



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO

**Influencia de la competencia entre componentes de sombra y cacao sobre la
producción en sistemas agroforestales en Centroamérica**

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado como
requisito para optar por el grado de

Magister Scientiae en

Agroforestería y Agricultura Sostenible

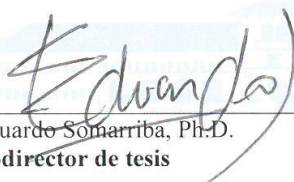
Diego Felipe Saquicela Rojas

Turrialba, Costa Rica
2017

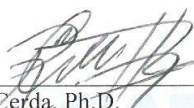
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERIA Y AGRICULTURA SOSTENIBLE

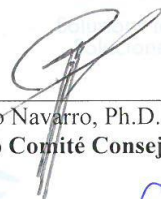
FIRMANTES:



Eduardo Somarriba, Ph.D.
Codirector de tesis



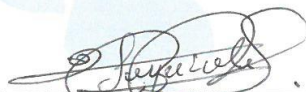
Rolando Cerda, Ph.D.
Codirector de tesis



Guillermo Navarro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Programa de Posgrado



Diego Saquicela Rojas
Candidato

Dedicatoria

A mi esposa

Agradecimientos

El autor deja constancia de su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) y al Instituto de Fomento al Talento Humano (IFTH) de Ecuador, por la beca otorgada para la realización de sus estudios.

A los profesores Eduardo Somarriba, Rolando Cerda y Guillermo Navarro, miembros del Comité Asesor, por su apoyo y paciencia.

Índice de contenidos

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivos y preguntas de investigación.....	3
1.1.1.	Objetivo general	3
1.1.2.	Objetivos específicos	3
1.1.3.	Preguntas de investigación.....	3
1.2.	Marco conceptual	4
1.2.1.	El diseño de sistemas agrícolas	4
1.2.2.	Procesos biofísicos dentro de los sistemas agroforestales	5
1.2.3.	Los sistemas agroforestales desde la perspectiva económica	7
1.2.4.	Características de los SAF con cacao.....	8
1.3.	Bibliografía citada.....	10
2.	Artículo I. Influencia de la competencia entre componentes de sombra y cacao sobre la producción en sistemas agroforestales en Centroamérica	14
2.1.	Introducción	14
2.2.	Materiales y métodos	17
2.2.1.	Descripción de los SAF con cacao.....	17
2.2.2.	Racionalización de la relación competencia-producción en SAF con cacao en Centroamérica.....	18
2.2.3.	Análisis de las relaciones competencia-producción con datos de parcelas.....	26
2.2.4.	Agrupamiento de las parcelas productivas (cacao seco) y el comportamiento de variables asociadas.....	27
2.3.	Resultados	27
2.3.1.	Descripción de los SAF con cacao.....	27
2.3.2.	Simulación del modelo competencia-producción	31
2.3.3.	Comparación de producción predicha por el modelo y los datos reales de parcelas .	34
2.3.4.	Análisis de la relación competencia-producción con datos de parcelas	34
2.3.5.	Agrupamiento de las parcelas productivas y el comportamiento de variables asociadas	35
2.4.	Discusión.....	38
2.4.1.	Características de los SAF con cacao.....	38
2.4.2.	La relación competencia-producción modelada y simulada	39
2.4.3.	La relación competencia-producción en las parcelas.....	41
2.4.4.	Exploración de los datos de parcelas productivas.....	41
2.5.	Conclusiones	45
2.6.	Bibliografía	46
2.7.	Anexos.....	49

Índice de cuadros

Cuadro 1. Preguntas de investigación	3
Cuadro 2. Principales procesos de interacción árbol-suelo-cultivo en sistemas agroforestales tropicales	6
Cuadro 3. Tipos de plantas presentes en sistemas agroforestales de cacao de Talamanca, Costa Rica	8
Cuadro 4. Producción a distintos niveles de densidad para cada componente en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	21
Cuadro 5. Área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$) equivalente a la densidad para los puntos inicial, p, q y máximo en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.....	21
Cuadro 6. Detalle de las ecuaciones de ajuste del rendimiento para cada tramo de la recta de la curva de rendimiento de la Figura 4.....	21
Cuadro 7. Ponderadores de altura y densidad de la madera por especie representativa de cada componente en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	22
Cuadro 8. Área basal (m^2) y dap promedio (m) promedios de los individuos por componentes en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.....	24
Cuadro 9. Áreas basales mínimas y máximas redondeadas por componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	25
Cuadro 10. Valores de área basal tomados para la simulación por componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	25
Cuadro 11. Especies más abundantes de cada componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica (entre paréntesis el total de individuos por componente).	30
Cuadro 12. Valores promedio de densidad por hectárea de individuos de cada componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	31
Cuadro 13. Parámetros estadísticos de las regresiones entre las variables área basal de componentes y sus doseles versus la producción del respectivo componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	35
Cuadro 14. Parámetros estadísticos de las regresiones entre áreas basales de cacao y de su dosel versus la producción por planta de cacao de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	35
Cuadro 15. Resultados de los análisis estadísticos aplicados usando como tratamientos los niveles establecidos para kg de cacao seco (a, b y c) de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	36
Cuadro 16. Tabla de contingencia que clasifica las fincas de acuerdo con los niveles de productividad por país en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.....	37

Índice de figuras

Figura 1. Corredor Biológico Mesoamericano, áreas protegidas y de zonas cacaoteras de Centroamérica con presencia del Proyecto Cacao Centroamérica	15
Figura 2. Esquema de un SAF con sus distintos componentes.....	18
Figura 3. Esquema descriptivo de la competencia y su influencia sobre la producción de un individuo dentro del SAF con cacao.....	19
Figura 4. Relación entre densidad del cultivo con la producción de un individuo y la competencia (en un monocultivo). Se muestran los puntos p y q.....	20
Figura 5. Histogramas de las áreas basales por ha de cada componente y del SAF total de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	28
Figura 6. Distribución empírica de las áreas basales por ha de cada componente y del SAF total de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	29
Figura 7. Tendencias suavizadas de producción para áreas basales en m ² fijas de cada componente (líneas numeradas), conforme varía el área basal de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica. Datos simulados para A: cacao, B: musáceas, C: frutales y D: maderables	33
Figura 8. Regresión entre producción observada y producción modelada de cacao en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.....	34
Figura 9. Distribución de los casos que dividen a la variable kg de cacao seco en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.....	36
Figura 10. Distribución de las áreas basales por componentes para las fincas de alta productividad en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica	38
Figura 11. Regresión entre área basal de cacao y kg de cacao seco	49
Figura 12. Regresión entre área basal de dosel sobre cacao y kg de cacao seco	50
Figura 13. Regresión entre área basal de musáceas y kg de musáceas.....	50
Figura 14. Regresión entre área basal del dosel de musáceas y kg de musáceas.	50
Figura 15. Regresión entre área basal de frutales y kg de frutas	51
Figura 16. Regresión entre área basal de dosel sobre frutales y kg de frutas.	51
Figura 17. Regresión entre área basal de cacao y kg de cacao por planta	52
Figura 18. Regresión entre área basal del dosel sobre cacao y kg de cacao por planta.....	52

Saquicela Rojas, DF. 2017. Influencia de la competencia entre componentes de sombra y cacao sobre la producción en sistemas agroforestales en Centroamérica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 64 p.

Palabras claves: Sistema agroforestal con cacao, musáceas, frutales, árboles de servicios, maderables, competencia, producción, modelación, simulación.

