claros sistemas de producción tecnificados con aplicación de las prácticas recomendadas para el cultivo del café; lo cual permite concluir que de aplicarse estas prácticas frecuente y oportunamente los sistemas de producción convencionales son tan sostenibles como los orgánicos. No obstante, Serrano *et al.* (2006), encontraron que en fincas bananeras con buena, mediana y baja productividad las propiedades físico-químicas fueron alteradas por la adición de agroquímicos, además fueron las propiedades físicas las que más explicaron los cambios en la producción. Twist y Coltman (1996) aseguran que los desequilibrios nutricionales en cultivos de café se deben a aplicaciones masivas de tratamientos artificiales sin interesar la reposición del humus.



**Figura 111.**

Escala de valoración de la sostenibilidad ambiental en los agrosistemas evaluados en el departamento de Caldas.

Glover *et al.* (2000) en cultivos de *Malus domestica* (Albaricoque), reportan valores de subindicadores físicos de 0,37, químicos de 0,15 y biológicos de 0,12 y un Índice de Calidad del Suelo (SQ) de 0,92. En cultivos de manzana orgánicos, convencionales e integrados, Reganold *et al.* (2001) obtuvieron indicadores generales de calidad del suelo de 0,88; 0,78 y 0,92 respectivamente; indicadores que asumieron como indicador de calidad ambiental de los sistemas de producción. Cantú *et al.* (2007) en suelos con ganadería intensiva obtuvieron valores parciales para los grupos de variables físicas y químicas de 0,38 y 0,58 respectivamente y un Índice General de Calidad del Suelo de 0,47. No obstante, en fincas cultivadas con pastos Gómez *et al.* (1996) reportan índices de sostenibilidad entre 1,08 y 1,48.

De los trabajos realizados por Zobeck *et al.* (2008) en cultivos de maíz en rotación con *Hordeum distichon* (cebada), encontraron valores para subindicadores en el conjunto de variables físicas de 0,54, químicas de 0,63, biológicas de 0,47 y un Índice de calidad del Suelo de 0,65. En un sistema maíz en rotación con soja (*Glycine max*) cultivados en un suelo arcilloso, Diack y Stott (2001), obtuvieron índices parciales para los grupos de variables físicas, químicas y biológicas de 0,31; 0,14 y 0,041 respectivamente y un Índice General Integrado de calidad del suelo de 0,49.

Wander *et al.* (2002), en cultivos de maíz y soja en Estados Unidos, reportan subindicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo (ISQI) de 0,9; 0,47 y 0,20 respectivamente y un índice general promedio de calidad del suelo de 0,33. Velásquez *et al.* (2007) evaluaron la calidad del suelo de diversos sistemas de producción, incluyendo café, a través de un índice general

de calidad del suelo (GISQ), con valores de 1,00; 0,80; 0,78 y 0,77 para plantaciones, barbechos, pastos y café, respectivamente. Indican que los GISQ permiten la evaluación de la calidad del suelo, ayudan en la identificación de áreas problemáticas, facilitan la supervisión del cambio en el tiempo y pueden direccionar la puesta en práctica de las tecnologías de restauración del suelo.

## 5.2 Sistema de indicadores para diagnosticar el estado de un sistema agroforestal con café

Un sistema de indicadores es un conjunto ordenado de variables cuyo objetivo es proveer una visión de los intereses predominantes relativos a la realidad objeto de estudio, como son los SAF con café. Los sistemas de indicadores para el diagnóstico del estado de los SAF con café contribuyen a reducir la gran cantidad de información que se puede obtener de los sistemas, transformándola en un número manejable de características; lo que se traduce en una rápida y acertada planificación e implementación de planes de manejo y mejora de los SAF.

El “sistema de indicadores” está compuesto por variables que califican el estado del cultivo (diez indicadores) y del componente arbóreo (seis indicadores). Cada uno de los indicadores tiene su tabla de calificación o valoración, la escala de valoración del indicador es variable y se asigna un Peso Relativo a cada Factor (PRF) de 1 a 5; donde 1 es la peor condición y 5 la mejor condición del indicador. Se debe interpretar el significado del indicador antes de valorarlo.

### 5.2.1 Indicadores relativos al cultivo del café

#### 1. Edad del cultivo

Edad del cultivo del café (años)		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	> 10 años	Cafetal muy viejo
2	8 - 9 años	Cafetal viejo
3	6 - 7 años	Cafetal relativamente joven
4	4 - 5 años	Cafetal joven (productivo)
5	< 4 años	Cafetal muy joven (productivo)

## 2. Densidad de siembra

Densidad de siembra (plantas/ha) – Variedades porte alto		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	< 2.500	Cafetal de muy baja densidad
3	2.500 – 3.500	Cafetal con densidad aceptable
5	4.000 – 5.000	Cafetal denso

## 3. Porcentaje de renovación del café

Porcentaje de renovación del café		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	0,0	Cafetal sin renovación
2	20,0 – 39,0	Cafetal con muy baja renovación
3	40,0 – 59,0	Cafetal con baja renovación
4	60,0 – 79,0	Cafetal con renovación
5	80,0 – 100	Cafetal bien renovado

## 4. Porcentaje del área en café/área total de la finca

Porcentaje del área en café/área total de la finca		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	0,0 – 10,0	Caficultura muy inestable
2	20,0 - 30,0	Caficultura inestable
3	40,0 - 50,0	Caficultura moderadamente estable
4	60,0 – 70,0	Caficultura estable
5	80,0 – 100,0	Caficultura muy estable

## 5. Producción de café

Producción de café (@.ha-año <sup>-1</sup> de c.p.s)		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	<60	Muy baja
2	61 - 80	Baja
3	81 - 100	Moderada
4	101 - 120	Aceptable
5	> 120	Muy aceptable



## 6. Fertilización del café

Empleo de fertilizantes químicos en el café		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	Muy mal	No se fertiliza el café
2	Mal	Se aplica cualquier dosis, a cualquier momento y sin análisis de suelos
3	Regular	Se aplica la dosis, a cualquier momento y sin análisis de suelos
4	Bien	Se aplica la dosis y frecuencia, sin análisis de suelos
5	Muy bien	Se aplica la dosis y frecuencia, según análisis de suelos

## 7. Cobertura de arvenses

Cobertura de arvenses		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	< 20%	Suelo desnudo
2	0% - 20%	Suelo parcialmente desnudo
3	20% - 40%	Suelo moderadamente cubierto (condición de alerta)
4	40% - 80%	Suelo parcialmente cubierto
5	> 80%	Suelo cubierto

## 8. Dominancia de arvenses

Dominancia de arvenses (Relación arvenses nobles - agresivas)		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	0% - 100%	Alta dominancia de arvenses agresivas
2	20% - 80%	Moderada dominancia de arvenses agresivas
3	50% - 50%	Estado de alerta
4	80% - 20%	Moderada dominancia de arvenses nobles
5	100% - 0%	Alta dominancia de arvenses nobles





## 9. Broca del café

Infestación de broca del café		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	> 5,0%	Muy alto porcentaje de infestación
2	5,0 %	Nivel de infestación permisible
3	2,0 %	Umbral permisible entre cosechas
4	1,0% - 2,0%	Bajo nivel de infestación de broca
5	0,0%	Cultivo libre de broca

## 10. Roya del cafeto

Incidencia de roya del cafeto		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	> 20,0%	Muy alto porcentaje de incidencia
2	15,1% - 20,0%	Alto porcentaje de incidencia de roya
3	10,1% – 15,0%	Porcentaje medio de incidencia de roya
4	5,0% - 10,0%	Bajo porcentaje de incidencia de roya
5	< 5,0%	Muy bajo porcentaje de incidencia de roya

### 5.2.2 Indicadores relativos al componente arbóreo

## 11. Densidad de siembra de los árboles de sombrío

Densidad de siembra de los árboles de sombrío (árboles/ha)		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	> 278	Muy alta densidad de siembra
2	278	Alta densidad de siembra
3	< 70	Baja a Muy baja
4	123	Moderada densidad de siembra
5	70	Adecuada densidad de siembra

## 12. *Número de especies de árboles de sombrío del café por hectárea*

Número de especies de árboles de sombrío por hectárea		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	> 12	Demasiado número de especies de árboles
2	10 - 12	Muy alto número de especies de árboles
3	7 - 9	Alto número de especies de árboles
4	5 - 6	Moderado número de especies de árboles
5	1 - 4	Adecuado número de especies de árboles

## 13. *Estratificación del componente arbóreo (Número de estratos)*

Número de estratos de árboles en los sistemas de producción		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	> 12	Demasiado número de estratos de árboles
2	10 - 12	Muy alto número de estratos de árboles
3	7 - 9	Alto número de estratos de árboles
4	5 - 6	Moderado número de estratos de árboles
5	1 - 4	Adecuado número de estratos de árboles

## 14. *Altura de los estratos*

Escala de valoración de altura de los estratos		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	2 - 5 m	Muy baja o ninguna distribución de la luz dentro del cultivo
2	5 - 10 m	Baja distribución de la luz dentro del cultivo
3	10 - 20 m	Moderada distribución de la luz dentro del cultivo
4	20 - 35 m	Alta distribución de la luz dentro del cultivo
5	> 35 m	Muy alta distribución de la luz dentro del cultivo





## 15. Cobertura arbórea o porcentaje de sombrío

Cobertura arbórea o porcentaje de sombra		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	Más del 10% por encima del nivel adecuado	Sombrío muy homogéneo, muy alto
2	10% por encima del nivel adecuado	Sombrío homogéneo, alto
3	Más del 10% por debajo del nivel adecuado	Sombrío heterogéneo, muy bajo
4	10% por debajo del nivel adecuado	Sombrío heterogéneo, bajo
5	Medir en finca seleccionada	Nivel de sombrío adecuado para la zona

## 16. Número de podas de árboles por año

Número de podas de los árboles por año		
PRF	Escala de valoración	Interpretación
1	0	Ninguna regulación del sombrío
2	4	Exceso en la regulación del sombrío
3	3	Alta regulación del sombrío
4	1	Baja regulación del sombrío
5	2*	Adecuada regulación del sombrío

# Consideraciones generales

- La agroforestería describe un sistema de uso de la tierra en el cual se combinan temporal y espacialmente árboles con cultivos de valor económico.
- La introducción de árboles en los cultivos no debe ocasionar pérdidas económicas, sociales o ambientales.
- Los SAF contribuyen a optimizar la productividad del sistema mediante la producción sostenible y en comunidades cafeteras, apoya la conservación y la optimización de los recursos.
- Los sistemas agroforestales aumentan y mantienen la producción y la productividad (del suelo), por los productos obtenidos de los árboles y los cultivos, reducción en la aplicación de insumos y la eficiencia en la mano de obra.
- Los SAF tienen la capacidad de volver a su estado original después de una perturbación, conservando las características iniciales de sus componentes (resiliencia).
- Los SAF son alternativas viables para atenuar los efectos de las variaciones climáticas.
- En SAF, los árboles son el componente más grande y dominante y son específicos del agroecosistema.
- La asociación del árbol con cultivos proporcionan beneficios, ya que éstos interactúan entre sí, cumpliendo objetivos adicionales como protección del cultivo en épocas secas o períodos de alta radiación solar y temperatura, protección del suelo en períodos de alta pluviosidad, mantenimiento productivo del cultivo en zonas donde se requiera cultivar bajo cubierta arbolada; lo cual conlleva a una productividad continuada y sostenible.
- En SAF, los efectos de los árboles a largo plazo se expresan a través de las propiedades del suelo; el mantenimiento de niveles altos de materia orgánica es uno de los principales factores.
- Los sistemas agroforestales persiguen objetivos tanto ecológicos como económicos y sociales, porque se orientan a facilitar actividades productivas en condiciones de alta fragilidad, incluso donde los recursos naturales se encuentran degradados.
- Las interacciones entre los componentes de un SAF dependen de las condiciones del sitio (suelo y clima), la selección del genotipo (especie, variedad y procedencia), las características del suelo, de los árboles y los cultivos, y de las prácticas de manejo.

- La supervivencia de las plantas de cultivo al crecer en SAF se puede ver comprometida al hacerse más compleja las interacciones suelo-planta-agua-luz, debido a la estratificación del sistema (aumento en el número de especies por unidad de área), abandono en la regulación del sombrío y la disminución de la heterogeneidad ambiental y de la disponibilidad lumínica al cerrarse el dosel.
- Las interacciones entre árboles y café, deben centrarse en explorar diversas especies de árboles a establecer en los SAF, estudiar las interacciones en los SAF a diversas escalas espaciales, determinar las implicaciones ambientales de los SAF en zonas tropicales secas, y manejar los componentes del SAF para maximizar las ventajas.
- Los árboles de sombrío en los cafetales reducen los efectos que los períodos de déficit hídrico imponen sobre la producción, mantienen la fertilidad del suelo, reducen la erosión, reciclan nutrientes, aportan materia orgánica, incrementan las poblaciones de epífitas y la biodiversidad.
- Los SAF favorecen las plantaciones de café; es así como el potencial de producción, la conservación de la humedad del suelo y los nutrientes, y la reducción en la incidencia de plagas y enfermedades son los aspectos más importantes.
- En SAF hay mejor conservación de los recursos naturales y menor aplicación de insumos, lo que se traduce en menores costos de producción. Además, la explotación de los productos adicionales de los árboles utilizados para el sombrío se traduce en ingresos adicionales para el agricultor.
- El SAF con café tienen gran potencial para retener el carbono atmosférico, tanto en las partes aéreas de las plantas, como en el sistema radicular y en la materia orgánica del suelo.
- Los SAF representan una alternativa para los caficultores, al reducir la dependencia de un solo cultivo, logrando por lo general, incrementar la rentabilidad en las fincas.



## Definición Sistema Agroforestal Cafetero Colombiano (SAFC)

*“Un sistema agroforestal cafetero es un conjunto de prácticas de manejo del cultivo, donde se combinan especies arbóreas en asocio con el café o en arborización de fincas, cuyo objetivo es el manejo y conservación del suelo y del agua, el aumento y mantenimiento de la producción, para garantizar la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo social y económico de las familias cafeteras”*

Finalmente se presenta, a manera de matrices resumen, algunas consideraciones finales que podrán servir de consulta rápida y aplicación práctica, al momento de Diagnosticar y Diseñar (D&D) Sistemas Agroforestales con Café (SAFC).

## Matriz general para la decisión de establecer café a libre exposición solar o bajo sombrío

Criterios de decisión	CLE	CAA	ADF
<b>Criterios de clima y suelos</b>			
Zonas de altas temperaturas		✓	
Lluvia anual entre 1.800 a 2.000 mm (120 mm al mes)	✓		
Temperatura entre 19,0 a 21,5°C	✓		
Radiación solar de 382 cal cm <sup>-2</sup> día <sup>-2</sup> (3,5 kWh m <sup>-2</sup> )	✓		
Brillo solar anual entre 1.500 a 1.800 horas (4,5 h.día <sup>-1</sup> )	✓		
Protección del cultivo durante períodos secos (evento de “El Niño”)		✓	✓
Protección del suelo durante períodos húmedos (evento de “La Niña”)	✓		✓
Suelos sin limitaciones hídricas en la franja ideal de altitud	✓		
Suelos sin limitaciones nutricionales en la franja ideal de altitud	✓		✓
Suelos con baja capacidad de almacenamiento de agua		✓	
Suelos susceptibles a la erosión		✓	✓
Suelos poco profundos y poco estructurados		✓	
Suelos con bajos contenidos de materia orgánica y baja fertilidad natural		✓	
Suelos con vocación forestal			
Suelos con vocación agroforestal		✓	✓
Suelos con vocación agrícola	✓	✓	✓
Zonas de altitudes elevadas		✓	
Zona altitudinal óptima para el cultivo (1.200 a 1.800 m)	✓		
Zonas donde se presentan daños causados por el viento			✓
Regiones con Deficiencia Hídrica Anual (DHA) inferior a 150 mm	✓		✓
Regiones con DHA entre 150 y 200 mm		✓	
Regiones con relieve fuertemente quebrado		✓	
Regiones con pendientes fuertes (mayor que 50%)		✓	
Regulación del microclima dentro de la plantación		✓	✓
Aumento y mantenimiento de la materia orgánica del suelo	✓	✓	
<b>Criterios ambientales</b>			
Facilitar el desarrollo del sistema de producción	✓	✓	
Mantener y mejorar la fertilidad del suelo		✓	

Continúa...