Resumen

La presente investigación se realizó con el objetivo de explorar el nivel de competencia al interior de los sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica y su relación con la producción. Se dispuso de datos de área basal, producción, costos, densidades, entre otros; de hasta 173 parcelas. Con esta información se clasificó a los individuos de SAF con cacao en cinco componentes agroforestales: cacao, musáceas, frutales, servicios y maderables. Se describieron sus características en términos de área basal, abundancia y diversidad de las especies que los componen. Luego se desarrolló un modelo de competencia para predecir la producción por componente, distinguiéndose dos formas de competencia: intra-componente e inter-componentes, con base en variables de área basal y ciertos parámetros específicos para Centroamérica. Con este modelo se pudo generar figuras que describen la producción para determinados niveles de área basal del componente sometidos a diversas intensidades de competencia. Se verificó la capacidad predictiva del modelo y no cumplió con lo esperado, presumiblemente debido a que no se incluyó algunas variables que describieran el manejo, nutrición, genética o estado sanitario entre otros factores, por no estar disponibles. Se trató de hallar evidencia de las dos formas de competencia en los datos de campo sin mayor éxito, lo cual también puede deberse a que no se está tomando en cuenta los factores ya mencionados. Luego, tomando como base la producción de cacao, se exploró en detalle las características de las parcelas más productivas. Resultaron ser parcelas pequeñas, con baja área basal de cacao, con alto rendimiento individual, árboles pequeños y sin mayores diferencias en cuanto a costos con respecto a las parcelas menos productivas. Con esta información se concluye que existen oportunidades de mejorar los resultados económicos en los SAF con cacao y, al mismo tiempo, generar servicios ecosistémicos para beneficio de los productores.

Key words: Cocoa - agroforestry systems, musaceae, fruit trees, service trees, timber, competition, production, modeling, simulation.

Abstract

This research was carried out with the objective of exploring the expression of competition within the cocoa - agroforestry systems in Central America, and its relationship with production. Data were available on basal area, production, costs, densities, among others; Of up to 173 plots. With this information, SAF individuals with cocoa were classified into five agroforestry components: cocoa, musaceae, fruit trees, services and timber. Their characteristics were described in terms of basal area, abundance and diversity of the species that compose them. A competition model was then developed to predict production by component, distinguishing two forms of competition: intra-component and inter-component, based on variables of basal area and certain parameters specific to Central America. With this model, it was possible to generate figures describing the production for certain levels of basal area of the component subjected to different intensities of competition. The predictive capacity of the model was verified and did not meet expectations, presumably because some not available variables describing management, nutrition, genetics or health status were not included among other factors. It sought to find evidence of the two forms of competition in the field data without greater success, which may also be because the factors already mentioned are not being considered. Then, based on the production of cocoa, the characteristics of the most productive plots were explored in detail. They turned out to be small plots, with low basal area of cacao, with high individual yield, small trees and without major differences in costs with respect to the less productive plots. This information concludes that there are opportunities to improve economic performance in cocoa-based SAFs and at the same time generate ecosystem services for the benefit of farmers.

1. Introducción

El diseño de sistemas agrícolas está íntimamente relacionado al desarrollo histórico de la agricultura, desde los modelos de tumba y quema en agricultura migratoria hasta los monocultivos plantados en grandes extensiones y con uso intensivo de insumos. Entre estos extremos existen muchas combinaciones posibles a nivel de biodiversidad, productividad y resiliencia, por citar algunos aspectos importantes (Perfecto y Vandermeer, 2008; Malézieux *et ál.* 2009 y Malézieux *et ál.* 2012). Algunos sistemas agrícolas son diseñados tomando como modelo el ecosistema natural del sitio. Malézieux (2012), propone que el diseño de sistemas agrícolas desde una perspectiva científica pasa por tres fases: 1) observar el ecosistema natural o lo que más se le asemeje en la zona en donde será implementado el nuevo sistema; 2) complementar conocimiento de científicos y agricultores para establecer el sistema, integrando objetivos, restricciones, rendimientos esperados en un ambiente experimental y 3) manejar el sistema en un ambiente participativo y a mayor escala. La existencia de disyuntivas (*trade-offs*) entre los aspectos productivos y la conservación de la biodiversidad en los sistemas agrícolas ha sido destacada por varios autores (Rapidel *et ál.* 2015; Deheuvels *et ál.* 2014).

El funcionamiento de los sistemas agroforestales, al tener multiplicidad de diseños y formas de manejo y ambientes, logra distintos grados de eficiencia en relación con aspectos de rentabilidad o generación de bienes y servicios ecosistémicos. En el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), se ha investigado sobre interacciones dentro de los sistemas agroforestales, siendo la serie “Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica” (Alpízar *et ál.* 1986; Heuveland *et ál.* 1988; Fassbender *et ál.* 1988; Imbach *et ál.* 1989 y Beer *et ál.* 1990), un acercamiento detallado a las relaciones existentes entre estos componentes a escala biofísica. Dicho compendio de artículos es pionero en la región e incluye modelación de aspectos como: flujos de materia orgánica, nutrientes, agua, producción de madera, de materia orgánica y su descomposición hasta productividad.

La modelación de sistemas agroforestales en la región centroamericana también ha abarcado los sistemas silvopastoriles e incluso forestales; con énfasis en modelos de desarrollo de pasturas y con restricciones relacionadas con nutrientes y emisiones de gases, para la selección de modelos de manejo de pastura para ganadería doble propósito de la zona atlántica de Costa Rica (Botero 1998); o enfocada en la rentabilidad del uso del suelo para el diseño en fincas (Cartín 1990). Alfaro (1990) por su parte, realizó un trabajo similar sobre rentabilidad del uso del suelo en fincas, pero dirigido a sistemas forestales. Además, se han estudiado otros aspectos que pueden servir como insumos para la modelación como sombra en los sistemas agroforestales (SAF) con cacao, especialmente su influencia en la productividad y sanidad del cacao, fertilidad del suelo y rentabilidad del sistema (Somarriba *et ál.* 1996; Beer *et ál.* 1998; Cerda *et ál.* 2014).

En Centroamérica, abarcando Costa Rica, Guatemala, Honduras Nicaragua y Panamá, se han realizado caracterizaciones de aspectos socioeconómicos, agroforestales, alimentarios y de

cuantificación de carbono acumulado en el dosel de sombra de sistemas agroforestales de cacao (Somarriba *et ál.* 2013; Sáenz Tijerino, 2012; Poroma, 2012; Sousa, 2013; Poveda *et ál.* (2013), cuantificaron carbono en la biomasa aérea de SAF con cacao de Waslala, Nicaragua incluyendo el que se encuentra almacenado en el suelo. Ayestas *et ál.* (2013), en la misma zona realizaron una caracterización de árboles superiores de cacao seleccionados en 29 fincas orgánicas. Almendarez *et ál.* (2013), reportan una evaluación de las existencias de árboles maderables y frutales en 49 fincas del lugar. Por su parte, Matey *et ál.* (2013) presentan un estudio de la composición florística y caracterización estructural de los estratos en el dosel tanto del cacaotal como de parches de bosque complementado con información sobre el uso que el agricultor le da a las especies allí existentes. Cerda *et ál.* (2013) presentan para Nicaragua, Costa Rica, Guatemala y Panamá, una cuantificación de carbono en SAF con cacao. Deheuvels *et ál.* (2011) muestran datos sobre la estructura de la vegetación y productividad de los SAF con cacao en Talamanca, Costa Rica.

Existen diversos esfuerzos de modelación de producción (de SAF con cacao) desde varios enfoques: con orientación fisiológica (Zuidema *et ál.* 2005); de patrones de siembra regulares progresivamente densificados (Wojtkowski y Cubbage, 1991); modelación del SAF con énfasis económico en plantaciones coetáneas (Wojtkowski *et ál.* 1991), o con enfoque de los ciclos de circulación de nutrientes en el sistema (Heuvelde *et ál.* 1988). Estos autores coinciden en que la sombra puede afectar a la producción pudiendo alcanzar niveles fuertes de afectación en un contexto de manejo deficitario. Además, existen otros modelos más generales para producción en los SAF, que pueden ser complejos al punto de requerir equipos multidisciplinarios para su aplicación; o son esquemas de modelación que vienen de sistemas agrícolas que no son sistemas agroforestales (Van Noordwijk y Lusiana, 1999; Mobbs *et ál.* 1999; Weigelt y Jolliffe 2003). Específicamente, para generar información sobre SAF se pueden requerir observaciones a largo plazo lo cual dificulta la obtención de información experimental. (Somarriba *et ál.* 1995).

En los sistemas agroforestales ocurren circunstancias en las que, quien lo administra debe tomar decisiones de optimización ante la limitada disponibilidad de recursos biofísicos. Optimizar es buscar la mejor manera de realizar una actividad. Maximizar un rendimiento o minimizar riesgos en una actividad son problemas básicos de optimización (Robinson, 1987; Betters, 1988). En los SAF, optimizar la energía lumínica disponible es de vital importancia; un desequilibrio en las actividades de manejo puede perjudicar el rendimiento, aunque es difícil determinar valores precisos acerca de la sombra.

Una de las dudas más persistentes relativas al manejo de sistemas agroforestales es la cantidad ideal de sombra que puede soportar un SAF sin sacrificar la producción (Cannell *et ál.* 1996); este es el nivel de competencia adecuado para no perjudicar la producción y que el dosel que genera la sombra también produzca bienes y/o servicios. Cuando se dice cantidad de sombra, implícitamente están siendo consideradas las interacciones que pueden originar los individuos que generan esa sombra. El problema se complica cuando se incluyen las particularidades de cada parcela sobre la cual se emite el criterio, y/o cuando se toman en cuenta

las necesidades particulares de cada agricultor. Esta duda es un genuino ejercicio de optimización que, aunque se tienen algunos insumos para plantear su resolución, no necesariamente se trata de una actividad sencilla. Ante esta problemática este estudio plantea los siguientes objetivos.

1.1. Objetivos y preguntas de investigación

1.1.1. Objetivo general

Analizar la influencia de la competencia sobre la producción de los componentes en sistemas agroforestales con cacao.

1.1.2. Objetivos específicos

- Describir las características de los sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.
- Estimar el efecto de la competencia entre miembros del mismo componente y entre componentes en los sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.
- Identificar oportunidades de mejorar la producción de los sistemas agroforestales.

1.1.3. Preguntas de investigación

En el Cuadro 1 se detallan las preguntas de investigación para cada uno de los objetivos propuestos.

Cuadro 1. Preguntas de investigación

	Objetivos	Preguntas de investigación
Objetivo general	Analizar la influencia de la competencia sobre la producción de los componentes en sistemas agroforestales con cacao.	1. ¿Cuál es la influencia que tienen los componentes de un sistema agroforestal en sus diversas dimensiones sobre la producción del sistema?
	Describir las características de los sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.	2. ¿Cuáles son las características agroforestales de los sistemas agroforestales con cacao de Centroamérica?
Objetivos específicos	Estimar el efecto de la competencia entre miembros del mismo componente y entre componentes en los sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica.	3. ¿Cuál es la relación de competencia y producción entre individuos del mismo componente dentro de los sistemas agroforestales con cacao?
		4. ¿Cuál es la relación de competencia y producción entre componentes dentro de los sistemas agroforestales con cacao?
	Identificar oportunidades de mejorar la producción de los sistemas agroforestales.	5. ¿En qué aspectos y circunstancias existe oportunidad de mejorar la productividad de los sistemas agroforestales?

1.2. Marco conceptual

1.2.1. El diseño de sistemas agrícolas

A lo largo de la historia de la humanidad, especialmente en el proceso de desarrollo de la agricultura, los seres humanos han modificado su entorno natural desde los ecosistemas originales hacia agroecosistemas con diverso grado de intervención (Perfecto y Vandermeer, 2008).

Malézieux (2012) menciona que el diseño de sistemas agrícolas debe ser influenciado por objetivos de producción, así como por restricciones y rendimientos esperados, armonizando con el ecosistema y con las condiciones económicas y sociales del sitio en donde se va a desarrollar. Para lograr lo anterior, no solo es necesario identificar y usar especies del ecosistema natural del sitio, sino conocer su comportamiento funcional y las principales interacciones biológicas existentes entre plantas y animales en dicho ecosistema para luego tratar de mimetizarlo. El análisis del conocimiento existente exige equipos multidisciplinarios que consideran altamente el conocimiento del agricultor. Lo que se persigue con este proceso es obtener un agroecosistema diseñado para generar bienes y servicios concretos en armonía con el entorno (optimizado). Un agroecosistema en desarrollo puede estar optimizado en mayor o menor grado, generando bienes y servicios con mayor o menor eficiencia.

Bergez *et ál.* (2010) mencionan que, si bien la experimentación y/o creación de prototipos de sistemas agrícolas son herramientas útiles para investigar sobre sistemas nuevos, son lentas para brindar respuestas a la velocidad requerida en la actualidad. Un aporte importante en este sentido es el uso de herramientas de modelación y simulación, en donde se crean y modifican reglas de decisión con facilidad y se pueden aglutinar gran cantidad de conocimientos que permiten obtener resultados valiosos rápidamente. Un modelo aplicable a sistemas agroforestales es el propuesto por Van Noordwijk *et ál.* (1999), denominado WaNuLCAS, que describe la interacción del agua, nutrientes y captura de luz en dichos sistemas. Modela las interacciones árbol-suelo-cultivo dentro de diversos SAF con parámetros de ajuste que permitan generar esquemas de comparación.

Las métricas para describir un SAF son diversas: sombra, biodiversidad, productividad y carbono capturado por citar algunas (Guiracocha *et ál.* 2001; Somarriba 2005; Grado y Husak 2005; Cerda *et ál.* 2014; Clough *et ál.* 2011; Deheuvels 2014). Sin embargo, la definición de las métricas a usar, sobre las cuales generar procesos de optimización siempre deberán ir de la mano con los objetivos del agricultor. Al respecto Cerda *et ál.* (2014), hacen una extensa descripción de las fuentes de ingreso y producción de consumo doméstico que se originan en SAF. Sus estudios los han realizado en Centroamérica, enfocándose en SAF con cacao, en los cuales han identificado la producción de bienes como alimentos, madera y cacao como requerimientos importantes para los agricultores y dando una prevalencia en criterios productivos y económicos como medida del grado de productividad de un SAF.

Existen diversos enfoques que consideran un SAF en condiciones óptimas. Es frecuente en ámbitos científicos, la valoración de la biodiversidad, aunque también intervienen conceptos de ecología de paisajes o la mitigación al cambio climático mediante la captura de carbono en estos sistemas (Clough *et ál.* 2011; Deheuvels *et ál.* 2014). Sin embargo, siempre se realizan esfuerzos por describir el comportamiento que debe tener un SAF para maximizar su producción (Vandemeer 1998; Botero 1998; Alvarado Boivirant 2011).

Ante la decisión de maximizar producción, existe la necesidad de comprender la relación entre cada componente del sistema agroforestal además de sus limitantes; esto conlleva una descripción de las interacciones y de las restricciones que afectan dichas interacciones (Robinson 1987; Dykstra 1984; Wojtkowski *et ál.* 1988; Bertomeu *et ál.* 2006). Un enfoque teórico interesante es el propuesto por Vandermeer (1998), quien interpreta las relaciones existentes entre componentes en sistemas de cultivos en callejones, buscando la cantidad óptima entre el número de filas de árboles que propicien la facilitación máxima y el mínimo de pérdidas por competencia. Esto, en términos prácticos, significa que $I = F - C$; es decir que el rendimiento es igual a un efecto de facilitación menos un efecto de competencia. Se puede establecer un *trade-off* entre la cantidad de podas a las especies arbóreas y la afectación de su rendimiento contra el incremento consecuente en el rendimiento del cultivo del callejón.

Wojtkowski y Cubbage (1991), por su parte plantean la construcción de un modelo para describir la producción de un SAF en el cual, la máxima producción obtenida por una especie cultivada será la obtenida por dicho componente sin competencia; luego, al ser un sistema con varias especies, se va descontando el efecto de la presencia competitiva de las demás. Esta técnica se conoce como enfoque de límites de matriz y establece que cuando se aumenta la participación de un componente, progresivamente se llega a afectar el rendimiento de los demás.

1.2.2. Procesos biofísicos dentro de los sistemas agroforestales

Partiendo de su definición, un SAF es aquel en donde se cultivan varias especies de las cuales al menos uno de los componentes es una leñosa perenne, al menos una de las especies es manejada con fines agrícolas (forraje, producción anual o perenne) y además existe interacción biológica entre al menos dos especies (Somarriba 1992). En consecuencia, en un SAF comparten lugar varias especies, con distintas interacciones tanto positivas como negativas (Somarriba 2005). Podemos citar, por ejemplo, las interacciones de sombra, fertilidad, recirculación de nutrientes, plagas y enfermedades, agronomía y rendimientos que han sido estudiadas; sin embargo, la cuantificación de estas relaciones puede resultar compleja en sistemas diversificados y ha requerido de perspectivas de diversas disciplinas para construir modelos (Alpizar *et ál.* 1986; Heuvelop *et ál.* 1988; Fassbender *et ál.* 1988; Imbach *et ál.* 1989; Beer *et ál.* 1990; Somarriba, 2005). En el Cuadro 2 se observa un resumen que describe los principales procesos de interacción en un SAF tropical.