... Continuación

Proporcionar hábitat para las especies nativas		✓	✓
Restaurar ecosistemas degradados	✓	✓	✓
Contribuir a generar agua limpia y fortalecer el ciclo hidrológico		✓	
Protección de especies arbóreas amenazadas o en peligro de extinción		✓	✓
Reducción en la perturbación del suelo <sup>21</sup>	✓		✓
Control natural de arvenses y reducción en aplicación de herbicidas <sup>22</sup>	✓	✓	✓
Asimilación de carbono (Carbono Neutral)	✓	✓	✓
Actitud ambiental (conservación)	✓	✓	✓
Criterios económicos			
Producir madera y fibra de una manera sostenible	✓	✓	✓
Crear oportunidades de agregar valor a los productos agrícolas		✓	✓
Desarrollar sistemas con alto potencial productivo	✓	✓	
Disponibilidad de insumos alta	✓		
Disponibilidad de insumos baja		✓	
Producción de cafés especiales	✓	✓	✓
Venta de bonos de carbono	✓	✓	✓
Obtención de beneficios económicos (frutos, resinas, fibras, etc.)		✓	✓
Reducción en la aplicación de insumos (fertilizantes, herbicidas)		✓	
Conservación de recursos naturales (biodiversidad)		✓	
Criterios sociales			
Producir alimentos sin riesgos para la salud y de alto valor nutritivo	✓	✓	
Asegurar un ingreso digno para los productores	✓	✓	✓
Producción de leña	✓	✓	✓
Cambio en valores, comportamientos y prácticas respecto al ambiente		✓	✓
Propósitos de investigación en sistemas agroforestales		✓	✓

<sup>21</sup> Establecimiento de café con 5.000 sitios/ha y 2 tallos/sitio

<sup>22</sup> Establecimiento del café con altas densidades de siembra

CLE: Café a libre exposición solar

CAA: Café en asocio de árboles

ADF: Arborización de fincas (árboles en protección fuentes de agua, linderos, caminos, barreras rompevientos, etc.)

## Respuesta del café al nivel de sombra con *Inga edulis* (guamo santafereño), en dos localidades de las zonas cafetera norte y centro de Colombia

### Localidades:

Estación Central Naranjal (Caldas) y Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar)

### Especie de sombrío en las dos localidades:

*Inga edulis* (guamo santafereño)

### Distancias de siembra:

6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha) - 9,0 m x 9,0 m (123 árboles/ha) - 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café:

1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha) en todos los casos y localidades

**Período de evaluaciones:** 1996 a 1999 en la Estación Central Naranjal

1997 a 2003 en la Estación Experimental Pueblo Bello

Variables evaluadas	Zona Centro	Zona Norte
	Naranjal	Pueblo Bello
Porcentaje de sombra con <i>I. edulis</i> a 6,0 m x 6,0 m	70,0%	58,0%
Porcentaje de sombra con <i>I. edulis</i> a 9,0 m x 9,0 m	60,0%	50,0%
Porcentaje de sombra con <i>I. edulis</i> a 12,0 m x 12,0 m	45,0%	34,0%
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	35,2	42,0
Promedio de la producción (kg.ha.año <sup>-1</sup> ) con sombrío a 6,0 m x 6,0 m	959,1	1.025,8
Promedio de la producción (kg.ha.año <sup>-1</sup> ) con sombrío a 9,0 m x 9,0 m	1.605,6	1.455,2
Promedio de la producción (kg.ha.año <sup>-1</sup> ) con sombrío a 12,0 m x 12,0 m	2.419,3	1.617,3
Diferencia en producción: 278 vs. 123 plantas/ha de <i>I. edulis</i>	67,4%	41,9%
Diferencia en producción: 123 vs. 70 plantas/ha de <i>I. edulis</i>	50,0%	11,1%
Diferencia en producción: 278 vs. 70 plantas/ha de <i>I. edulis</i>	152,0%	57,7%
Reducción en la producción por efecto de los árboles (70 árboles por hectárea), comparada con café a libre exposición solar	35,5 %	No aplica
Reducción de la producción por incremento en un 15,0% en el porcentaje de sombrío	34,0% <sup>1</sup>	10,0 % <sup>2</sup>
Reducción de la producción por incremento en un 25,0% en el porcentaje de sombrío	60,5 %	36,0 %
Edad de los árboles a 6,0 x 6,0 m para dar el 40,0 % de sombra	4,0 años	4,5 años
Edad de los árboles a 9,0 x 9,0 m para dar el 40,0 % de sombra	2,5 años	3,5 años
Edad de los árboles a 12,0 x 12,0 m para dar el 40,0 % de sombra	1,0 año	2,5 años
Respuesta del café a la aplicación de fertilizante - 6,0 m x 6,0 m	No	No
Respuesta del café a la aplicación de fertilizante - 9,0 m x 9,0 m	No	No
Respuesta del café a la aplicación de fertilizante - 12,0 m x 12,0 m	25%, 50% ó 75%*	75%
Porcentaje de la cosecha en el primer semestre del año	40,0	7,0
Porcentaje de la cosecha en el segundo semestre del año	60,0	93,0

## Respuesta del café al nivel de sombra con cinco especies leguminosas en una zona cafetera norte de Colombia

### Localidades:

Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar)

### Especies de sombrío:

(1) *Erythrina fusca* (cámbulo); (2) *E. rubrinervia* (fríjol rojo); (3) *Inga edulis* (guamo santafereño); (4) *Leucaena leucocephala* (leucaena); (5) *Albizia carbonaria* (carbonero gigante)

### Distancias de siembra:

6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha) - 9,0 m x 9,0 m (123 árboles/ha) - 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café:

1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha) en todos los casos

### Período de evaluaciones:

1998 a 2003

Variables evaluadas	Especies de sombrío*				
	1	2	3	4	5
Promedio del porcentaje de sombra con 278 plantas/ha	57,6%	32,2%	60,8%	35,5%	74,6%
Promedio del porcentaje de sombra con 123 plantas/ha	29,9%	25,3%	72,5%	29,8%	65,6%
Promedio del porcentaje de sombra con 70 plantas/ha	25,3%	20,9%	37,4%	24,0%	47,0%
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	42,0%	42,0%	42,0%	42,0%	42,0%
Tiempo (años) para alcanzar del 35,0% al 40,0% de sombra con 278 plantas/ha	2,5	5,0	0,7	-	0,5
Tiempo (años) para alcanzar del 35,0% al 40,0% de sombra con 123 plantas/ha	14,0	17,5	0,7	-	0,5
Tiempo (años) para alcanzar del 35,0% al 40,0% de sombra con 70 plantas/ha	10,0	8,4	4,5	11,0	5,0
Promedio de la producción (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s.) con 278 árboles de sombrío por hectárea	1.927	2.354	1.990	2.589	2.505
Promedio de la producción (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s.) con 123 árboles de sombrío por hectárea	3.270	2.931	2.681	2.631	2.809
Promedio de la producción (kg.ha <sup>-1</sup> de c.p.s.) con 70 árboles de sombrío por hectárea	2.881	3.683	3.002	2.627	2.826
Incremento en producción por reducción en el número de árboles de sombrío por hectárea (de 278 a 123)	69,7%	24,5%	34,7%	1,6%	12,1%
Incremento en producción por reducción en el número de árboles de sombrío por hectárea (de 278 a 70)	29,2%	45,3%	37,7%	1,4%	11,4%
Incremento en producción por reducción en el número de árboles de sombrío por hectárea (de 123 a 70)	-	20,4%	10,7%	-	0,60%

1) *Erythrina fusca* (cámbulo); (2) *E. rubrinervia* (fríjol rojo); (3) *Inga edulis* (guamo santafereño); (4) *Leucaena leucocephala* (leucaena); (5) *Albizia carbonaria* (carbonero gigante)

## Efecto de la cobertura arbórea y vegetal muerta sobre la producción del café en dos localidades de la zona cafetera colombiana

### Localidades:

Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar)

Estación Experimental El Tambo (Cauca)

### Especies de sombrío:

*Inga edulis* y *Erythrina fusca* en Pueblo Bello; *I. edulis* y *E. poeppigiana* en El Tambo

### Distancias de siembra:

9,0 m x 9,0 m (123 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café:

1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha) en todos los casos

### Período de evaluaciones:

1996 a 1999 en la Estación Experimental El Tambo

1997 a 2003 en la Estación Experimental Pueblo Bello

Variables evaluadas	Estación Experimental Pueblo Bello			Estación Experimental El Tambo		
	1	2	3	1	2	3
Promedio del porcentaje de sombrío	0,0%	72,0%	80,0%	0,0%	62,0%	25,0%
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	42,0%	42,0%	42,0%	32,8%	32,8%	32,8%
Tiempo (años) para alcanzar el 45,0% de sombra	-	3,0	3,0	-	4,5	4,5
Promedio de la producción de café (kg.ha <sup>-1</sup> )	2.569	1.981	1.503	3.083	2.696	3.524
Diferencia en producción (%) (café al sol vs. café sombrío)	-	-29,7%	-41,5%	-	-12,6%	+14,3%
Diferencia en producción (café <i>Inga</i> vs. café <i>Erythrina</i> )	-	-	-24,1	-	-	+30,7
Influencia de la cobertura muerta sobre la producción	No	No	No	No	No	No
Efecto del sombrío sobre la producción	-	Alto	Alto	-	Alto	Ninguno
Deficiencias hídricas en café y con mulch	No	Sí	No	No	No	No
Deficiencias hídricas en café y sin mulch	No	No	No	No	No	No

1. Café al sol. 2. Café con sombrío de *Inga edulis*. 3. Café con sombrío de *Erythrina* sp. (*E. fusca* en Pueblo Bello y *E. poeppigiana* en El Tambo).

## Comportamiento de especies forestales como sombrío en la producción de café, en dos localidades de la zona cafetera Colombiana

### Localidades:

Estación Experimental Paraguaicito (Quindío)

Finca La Suecia – Estación Experimental El Tambo (Cauca)

### Especies de sombrío:

*Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* en Paraguaicito

*Eucalyptus grandis*, *Pinus tecunumanii*, *Pinus chiapensis* e *Inga densiflora* en la finca La Suecia

### Distancias de siembra:

6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café:

1,5 m x 1,5 m (4.500 plantas/ha) en todos los casos

**Período de evaluaciones:** 1997 a 2002 en Paraguaicito

2004 a 2007 en la finca La Suecia

Variables evaluadas	Estación Experimental Paraguaicito				Finca La Suecia				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Promedio del porcentaje de sombrío	0,0%	68,45	49,2%	58,6%	0,0%	66,6%	52,0%	48,3%	46,8%
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%	32,8%	32,8%	32,8%	32,8%	32,8%
Tiempo (años) para alcanzar del 30,0% al 40,0% de sombra	-	-	-	-	-	2,0	4,8	5,8	5,0
Promedio de la producción de café (kg.ha <sup>-1</sup> )	2.194	1.337	1.840	1.866	2.314	1.355	1.029	1.227	1.355
Diferencia en producción (%) (café al sol vs. café sombrío)	-	-39,1	-16,1	-14,9	-	-41,4	-55,5	-47,0	-41,4
Efecto del sombrío sobre la producción	-	Alto	No	No	-	Alto	Alto	Alto	Alto
Porcentaje de la cosecha en el primer semestre del año	32,0%	40,0%	42,0%	45,0%	82,0%	82,0%	85,0%	83,0%	77,0%
Porcentaje de la cosecha en el primer semestre del año	68,0%	60,0%	58,0%	55,0%	18,0%	18,0%	15,0%	17,0%	23,0%

## Productividad del café ante la variación conjunta de su densidad de siembra y la densidad de siembra del sombrío de *Inga edulis*

### Localidades:

Estación Experimental Pueblo Bello (Cesar)

### Especies de sombrío:

*Inga edulis*

### Distancias de siembra:

6,0 m x 6,0 m (278 árboles/ha) - 9,0 m x 9,0 m (123 árboles/ha) - 12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café:

1,0 m x 1,0 m (10.000 plantas/ha) - 1,42 m x 1,42 m (5.000 plantas/ha) - 2,0 m x 2,0 m (2.500 plantas/ha)

### Período de evaluaciones:

1997 a 2002

Variables evaluadas	Distancia de siembra del sombrío (m)		
	6,0 x 6,0	9,0 x 9,0	12,0 x 12,0
Promedio del porcentaje de sombrío	88,4%	69,9%	27,9%
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	32,8%	32,8%	32,8%
Tiempo (años) para alcanzar del 35,0% al 45,0% de sombra	3,5	4,0	6,7
Producción promedio de café a 2,0 x 2,0 m (kg.ha <sup>-1</sup> )	840	726	1.067
Producción promedio de café a 1,42 x 1,42 m (kg.ha <sup>-1</sup> )	1.612	1.400	2.579
Producción promedio de café a 1,0 x 1,0 m (kg.ha <sup>-1</sup> )	2.030	2.296	2.493
Incremento en producción (%) de café a 2,0 x 2,0 m frente a café a 1,42 x 1,42 (m)	91,9%	92,8%	141,7%
Incremento en producción (%) de café a 2,0 x 2,0 m frente a café a 1,0 x 1,0 (m)	141,7%	216,3%	133,6%
Incremento en producción (%) de café a 1,42 x 1,42 m frente a café a 1,0 x 1,0 (m)	25,9%	64,0%	-3,3%
Incremento en producción por disminución en la densidad de siembra del sombrío (café a 2,0 x 2,0 (m)	-	-13,6	27,0
Incremento en producción por disminución en la densidad de siembra del sombrío (café a 1,42 x 1,42 m)	-	-13,2	60,0
Incremento en producción por disminución en la densidad de siembra del sombrío (café a 1,0 x 1,0 m)	-	13,1	22,8
Máximo número de plantas de café a establecer por hectárea	8.500	9.500	8.000
Distancias de los árboles de sombrío a establecer con café a 1,0 x 1,0 m	No	No	Sí
Distancias de los árboles de sombrío a establecer con café a 1,42 x 1,42 m	No	No	Sí
Distancias de los árboles de sombrío a establecer con café a 2,0 x 2,0 m	Sí	Sí	Sí

## La variedad Tabi y su densidad de siembra en sistemas agroforestales

### Localidad:

Estación Central Naranjal (Caldas)

### Especies de sombrío:

Estudio 1. *Inga edulis* (guamo santafereño)

Estudio 2. *Inga edulis* (guamo santafereño), *I. densiflora* (guamo macheto), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Albizia carbonaria* (carbonero)

### Distancia de siembra del sombrío:

12,0 m x 12,0 m (70 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café, Estudio 1:

2,00 x 3,00 m (1.667 plantas/ha) - 2,00 x 2,00 m (2.500 plantas/ha)

2,00 x 1,50 m (3.333 plantas/ha) - 2,00 x 1,20 m (4.167 plantas/ha)

2,00 x 1,00 m (5.000 plantas/ha)

### Distancia de siembra del café, Estudio 2:

2,35 x 2,35 m (1.800 plantas/ha) - 1,65 x 1,65 m (3.600 plantas/ha)

1,35 x 1,35 m (5.400 plantas/ha) - 1,18 x 1,18 m (7.200 plantas/ha)

Variables evaluadas	Café var. Tabi – Estación Central Naranjal	
	Estudio 1	Estudio 2
Promedio del porcentaje de sombrío	35% - 40%	20% - 25%
Estructura del componente arbóreo	Simple	Estratificado
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	35,2%	35,2%
Promedio de la producción de café en alta densidad de siembra (kg.ha <sup>-1</sup> )	787,6	949,4
Promedio de la producción de café en baja densidad de siembra (kg. ha <sup>-1</sup> )	582,5	613,7
Densidad de siembra óptima del café (plantas/ha)	5.000	5.000
Máxima producción alcanzada con la densidad óptima de café (kg.ha <sup>-1</sup> )	731,8	1189,4
Incremento en producción (%) por incremento en la densidad de siembra (bajas a altas densidades)	35,2%	54,7%
Recomendación para su establecimiento en la localidad	Libre exposición	Libre exposición

## Café Variedad Castillo® y Caturra en Sistemas Agroforestales (SAF) estratificados

### Localidad:

Estación Central Naranjal (Caldas)

### Especies de sombrío:

*Inga densiflora* (guamo macheto), *Inga edulis* (guamo santafereño), *Erythrina fusca* (cámbulo) y *Albizia carbonaria* (carbonero).