Cuadro 2. Principales procesos de interacción árbol-suelo-cultivo en sistemas agroforestales tropicales

Naturaleza de la interacción	Proceso
Fertilidad del suelo: química	
Carbón	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento en reservorios activos de materia orgánica del suelo a través de la hojarasca, recambio de raíces y la incorporación de ramas de árboles y residuos de cultivos
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor oferta de N en el suelo a través de: fijación, captura en suelos profundos y reducción de lixiviación
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Transformación de P inorgánico menos disponible a formas fácilmente disponibles para las plantas
Cationes (Ca, Mg, K)	<ul style="list-style-type: none"> • Reubicación en perfil del suelo
Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> • Ácidos orgánicos que bloquean el aluminio • Desintoxicación localizada de aluminio
Fertilidad del suelo: física	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoría en agregación del suelo, porosidad y conectividad de poros • Reducción de la densidad aparente del suelo • Ruptura de capas de suelo compactado o endurecido
Fertilidad del suelo: biológica	<ul style="list-style-type: none"> • Acumulación de poblaciones microbianas y macrofauna del suelo • Acumulación de las poblaciones de rizobios y micorrizas arbusculares vesiculares • Plagas y patógenos de insectos del suelo reducidos o aumentados
Competencia	<ul style="list-style-type: none"> • Compartición de los recursos necesarios para el crecimiento de árboles y cultivos: luz, agua y nutrientes
Microclima	<ul style="list-style-type: none"> • Sombra: reduce la temperatura del suelo y el aire • Refugio: protección del viento • Redistribución e intercepción de lluvia
Conservación	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de erosión del suelo • Reducción de la lixiviación
Biológicos: Malas hierbas	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de las poblaciones de malezas • Cambios en las especies de malezas • Viabilidad disminuida de rizomas de malezas perennes • Decaimiento del banco de semillas de malas hierbas anuales
Plagas y enfermedades	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción o aumento de las poblaciones de biocontroladores/depredadores
Alelopatía	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de productos químicos que afectan al crecimiento en el suelo

Tomado de Rao *et ál.* 1998.

Nair (1993), enfatiza que el éxito de la agroforestería tiene una fuerte relación con el aprovechamiento de las interacciones, tanto así que interacciones económicas y biológicas aparecen en la propia definición de agroforestería. Sin embargo, el conocimiento de las características de las interacciones como modelo establecido puede ser difícil de lograr por la complejidad de factores involucrados.

Dentro de un SAF, las interacciones positivas son las que incrementan la producción debido al mejoramiento del microclima y el reciclaje de nutrientes; las interacciones negativas son las que perjudican la producción consecuencia de la competencia por luz, nutrientes, agua, alelopatía y modificación de microclima (Nair 1993; Somarriba *et ál.* 2001, Cannell *et ál.* 1996). Sin embargo, un mismo proceso de interacción puede ser visto como positivo o negativo, dependiendo del origen y direccionamiento que tenga. La sombra es un caso típico; su exceso provocado por el componente arbóreo puede afectar el desarrollo de algunas especies y favorecer el de otras. Así mismo, una mayor densidad del dosel puede perjudicar a otras especies al bloquear la luz, favorecer presencia de plagas, pero también beneficiar la fertilidad del suelo (Rao *et ál.* 1998; Nair *et ál.* 1999; Schroth *et ál.* 2000).

1.2.3. Los sistemas agroforestales desde la perspectiva económica

Los SAF se pueden describir desde un punto de vista económico, mediante la teoría del uso conjunto de la tierra (Robinson 1987), según la cual la producción conjunta ocurre en cualquier situación en donde el mismo activo de producción (conjunto de recursos biofísicos), es usado para producir dos o más productos agrícolas. En este modelo, dos productos pueden ser producidos en proporciones “técnicamente variables”. Conforme se incrementa la intensidad del cultivo sobre los demás componentes de un sistema de producción conjunta, ocurren situaciones de incompatibilidad ante la limitación de recursos que sostienen la producción (luz, agua y nutrientes, por ejemplo). Las relaciones existentes entre cultivo o producto al interior de un mismo sistema productivo pueden ser de diversa índole, especialmente a partir de un determinado grado de intensificación: desde totalmente compatibles hasta incompatibles pasando por diversos grados intermedios. Ello depende del grado de afectación que genere la producción de un determinado bien sobre el aprovechamiento de otro. En una situación de bajos ingresos podría ser posible que ambos productos puedan seguir aumentando si se invierte más en producir. Con la teoría del uso conjunto de la tierra, se observa que existe una oportunidad de optimización de sistemas agrícolas cuando se manejan con dos o más cultivos.

Al respecto de la curva de producción y haciendo énfasis sobre especies de uso forestal Klemperer (1996), indica que se reconocen básicamente dos formas de abordar el manejo de la edad de las plantaciones. El primero, consiste en sembrar al mismo tiempo para cosechar al mismo tiempo y volver a plantar nuevamente el espacio liberado; esto se conoce como sistema coetáneo puesto que todos los individuos son de la misma edad. La otra forma, conocida como sistema disetáneo, consiste en manejar la cosecha (tumba) parcial de los individuos plantados, lo cual obliga a hacer renuevos parciales. El autor señala que estos modelos de manejo implican diferencias sociales y económicas por parte de quienes lo aplican.

En Centroamérica, los SAF con cacao se manejan específicamente, bajo un esquema disetáneo. Tienen componentes con proporciones variables si se les compara en diversos ambientes geográficos (Cárdenas *et ál.* 2013; Cerda *et ál.* 2014). Esa variabilidad proviene de las decisiones de manejo que toma el productor dependiendo de sus necesidades, su entorno social e inclusive de la logística necesaria para realizar sus actividades de manejo.

1.2.4. Características de los SAF con cacao

Somarriba (2007), indica que hay cinco tipologías básicas de SAF con cacao: 1) cacao bajo sombra monoespecífica, como *Inga* spp. o *Cordia alliodora*; 2) cacao bajo sombra de dos estratos, una mezcla de frutas (*Citrus* spp., *Bactris gasipaes*, *Nephelium lappaceum*), leguminosas y maderables; 3) cacao intercalado con banano y frutales bajo una sombra monoespecífica de maderables o leguminosas; 4) huertos caseros diversificados con cacao, frutales, madera y leguminosas y 5) cacao rústico, conocido como *cabruca*, que consiste en cacao sembrado debajo de bosque natural raleado.

Estudios realizados por Cerda *et ál.* (2013), en sistemas agroforestales con cacao de comunidades indígenas *bribri*, en la zona de Talamanca, Costa Rica, cuantificaron el área basal de los diferentes componentes (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tipos de plantas presentes en sistemas agroforestales de cacao de Talamanca, Costa Rica

Variable	Árboles maderables	Árboles frutales	Otros árboles	Palmas	Musáceas	Árboles de cacao	Total
Densidad (ind. ha ⁻¹)	119±84	84±63	42±58	43±48	193±261	591±218	1071±242
Área basal (m ² ha ⁻¹)	8,2±5,6	1,9±1,7	0,9±2,2	0,9±1,2	3,4±4,6	10,2±4,3	25,5±7,4

Tomado de Cerda *et ál.* (2013).

En un estudio sobre SAF con cacao bajo manejo orgánico en Waslala, Nicaragua, se observó que existen 625 árboles de cacao por hectárea. Estos sistemas se desyerban y podan tres veces por año; las enfermedades fungosas (monilia y mazorca negra), se combaten mediante la remoción de mazorcas enfermas y la aplicación de cal de uso agrícola disuelta en agua dos o tres meses antes de la cosecha principal. La fertilidad del suelo se mantiene o mejora aplicando compost a razón de 2,3 kg por árbol·año⁻¹ y/o incorporando abonos verdes y residuos de cosecha. Sobre un grupo de árboles promisorios se observó que el 79% presentó una altura media de 3,6 m y mostró una apariencia vigorosa. El peso medio por fruto fue de 683 g, con 39 semillas por fruto; la forma y color predominantes de los frutos fue cundeamor (42%) y amarillo (71%), respectivamente. La mayoría de las semillas (76%), presentaron un cotiledón color violeta. Los índices de semilla y mazorca, en promedio, fueron de 1,4 y 20, respectivamente (Ayestas *et ál.* 2013).

En la misma zona de Waslala, Nicaragua, se estudió una muestra de 40 fincas cuyos resultados indicaron que en todas existen especies maderables y otros cultivos; *Cordia alliodora* (17,5 árboles·ha⁻¹), *Darbergia tucurensis* (3,25 árboles·ha⁻¹), *Cordia bicolor* (2,08 árboles·ha⁻¹) y *Terminalia oblonga* (2,75 árboles·ha⁻¹) son las más abundantes. Sin embargo, existe un 10% de cacaotales que no tienen árboles maderables asociados. El 75% de los árboles presentes provienen de la regeneración natural y el restante 25% fueron plantados. Además, se observa que existen en promedio 31,25 árboles maderables ha⁻¹, que suman un área basal 3 m²·ha⁻¹ que son aprovechados principalmente por parte de los mismos propietarios. Los frutales presentes son *Bactris gasipaes* (3-6,7 árboles·ha⁻¹), *Citrus sinensis* (4-28 árboles·ha⁻¹), *Mangifera indica*

(1-4 árboles·ha⁻¹), *Persea americana* (1-6 árboles·ha⁻¹), *Citrus reticulata* (224 individuos, 0,42 árboles·ha⁻¹) y *Citrus lemon* (1-3,5 árboles·ha⁻¹). La comercialización de las frutas es limitada (Almendárez *et ál.* 2013).

En un estudio sobre la composición florística y diversidad realizado también en Waslala, se indica que la densidad de siembra del cacao fue de 660 árboles·ha⁻¹. Entre las especies del dosel se destacan por su abundancia las musáceas (182 tallos·ha⁻¹), *Cordia alliodora* (22 árboles·ha⁻¹), *Bactris gasipaes* (20 individuos·ha⁻¹) y *Ryania speciosa* (17 plantas·ha⁻¹). En el sitio se registraron 145 individuos·ha⁻¹. En las 3,6 ha del estudio se observaron 35 familias, 57 géneros y 70 especies. (Matey *et ál.* 2013).

Cerda *et ál.* (2014), mencionan que en sistemas agroforestales de Centroamérica (Panamá Costa Rica, Guatemala, Honduras y Nicaragua), los de Panamá son los que presentan la mayor riqueza de especies de dosel (110 especies), seguido por Honduras (105), mientras que la menor la presentan SAF de Guatemala (43), en observaciones de hasta 20 hectáreas. Las especies de este dosel son utilizadas por los productores principalmente para frutas, madera, leña y sombra (árboles de servicio). En los SAF con cacao las especies del dosel más abundantes son *Cordia alliodora* (29,8% de abundancia relativa), *Gliricidia sepium* (15,2%), *Bactris gasipaes* (7,7%), *Inga spp.* (5,5%), *Cedrela odorata* (2,7%), *Citrus sinensis* (2,3%), *Persea americana* (1,9%), *Mangifera indica* (1,3%), *Guazuma ulmifolia* (1,2%), *Swietenia macrophylla* (1,1%), y *Pterocarpus officinalis* (1,0%). Los principales productos comerciales de los SAF con cacao son frutas (cacao, bananos, cítricos y pejíbaye), además de la madera especialmente en Costa Rica y Panamá. Otros usos son menos relevantes para la comercialización.

En lo referente a la rentabilidad de los SAF en Centroamérica, Cerda *et ál.* (2014), mencionando que en Nicaragua existe un ingreso neto positivo en 60% de las fincas, seguido de Guatemala (56%), Honduras (26%), Panamá (18%) y Costa Rica (17%). Sin embargo, en todas las fincas el beneficio familiar (ingreso efectivo que obtiene la familia), es positivo en todos los SAF observados debido a la participación de la mano de obra familiar. Los autores clasifican a los SAF en función de la información disponible; mencionan tres tipologías provenientes de un análisis de *clúster*: (C1), gran tamaño (área), densidad moderada de maderables y bajos rendimientos; (C2), tamaño pequeño (área), alta densidad de especies maderables y bajos rendimientos y (C3), tamaño moderado (área), alta densidad de especies maderables y altos rendimientos.

Ante tales características, donde los agricultores escogen la mezcla de especies que desean asociar con cacao conforme a sus propias estrategias, es lógica la presencia de *trade-offs* especialmente entre altas producciones de cacao y la provisión de servicios ecosistémicos para el productor y la sociedad; sin embargo, el uso de sombra diversificada puede ser visto como un nuevo enfoque de intensificación de producción. La disminución de sombra afecta la capacidad del agricultor de adaptarse a cambios globales orientados a presión demográfica, inseguridad

alimentaria, volatilidad de precios de cacao o cambio climático (Deheuvels *et ál.* 2011; Vaast y Somarriba 2014).

1.3. Bibliografía citada

- Almendárez, E; Orozco, L; López, A. 2013. Existencias de especies maderables y frutales en fincas de Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 49:68-77.
- Alpizar, L; Fassbender, HW; Heuvelop, J; Fölster, H; Enríquez, G. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica: I. Inventory of organic matter and nutrients. *Agroforestry Systems* 4(3):175-189.
- Alvarado Boirivant, J. 2011. El análisis post-optimal en programación lineal aplicada a la agricultura. *Revista Reflexiones* 90(1).
- Ayestas, E; Orozco, L; Astorga, C; Munguía, R; Vega, C. 2013. Caracterización de árboles promisorios de cacao en fincas orgánicas de Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 49:18-25.
- Alfaro, MA. 1990. Estudio de caso sobre la rentabilidad y uso óptimo de recursos en plantaciones forestales en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 162 p.
- Beer, J; Bonnemann, A; Chavez, W; Fassbender, HW; Imbach, AC; Martel, I. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica: V. Productivity indices, organic material models and sustantability over ten years. *Agroforestry systems* 12(3):229–249.
- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38(1-3)139–164.
- Bergez, JE; Colbach, N; Crespo, O; Garcia, F; Jeuffroy, MH; Justes, E; Loyce, C; Munier-Jolain, N; Sadok, W. 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32(1):3–9.
- Bertomeu, M; Bertomeu, M; Giménez, JC. 2006. Improving adoptability of farm forestry in the Philippine uplands: a linear programming model. *Agroforestry Systems* 68(1):81-91.
- Bettors, DR. 1988. Planning optimal economic strategies for agroforestry systems. *Agroforestry systems* 7(1):17–31.
- Botero, JA. 1998. Exploración de opciones silvopastoriles para la sostenibilidad del sistema de doble propósito en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 99 p.
- Cannell, MGR; Van Noordwijk, M; Ong, CK. 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry systems* 34(1):27–31.
- Cárdenas, A; Hipólito-Romero, E; Junkin, R; Escobedo, A. 2013. El rol de los sistemas cacaoteros en los medios de vida de los hogares productores en el Municipio de Cortés, Honduras. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 55 p. (Boletín Técnico, no. 67).