### Distancia de siembra del sombrío:

12,0 x 12,0 m (70 árboles/ha)

### Distancia de siembra del café:

1,65 x 1,65 m (3.600 plantas/ha) - 1,35 x 1,35 m (5.400 plantas/ha)

1,18 x 1,18 m (7.200 plantas/ha) - 1,05 x 1,05 m (9.000 plantas/ha)

Variables evaluadas	Variedades de café. Estación Central Naranjal	
	Variedad Castillo®	Caturra
Exposición a la roya del cafeto ( <i>Hemileia vastatrix</i> )	Resistente	Susceptible
Promedio del porcentaje de sombrío	20% - 25%	20% - 25%
Estructura del componente arbóreo	Estratificado	Estratificado
Nivel de sombrío adecuado para la localidad (%)	35,2%	35,2%
Promedio de la producción de café (kg.ha <sup>-1</sup> ) con 3.600 plantas/ha	1.755,3	1.063,2
Promedio de la producción de café (kg.ha <sup>-1</sup> ) con 5.400 plantas/ha	1.985,7	939,8
Promedio de la producción de café (kg.ha <sup>-1</sup> ) con 7.200 plantas/ha	1.819,2	1.222,3
Promedio de la producción de café (kg.ha <sup>-1</sup> ) con 9.000 plantas/ha	2.156,7	1.492,9
Diferencia en producción (%) del promedio de las densidades de siembra en el año 2008	-	+48,9%
Diferencia en producción (%) del promedio de las densidades de siembra en el año 2009	-	+13,4%
Diferencia en producción (%) del promedio de las densidades de siembra en el año 2010	+211,8%	-
Diferencia en producción (%) del promedio de las densidades de siembra en el año 2011	+285,7%	-
Densidad de siembra (plantas/ha) con la que se obtiene la máxima producción	9.000	9.000
Precipitación acumulada (mm) en los años 2008, 2009, 2010	3.926; 3.292; 3.568	
Precipitación promedio anual histórica (60 años) (mm)	2.789	

## ¿Cómo establecer los árboles en SAF con café?

A continuación se presenta para diferentes especies arbóreas con potencial para ser incorporadas en sistemas agroforestales con café, cuál sería su SAF adecuado, dentro de ocho posibles planteados:

Especies de árboles	Modelos agroforestales con café							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Guamo santafereño ( <i>Inga edulis</i> )		✓				✓	✓	
Guamo macheto ( <i>Inga densiflora</i> )		✓				✓	✓	
Cámbulo ( <i>Erythrina fusca</i> )	✓	✓			✓	✓	✓	
Cámbulo, anaco ( <i>Erythrina poeppigiana</i> )	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Leucaena ( <i>Leucaena leucocephala</i> )		✓		✓	✓	✓	✓	
Carbonero gigante ( <i>Albizia carbonaria</i> )		✓			✓	✓	✓	
Nogal cafetero ( <i>Cordia alliodora</i> )	✓	✓			✓		✓	✓
Eucalipto ( <i>Eucalyptus grandis</i> )	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Pino ( <i>Pinus oocarpa</i> )	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Pino tecunumani ( <i>Pinus tecunumani</i> )	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Pino chiapensis ( <i>Pinus chiapensis</i> )	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Ceiba ( <i>Ceiba pentandra</i> )		✓	✓		✓			
Resbalamono, guayabete ( <i>Capirona decorticans</i> )	✓	✓						✓
Guanábano de monte, molinillo ( <i>Magnolia hernándezii</i> )	✓	✓			✓			
Laurel, manuelo ( <i>Magnolia lenticellata</i> )	✓			✓	✓			
Abarco ( <i>Cariniana pyriformis</i> )	✓	✓	✓		✓			
Algarrobo ( <i>Hymenaea oblongifolia</i> )	✓			✓			✓	
Hojarasco ( <i>Magnolia caricifragans</i> )	✓	✓			✓			
Cedro guiño, cedro carmín ( <i>Carapa guianensis</i> )	✓	✓			✓			✓
Cedro ( <i>Cedrela odorata</i> )		✓	✓			✓	✓	✓
Cedro negro, nogal ( <i>Juglans neotropica</i> )					✓	✓	✓	
Ceiba, volador ( <i>Ceiba samauma</i> )	✓	✓			✓			
Caoba ( <i>Swietenia macrophylla</i> )	✓			✓	✓	✓	✓	

# Modelos agroforestales propuestos

1. **Como bosque protector.** En el 25% del área (1,0 ha) pueden establecerse los árboles a una distancia de 6,0 x 6,0 m, para una densidad de siembra de 70 árboles/ha.
2. **Como linderos con árboles, separación de lotes.** En 400 m lineales de terreno (igual al perímetro de una hectárea) pueden establecerse los árboles a una distancia de 5,7 m entre cada uno; para una densidad de siembra de 70 árboles/ha.
3. **Como barreras rompavientos o franjas de árboles.** Se establecen barreras dobles con separación de 5,7 m entre árboles y 30 m entre barreras; para una densidad de siembra de 70 árboles/ha, que ocuparán el 25% del área (1,0 ha).
4. **Como barreras protectoras de cauces.** En 100 m del cauce de agua se establecen 70 árboles (35 a cada lado del cauce), en dos líneas de cada lado; los árboles se siembran al triángulo con distancias de siembra de 5,7 m por cada lado. Si la pendiente es menor del 8,0%, dejar un área libre mínima de 3,0 m, entre el borde del cauce y el inicio de la barrera protectora; si la pendiente es superior al 8,0% el área libre debe ser igual o superior a 5,0 m.
5. **Árboles en caminos y vías de acceso.** En 100 m de vía se establecen 70 árboles (35 a cada lado de la vía), en una sola línea de cada lado; los árboles se siembran a una distancia de 3,0 m entre ellos.
6. **Árboles en sombrío del café (1).** Se establecen los árboles a 12,0 x 12,0 x 12,0 m (al triángulo), para una densidad de siembra de 80 árboles/ha. Es recomendable no sembrar como sombrío del café más de cuatro especies de árboles bajo este sistema.
7. **Árboles en sombrío del café (2).** Se establecen los árboles a 12,0 x 12,0 m (al cuadro), para una densidad de siembra de 70 árboles/ha. Es recomendable no sembrar como sombrío del café más de cuatro especies de árboles bajo este sistema.
8. **Como cultivos en callejones.** Se pueden establecer seis líneas o surcos de árboles en una hectárea, con separaciones de 14,3 m entre cada línea; si los árboles se siembran a distancias de 8,6 m entre ellos se obtiene una densidad de 70 árboles/ha; en los callejones se siembra el café.



## Literatura citada

- ABRUÑA, F.; SILVA, S.; [et al.]. Effects of yield, shade, and varieties on size of coffee beans. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 50(3):226-230. 1966.
- ACCIÓN ECOLÓGICA. Historia de la agricultura en América. [En línea]. Quito : Acción ecológica, 2007. 6 p. Disponible en Internet: [http://www.accionecologica.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=338&Itemid=7546](http://www.accionecologica.org/index.php?option=com_content&task=view&id=338&Itemid=7546). Consultado en agosto de 2008.
- ACERO D., L.E. Árboles de la zona cafetera colombiana. Bogotá : Fondo cultural cafetero, 1985. 159 p.
- AGUILAR, A.; BEER, J.W.; [et al.]. Desarrollo del café asociado con *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* en la etapa de establecimiento. *Agroforestería en las Américas* 8(30):28-31. 2001.
- ALARCÓN M., O.; ALDAZABAL R., M.; [et al.]. Influencia del sol y la sombra en la calidad y el rendimiento del grano de café. *Centro Agrícola* 23(1/3):11-16. 1996.
- ALCANTARA, E.N.; FERREIRA, M.M. Efeitos de metodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade fisica do solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 24(4):711-721. 2001.
- ALHAMD, L.; ARAKAKI, S.; [et al.]. Decomposition of leaf litter of four tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest, Okinawa Island, Japan. *Forest Ecology and Management* 202:1-11. 2004.
- ALPIZAR O., L.A.; FASSBENDER, H.W.; [et al.]. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina peoppigiana*) en Turrialba, Costa Rica : Biomasa y reservas nutritivas. *Turrialba* 35(3):233-242. 1985.
- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. Cambio climático y agricultura campesina: Impactos y respuestas adaptativas. *LEISA* 24(4):5-9. 2009.
- ALVARADO A., G.; MORENO R., L.G. Cómo se distribuye anualmente la cosecha de las variedades Caturra y Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 260).
- \_\_\_\_\_; POSADA S., H.E.; [et al.]. Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 8 p. (Avances Técnicos No. 337).
- ALVARADO, A. Producción de madera con bajos insumos: Reciclaje de nutrientes en plantaciones y bosques tropicales. [En línea]. [San José de Costa Rica] : Universidad de Costa Rica, 2008. Disponible en Internet: <http://www.una.ac.cr/inis/docs/suelos/Prodalfr.pdf>. Consultado junio de 2010.
- ALVIM, P. de T. Cacao. p. 279-313. En: \_\_\_\_\_; KOZLOWSKI, T.T. *Ecophysiology of tropical crops*. New York : Academic Press, 1977. 502 p.
- AMACHER, M.C.; O'NEILL, K.P. Soil vital signs: A new index for assessing forest soil health [Poster]. Fort Collins, Colorado. United States. USDA, 2003.

- AMERICAS REGIONAL WORKSHOP. Conservación y manejo sustentable forestal, Costa Rica, 1998. [En línea]. [San José de Costa Rica] : *Juglans neotropica*, 2006. Disponible en Internet: <http://www.rngr.net/Publications/ttsm/Folder.2003-07-11.4726/PDF.2004-03-15.0019/file>. Consultado enero de 2009
- ANDREWS, S.S.; CARROLL, R.C. Creating a minimum data set to compare soil quality under poultry litter management alternatives. p. 75. En: \_\_\_\_\_. Sustainable agriculture alternatives: Ecological and managerial implications of composted and fresh poultry litter amendments on agronomic soils. Georgia, U.S.: University of Georgia, 1998. 275 p.
- \_\_\_\_\_.; JEFFERY, P.M.; [et al.]. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal American Society of Agronomy* 94(1):12-23. 2002.
- \_\_\_\_\_.; KARLEN, D.L.; [et al.]. A Comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90:25-45. 2002.
- AOKI, A.M.; SERENO, R. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Revista Agriscientia* 23(1):23-31. 2006.
- ARANGUREN, J.; ESCALANTE, G.; [et al.]. Ciclo del N en cultivos tropicales permanentes bajo árboles de sombra: Café. *Plant and Soil* 67(1/3):247-258. 1982.
- ARBELÁEZ, J.D. Conjunto de opciones tecnológicas para el manejo de plátano en zona cafetera. p. 148-175. En: CENICAFÉ. Manual sobre el cultivo del plátano. Chinchiná : CENICAFÉ : Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, 1989. 175 p.
- ARCILA P, J. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. p. 21-60. En: SISTEMAS de producción de café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ : FNC, 2007. 309 p.
- \_\_\_\_\_. Fisiología del cafeto: Crecimiento, desarrollo, floración y producción. Chinchiná : CENICAFÉ, 2002. 16 p.
- \_\_\_\_\_. Modelos para estimar la producción de los cafetales. Chinchiná : CENICAFÉ, 1990. 30 p.
- \_\_\_\_\_.; CHAVES C., B. Desarrollo del cafeto en tres densidades de siembra. *Cenicafé* 46(1):5-20. 1995.
- \_\_\_\_\_.; JARAMILLO R., A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto. Chinchiná : CENICAFÉ, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 311).
- ARGÜELLO A., H. Cambios en la composición bioquímica y su aplicabilidad en el uso de follajes verdes como fuente de materia orgánica y nutrimentos en sistemas agroforestales. *Agronomía Colombiana* 12(2):169-181. 1995.
- ARKEBAUER, T.J.; WEISS, A.; [et al.]. In defense of radiation use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology* 68:2221-227. 1994
- AROMOLO, R.; FRANCAVIGLIA, R. Effects on soil quality of mineral and organic fertilization. *Geophysical Research Abstracts* 8:1. 2006.
- ARSHAD, M.A.; COEN, G.M. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7(1/2):25-31. 1992.

- AUSTIN, A.T.; VITOUSEK, P.M. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawaii. *Journal of Ecology* 88(1):129-138. 2000.
- ÁVILA, G.; JIMÉNEZ, F.; [et al.]. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. [En línea]. Turrialba : CATIE, 2001. 7 p. Disponible en Internet: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/LEAD/X6349s/X6349s00.pdf>. Consultado Septiembre de 2008.
- BAGGIO, A.J.; CARAMORI, P.H.; [et al.]. Productivity of southern Brazilian coffee plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. *Agroforestry Systems* 37:111-120. 1997.
- BANDEIRA, F.; MARTORELL, C.; [et al.]. The role of rustic coffee plantations in the conservation of wild tree diversity in the Chinantec region of Mexico. *Biodiversity and Conservation* 14(5):1225-1240. 2005.
- BAPNA, M. Forests, climate change and the challenge of REDD. [En línea]. Washington : World resources institute, [s.f.]. Disponible en Internet: <http://www.wri.org/stories/2010/03/forests-climate-change-and-challenge-redd>. Consultado en marzo de 2010.
- BAUR, G. The ecological basis of rainforest management. *Unasylva* 18(1):1-12. 1964.
- BAUTISTA, C. A.; ETCHEVER B., J.; DEL CASTILLO., R. F.; GUTIÉRREZ., C. La calidad del suelo y sus indicadores [En línea]. *Revista Ecosistemas* n° 2. 2004. Disponible Internet: <http://www.aeet.org/ecosistemas/042/revision2.htm>. Consultado en marzo de 2010.
- BEDOYA V., J.E.; ESCOBAR U., D.; [et al.]. El patrón de cosecha en la caficultura colombiana. *Economía Cafetera* 26(6):1-8. 1997.
- BEER J.; HARVEY C. A.; IBRAHIM M.; HARMAND J. M.; SOMARRIBA E. Service functions of agroforestry systems 2003. In : Congress proceedings. XII world forestry congress: Forests, source of life. Forests for the planet. Québec: Bibliothèque Nationale du Québec, p. 417-424. Congrès forestier mondial. 12, 2003-09-21/2003-09-28, Québec, Canada.
- BEER, J.W. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems* 5(1):3-13. 1987.
- \_\_\_\_\_.; FASSBENDER, H.W.; [et al.]. Estudio de sistemas agroforestales en el experimento central del CATIE: Modelos de los ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos en los sistemas café (*Coffea arabica*, Híbrido de Timor) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró gigante (*Erythrina poeppigiana*). Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1985. 16 p. (Informe Técnico No. 147).
- \_\_\_\_\_.; BONNEMANN, A.; [et al.]. Productividad y sostenibilidad de los sistemas agroforestales *Theobroma cacao* - *Erythrina poeppigiana* y *T. cacao* - *Cordia alliodora*: Resultados de 10 años del experimento central, CATIE. Turrialba : CATIE, 1989. 4 p.
- \_\_\_\_\_.; IBRAHIM, M.; [et al.]. Establecimiento y manejo de árboles en sistemas agroforestales. P 197-242. En: BOSHIER, D.H.; CORDERO, J. Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas. El Salvador : OFI : CATIE, 2003. 1076 p.
- \_\_\_\_\_.; MUSCHLER, R.; [et al.]. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164. 1998.