- Cartín, J. 1990. Aplicación de un modelo de programación lineal en una finca demostrativa del Proyecto Cultivo de Arboles de Uso Múltiple (MADELEÑA) en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 134 p.
- Cerda, R; Espín Chion, T; Cifuentes, M. 2013. Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 49:33-41.
- Cerda, R; Deheuvels, O; Calvache, D; Niehaus, L; Sáenz, Y; Kent, J; Vílchez, S; Villota, A; Martínez, C; Somarriba, E. 2014. Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification. *Agroforestry Systems* 88(6):957-981.
- Clough, Y; Barkmann, J; Juhbandt, J; Kessler, M; Wanger, TC; Anshary, A; Buchori, D; Cicuzza, D; Darras, K; Putra, DD; Erasmi, S; Pitopang, R; Schmidt, C; Schulze, CH; Seidel, D; Steffan-Dewenter, I; Stenchly, K; Vidal, S; Weist, M; Wielgoss, AC; Tschardtke, T. 2011. Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(20):8311-8316.
- Deheuvels, O; Avelino, J; Somarriba, E; Malezieux, E. 2011. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 149:181–188.
- Deheuvels, O; Rousseau, GX; Soto, G; Decker, M; Cerda, R; Vílchez, SJ; Somarriba, E. 2014. Biodiversity is affected by changes in management intensity of cocoa-based agroforests. *Agroforestry Systems* 88(6):1081-1099.
- Dykstra, DP. 1984. *Mathematical programming for natural resource management*. New York, United States of America, McGraw-Hill. 318 p.
- Fassbender, HW; Alpízar, L; Heuvelodop, J; Fölster, H; Enríquez, G. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica III. Cycles of organic matter and nutrients. *Agroforestry Systems* 6(1):49-62.
- Grado, SC; Husak, AL. 2005. Economic Analyses of a Sustainable Agroforestry System in the Southeastern United States. *In* Alavalapati, JRR; Mercer, DE (eds.). *Valuing Agroforestry Systems. Methods and Applications*. Países Bajos, Kluwer Academic Publisher. p. 39–57.
- Guiracocha, G; Harvey, C; Somarriba, E; Krauss, U; Carrillo, E. 2001. Conservación de la biodiversidad en sistemas agroforestales con cacao y banano en Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(30):7–11.
- Heuvelodop, J; Fassbender, HW; Alpízar, L; Enríquez, G; Fölster, H. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica II. Cacao and wood production, litter production and decomposition. *Agroforestry Systems* 6(1):37-48.
- Imbach, AC; Fassbender, HW; Borel, R; Beer, J; Bonnemenn, A. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and cacao with poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica: IV. Water balances, nutrient inputs and leaching. *Agroforestry Systems* 8(3):267-287.

- Klemperer, WD. 1996. Forest resource economics and finance. New York, United States of America, McGraw Hill. 551 p. (McGraw-Hill Series in Forest Resources).
- Malézieux, E; Crozat, Y; Dupraz, C; Laurans, M; Makowski, D; Ozier-Lafontaine, H; Rapidel, B; Tourdonnet, S; Valantin-Morison, M. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29(1):43-62.
- Malézieux, E. 2012. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for sustainable development* 32(1):15–29.
- Matey, A; Zeledón, L; Orozco Aguilar, L; Chavarría, F; López, A; Deheuvels, O. 2013. Composición florística y estructura de cacaotales y parches de bosque en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 49: 61-67.
- Mobbs, DC; Lawson, GJ; Friend, AD; Crout, NMJ; Arah, JRM; Hodnett, MG. 1999. HyPAR: Model for agroforestry systems. s.l., s.e. 120 p.
- Nair, PKR. 1993. An introduction to agroforestry. Netherlands, Kluwer Academic Publisher. 499 p.
- Nair, PR; Buresh, RJ; Mugendi, DN; Latt, CR. 1999. Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: myths and science. In Buck, LE; Lassoie, JP; Fernandes, ECM (eds.). *Agroforestry in Sustainable Agricultural System*. p. 1–31.
- Perfecto, I; Vandermeer, J. 2008. Biodiversity conservation in tropical agroecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134(1):173–200.
- Poroma, D. 2012. Estrategias de reducción de la huella de carbono en la producción del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 79 p.
- Poveda, V; Orozco, L; Medina, C; Cerda, R; López, A. 2013. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 49:42-50.
- Rao, MR; Nair, PKR; Ong, CK. 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 38:3–50.
- Rapidel, B; Ripoché, A; Allinne, C; Metay, A; Deheuvels, O; Lamanda, N; Blazy, J-M; Valdés-Gómez, H; Gary, C. 2015. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development* 35(4):1373-1390.
- Robinson G. 1987. Resource economics for foresters. Nueva York, Estados Unidos, Wiley. 477.
- Sáenz Tijerino, YI. 2012. Aporte del cacaotal en la economía y nutrición familiar en Waslala, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 119 p.
- Schroth, G; Krauss, U; Gasparotto, L; Aguilar, JD; Vohland, K. 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems* 50(3):199–241.
- Somarriba, E. 1992. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems* 19(3):233-240.
- Somarriba Chávez, E; Meléndez, L; Campos, W; Lucas, C. 1995. Cacao bajo sombra de maderables en Puerto Viejo, Talamanca, Costa Rica: manejo, crecimiento y producción de cacao. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 72. (Serie Técnica. Informe Técnico, no. 249).

- Somarriba, E; Beer, J; Bonnemann, A. 1996. Arboles leguminosos y maderables como sombra para cacao: el concepto. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 51 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 274).
- Somarriba, E; Beer, J; Muschler, RG. 2001. Research methods for multistrata agroforestry systems with coffee and cacao: recommendations from two decades of research at CATIE. *Agroforestry Systems* 53(2):195–203.
- Somarriba, E. 2005. ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? *Agroforestería en las Américas* 41(42):120–128.
- Somarriba, E. 2007. Cocoa and shade trees: production, diversification and environmental services. *Gro-cocoa* 11:1-4.
- Somarriba, E; Villalobos, M; Cerda, R; Astorga, C; Orozco, S; Escobedo, A; Say, E; Deheuvels, O; Orozco, L; Junkin, R; Villegas, R; López, A; Salazar, J. 2013. ¿Cómo diseñamos y ejecutamos el Proyecto Cacao Centroamérica para estimular al sector cacaotero de Centroamérica? *Agroforestería en las Américas* 49(1):111-116.
- Sousa, KFD de. 2015. Agroforestry timber production in Central America: population dynamics and information technologies in Nicacento and Trifinio. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 43 p.
- Vaast, P; Somarriba, E. 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems* 88(6):947-956.
- Van Noordwijk, M; Lusiana, B. 1999. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications. Agroforestry Systems* 43:217–242.
- Vandermeer, J. 1998. Maximizing crop yield in alley crops. *Agroforestry systems* 40(2):199–206.
- Weigelt, A; Jolliffe, P. 2003. Indices of plant competition. *Journal of Ecology* 91(5):707-720.
- Wojtkowski, PA; Brister, GH; Cubbage, FW. 1988. Using multiple objective linear programming to evaluate multi-participant agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 7(2):185-195.
- Wojtkowski, PA; Cubbage, FW. 1991. A bordered matrix approach to the bioeconomic modeling of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 14(1):81–97.
- Wojtkowski, PA; Jordan, CF; Cubbage, FW. 1991. Bioeconomic modeling in agroforestry: A rubber-cacao example. *Agroforestry Systems* 14(2):163–177.
- Zuidema, PA; Leffelaar, PA; Gerritsma, W; Mommer, L; Anten, NPR. 2005. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agricultural Systems* 84(2):195-225.

2. Artículo I. Influencia de la competencia entre componentes de sombra y cacao sobre la producción en sistemas agroforestales en Centroamérica

2.1. Introducción

Los productores cacaoteros centroamericanos representan unos 16.400 hogares que se dedican a la agricultura de subsistencia y al cultivo del cacao. Se cultivan unas 18 mil ha de cacaotales que producen tres mil toneladas anuales con un valor bruto aproximado de US\$7 millones por año (Orozco *et ál.* 2015). En Panamá, la provincia de Bocas del Toro es la principal zona productora de cacao; en Costa Rica, los principales territorios cacaoteros se ubican en Talamanca, en el eje ferrocarrilero entre Limón y Guápiles y en la zona norte entre Guatuso y Upala; en Nicaragua, hay tres núcleos cacaoteros determinados: el mayor y más antiguo se ubica en Rancho Grande y Waslala y los otros dos, en el triángulo minero del noreste de Nicaragua y en el departamento de Río San Juan y la Región Autónoma del Atlántico Sur (RAAS). En Honduras se cultiva cacao a lo largo del piedemonte de la costa norte y en Río Plátano; en Guatemala existen tres zonas cacaoteras diferenciadas: la costa sur (Pacífico sur occidental o Boca Costa), que corresponde a los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla y Santa Rosa; los municipios de Cahabón y Lanquín en Alta Verapaz y el departamento de Izabal. En Belice, la principal zona de producción de cacao incluye localidades del distrito de Toledo, en las colinas Maya, y en menor escala los distritos Cayo, Stann Creek y Belice (Somarriba *et ál.* 2013; Orozco *et ál.* 2015) (Figura 1).