- BELALCÁZAR C., S.L. El cultivo del plátano (*Musa AAB*, Simmonds) en el trópico. Armenia : ICA, 1991. 376 p.
- BELIL, M. La organización de sistemas de producción: El caso de las redes de subcontratación. *Documents D'analisi Geografica* 13:19-34. 1988.
- BELLEFONTAINE P., R.; PAINORCET, S.; [et al.]. Los árboles fuera del bosque: Hacia una mejor consideración. Roma : FAO, 2002. 217 p.
- BENIEST, J.; FRANZEL, S.; [et al.]. Characterization, diagnosis and design: Training exercise book. Bogor : ICRAF, 2000. 46 p.
- BENITO S., J. A. Paquete tecnológico de manejo integrado del café. Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. Lima, Perú. 2010. 12 p.
- BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133:13-22. 2000.
- BERNAL G., G. Distribución espacial del brillo solar en Colombia. Bogotá : HIMAT, 1987. 30 p.
- BERTALANFFY, L.V. Teoría general de los sistemas: Fundamentos, desarrollo, aplicaciones. México : Fondo de Cultura Económica, 1993. 311 p.
- BHARATI, L.; LEE K.H.; [et al.]. Soil-water infiltration under crops, pasture and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems* 56(3):249-257. 2002.
- BLACK, C.; ONG, C. Utilization of light and water in tropical agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 104(1):25-47. 2000.
- BOHLMAN S., A.; MATELSON T., J.; [et al.]. Moisture and temperature patterns of canopy humus and forest floor soil of Montane Cloud Forest, Costa Rica. *Biotropica* 27(1):13-19. 1995.
- BOLÍVAR, V.D.M.; IBRAHIM, M.; [et al.]. Producción de *Brachiaria humidicola* bajo un sistema silvopastoril con *Acacia mangium* en el trópico húmedo. [En línea]. Medellín : Universidad Nacional, [s.f.]. Disponible en Internet: <http://www.cipav.org.co/redagrofor/memorias99/BolivarP.htm>. Consultado noviembre de 2009.
- BOSHIER, D.H.; CORDERO, J. Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas. El Salvador : OFI : CATIE, 2003. 1076 p.
- BOTERO E., J.E.; FARFÁN V., F. Organic coffee production: A producer country perspective Colombia. En: INTERNATIONAL IFOAM Organic coffee conference. (3 : Octubre 6-8 2004 Kampala). Kampala : ICO, 2004. (Ponencias en disco compacto)
- BOUMA, J. Land quality indicators of sustainable land management across scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88(2):129-136. 2002.
- BRADLEY, B. D.; CHRISTODOULOU, M.; CASPARI, C.; DI LUCA., P. Integrated crop management systems in the EU. Amended Final Report for European Commission. DG Environment Submitted by Agra CEAS Consulting. This report is an amended version of the final report submitted to Dg environment in March 2002. Brussels, BELGIUM. 157 p.

- BREJDA, J.J.; KARLEN, D.L.; [et al.]. Identification of regional soil quality factors and indicators: Northern Mississippi loess hills and Palouse prairie. *Soil Science Society of America journal* 64:2125-2135. 2000.
- BRESHEARS D., D.L.; BARNES F., J. Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland/forest continuum: A unified conceptual model. *Landscape Ecology* 14:465-478. 1999.
- BRIGGS, L.; TWOMLOW, S.J. Organic material flows within a smallholder highland farming system of south west Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 89(3):191-212. 2002.
- BULL, R.A. Studies on the effect of mulch and irrigation on root and stem development in *Coffea arabica* L. I. changes in the roots system induced by mulching and irrigation. *Turrialba* 13(2):96-115. 1963.
- BUNVONG, T.; GRANGER, O. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. *Unasyuva* 31(126):45-56. 1979.
- BURBANO O., H. El suelo; una visión sobre sus componentes biogénicos. Pasto : Universidad de Nariño, 1989. 447 p.
- BUSTILLO P., A. E. Hacia un manejo integrado de la broca del café en Colombia. In: CONGRESO de la Sociedad Colombiana de Entomología, 18. Bogotá (Colombia), Julio 17-19, 1991. Resúmenes. Bogotá (Colombia), SOCOLEN, 1991. p. 61.
- BUSTILLO P., A.E. El manejo de cafetales y su relación con el control de la broca del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2002. 40 p. (Boletín Técnico No. 24).
- BYARD, R.; LEWIS, K.C.; [et al.]. Leaf litter decomposition and mulch performance from mixed and monospecific plantations of native tree species in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58:145-155. 1996.
- CALDERÓN, E.; GALEANO, G.; [et al.]. Libro rojo de plantas fanerógamas de Colombia: Chrysobalanaceae, Dichapetalaceae y Lecythydaceae. Bogotá : Instituto Alexander Von Humboldt : Universidad Nacional de Colombia, 2002. 44 p.
- CALLAHAM, M.A.; ANDERSON P., H.; [et al.]. Litter decomposition and soil respiration responses to fuel-reduction treatments in Piedmont loblolly pine forests. p. 25-29. En: Connor, K. Proceedings 12th biennial southern silvicultural research conference. North Carolina : Department of Agriculture, 2004. 600 p.
- CAMARGO A., P.D.; PEREIRA, A.R. Agrometeorology of the coffee crop. Ginebra : World Meteorological Organization, 1994. 43 p.
- CAMARGO, A.P.E. Quebra-ventos na prevencao da seca de ponteiros do café. *Série Experimentacao Cafeeira* 1(4):31-38. 1977.
- CAMIRÉ, C.; TROFYMOW, J.A.; [et al.]. Rates of litter decomposition over 6 years in canadian forests: Influence of litter quality and climate. *Canadian Journal of Forest Research*. 32(5):789-804. 2002.
- CANTÚ, M.P.; BECKER, A.; [et al.]. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25(2):173-178. 2007.

- CANU, A.; ZUCCA, C. Change in soil properties as indicators of soil quality in an agropastoral area of Sardinia. *Geophysical Research Abstracts* 8:1-2. 2006.
- CÁRDENAS, L.D.; SALINAS, N.R. Libro rojo de plantas de Colombia: Especies maderables amenazadas. Bogotá : SINCHI : Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007. 232 p.
- \_\_\_\_\_. Libro rojo de las plantas de Colombia: Especies maderables amenazadas. Bogotá : SINCHI : Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007. 232 p.
- CÁRDENAS, D. Catálogo de especies. [En línea]. Bogotá : SIB : Instituto Alexander von Humboldt, 2006. Disponible en Internet: <http://www.siac.net.co/sib/catalogoespecies/especie.do?idBuscar=270&method=displayAAT> consultado en noviembre de 2008.
- CARDONA C., D.A.; SADEGHIAN K., S. Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrío de guamo. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 8 p. (Avances Técnicos No. 334).
- CARNEIRO, M.; FABIA O., M.C.; [et al.]. Effects of harrowing and fertilization on understory vegetation and timber production of a *Eucalyptus globulus* Labill plantation in central Portugal. *Forest Ecology and Management* 255:591-597. 2008.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W.J.; [et al.]. Physical features of soil quality under an agroforestry system. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39(11):1153-1155. 2004.
- CASIERRA P., F. Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 1(1):114-123. 2007.
- CASSOL, E.A.; BARROS C., J.R.; [et al.]. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39(7):685-690. 2004.
- CASTILLO, R.E.; ARCILA, P.J.; [et al.]. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica*. *Cenicafé* 48(3):182-194. 1997.
- CATIE. Sistemas agroforestales, principios y aplicaciones. San José de Costa Rica : CATIE : OTS, 1986. 125 p.
- CAYON S., D.G.; VALENCIA M., J.A.; [et al.]. Desarrollo y producción del plátano Dominicano Hartón (Musa AAB, Simmonds) en diferentes densidades y arreglos de siembra. *Agronomía Colombiana* 22(1):18-22. 2004.
- CENICAFÉ. Anuario meteorológico cafetero 1997. Chinchiná : Cenicafé, 1998. 515 p.
- \_\_\_\_\_. Archivos de información climática 1950 a 2010. Chinchiná : Cenicafé, 2010. (Disciplina de Agroclimatología – Cenicafé).
- \_\_\_\_\_. Base de datos Flora, Cenicafé. On line Internet. [www.orton.ac.cr/flora/htm](http://www.orton.ac.cr/flora/htm). (Consultada en febrero de 2009).
- \_\_\_\_\_. Archivo de información climática 1950-2004. Chinchiná : Cenicafé, 2004. Disciplina de Agroclimatología – Cenicafé).

- CENICAÑA. Agricultura Específica por Sitio – AEPS. [En línea]. Cali, Colombia : Cenicaña, 2003. Disponible en Internet: <http://www.cenicana.org/aeps/index.php>. Consultado en marzo de 2010.
- CHALARCA, J.; HERNÁNDEZ S., H.H. El café. Bogotá : Canal Ramírez Antares, 1974. 400 p.
- CHALLENGE AGRICULTURE. Rue des sources. Gardonne : WATERMARK, 1998. 10 p.
- CHANG S., X.; AMATYA, G.; [et al.]. Soil properties under a *Pinus radiata* – ryegrass silvopastoral system in New Zealand: Soil N and moisture availability, soil C, and tree growth. *Agroforestry Systems* 54(2):137-147. 2002.
- CHAVES, C.B.; JARAMILLO, R.A. Regionalización de la distribución del brillo solar en Colombia por métodos de conglomeración estadística. *Cenicafé* 48(2):120-132. 1997.
- CHAVES C., B.; JARAMILLO R., A. Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. *Cenicafé (Colombia)* 49(3):224-230. 1998.
- CHINEA R., J.D. *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. Ceiba, kapok, silk cotton tree. New Orleans : U.S. Department of Agriculture, 1990. 4 p.
- CICUZZA, D.; NEWTON, A.; [et al.]. The red list of magnoliaceae, fauna & flora international. Cambridge : The Lavenham Press, 2003. 56 p.
- CIETTO, S.; HAAG, H.P.; [et al.]. Acumulacao de matéria seca, absorcao de N, P e K pelo cafeeiro *Coffea arabica* L. cv. Catuaí com dois, três, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granacao e maturacao vegetando em um latossolo vermelho amarelo, fase cerrado. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz* 48(1):245-268. 1991.
- CINTRÓN, B.B. *Cedrela odorata* L. Cedro. [En línea]. Washington : USDA Forest Service : IITF, 2006. Disponible en Internet: <http://www.fs.fed.us/global/iitf/Cedrelaodorata.pdf>. Consultado en noviembre de 2008.
- CLEAR. About ecosystem forecasting. [En línea]. Louisiana : Coastal Louisiana ecosystem assessment & restoration, [s.f.]. Disponible en Internet: [http://www.clear.lsu.edu/about\\_ecosystem\\_forecasting/](http://www.clear.lsu.edu/about_ecosystem_forecasting/). Consultado en noviembre de 2011.
- COFFEE RESEARCH IN THE TRANSVAAL LOWVELD. A shade experiment. *Information Bulletin of Citrus and Subtropical fruit Research Institute* 36:3-4. 1975.
- COMBE, J.; BUDOWSKI, G. Clasificación de las técnicas agroforestales. p. 17-48. En: De Las Salas., G. Taller de sistemas agroforestales en América latina. Turrialba : CATIE, 1979. 226 p.
- COMITÉ DEPARTAMENTAL DE CAFETEROS DE CALDAS. El caficultor. 251 ed. Manizales: Comité Departamental de Cafeteros de Caldas; Manizales-Caldas, 2010. 18 p.
- CONSERVATION INTERNATIONAL. Conservation principles for coffee production. Bogotá, Colombia: RAINFOREST ALLIANCE, 2001. 11 p.
- CORBEELS, M. Plant litter and decomposition: General concepts and model approaches. *CSIRO Forestry and Forest Products* 18/20:124-129. 2001.

- CORPORACIÓN COLOMBIA INTERNACIONAL - CCI. Acuerdo de competitividad de la cadena productiva del plátano en Colombia. Santa Fé de Bogotá, Colombia : CCI, 2000. 62 p.
- \_\_\_\_\_. Plátano: Sistema de inteligencia de mercados SIM perfil de producto No. 7. Santa Fé de Bogotá, Colombia : CCI, 2000. 12 p.
- CORRAL, R.; DUICELA, L.; [et al.]. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. [En línea]. Manabí : COFENAC, 2006. 3 p. Disponible en Internet: <http://www.cofenac.org/documentos/Resumenes-Carbono-en-SAF.pdf>
- COSTAS, R. Modelos predictivos de la producción de *Pinus taeda* empleando variables vinculadas con las podas. *Bosque* 27(2):98-107. 2006.
- CUELLO E., M. Análisis conceptual del uso agrícola del suelo: Su incidencia en la sostenibilidad. *Tecnología en Marcha* 21(1):16-27. 2008.
- CUNNINGHAM, R.K.; ARNOLD, P.W. The shade and fertilizer requirements of cacao (*Theobroma cacao* L) in Ghana. *Journal Science food Agriculture* 13:213-221. 1962.
- DALLA T.; NEEDLEFALL, F. Canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stand. *Forest Science* 37(5):1298-1313. 1991.
- DALLING., I. Integrated Management Definition. Prepared by the Chartered Quality Institute Integrated Management Special Interest Group. London-England. CQI IMSIG-Integrated Management Definition – Issue 2.1 – 11/05/2007. 5 p.
- DAMATTA, F.; RODRÍGUEZ, N. Sustainable production of coffee in agroforestry systems in the Neotropics: An agronomic and ecophysiological approach. *Agronomía Colombiana* 25(1):113-123. 2007.
- DAMES, J.F.; SCHOLES, M.C.; [et al.]. Litter production and accumulation in *Pinus patula* plantations of the Mpumalanga province, South Africa. *Plant and Soil* 203:183-190. 1998.
- DEANS, J.D.; DIAGNE, O.; [et al.]. Nutrient and organic-matter accumulation in *Acacia senegal* fallows over 18 years. *Forest Ecology and Management* 124(2/3):153-167. 1999.
- DE LA TORRE, L.E. Estado actual de la información sobre madera para energía. [En línea]. Roma : FAO, 2002. Disponible en Internet: <http://www.fao.org/docrep/006/ad392s/AD392s07.htm>. Consultado en enero de 2011.
- DUQUE O., H.; BUSTAMANTE G., F. J. Determinantes de la productividad del café. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 2002. 53 p.
- DETLEFSEN R., E.G. Evaluación del rendimiento de (*Coffea arabica*) cv. Caturra bajo diferentes densidades de *Cordia alliodora* y *Erythrina poeppigiana* plantados en un diseño sistemático de espaciamientos. Turrialba : IICA : CATIE, 1988. 121 p.
- DIACK, M.; STOTT, D.E. Development of a soil quality index for the chalmers silty clay loam from the Midwest USA. p. 550-555. En: STOTT, D.E.; STEINHARDT, 1999. The global farm: Selected paper from the international soil conservation organization meeting held. (10 : May 24-29 1999 : West Lafayette, Inglaterra). West Lafayette, Inglaterra: Purdue University : USDA, 2001. 1169 p.

- DIJKSTRA, F. Effects of tree species on soil properties in a forest of the northeastern United States promotoren: N. van Breemen en G.E. Likens. Wageningen, Netherlands: Wageningen University, 2001. 120 p.
- DORA, M.; VILLELA, D.M.; [et al.]. Leaf litter decomposition and monodominance in the *Peltogyne* forest of Maracá island, Brazil. *Biotropica* 34(3):334-347. 2002.
- DORAN, J.W.; STAMATIADIS, S.; [et al.]. Soil health as an indicator of sustainable management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88(2):107-110. 2002.
- \_\_\_\_\_.; ZEISS M.R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15:3-11. 2000
- DUICELA G., L.A.; CORRAL C., R.; [et al.]. Influencia de las podas y regulación de sombra sobre la producción de cafetales arábigos. Manta : COFENAC, 2003. 3 p.
- DUQUE O., H. Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera. Chinchiná : CENICAFÉ, 2002. 85 p.
- DURÁN V., Y. Sistemas agroforestales. [En línea]. Santa Fé de Bogotá, Colombia : UNAD, 2004. 56 p. Disponible en Internet: <http://www.unad.edu.co/pages/cursos/agrarias.htm>. Consultado en noviembre de 2005.
- ELE International. Soil moisture block, model A-71, technical data: Relationship of soil moisture and soil suction. Illinois : ELE International, [s.f.], 1998. 7 p.
- ECOSAF. ¿Qué es la agroforestería?. [En línea]. La Paz, Bolivia : Espacios Compartidos en Sistemas agroforestales, 2010. Disponible en Internet: <http://www.ecosaf.org/webecosaf/agroforesteria.php>. Consultado en agosto de 2011.
- ESTIVARIZ, J.; MUSCHLER, R. Efecto de la sombra sobre el vigor y producción de *Coffea arabica* var. Caturra, después de una poda total del café en Turrialba, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 5(17/18):49-52. 1998.
- EUREPGAP. Buenas prácticas agrícolas (BPA) en el cultivo del café; criterios EUREPGAP: Puntos de control y criterios de cumplimiento. Spichernstr, Germany : EUREPGAP, Germany, Septiembre de 2004. 31 p.
- FAO. La situación de los bosques del mundo. [En línea]. Roma : FAO, 2009. Disponible en Internet: <http://www.fao.org/docrep/011/i0350s/i0350s00.htm>. Consultado enero de 2010.
- FARFÁN V., F. Aspectos generales de la producción de café orgánico en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 94 p.
- \_\_\_\_\_. Café orgánico al sol y bajo sombrío: Una doble posibilidad para la zona cafetera de Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 399).
- \_\_\_\_\_. Cambios en la fertilidad del suelo con plantaciones de café y sombrío de especies forestales. *Cenicafé* 61(1):7-27. 2010
- \_\_\_\_\_. Cómo producir café orgánico en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 2000. 8 p. (Avances Técnicos No. 279).