Los SAF con cacao de Centroamérica, se caracterizan por su alta adaptabilidad a la presencia de diversas especies que se complementan aprovechando los diferentes espacios biofísicos, puesto que el cacao se desarrolla bien en sistemas agroforestales con compañía de árboles y cultivos perennes o anuales, mientras las interacciones entre dichos componentes agroforestales sean manejadas adecuadamente (Alvim y Nair 1986; Somarriba y Beer 2011). El funcionamiento del sistema genera interrelaciones como la regulación de luz por parte de los árboles, influencia en la dinámica de plagas, incidencia en la fertilidad y producción de bienes y servicios (Rao *et ál.* 1998). En esta región, el cultivo del cacao está en manos de pequeños productores, algunos de ellos indígenas que viven en condiciones de pobreza y con frecuencia alrededor de áreas protegidas de interés nacional e internacional (Beer *et ál.* 2003).

Existe una influencia de la estructura de los componentes agroforestales sobre la producción y por ende en el beneficio económico que de ellos se obtiene (Deheuvels *et ál.* 2012; Cárdenas *et ál.* 2013a; Sáenz 2012). Esta influencia es la que puede ser moldeada, a través del manejo que el agricultor da a su sistema para movilizar recursos biofísicos hacia los individuos de quienes se espera obtener réditos.

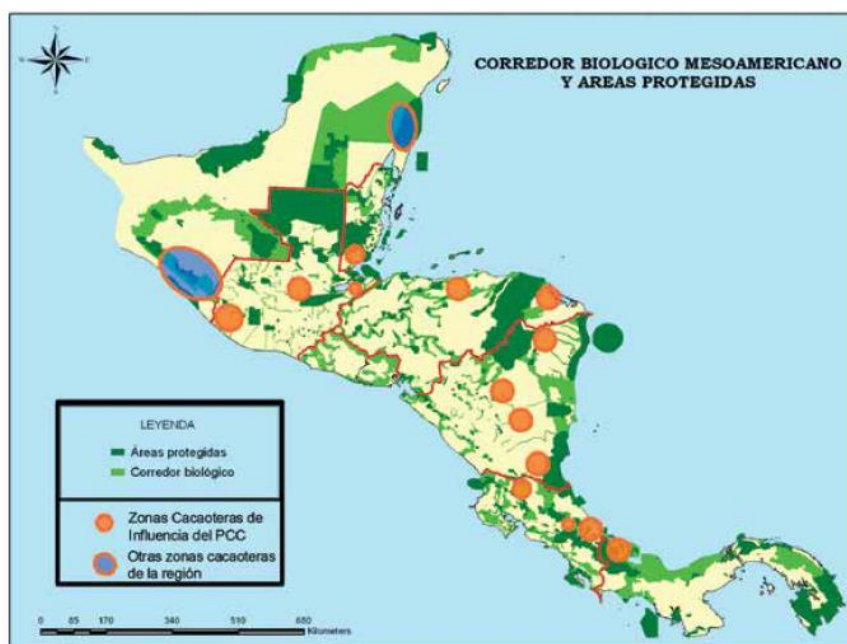


Figura 1. Corredor Biológico Mesoamericano, áreas protegidas y de zonas cacaoteras de Centroamérica con presencia del Proyecto Cacao Centroamérica
Tomado de Orozco *et ál.* 2015

Los sistemas agroforestales diversificados (como los centroamericanos), presentan diversas ventajas como: efectos positivos en la estabilidad de la producción ya que en ellos se propicia la generación de hábitats para una mayor cantidad de especies vegetales y animales. Esta diversidad también puede generar ambientes más estables que mantengan bajo límites razonables a plagas y malezas. Además, hay un efecto positivo en la calidad e inclusive en la cantidad de producción, si se considera al total generado por el sistema. Algunos de los servicios más importantes son la conservación de biodiversidad, suelos y agua, favorecimiento el reciclaje de nutrientes en el suelo y la captura de carbono por encima y por debajo del nivel del suelo (Malezieux *et ál.* 2009; Muschler 2001).

Aunque se han mencionado los efectos positivos que se obtienen de estas interacciones, vale mencionar que también puede haber efectos negativos como la competencia por luz, agua o nutrientes o una mayor presencia de plagas y malezas. Dependiendo de las condiciones del sistema agroforestal el efecto puede ser de mayor o menor importancia. De todos estos aspectos que tienen connotación negativa, la competencia es una de las más importantes puesto que actúa sobre recursos biofísicos elementales como la luz, los nutrientes o el agua. En este contexto surge la oportunidad de aprovechar al máximo los recursos biofísicos del sistema agroforestal, pero sin permitir que la competencia ejerza un efecto perjudicial sobre los individuos del sistema y su capacidad productiva. Para minimizar la competencia entre individuos y favorecer la productividad de los componentes del SAF, es importante estudiar aspectos biológico-económicos de los distintos usos del suelo, sin dejar de lado al menos un entendimiento básico de los procesos biofísicos involucrados en los SAF (ICRAF 1992 citado por Babu *et ál.* 1995).

Cannell *et ál.* (1996) indican que la hipótesis biofísica de la investigación en agroforestería consiste en que los beneficios de cultivar árboles junto a otros cultivos, ocurre solo cuando los árboles son capaces de captar recursos como agua, luz y nutrientes que los cultivos no requieren; es la definición de un sistema con un nivel de competencia ideal, que usa los recursos al máximo sin que exista perjuicio entre cultivos al interior del SAF.

Para la valoración de la competencia existen diversos indicadores. Weigelt y Jolliffe (2003), mencionan más de 50 índices relativos a la valoración de la competencia entre plantas. Estos autores clasifican los indicadores dependiendo de sus características y uso en aquellos que valoran la intensidad de la competencia, los que valoran los efectos de la competencia y aquellos que estiman los resultados de la competencia. Al enfocarnos en los segundos, encontramos indicadores como el LER (*Land Equivalent Ratio* o Proporción equivalente de la tierra), que compara los rendimientos obtenidos al cultivar dos o más especies juntas con los rendimientos que se obtendrían al cultivar los mismos cultivos en lotes separados y en monocultivos. Resultados mayores a uno, evidenciarían una producción global mayor a la que se obtendría solo con monocultivos (Mead y Wiley 1980; Malezieux *et ál.* 2009). En un SAF, este indicador bien puede ser una evidencia del estado de la competencia que pudiera ser conveniente o perjudicial para la producción.

Existe una amplia información sobre competencia en sistemas agrícolas, aunque no hay un énfasis claro en SAF con cacao, quizás por su complejidad; es abundante más bien el desarrollo de aspectos generales de la competencia o de modelos altamente elaborados como el denominado WaNuLCAS (Van Noordwijk y Lusiana 1999; Weigelt y Jolliffe 2003).

La presencia de competencia puede ser analizada desde el punto de vista del tamaño de los individuos involucrados. Schwinning y Weiner (1998) mencionan que cuando las plantas están sometidas a competencia, los individuos más grandes a menudo obtienen una parte desproporcionada de los recursos (biofísicos) disponibles y limitan el crecimiento de sus vecinos más cercanos. Este fenómeno es conocido como la competencia asimétrica por tamaño y es, definitivamente, el caso de los SAF con cacao en Centroamérica, dada la composición botánica de sus componentes que va desde maderables hasta musáceas o el mismo cacao, con las asimetrías correspondientes (Deheuvels *et ál.* 2012; Cerda *et ál.* 2014).