- \_\_\_\_\_. El zoqueo del café conserva el bosque nativo. Chinchiná : CENICAFÉ, 1994. 4 p. (Avances Técnicos No. 209).
- \_\_\_\_\_. Producción de café en sistemas agroforestales. p. 161-200. En: Arcila P.,J.; [et al.]. SISTEMAS de producción de café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ : FNC, 2007. 309 p.
- \_\_\_\_\_. Producción de café en un sistema intercalado con plátano Dominico Hartón con y sin fertilización química. *Cenicafé* 56(3):269-280. 2005.
- \_\_\_\_\_. Árboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café. Chinchiná (Colombia), *Cenicafé*, 2012. 87 p.
- \_\_\_\_\_.; ARIAS H., J.J.; [et al.]. Desarrollo de una metodología para medir sombrío en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé* 54(1):24-34. 2003.
- \_\_\_\_\_.; BAUTE B., J. E. Efecto de la distribución espacial del sombrío de especies leguminosas sobre la producción de café. *Cenicafé* 61(1):35-45. 2010
- \_\_\_\_\_. Efecto del arreglo espacial del café y del sombrío sobre la producción de café. *Cenicafé* 60(4):313-323. 2009.
- \_\_\_\_\_.; [et al.]. Guamo santafereño en sistemas agroforestales con café. Chinchiná: CENICAFÉ, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 396).
- \_\_\_\_\_. Guía para el establecimiento de barreras con árboles y sombrío del café. Chinchiná: CENICAFÉ, 2012. 8 p. (Avances Técnicos No. 428).
- \_\_\_\_\_.; JARAMILLO R., A. Efecto de la cobertura vegetal muerta y arbórea sobre la disponibilidad de agua en el suelo en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé* 59(1):39-54 2008.
- \_\_\_\_\_. Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. Chinchiná : CENICAFÉ, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 379).
- \_\_\_\_\_.; MESTRE M., A. Fertilización del café en un sistema agroforestal en la zona cafetera norte de Colombia. *Cenicafé* 55(3):232-245. 2004.
- \_\_\_\_\_. Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes. *Cenicafé* 55(2):161-174. 2004.
- \_\_\_\_\_.; SÁNCHEZ A., P.M. Certificación de fincas de producción de café orgánico. Chinchiná : CENICAFÉ, 2007. 8 p. (Avances Técnicos No. 363).
- \_\_\_\_\_.; URREGO, B. Comportamiento de las especies forestales *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* como sombrío e influencia en la productividad del café. *Cenicafé* 55(4):317-329. 2004.
- \_\_\_\_\_. Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé* 58(1):342-361. 2007.
- FARRELL, J.G.; ALTIERI, M.A. p. 163. ALTIERI, M.A. En: Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable. La Habana : CLADES : ACAO, 1997. 325 p.

- FASSBENDER, H.W. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Turrialba : CATIE, 1993. 532 p. (Serie de materiales de enseñanza No. 29)
- \_\_\_\_\_.; BEER, J.; [et al.]. Ten year balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 45(1/4):173-183. 1991.
- \_\_\_\_\_.; BORNEMISZA, E. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica : IICA, 1987. 420 p.
- \_\_\_\_\_.; ALPIZAR, L.; [et al.]. Modelling agroforestry system of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poró (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica: Cycles of Organic Matter and Nutrients. *Agroforestry systems* 6:49-62. 1988.
- FNC. Censo cafetero de Colombia, año 1932. *Revista Cafetera de Colombia* 4(42/43):1546-1551. 1932.
- \_\_\_\_\_. Censo cafetero nacional 1980-1981. Bogotá : FNC, 1983. 148 p.
- \_\_\_\_\_. Manual de uso de fotografías aéreas; aplicación al sistema de información cafetera. Bogotá : FNC, 1993. 53 p.
- \_\_\_\_\_. Manual del cafetero colombiano. Bogotá : FNC, 1932. 399 p.
- \_\_\_\_\_. Cómo cultivar bien el plátano y el banano. Bogotá : FNC, 1966. 12 p. (Boletín de Extensión No. 56).
- \_\_\_\_\_. Sistema de información cafetera: Encuesta nacional cafetera SICA, Estadísticas Cafeteras, informe final. Bogotá : FNC, 1997. 178 p.
- \_\_\_\_\_. Origen del cultivo del café en los varios departamentos del país. *Agricultura Tropical* 13(5):326-334. 1957.
- \_\_\_\_\_. Manual del cafetero colombiano. Santa Fé de Bogotá, Colombia : FNC, Colombia, 1958. 571 p.
- \_\_\_\_\_. Líneas guías para el café de conservación en Colombia. Santa Fé de Bogotá, Colombia : FNC, Colombia, 2003. 19 p.
- \_\_\_\_\_.; CONSERVATION INTERNATIONAL. Principios y criterios de conservación para la producción cafetera en Colombia. [En línea]. Santa Fé de Bogotá, Colombia : FNC, Colombia, 2001. Disponible en Internet: <http://www.conservation.org.co/filesdn/PRINCIPIOS%20Y%20CRITERIOS%20DE%20CONSERVACION%20PARA%20LA%20PRODUCCION%20CAFETERA%20EN%20COLOMBIA.doc>. Consultado en marzo de 2010.
- \_\_\_\_\_. FNC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Manejo integrado de la broca. Bogotá (Colombia), FNC, 1995. 25 p.
- \_\_\_\_\_. FNC. Documento estratégico: Sostenibilidad de la caficultura colombiana. I. Diagnóstico climático. II. Alternativas de adaptación para la caficultura. FNC, Manizales – Caldas (Colombia). 2011. 36 p.
- FELICÍSIMO P., A.M.; FERNÁNDEZ C., G. Estimación de la radiación solar incidente en laderas con pendiente y orientación variables. *Studia Oecologica* 3(1/2):267-283. 1984.

- FILIP, Z. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88(2):169-174. 2002.
- FOURNIER O., L. A. Fundamentos ecológicos del cultivo de café. San José (Costa Rica), IICA-PROMECAFÉ, 1980. 29 p. (Publicación Miscelánea No. 230)
- \_\_\_\_\_. Tropical tree seed manual section species descriptions. *Carapa guianensis* Aubl. : Species descriptions *Carapa guianensis* Aubl. [en línea]. Washington : RNGR, [s.f.]. Disponible en Internet: <http://www.rngr.net/Publications/ttsm/Folder.2003-07-11.4726/>. Consultado en noviembre 2009
- \_\_\_\_\_. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. P. 17. En: Simposio sobre caicultura latinoamericana. (17 : Octubre 23-27 1995 : San Salvador). San Salvador : IICA : PROMECAFE, 1995. p.v.
- FRANCO, C.M. A agua do solo e o sombreamento dos cafezais em Sao Paulo. *Superintendencia dos Dervicios do Café* 27(299):10-19. 1952.
- \_\_\_\_\_. A agua do solo e o sombreamento dos cafezais em Sao Paulo. *Superintendencia dos Servicios do Café* 27(299):10-19. 1952.
- \_\_\_\_\_.; INFORZATO, R. Quantidade de agua transpirada pelo cafeeiro sombreado e pelo ingazeiro. *Bragantia* 10(9):247-257. 1950.
- \_\_\_\_\_. Quantidade de agua transpirada pelo cafeeiro sombreado e pelo ingazeiro. *Bragantia* 10(9):247-257. 1950.
- FRAZER, G.W.; CANHAM, C.D.; [et al.]. Gap light analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract xanopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user manual and program documentation. New York : Simon Fraser University : Institute of Ecosystem Studies, 1999. 36 p.
- FEDESARROLLO. Economía cafetera colombiana. Bogotá : Fondo cultural cafetero, 1978. 576 p.
- GAAFAR, A.M.; SALIH, A.A.; [et al.]. Improving the traditional *Acacia senegal* -crop system in Sudan: The effect of tree density on water use, gum production and crop yields. *Agroforestry Systems* 66:1-11. 2006.
- GAMA R., A.C.; BARROS, N.F.; [et al.]. Decomposição e liberação de nutrientes do folheto de espécies florestais nativas em plantios puros e mistos no sudeste da bahia. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 27(6):1021-1031. 2003.
- GANJEGUNTE G., K.; CONDRON L., M.; [et al.]. Decomposition and nutrient release from radiata pine (*Pinus radiata*) coarse woody debris. *Forest Ecology and Management* 187(2):197-211. 2004.
- GARCÍA L., J.C. Producción de la variedad tabi con tres frecuencias de poda de *Erythrina fusca* como sombrío y tres niveles de fertilización. *Cenicafé* 59(4):361-373 2008.
- GARCÍA, M.E.; BOCCUZZO, L. Light interception into canopies. [En línea]. Vermont : University of Vermont, 2006. Disponible en Internet: <http://orchard.uvm.edu/uvmapple/hort/PresentationsHort/Light%20interception%20by%20apple%20tree%20canopies.pdf>. Consultado en junio de 2010.

- GARCÍA, R. Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Editorial GEDISA. Paseo de la Bonanova 9, Barcelona, España. 2006. 201 p.
- GELDRES, E.; GERDING, V.; [et al.]. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X región, Chile. *Bosque* 27:223-230. 2006.
- GEORGE, A. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. Turrialba : CATIE, 2006. 118 p.
- GIOVANNUCCI, D. Encuesta sobre café sustentable en el mercado de especialidad de América del Norte. Philadelphia, Estados Unidos : Summit Foundation Nature Conservancy : Banco Mundial, 2001. 32 p.
- GLOVER, N. Coffee yields in a plantation of *Coffea arabica* var. caturra shaded by *Erythrina poeppigiana* with and without *Cordia alliodora*. Turrialba : CATIE, 1981. 24 p. (Informe Técnico No. 17)
- GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington state. *Source Agriculture, Ecosystems and Environment* 80(1-2):29-43. 2000.
- \_\_\_\_\_; BEER, J. Nutrient cycling in two traditional Central American agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 4(2):77-87. 1986.
- GÓMEZ, A.A.; SWETE K., D.E.; [et al.]. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level. p. 401-410. En: Doran, J.W.; Jones, A.J. *Methods for assessing soil quality*. Madison. Wisconsin, USA : Soil Science Society of America, 1996. 553 p.
- GÓMEZ, C.; MANGEAS, M.; [et al.]. Use of high-resolution satellite imagery in an integrated model to predict the distribution of shade coffee tree hybrid zones. *Remote Sensing of Environment* 114:2731-2744. 2010.
- GONZÁLEZ S., E.; BRAUD, I.; [et al.]. Heat and water exchanges of fallow land covered with a plant - residue mulch layer: A modelling study using the three year MUREX data set. *Journal of Hydrology* 244(3/4):119-136. 2001.
- GONZÁLEZ, J. Cafetales con sombra mezclada, hábitat para fauna silvestre. San José, Costa Rica : Universidad Nacional de Costa Rica, 2002. 3 p. (AMBIENTICO No. 103)
- GREENBERG, R.; RICE, R.A. *The Peruvian shade-grown coffee primer*. Washington : Migratory Bird Center Smithsonian Institution, 1999. 52 p.
- GUHARAY, F.; MONTERROSO, D.; [et al.]. El diseño y manejo de la sombra para la supresión de plagas en cafetales de América central. *Agroforestería en las Américas* 8(29):22-29. 2001.
- GULSER, C.A. comparison of some physical and chemical soil quality indicators influenced by different crops species. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 7(6):905-911. 2004.
- GUO, L.B.; SIMS, R.E.H. Effects of light, temperature, water and meatworks effluent irrigation on eucalypt leaf litter decomposition under controlled environmental conditions. *Applied Soil Ecology* 17(3):229-237. 2001.

- GUTIÉRREZ, L.; CEIBA, M.E. *Ceiba pentandra*. [En línea]. Medellín : Escuela de ingeniería de Antioquia, 2001. Disponible en Internet: <http://biologia.eia.edu.co/ecologia/estudiantes/ceiba.htm>. Consultado en febrero de 2009.
- GUTIÉRREZ V., B.A.; FIERRO G., L.H. Diagnóstico y diseño participativo en sistemas agroforestales: Manual y guías de campo. Bogotá : Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006. 110 p.
- HAGGAR, J.P.; SCHIBLI, C.; [et al.]. Cómo manejar árboles de sombra en cafetales. Agroforestería en las Américas 8(29):37-41. 2001.
- HAIRIAH, K.; SULISTYANI, H.; [et al.]. Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. Forest Ecology and Management 224:45-57. 2006.
- \_\_\_\_\_; SUPRAYOGO, W.D.; [et al.]. Trees that produce mulch layers which reduce run-off and soil loss in coffee multistrata systems. p. 9-30. En: FAHMUDDIN, A.; MEINE, N. VAN. Alternatives to slash and burn in Indonesia: Facilitating the development of agroforestry systems phase 3 synthesis and summary report. Bogor : World Agroforestry Centre, 2005. 81 p.
- HAN, X.; WANG, S.; [et al.]. Change of organic carbon content and its fractions in black soil under long-term application of chemical fertilizers and recycled organic manure. Soil Science and Plant Analysis 37:1127-1137. 2006.
- HANDAYANTO, E.; NURAINI, Y.; [et al.]. Decomposition rates of legume residues and N mineralization in an ultisol in Lampung. Agrivita 15(1):75-86. 1992.
- HARTEMINK, A.E.; O'SULLIVAN, J.N. Leaf litter decomposition of *Piper aduncum*, *Gliricidia sepium* and *Imperata cylindrica* in the humid lowlands of Papua New Guinea. Plant and Soil 230:115-124. 2001.
- HENIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique des sols: Annual. Agronomy 15(1):161-172. 1945.
- HERNÁNDEZ, G.O.; BEER, J.; [et al.]. Rendimiento de café (*Coffea arabica* cv. Caturra), producción de madera (*Cordia alliodora*) y análisis financiero de plantaciones con diferentes densidades de sombra en Costa Rica. Agroforestería en las Américas 4(13):8-13. 1997.
- HERRERA, A. Verdades y mitos sobre la materia orgánica y los abonos orgánicos. Informaciones Agronómicas 5:4-5. 2001.
- HERRERA E., J.S.; PALMA O., M.R.; [et al.]. Efecto de la aplicación de nitrógeno en la producción de café bajo sombra de Inga sp. p. 400-406. En: Seminario nacional de investigación y transferencia en cafcultura. (6 : Noviembre 22-24 1995 : Tegucigalpa). Tegucigalpa : Instituto Hondureño del Café, 1997.
- HERWITZ, S.R.; GUTTERMAN, Y. Biomass production and transpiration efficiencies of eucalyptus in the Negev desert. Forest Ecology and Management 31(1/2):81-90. 1990.
- HEUVELDOP, J.; ALPIZAR O., L.A.; [et al.]. Modeling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica: Cacao and wood production, litter production and decomposition. Agroforestry Systems 6:37-48. 1989.
- HILLOCKS, R.J. Integrated crop management for smallholder farmers in Africa with special reference to coffee in Malawi. Pest Management Science (Inglaterra) 56:963-968. 2000.

- HUXLEY, P.A. The basis of selection, management and evaluation of multipurpose trees: An overview. Nairobi : ICRAF, 1984. 107 p. (Working Paper No. 25).
- INSTITUTO DE CIENCIAS NATURALES. Flora de Colombia: Magnoliaceae. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 1983. 119 p.
- ICRAF. Resources for agroforestry; diagnosis and design: Diagnostic and design methodology manual. Nairobi: ICRAF, 1983. 352 p. (Working Paper No. 7).
- ISA. Pruning young trees: Bruchure. Illinois : International Society of Arboriculture, 2007. 4 p.
- JANSSENS, M.J.J.; DENG, Z.; [et al.]. Relating agro-climax of orchards to eco-climax of natural vegetation. Acta Horticulturae 707:181-186. 2006.
- JAPANESE AGRICULTURAL STANDARD OF ORGANIC AGRICULTURAL PRODUCTS. Notification No. 59 of the Ministry of agriculture, forestry and fisheries of January 20, 2000. Tokio, Japón. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japón : 2001. 25 p.
- JARAMILLO R., A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 196 p.
- \_\_\_\_\_. Climatología de región andina de Colombia; microclima y fenología del cultivo del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2000. 172 p.
- \_\_\_\_\_. La lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. Cenicafé 54(2):134-144. 2003.
- \_\_\_\_\_. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). Revista Academia Colombiana de Ciencias 29(112):371-382. 2005.
- \_\_\_\_\_.; LARSEN, L.O.; [et al.]. Un modelo para evaluar la influencia del clima en la producción de café. Cenicafé 43(1):22-26. 1992.
- \_\_\_\_\_.; GÓMEZ G., L. Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrío. Cenicafé 40(3):65-67. 1989.
- JIMÉNEZ S., A.M.; FARFÁN V., F.; [et al.]. Biomasa seca y contenido de nutrientes de *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida*, empleadas como abonos verdes en cafetales. Cenicafé 56(2):93-109. 2005.
- JIMÉNEZ, A.E.; MARTÍNEZ, V.P. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero: Producción de materia orgánica en diferentes tipos de cobertura. Biótica 4(3):109-126. 1979.
- JONES, C.J. Analog forestry as a conservation and development approach: Lessons learned from the international analogue forestry network. California : University of California, 2001. 15 p.
- JONES, J.R.; PRICE, N. Agroforestry and application of the farming systems approach to forestry. Human Organization 44(4):322-331. 1985.
- JUNGUITO B., R.; PIZANO S., D. Producción de café en Colombia. Bogotá : FEDESARROLLO, 1991. 320 p.
- KAINULAINEN, P.; KAINULAINEN, J.K. Concentrations of secondary compounds in Scots pine needles at different stages of decomposition. Soil Biology and Biochemistry 34(1):37-42. 2002.

- KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S. The soil quality concept: A tool for evaluating sustainability. *Danmarks Jordbrugs Forskning* 38:15-26. 2000.
- \_\_\_\_\_.; DITZLERB, C.A.; [et al.]. Soil quality: Why and how? *Geoderma* 114:145-156. 2003.
- KAVVADIAS, V.A.; ALIFRAGIS, D.; [et al.]. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecology and Management*. 144(1/3):113-127. 2001.
- \_\_\_\_\_. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecology and Management*. 144(1/3):113-127. 2001.
- KIARA, J.M.; NAGED, T.F. Establishment of rust resistant arabica coffee cultivar under temporary shade and inorganic fertilizer regimes in Papua Nueva Guinea. p. 816-820. En: *Colloque Scientifique International Sur le Café* (16 : Avril 9-14 1995 : Kyoto). Paris : ASIC, 1995. 345 p.
- KIMEMIA, J.K.; CHWEYA, J.A.; [et al.]. The effect of green manure application to coffee plants growth, yield and quality in Kenya. p. 426-429. En: *Colloque Scientifique International Sur le Café* (18 : Agosto 2-6 1999 : Helsinki). Paris : ASIC, 2000. 240 p.
- KING, K.F.S. The history of agroforestry. p. 3-11. En *Steppler, H.A.; Nair, P.K.R. Agroforestry: A decade of development*. Nairobi, Kenia : ICRAF, 1987. 345 p.
- KIRKBRIDE, J.H. *Manipulus rubiacearum: A revision of the Genus Capirona*. *Acta Amazónica* 15 (1/2):7-60. 1985.
- KOCHY, M.; SCOTT D.W. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology* 78(3):732-739. 1997.
- KURSTEN, E.; BURSCHEL, P. CO2 mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution*. 70:533-544. 1993.
- KURZ, C.; TEAUXA, M.M. C.; [et al.]. A comparison of litterbag and direct observation methods of Scots pine needle decomposition measurement. *Soil Biology and Biochemistry* 37:2315-2318. 2005.
- KWABIAH A., B.; VORONEY R., P.; [et al.]. Inorganic fertilizer enrichment of soil: Effect on decomposition of plant litter under subhumid tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils* 30(3):224-231. 1999.
- LABRADOR M., J. *Materia orgánica en los agrosistemas*. Madrid : Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación : Mundi Prensa, 1996. 174 p.
- LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; [et al.]. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. *Forest Ecology and Management* 128(3):181-196. 2000.
- LÄDERACH, P.; ZELAYA, C.; OVALLE, O.; GARCÍA, S.; EITZINGER, A.; BACA, M. Escenarios del Impacto del Clima Futuro en Áreas de Cultivo de Café en México. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Managua, Nicaragua. Informe Final Cali, Colombia y Managua, Nicaragua: Marzo, 2012. 44 p.
- LAGEMANN, J.; HEUVELDOP, J. Characterization and evaluation of agroforestry systems: The case of Acosta-Puriscal, Costa Rica. *Agroforestry Systems* 1:101-115. 1983.
- LAL, R. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: Soil moisture and crop yields. *Agroforestry Systems* 8:7-29. 1989.

- \_\_\_\_\_. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Washington : Ohio State University : Agency for International Development, 1994. 78 p. (Technical Monograph No. 21).
- LAW, B.E. Growth in relation to canopy light interception in a red pine (*Pinus resinosa*) thinning study. *Forest Science* 38(1):199-202. 1992.
- LEE, S.; TEWARI R., K.; [et al.]. Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania somnifera* (L.) Dunal. *Plantlets. Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 90:141-151. 2007.
- LI, X. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. *Catena* 52(21):105-127. 2003.
- LISKI, J.; NISSINEN, A.; [et al.]. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology* 9(4):575-584. 2003.
- LISTER, T.W.; BURGER, J.A.; [et al.]. Role of vegetation in mitigating soil quality impacted by forest harvesting. *Soil Science Society of America Journal* 68:263-271. 2004.
- LIVESLEY S., J.; GREGORY P., J.; [et al.]. Competition in tree row agroforestry systems: Soil water distribution and dynamics. *Plant and Soil* 264:129-139. 2004.
- LLORENS, J. Poda de formación: Arte, ciencia, paciencia y práctica. [En línea]. Champaign , Illinois, USA : ISA, 1999. 8 p. Disponible en Internet: [http://isahispana.com/treecare/resources/poda\\_de\\_form.pdf](http://isahispana.com/treecare/resources/poda_de_form.pdf). Consultado: Noviembre, 2011.
- LOAIZA, J. Flora quindiana: *Magnolia Hernándezii* (Lozano) Govaerts. [En línea]. Armenia, Quindío : [s.n.]. 1999. Disponible en Internet: <http://floraquindiana.blogspot.es/> Consultado febrero de 2009.
- LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Productivity and the morphology of crop stands: Patterns with Leaves. Lincoln : University of Nebraska, 1.969. 27 p. Disponible en Internet: <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/187>. Consultado: Agosto de 2011.
- LÓPEZ, C.R.; NAVARRO L., J.A.; [et al.]. Catálogo de especies. Bogotá : Catalogo de la biodiversidad de Colombia, 2007. Disponible en Internet: <http://www.siac.net.co/sib/catalogoespecies/especie>. Consultado en marzo de 2009.
- LÓPEZ, A.M. Sistemas agroforestales tipo multiestratos. Montevideo, Uruguay : ALADI, 2001. 50 p.
- LUPWAYI, N.Z.; HAQUE, I. Leucaena hedgerow intercropping and cattle manure application in the Ethiopian highlands: Decomposition and nutrient release. *Biology and Fertility of Soils* 28(2):182-195. 1998.
- LUSK C., H.; DONOSO, C.; [et al.]. Decomposition of leaf litter of *Pinus radiata* and three native tree species. *Revista Chilena de Historia Natural* 74:705-710. 2001.
- LYNGBAEK, A.E.; MUSCHLER, R.G.; [et al.]. Productividad, mano de obra y costos variables en fincas cafetaleras orgánicas y convencionales de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 6(23):24-26. 1999.

- MACHADO S., A. El sombrío como factor interactuante en la producción del cafeto. *Cenicafé* 2(16):21-33 1951.
- \_\_\_\_\_. Estado actual de las investigaciones sobre el uso de sombra en cafetales. *Cenicafé* (10):5-51. 1959.
- MAGAÑA, S. DE M.; HARMAND, J.M.; [et al.]. Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 41/42:98-104. 2004.
- MAGGS, J. Litter fall and retranslocation of nutrients in a refertilized and prescribed burned *Pinus elliottii* plantation. *Forest Ecology and Management* 12(3/4):253-268. 1985.
- MARÍN G., R. Monitoreo y evaluación, Desarrollo de indicadores. Universidad ICESI, Cali. CALI (COLOMBIA). 2006. 24 p.
- MARÍN V., A.L.; TORO R., L.J.; [et al.]. Conectividad estructural del paisaje cafetero en la cuenca alta del río San Juan, suroeste antioqueño, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 23:43-54. 2008.
- MARIÑO V., G.E.; GIL S., M.S. La roya (*Hemileia vastatrix*) Berk et Br. del cafeto. Palmira : Universidad Nacional de Colombia, 1976. 162 p.
- MARISCAL, M.J.; ORGAZ, F.; [et al.]. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 100(2/3):183-197. 2000
- MASTO, R.E.; CHHONKAR, P.K.; [et al.]. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 136:419-435. 2008.
- MATOSO C., M.; SILVA S., R.H.; [et al.]. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems* 63:75-82. 2004.
- \_\_\_\_\_. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na zona da mata mg1. *Revista Arvore* 31(5):805-812. 2007.
- McCRADY, R.L. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. *Forest Science* 44(1):64-72. 1998.
- McNEELY, J.A. Nature vs. nurture: Managing relationships between forests, agroforestry and wild biodiversity new visitas in agroforestry. *Agroforestry Systems* 61(1):155-165. 2004.
- MCTIERNAN K., B.; COUTEAUX M., M.; [et al.]. Changes in chemical composition of *Pinus sylvestris* needle litter during decomposition along a European coniferous forest climatic transect *Soil. Biology and Biochemistry* 35(6):801-812. 2003.
- MELÉNDEZ, G. Residuos orgánicos y materia orgánica del suelo. San José de Costa Rica : Universidad de Costa Rica : CIA, 2003. 95 p.
- MENDONÇA E., DE S.; GOMIDE L., E. Matéria orgânica do solo, 1a Aproximação. [en línea]. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, [s.f.]. Disponible en Internet: [http://www.ufmt.br/petfloresta/disciplinas/solos/Apostila\\_MateriaOrganica.pdf](http://www.ufmt.br/petfloresta/disciplinas/solos/Apostila_MateriaOrganica.pdf). Consultado en Diciembre de 2005.

- MESTRE M., A.; OSPINA O., H.F. Manejo de los cafetales para estabilizar la producción en las fincas cafeteras. Chinchiná : CENICAFÉ, 1994. 8 p. (Avances Técnicos No. 201).
- \_\_\_\_\_.; SALAZAR A., J.N. Establecimiento de un sistema de manejo de cafetales. Avances Técnicos Cenicafe (Colombia) No. 254:1-4. 1998.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Resolución No. 0074 del 04 Abril de 2002: Reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaquetado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y comercialización de productos agropecuarios ecológicos. Bogota : El Ministerio, 2002. 21 p.
- \_\_\_\_\_. Dirección de desarrollo y protección sanitaria: Plan nacional para la implementación de las buenas prácticas agrícolas. Bogotá : El Ministerio, 2004. 21 p.
- MIRANDA R., G.; ZULLO J., J. Avaliação da resposta espectral de plantios de café (*Coffea arabica*) nas imagens LANDSAT/TM E QUICKBIRD. p. 339-345. En: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. (14: 25-30 abril 2009 :). Natal : 2009. 89 p.
- MITCHELL, H.W. Results of a coffee and banana interplanting trial in Bukoka. p. 25-30. En: RESEARCH Report 1963. Tanganyika : Coffee Research Station, 1965. 125 p.
- MOGUEL, P.; TOLEDO V.M. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. Conservation Biology 13(1):11-21. 1999.
- MOLINERO, J.; POZO, J. Impact of a eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill.) plantation on the nutrient content and dynamics of coarse particulate organic matter (CPOM) in a small stream. Hydrobiologia 528:143-165. 2004.
- MONTAGNINI, F.; RAMSTAD, K.; [et al.]. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous tree species in the Atlantic lowlands of Costa Rica. Agroforestry Systems 23(1):39-61. 1993.
- MONTENEGRO B., J.; RAMÍREZ, G.; [et al.]. Evaluación del establecimiento y crecimiento inicial de seis especies maderables asociadas con café. Agroforestería en las Américas 4(13):14-20. 1997.
- MORAIS, H.; CARAMORI, P.E.; [et al.]. Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira 41(5):763-770. 2006.
- MORENO B., A.M. Producción de café en sistemas intercalados. p. 255-274. En: SISTEMAS de producción de café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ : FNC, 2007. 309 p.
- \_\_\_\_\_. Evite pérdidas económicas al renovar por zoqueo : Resiembra los sitios perdidos. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 4 p. (Avances Técnicos No. 398).
- \_\_\_\_\_.; HERNÁNDEZ G., E. Estudio agroeconómico del sistema barreras de plátano (*Musa sp.*) grupo AAB intercaladas con café (*Coffea arabica*). p. 69. En: CONGRESO de la Sociedad colombiana de fitomejoramiento y producción de cultivos. (8 : Julio 2-5 2003 : Bogotá). Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2003. 187 p.
- \_\_\_\_\_.; GRISALES L., F.L. Productividad del sistema: café intercalado con plátano en barreras. Cenicafe (Colombia) 56(1):79-85. 2005.

- \_\_\_\_\_.; POSADA S., H.E.; [et al.]. Obtenga ingresos adicionales al intercalar maíz en siembras nuevas de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 4 p. (Avances Técnicos No. 220).
- \_\_\_\_\_. Obtenga ingresos adicionales al intercalar frijol en nuevas siembras de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 4 p. (Avances Técnicos No. 219)
- MORENO R., L.G. Nueva variedad de café de porte alto resistente a la roya del cafeto. Cenicafé 53(2):132-143. 2002.
- MORO M., A.J.; DOMINGO, F. Litter decomposition in four woody species in a Mediterranean climate: Weight loss, N and P dynamics. *Annals of Botany* 86:1065-1071. 2000.
- MOTTA A., C.V.; REEVES, D.W.; [et al.]. Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in two coastal plain soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33(5):913-932. 2002.
- MÜLLER, L.E. La fisiología del cafeto. Bogotá : FAO : OEA : FNC, 1960. 42 p.
- MUNGAI D., N.; STIGTER C., J.; [et al.]. Simply obtained global radiation, soil temperature and soil moisture in an alley cropping system in semi-arid Kenya. *Theoretical and Applied Climatology* 65:63-78. 2000.
- MUNGUÍA, R.; BEER, J.; [et al.]. Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas y en mezclas. *Agroforestería en las Américas* 41/42:62:68. 2004.
- MUÑOZ, F.; ESPINOSA, M.; [et al.]. Growth characteristics in diameter, height, and volume of a *Eucalyptus nitens* plantation with different silvicultural treatment for pruning and thinning, silvicultura y manejo. *Bosque* 26(1):93-99. 2005.
- MURAGE, E.W.; KARANJA, N.K.; [et al.]. Diagnostic indicators of soil quality in productive and non-productive smallholders' fields of Kenya's central highlands. *Source Agriculture, Ecosystems and Environment* 79(1):1-8. 2000.
- MUSALEM L., A. Asistencia técnica y capacitación en sistemas agroforestales tipo multiestratos. [En línea]. México : ALADI, 2001. 9 p. Disponible en Internet: <http://www.aladi.org/nsfaladi/estudios.nsf/vpubliantioresweb/C8150A32E41C8E3603256A3100634B50>
- MUSCHLER, R.G. Árboles en cafetales. Turrialba : CATIE, 2000. 139 p.
- \_\_\_\_\_. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 85:131-139. 2001.
- MYERS R., J.K.; NOORDWIJK, M. VAN; [et al.]. Synchrony of nutrient release and plant demand: Plant litter quality, soil environment and farmer management options. p. 215-229. En: CADISCH., G.; GILLER, K.E. *Driven By Nature : Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford : CABI, 1997. 432 p.
- NAIR, P.K.R. An introduction to agroforestry. Dordrecht : Kluwer Academic, 1993. 499 p.
- \_\_\_\_\_. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 3(2):97-128. 1985.

- NAVAS, A.; MACHIN, J.; [et al.]. Soil properties and physiographic factors controlling the natural vegetation re-growth in a disturbed catchment of the central Spanish Pyrenees. *Agroforestry Systems* 72:173-185. 2008.
- NEW ZELAND FARM FORESTRY ASSOCIATION. Trees on farms, local experience of growing trees in the Waikato region. *Waikato* : New Zeland Farm Forestry Association, 2002. 29 p.
- NGAO, J.; REVERSAT, F.B.; [et al.]. Changes in eucalypt litter quality during the first three months of field decomposition in a Congolese plantation. *Applied Soil Ecology* 42:191-199. 2009.
- NICHOLAS, I.D. Plantings in tropical and subtropical areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 22/23:465-482. 1988.
- NOBEL, P.S. Introduction to biophysical plant physiology. San Francisco: W.H. Freeman, 1970. 488 p.
- \_\_\_\_\_.; FORSETH, I.W.; [et al.]. Canopy structure and light interception. p. 79-90. En: HALL, D.O.; SCURLOCK, J.M.O.; [et al.]. Photosynthesis and production in a changing environment: A field and laboratory manual. Londres : Chapman & Hall, 1993. 464 p.
- NOLTE, C.; TIKI M., T.; [et al.]. Effects of calliandra planting pattern on biomass production and nutrient accumulation in planted fallows of southern Cameroon. *Forest Ecology and Management* 179(1/3):535-545. 2003.
- NOORDWIJK, M. VAN; HAIRIAH, K.U. Tree soil crop interactions. Bogor : ICRAF, 2000. 12 p.
- NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88(2):161-168. 2002.
- OBANDO M., F.H.; MONTES, J.M.; [et al.]. Desarrollo de indicadores de calidad inherentes y dinámica de andisoles en el departamento de Caldas. p. 2-4. En: TALLER Nacional sobre indicadores de calidad del suelo (1 : Octubre 20-22 2004 : Palmira). Palmira : CIAT, 2004. 16 p.
- OELBERMANN, M.; VORONEY R., P.; [et al.]. Decomposition of *Erythrina poeppigiana* leaves in 3, 9, and 18 year-old alleycropping systems in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 63:27-32. 2004.
- OLIVER, L.; PÉREZ, C.; [et al.]. Degradación de la hojarasca de un pastizal oligotrófico mediterráneo del centro de la península Ibérica. *Anales de Biología* 24:21-32. 2002.
- OLSCHEWSKI, R.; KLEIN, A.M.; [et al.]. Economic trade-offs between carbon sequestration, timber production, and crop pollination in tropical forested landscapes. *Ecological Complexity* 2(59):1-6. 2003.
- OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44:322-331. 1963.
- OROZCO, J.A.; GARDEA, A.; [et al.]. Influencia de la estructura de la copa en el sombreado de la nogalera. Chihuahua : Asociación Agrícola Local de Productores de Nuez, 2000. 8 p.
- OSORIO M., V.E. Decomposition and nitrogen release of foliar, litter and root material from seven shade tree species in coffee agroforestry systems. Turrialba : CATIE, 2004. 75 p.

- OTHMAN, A.R. A note on intercropping of coffee with (*Araucaria hunsteini*) and (*Pinus merkusii*) trees in peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 4(2):179-181. 1991.
- OTS. Sistemas agroforestales; principios y aplicación en los trópicos. San José : OTS : CATIE, 1986. 817 p.
- OYARZUN, R.A.; STÖCKLE, C.O.; [et al.]. A simple approach to modeling radiation interception by fruit-tree orchards. *Agricultural and Forest Meteorology* 142:12-24. 2007.
- PAZ, I.E.; SÁNCHEZ DE P, M. Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. *Revista Unicauca* 5(2):39-43. 2007.
- PEARCY, R.; MURAOKA, H.; [et al.]. Crown architecture in sun and shade environments: Assessing function and trade-offs with a threedimensional simulation model. *New Phytologist* 166:791-800. 2005.
- PÉREZ S., V.M. Advances in the use of *Eucalyptus deglupta* as shade in coffee plantations. *Boletín Promecafé* 86:15-17. 2000.
- PERFECTO, I.; RICE R., A.; [et al.]. Shade coffee: A disappearing refuge for biodiversity. *BioScience* 46(8):598-607. 1996.
- PERI, P. Efecto de la sombra sobre la producción y calidad de pasturas en sistemas silvopastoriles. *SAGPyA Forestal* 13:35-42. 1999.
- PERIE, C.; MUNSON, A.D. Ten-year responses of soil quality and conifer growth to silvicultural treatments. *Soil Science Society of America Journal* 64:1815-1826. 2000.
- POORTER, L.; BONGERS, L.; [et al.]. Architecture of 54 moist-forest tree species: Traits, trade-offs, and functional groups. *Ecology* 87(5):1289-1301. 2006.
- PORRAS V., C.M. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el corredor biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica. Turrialba : CATIE, 2006. 150 p.
- POWELL G., W.; BORK E., W. Effects of aspen canopy removal and root trenching on understory microenvironment and soil moisture. *Agroforestry Systems* 70:113-124. 2007.
- PRAUSE, J.; LIFSCHITZ, A.P. Constantes de descomposición de hojas y la relación lignina/celulosa en cuatro especies forestales de la reserva estricta de Colonia Benítez – Chaco. [En línea]. Chaco – Corrientes, Argentina : Universidad Nacional del Nordeste, 2001. Disponible en Internet: [www.unne.edu.ar/cyt/2001/cyt.htm](http://www.unne.edu.ar/cyt/2001/cyt.htm). Consultado enero de 2007.
- PRIMAVESI, A. Manejo ecológico del suelo. Buenos Aires : El Ateneo, 1984. 499 p.
- PROMECAFÉ. Manejo de cafetales y árboles de sombra. Santa Tecla : PROMECAFÉ, Guatemala, 2004. 46 p.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE - PNUMA. Declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo. [En línea]. Río de Janeiro : PNUMA, 1992. Disponible en Internet: <http://www.pnuma.org/docamb/dr1992.php>. Consultado junio de 2009.

- PUERTA Q., G.I. Buenas prácticas en el beneficio del café. In: CONGRESO de la Sociedad Colombiana de Entomología, 33. Manizales (Colombia), Julio 26 - 28, 2006. Memorias. Manizales (Colombia), SOCOLEN, 2006. p. 78-87.
- PUPO DE M., F.R. Adubacao do cafeeiro: Macronutrientes e adubacao organico. Rio de Janeiro : EUA : SUICA, 1981. 88 p.
- RADERSMA, S.; ONG, C.K.; [et al.]. Water use of tree lines: Importance of leaf area and micrometeorology in sub-humid Kenya. *Agroforestry Systems* 66:179-189. 2006.
- RAINFOREST ALLIANCE. Norma para agricultura sostenible: Certificación Rainforest Alliance julio de 2010, Versión 2. San José - Costa Rica : Red de Agricultura Sostenible, 2010. 53 p.
- RAINTREE, J.B. The state of the art of agroforestry diagnosis and design. *Agroforestry Systems* 5:219-250. 1987.
- \_\_\_\_\_.; YOUNG, A. Guidelines for agroforestry diagnosis and design. Nairobi : ICRAF, 1983. 25 p.
- \_\_\_\_\_. Los atributos socioeconómicos de los árboles: Características socioeconómicas de los árboles y de las prácticas de plantación forestal. Roma : FAO, 1996. 113 p.
- RAMÍREZ M., L.G. Producción de café bajo diferentes niveles de fertilización con y sin sombra de Poró. p. 135-139. En: SIMPOSIO sobre cafcultura latinoamericana (16 : Octubre 25-29 1993 : Managua). Tegucigalpa : CONCAFÉ : IICA, 1995. 2 vols.
- RAMÍREZ, C. Algunas consideraciones sobre el asocio de árboles de poró (*Erythrina poeppigiana*) en plantaciones de café. *Boletín Promecafé* 8:9-13. 1990.
- RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; PEÑA Q., A.J.; VALENCIA A., J.A. El brillo solar en la zona cafetera colombiana, durante los eventos El Niño y La Niña. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 12 p. (Avances Técnicos No. 421).
- RAMOS A., H.M.; TAVARES P., R.J.; [et al.]. Utilizacao do spring para avaliacao da terra em agroecosistemas cafeeiros da regio de Sao Sebastiao do Paraíso-MG. [En línea]. Minas Gerais, Brasil : Consorcio brasileiro de pesquisa e desenvolvimento do Café, 2004. 4 p. Disponible en Internet:[http://www.epamig.br/geosolos/MaterialSite/Congressos%20Nacionais/SBPC/Pocos\\_Caldas/SPRING\\_SSParaiso.pdf](http://www.epamig.br/geosolos/MaterialSite/Congressos%20Nacionais/SBPC/Pocos_Caldas/SPRING_SSParaiso.pdf). Consultado enero de 2011.
- RAMOS P., J.M.; RODRÍGUEZ, S.A.; [et al.]. Diversidad y tipos de agroecosistemas: Consideraciones para diseño. [En línea]. Bogotá, Colombia : VALSALICE, Bogotá, 2010. 6 p. Disponible en Internet: <http://www.valsalice.edu.co/articulos/Diversidad%20y%20tipos%20de%20agroecosistemas.pdf> Consultado junio de 2011.
- RED AGROFORESTAL NACIONAL. Programa modelos agroforestales para un desarrollo sustentable de la agricultura familiar campesina. Concepción : INFOR, 2005. 6 p.
- REES, H.W.; CHOW, T.L. Impact of incorporated hay mulch on selected physical, chemical and microbiological properties of a loam soil in Atlantic Canada after five years of continuous potato production. *Canadian Journal of Soil Science* 85:161-172. 2005.

- REGANOLD, J.P.; GLOVER, J.D.; [et al.]. Sustainability of three apple production systems. *Nature* 410(19):926-930. 2001.
- REIFSNYDERW., E. Control of solar radiation in agroforestry practice. p. 141-156. En: \_\_\_\_\_; DARNHOFER, T.O. Meteorology and agroforestry: Proceedings of an international workshop on the application of meteorology to agroforestry systems planning and management. Nairobi : ICRAF, 1989. 546 p.
- REX, I.R.; GANAPATHY, M. Growth and physiological attributes of *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.: Seeds and seedlings under salt stress. *ARPN* 2(6):12-16. 2007.
- RIAÑO H., N.M. La zona cafetera colombiana y su potencial en el marco del protocolo de Kyoto. Chinchiná : CENICAFÉ, 2004. (Seminario Junio 11).
- RIBASKI, J. Las ventajas de los sistemas agroforestales. [En línea]. Brasília, DF – Brasil : PROCITROPICOS, 2009. 2 p. Disponible en Internet: <http://www.procitropicos.org.br/portal/conteudo/makepdf.php?itemid=893>. Consultado en agosto de 2011
- RIBEIRO, C.; MADEIRA, M.; [et al.]. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management* 171(1):31-41. 2002.
- RICCI, M. DOS S.F.; COSTA, J.R.; [et al.]. Cultivo orgánico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 41(4):569-575. 2006.
- RIVERA P, J.H.; GÓMEZ A., A. El sombrío en los cafetales protege los suelos de la erosión. Chinchiná : CENICAFÉ, 1992. 8 p. (Avances Técnicos No. 177).
- RIVILLAS O., C.A.; LEGUIZAMÓN C., J.E.; GIL V., L.F. Recomendaciones para el manejo de la roya del cafeto en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafe (Colombia)* No. 19:1-36. 1999.
- RIVILLAS O., C.A.; CASTRO T., A.M. Ojo de gallo o gotera del cafeto *Omphalia flavida*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2011. 25 p.
- ROBINSON, J.B.D. The influence of interplanted bananas on arabica coffee yields. p. 31-38. En: COFFEE Research report 1961. Tanganyika : Coffee Research and Experimental Station, 1962.
- \_\_\_\_\_; MITCHEL, H.W. Studies on the effect of mulch and irrigation on root and stem development in *Coffea arabica* L.: The effects of mulch and irrigation on yield. *Turrialba* 14(1):24-28. 1964.
- RODRIGUES, G.S.; CAMPANHOLA, C.; [et al.]. Avaliação de impacto ambiental da inovação tecnológica agropecuária. Jaguariúna : Embrapa, 2003. 95 p.
- RODRÍGUEZ B., F.; JIMÉNEZ C., R. La aplicación de indicadores en el recurso suelo para evaluar la sostenibilidad de la microrregión Platanar-La Vieja, cuenca del río San Carlos, Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 20(3):12-34. 2007.
- RODRÍGUEZ I., I.; PORPORATO, A.; [et al.]. Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress scope and general outline. *Advances in Water Resources* 24(7):695-705. 2001.

- ROMERO A., Y.; SOTO P., L.; [et al.]. Coffee yields and soil nutrients under the shades of *Inga* sp. vs. multiple species in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 54(3):215-224. 2002.
- RUIZ S., R. Principios generales de nutrición y fertilización: Jornadas de actualización en riego y fertirriego. Mendoza-Argentina: INTA, 2010. 14 p.
- SALAS, G. Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América tropical. San José de Costa Rica : IICA, 1987. 450 p.
- SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Causas de los movimientos masales y erosión avanzada en la zona cafetera colombiana. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 8 p. (Avances Técnicos No. 348).
- \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. Estrategias para la implementación de las prácticas de conservación de suelos y aguas en las regiones cafeteras. Modulo 2. En Retos en conservación de suelos y aguas en zonas de ladera. 35 p. (Octubre 2012: Manizales). Chinchiná: Fundación Manuel Mejía, 2012.
- SALAZAR G., L.F.; SADEGHIAN K., S. Respuesta del café a la fertilización antes y después de la renovación por zoca. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Pereira-Risaralda, octubre 27 al 29 de 2010. 4p.
- SALDÍAS B., C.A. El sistema de información cafetera SICA: Herramienta de consulta y planeación. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. (Seminario Agosto 11).
- SAÑA, J. Mineralització de la fracció organiconitrogenada dels adobs orgànics: Possibles vies per a La Seva. España : Dossiers Agraris (5):29-40. 1999.
- SÁNCHEZ L., J.A. La agroforestería y el desarrollo sostenible. San Pedro Sula : FHIA, 2003. 19 p.
- SANTA, R.I. Litter fall, decomposition and nutrient release in three semi-arid forests of the Duero basin, Spain. *Forestry* 74(4):347-358. 2001.
- SANTELICES, R. Desarrollo de una plantación de *Eucalyptus globulus* establecida en primavera con diferentes tratamientos de riego. *Bosque* 26(3):105-112. 2005.
- SARIYILDIZ, T.J. Litter decomposition of *Picea orientalis*, *Pinus sylvestris* and *Castanea sativa* trees grown in Artvin in relation to their initial litter quality variables. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* (27):237-243. 2003.
- \_\_\_\_\_.; ANDERSON, J.M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: A laboratory study. *Soil Biology Biochemistry* (35):391-399. 2003.
- SARMIENTO C., J. Applications of aerial photography in the coffee zone of Colombia. *Revista Cafetera de Colombia* 165:45-54. 1977.
- SCHAFFERS A., E.P. Soil, biomass, and management of semi-natural vegetation: Interrelationships. *Plant Ecology* 158:229-246. 2002.
- SCHLATTER, J. E.; OTERO, L. Effect of *Pinus radiata* on the chemical-nutritive characteristics of surface mineral soil. *Bosque* 16(1):29-46. 1995.

- SCHROTH, G.; LEHMANN, J.; [et al.]. Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems* 53(2):85-102. 2001.
- SCURLOCK, J., LONG, S., HALL, D., COOMBS, J. Introducción a las técnicas en fotosíntesis y bioproductividad. En técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad (eds. Coombs, J., Hall, D. Long, S. y J. Scurlock). Editorial Futura. México. 2a edición. 1987. 258 p.
- SEGURA, M.; KANNINEN, M.; [et al.]. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* 68:143-150. 2006.
- SENANAYAKE, R. Analog forestry as a conservation tool. *Tiger Paper* 14(2):25-29. 1987.
- \_\_\_\_\_. Analog forestry: An alternative to clear and simplify. *LEISA Magazine* 16(3):12-13. 2000.
- SEPÚLVEDA, S.; CHAVARRÍA, H.; [et al.]. Metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible de espacios territoriales. San José : IICA, 2002. 76 p.
- SEQUEIRA, W. Canopy structure, light penetration and tree growth in a slash pine (*Pinus elliotii*) silvo-pastoral system at different stand configurations in Florida. *The Forestry Chronicle* 37(3):263-267. 1991.
- SERRANO, E.; SANDOVAL, J.; [et al.]. The importance of physical-chemical indicators in the soil quality for the sustainable production of banana in Costa Rica. p. 207-221. En: Reuniao internacional da associacao a cooperacao nas pesquisas sobre banana no Caribe e na América tropical (17: 15 - 20 de outubro 2006 : Santa Catarina). Santa Catarina - BRASIL : ACORBAT, 2006. 453 p.
- SIMMONS, T.T.; HAWKINS, C.P. Factors influencing lotic leaf litter decomposition rates: Results of a large scale study in Western streams. [En línea]. Vancouver : NABS Annual meeting, 2004. Disponible en Internet: <http://www.benthos.org/database/allnabstracts.cfm/db/Vancouver2004abstracts/id/201> Consultado septiembre de 2005
- SIMON, O. Elaboración y caracterización de lignosulfonatos amonificados a partir de pinzote de banano y aserrín de Laurel (*Cordia alliodora*) para utilizarse como fertilizante de liberación lenta. Guácimo : Universidad EARTH, 2004. 42 p.
- SINGH, K.P.; TRIPATHI S.K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. *Biology and Fertility of Soils* 29:371-378. 1999
- SINHA, M.K.; SINHA, D.P.; [et al.]. Organic matter transformations in soils: kinetics of carbon and nitrogen mineralization in soils amended with diferent organic materials. *Plant and Soils* 46:579-590. 1977.
- SLODICAK, M.; NOVAK, J.; [et al.]. Wood production, litter fall and humus accumulation in a czech thinning experiment in norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management* 209(1/2):157-166. 2005.
- SMITH, J. The history of temperate agroforestry. Berkshire : Agroecology Researcher Organic Research Centre, 2010. 17 p.
- SMITH, A.P. La estratificación de la temperatura y los bosques tropicales. *American Naturalist* 107(957):671-683. 1973.

- SMITHSONIAN MIGRATORY BIRD CENTER - SMBC. Normas para la producción, el procesamiento y la comercialización de café Bird Friendly®: Certificado orgánico bajo sombra. Washington : Smithsonian Migratory Bird Center, 2004. 19 p.
- \_\_\_\_\_. Definición del café de sombra con criterios biofísicos: Resultados del taller organizado por el centro smithsoniano de aves migratorias del parque zoológico nacional. Veracruz : Jardín Botánico del Instituto de Ecología, 1999. 51 p.
- \_\_\_\_\_. Normas para la producción, el procesamiento y la comercialización de café Bird Friendly®, certificado orgánico bajo sombra. Washington DC. – USA. Smithsonian Migratory Bird Center. 2002. 19 p.
- SOMARRIBA, E. Diagnóstico y diseño agroforestal. *Agroforestería en las Américas* 5(17/18):68-72. 1998.
- \_\_\_\_\_. Estimación visual de la sombra en cacaotales y cafetales. *Agroforestería en las Américas* 9(35/36):86-94. 2002
- \_\_\_\_\_. Timber, damage to crops plants and yield reduction in two Costa Rican plantations with *Cordia alliodora* shade trees. *Agroforestry Systems* 18:69-82. 1992.
- \_\_\_\_\_.; BEER, J.W. Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management* 18(2):113-126. 1987.
- SOSA M., L.H.; ORDOÑEZ, M.A. Uso y manejo de la sombra en cafetales. [En línea]. Tegucigalpa : ICADE, 2009. 9 p. Disponible en Internet: [http://www.cafedehonduras.org/ihcafe/administrador/aa\\_archivos/Documentos/tec\\_guia\\_uso\\_manejo\\_sombra.pdf](http://www.cafedehonduras.org/ihcafe/administrador/aa_archivos/Documentos/tec_guia_uso_manejo_sombra.pdf) Consultado e marzo de 2011.
- SOTO P, L.; PERFECTO, I.; [et al.]. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, México. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80:61-69. 2000.
- SOTOMAYOR G., A.; SILVA, S. Introducción a los modelos agroforestales: Programa modelos agroforestales para un desarrollo sustentable de la agricultura familiar campesina. Concepción : INFOR, 2003. 27 p.
- SSALI, H.; MCINTYRE B., D.; [et al.]. Effects of mulch and mineral fertilizer on crop, weevil and soil quality parameters in highland banana. *Nutrient Cycling in Agroforestry* 65(2):141-150. 2003.
- STARBUCKS COFFEE COMPANY. C.A.F.E. practices: Tarjeta de puntuación. Washington - USA : Starbucks Coffee Company, 2009. 18 p.
- STAVER, C.; GUHARAY, F.; [et al.]. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: Shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems* 53(2):151-170. 2001.
- STIGTER C., J.; MOHAMMED A., E.; [et al.]. Agroforestry solutions to some African wind problems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90(10):1101-1114. 2002.
- STOVER, R.H. Biomass production, partitioning and yield determinants in bananas and plantains: La cooperation internationale pour une recherche efficace sur le plantain et les bananes. Cote d'ivoire : INIBAP, 1985. 207 p.
- SUÁREZ DE C., F.; MONTENEGRO, L.; [et al.]. Efecto del sombrero en los primeros años de vida de un cafetal. *Café, Servicios Técnicos de Café y Cacao* 3(10):81-102. 1961.

- SUÁREZ V., S.; ÁLVAREZ J., O.J.; [et al.]. Estudio detallado de suelos y clima estación central Naranjal. Chinchiná : CENICAFÉ, 1994. 87 p.
- SUÁREZ, A.; SOMARRIBA, E. Aprovechamiento sostenible de madera de *Cordia alliodora* de regeneración natural en cacaotales y bananales de comunidades indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 9(4):35-36. 2002.
- SUBERO, L. La roya del cafeto. San José de Costa Rica : INFOAGRO, 2011. 15 p.
- SYLVAIN, P.G. Agro-technical innovations in coffee cultivation. p. 21-26. En: 8° Colloque scientifique international sur le café. (1977 : Cote d'Ivoire). Turrialba : CATIE, 1977. 26 p.
- \_\_\_\_\_. El cafeto en relación al agua: El balance hídrico. p. 1-8. En: Curso internacional sobre técnica de la producción del café. Turrialba : IICA, 1958. 41 p.
- SZOTT, L.T.; KASS D., C.L. Fertilizers in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 23:157-176. 1993.
- TEKLAYA, T.; MALMER, A. Decomposition of leaves from two indigenous trees of contrasting qualities under shaded-coffee and agricultural land-uses during the dry season at Wondo Genet, Ethiopia. *Soil Biology and Biochemistry* 36:777-786. 2004.
- THAIUTSA, B.; GRANGER, O. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. *Unasyvla* 31(126):121-129. 1979.
- THOMPSON, I.; MACKEY, B.; [et al.]. Forest resilience, biodiversity, and climate change: A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems. Montreal : Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009. 67 p.
- TORQUEBAU, E. Conceptos de agroforestería: Una introducción. Chapingo : Universidad Autónoma de Chapingo, 1993. 89 p.
- TORRES, D.; FLORENTINO, A.; [et al.]. Indicadores e índices de calidad del suelo en un ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela. *Bioagro* 18(2):83-91. 2006.
- \_\_\_\_\_; GAMBOA, L.; [et al.]. *Forestería análoga: Principios e implementación*. República Dominicana : Curso Taller sobre Forestería Análoga, 2008. 55 p.
- TRIANA B., J.V. Informe preliminar sobre un estudio de modalidades de cultivo del cafeto. *Cenicafé* 8(5):156-168. 1957.
- TROJER, H. Informe anual de los trabajos de la Sección de Agroclimatología, julio de 1963 – junio de 1964. Chinchiná: Cenicafé, 1964. p 28-31
- TUNDIS V., A.R.; GUERRINI, I.; [et al.]. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. *Revista Arvore* 28(6):793-800. 2004.
- TWIST, T.K.; COLTMAN, W.F. Organic matter and healthy coffee with reference to coffee berry disease and quality. *Kenya Coffee* 31(366):261-267. 1966.
- UNIÓN EUROPEA. Reglamento CE No. 1452/2003: De la comisión. En: Diario oficial. Bruselas - Bélgica, agosto 14, 2003. p. 17

- \_\_\_\_\_. Reglamento CEE No. 2092/91 sobre la producción agrícola ecológica y su indicación en los productos agrarios y alimenticios. En: Diario Oficial. Madrid, Enero 24, 2005. 107 p.
- UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION. Manual de agroforestería para zonas secas y semiáridas. Guatemala : UNCCD, 2009. 102 p.
- UNIVERSITY OF MISSOURI. Training manual for applied agroforestry practices. Missouri : University of Missouri, 2006. 425 p.
- URBANO T., P. Tratado de fitotecnia general. 2. ed. Madrid : Mundi prensa, 1995. 895 p.
- URIBE H., A. Distribución anual de la cosecha de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1977. 7 p. (Avances Técnicos No. 63).
- URREGO, B.; FARFÁN V., F. Aportes de hojarasca en cafetales con sombrío de especies forestales. Cali : Smurfit cartón de Colombia, 2002. (Informe de Investigación No. 188).
- USDA. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Washington : USDA, 1999. 82 p.
- \_\_\_\_\_. The NOP final rule: Read the national standards on organic agricultural production and handling view the final regulations. Washington : USDA, 2000. 120 p.
- VAAST, P.; HARMAND, J.M., [et al.]. The EU-CASCA Project: Databases and Models. p. 253-262. En : RAPIDEZ, B.; ROUPSARD, O.; [et al.]. Modelling agroforestry systems: Workshop Proceedings. Turrialba : CATIE, 2009. 338 p.
- VALARINI, P.J.; SHIRAIISHI F., R.T.; [et al.]. Desenvolvimento de método e indicadores de avaliação do impacto ambiental das práticas de manejo em sistemas de produção intensivos. Jaguariúna : EMBRAPA, 2006. 24 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento No. 36).
- VALENCIA A., G.; CARRILLO P., I.F. Interpretación de análisis de suelos para café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1983. 5 p. (Avances Técnicos No. 115).
- \_\_\_\_\_. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 94 p.
- \_\_\_\_\_. Índice de área foliar y productividad del cafeto. Cenicafé 24(4):79-89. 1974.
- VALLADARES, F.; ALLEN, M.T.; [et al.]. Photosynthetic responses to dynamic light under field conditions in six tropical rainforest shrubs occurring along a light gradient. Oecologia 111:505-514. 1997.
- \_\_\_\_\_.; PEARCY, R.W. The geometry of light interception by shoots of *Heteromeles arbutifolia*: Morphological and physiological consequences for individual leaves. Oecologia 121:171-182. 1999.
- \_\_\_\_\_.; ARANDA, I.; [et al.]. La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. p. 335 – 369. En: VALLADARES., F. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Madrid : CSIC, 2005. 583 p.
- VAN DANG, M. Quantitative and qualitative soil quality assessments of tea enterprises in northern Vietnam. African Journal of Agricultural Research 2(9):455-462. 2007.

- VARGAS V., R.; FLORES S., C.L. Retribución nutricional de los residuos de hojas, venas de hojas, pseudotallo y pinzote de banano (*Musa AAA*) en fincas de diferentes edades de cultivo. *Corbana* 20(44):33-47. 1995.
- VARLET G., C.; MOULIA, B.; [et al.]. Spectral modification of light within plant canopies: How to quantify its effects on the architecture of the plant stand. p. 427-451. En: VARLET G., C.; BONHOMME, R. [et al.]. *Crop structure and light microclimate: Characterization and application*. Paris : I.N.R.A., 1993. 518 p.
- VAZ, J.T. Sombreamento e fertilizacao do cafezal. *Gazeta Agrícola de Angola* 12(2):100-103. 1967.
- VELÁSQUEZ, E.; LAVELLE, P.; [et al.]. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39(12):3066-3080. 2007.
- VESTGARDEN, L.S. Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: Effects of internal and external nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry* 33:465-474. 2001.
- VIDAL M., R. Sistemas de producción: El concepto de sistema. [En línea]. Valdivia - Chile : ICATC : Universidad Austral de Chile, 2007. Disponible en Internet: <http://intranet.uach.cl/dw/canales/repositorio/archivos/1014.pdf>. Consultado en noviembre de 2011
- VIDHANA A., L.P.; LIYANAGE, M. DE S. Soil water content under coconut palms in sole and mixed (with nitrogen-fixing trees) stands in Sri Lanka. *Agroforestry System* 57(1):1-9. 2003.
- VILLARREAL, N.J.; GIRALDO, L.N.; [et al.]. Sostenibilidad ambiental y desempeño financiero: Cuatro casos de estudio de gerencia de valor en América latina, el caso finca La mesa. Caracas : Corporación Andina de Fomento, 2002. p. 130.
- VILLEGAS, J.C. Análisis del conocimiento en la relación agua suelo vegetación para el departamento de Antioquia. *Revista EIA* 1:73-79. 2004.
- WADSWORTH, F.H. *Agriculture handbook*. Washington : Department of Agriculture, 1997. 563 p.
- WANDER, M.M.; WALTER, G.L.; [et al.]. Soil quality: Science and process. *Agronomy Journal* 94(1):23-32. 2002.
- WANGA, W.J.; BALDOCKA, J.A.; [et al.]. Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 36:2045-2058. 2004.
- WHITE, D.L.; HAINES, B.L.; [et al.]. Litter decomposition in southern Appalachian black locust and pine-hardwood stands: Litter quality and nitrogen dynamics. *Canadian Journal Forest Research* 181 (11):54-63. 1988.
- WIEDER, R.K.; LANG, G.E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology* 6(36):1636-1642. 1982.
- WILKINSON, K.M.; ELEVITCH, C.R. Integrating understory crops with tree crops: An introductory guide pacific island. Hawaii : Permanent Agriculture Resources, 2000. 4 p.

- WONG, C.C.; WILSON, J.R. Effects of shading on the growth and nitrogen content of green panic and siratro in pure and mixed swards defoliated at two frequencies. *Australian Journal of Agriculture Research* 31:269-285. 1980.
- WCED. *Our common future*. Oxford : Oxford University Press, 1987. 51 p.
- XU, X.; HIRATA, E.; [et al.]. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance. *Vegetatio* 173(2):161-170. 2004.
- YOUNG, A. *Agroforestry for soil conservation*. Wallingford : CAB : ICRAF, 1991. 276 p.
- ZAGAL, E.; CÓRDOVA, C. Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un andisol cultivado. *Agricultura Técnica* 65(1):186-197. 2005.
- ZAIA F., C.; GAMA R., A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense: Fertilidade e nutrição do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28:843-852. 2004.
- ZHI A., L.; SHAO L., P.; [et al.]. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forests of southern China, with special attention to comparisons between legumes and non-legumes. *Plant and Soil* 229(1):105-116. 2001.
- ZOBECK, T.M.; HALVORSON, A.D.; [et al.]. Comparison of two soil quality indexes to evaluate cropping systems in northern Colorado. *Journal of Soil and Water Conservation* 63(5):329-338. 2008.

# Abreviaturas y siglas empleadas

- ACP.** Análisis de Componentes Principales
- C.C.** Capacidad de Campo
- Cenicafé.** Centro Nacional de Investigaciones de Café
- CMNUCC.** Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático
- CMV.** Conjunto Mínimo de Variables
- c.p.s.** Café Pergamino Seco
- DHA.** Deficiencia Hídrica Anual
- D&D.** Diagnóstico y Diseño
- FA.** Forestería Análoga
- FNC.** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia
- GAP.** Apertura del dosel de los árboles
- GLA.** Gap Light Analyzer
- IGSA.** Índice General de Sostenibilidad Ambiental
- IHS.** Índice de Humedad del Suelo
- MDL.** Mecanismos de Desarrollo Limpio
- Mulch.** Cobertura Vegetal Muerta
- nm.** Nanómetro. Es la unidad de longitud equivalente a una milmillonésima parte de un metro. Se utiliza para medir la longitud de onda de la radiación ultravioleta, radiación infrarroja y la luz.
- pmp.** Punto de marchitez permanente
- r.** Coeficiente de Correlación
- R<sup>2</sup>.** Coeficiente de Determinación
- RA.** Rainforest Alliance
- Redegrana.** Diagramas en red. Instrumento indicador para la evaluación comparativa, análisis y planificación de agrosistemas o fincas destinadas a la producción y desarrollo sostenible
- RFA.** Radiación Fotosintéticamente Activa
- SAF.** Sistema Agroforestal
- SIC.** Sistema de Información Cafetera
- SMBC.** Smithsonian Migratory Bird Center
- $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .** Micromoles por metro cuadrado por segundo; están basados en el número de fotones de una cierta longitud de onda incidente por unidad de área y por unidad de tiempo. Se usa comúnmente para describir RFA en el rango de 400 a 700 nm de longitud de onda.