Uno de los modelos más flexibles y aplicables a SAF es el propuesto por Wojtkowski y Cubbage (1991), quienes señalan que, si la producción de un monocultivo está en función de la densidad del mismo, entonces la producción de un policultivo está en función de la densidad de cada cultivo y del número de plantas del otro cultivo, cuyo efecto a su vez se puede descomponer en diferentes aspectos relativos a las interacciones entre cultivos y las limitaciones de recursos biofísicos del sistema. Expresando lo anterior en forma de ecuación general tendremos:

$$P_a = f(D_a, N_b) \quad (1)$$

Donde:

P_a = producción por unidad de área de un cultivo a ; en función de:

D_a = densidad por unidad de área del componente a

N_b = densidad por unidad de área de individuos de otro u otros cultivos

En esta investigación se explora la competencia y su influencia en la producción en los SAF con cacao en Centroamérica. Para ello se consideraron las características agroforestales de los SAF y se definió una modelación de la producción en dos niveles de competencia: intra-componente e inter-componente. Luego se hizo una comprobación del valor predictivo del modelo y una exploración de los datos de las parcelas para buscar las funciones matemáticas que describan la competencia e identificar las características de las fincas más productivas. Con los resultados obtenidos se buscó mejorar la comprensión del comportamiento de la competencia en el interior de los sistemas agroforestales diversificados y emitir un criterio relativo a la competencia y la producción, con base en un diagnóstico basado en la cuantificación del área basal y las dimensiones de los componentes agroforestales. Durante este proceso se identificaron algunas condiciones que podrían ayudar a direccionar el manejo de un SAF con cacao con el objetivo de incrementar la producción de los componentes del sistema.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Descripción de los SAF con cacao

Con información proveniente de sistemas agroforestales de Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Honduras y Guatemala¹ (Orozco *et ál.* 2014), se procedió a organizar una base de datos que, en general, cuenta con información por parcela, área basal de cacao y del dosel, costos y producción de cacao. Dadas ciertas diferencias en la metodología de recolección de datos, para Costa Rica, Nicaragua y Guatemala se clasificó a los individuos del SAF en hasta cinco componentes agroforestales: cacao, musáceas, frutales, árboles de servicios y forestales; para Honduras y Panamá, se logró diferenciar únicamente entre el componente cacao y el dosel en el que se incluyen los demás individuos. La unidad observacional es cada una de las parcelas de cacao que en total contabilizan 239,09 ha y 173 parcelas.

Esta información se usó para describir la distribución de las áreas basales mediante histogramas, de cada componente como la total. Se pudo establecer las características típicas de los SAF observados desde el punto de vista del área basal; es decir, los rangos en los que se ubica cada componente y las dimensiones en torno a las cuales se concentran las observaciones.

Luego se describieron las especies más abundantes de cada componente, tomando como referencia su abundancia en el área observada. Esta abundancia es válida únicamente para Costa Rica, Nicaragua y Guatemala, debido a la disponibilidad de los datos (103 parcelas distribuidas

¹ Datos provenientes de diversas etapas del Proyecto Cacao Centroamérica del CATIE, desarrollado entre 2008 y 2012. Dadas las diferencias por país en la recolección de datos, para cada cuadro o figura presentada en lo sucesivo, se detalla el país del que proviene la información. De Guatemala solo se usan datos de la zona de Alta Verapaz.

en 89,19 ha). Se sintetizaron también los resultados de la densidad de todos los componentes por hectárea y su importancia relativa.

2.2.2. Racionalización de la relación competencia-producción en SAF con cacao en Centroamérica

Para la comprensión de la relación competencia-producción se consideró inicialmente un enfoque analítico-sintético, que trató de racionalizar esta relación con base en las condiciones de los SAF y el desarrollo de modelos simulados. Para la generación del modelo de competencia-producción este trabajo considera las características de los SAF centroamericanos y las ideas propuestas por Wojtkowski y Cubbage, (1991).

Posteriormente se hizo una clasificación de individuos en cinco componentes agroforestales; en la Figura 2 se observa un esquema de SAF en su forma típica, indicando que cada componente tiene diferentes dimensiones.

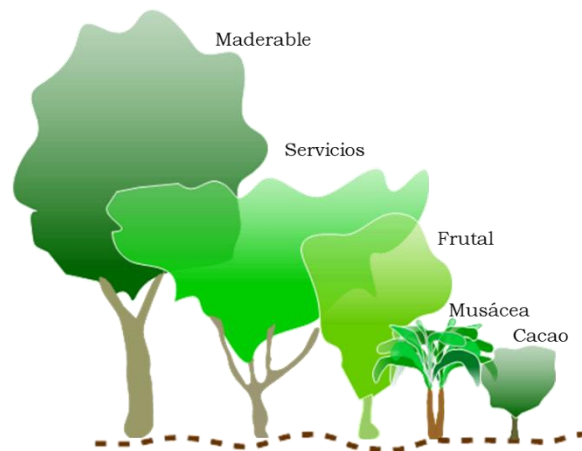


Figura 2. Esquema de un SAF con sus distintos componentes
Fuente: Elaboración propia

Así mismo se consideró que la producción de un individuo está influenciada por la competencia que generan sus compañeros dentro del mismo componente y los de los otros componentes. En este marco, se trató de estimar la producción de cada componente (cacao, bananos, frutas, madera), considerando la competencia a la que se encuentran sometidos los individuos dentro de un determinado componente (Figura 3).

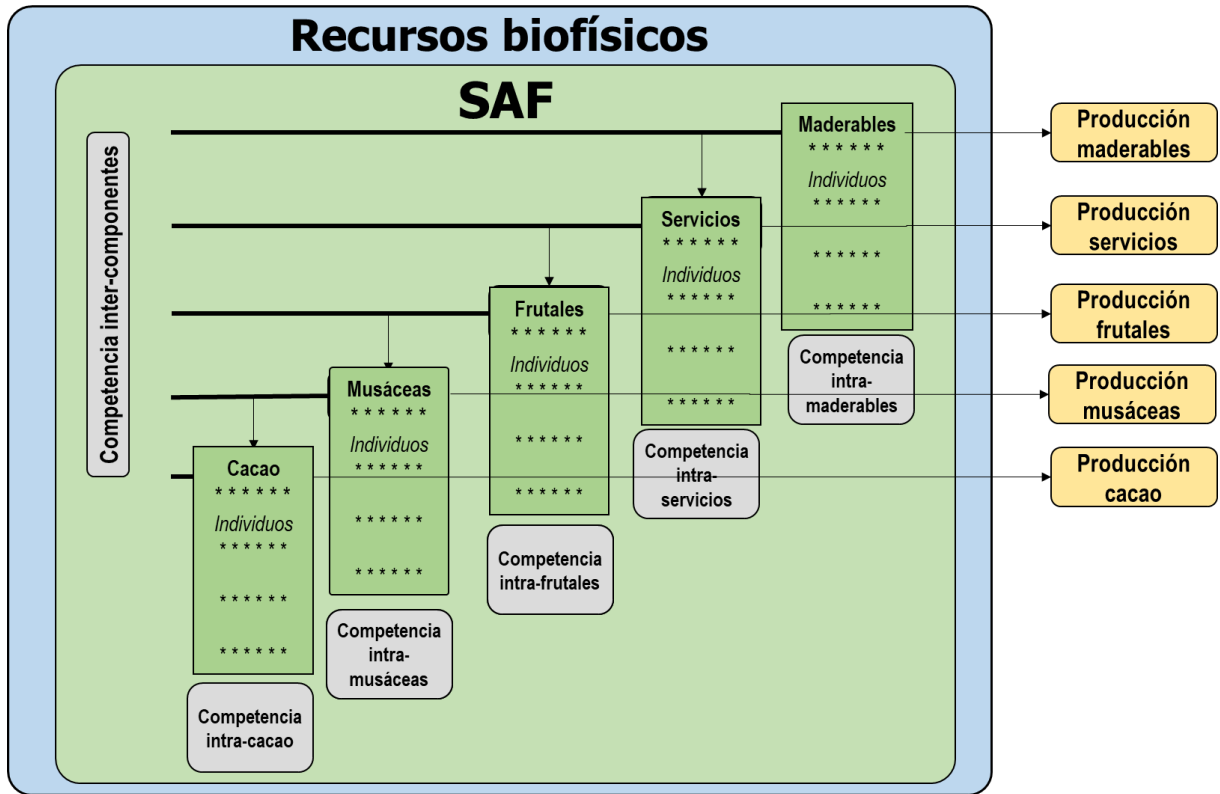


Figura 3. Esquema descriptivo de la competencia y su influencia sobre la producción de un individuo dentro del SAF con cacao

Fuente: Elaboración propia

2.2.2.1. La competencia intra-componente

Para definir el comportamiento de la competencia entre individuos del mismo componente se plantean criterios semejantes a los de un monocultivo cualquiera. En un monocultivo con bajas densidades, la competencia entre individuos será prácticamente inexistente y las plantas presentes producirán sin más limitantes que las ambientales (luz, agua, nutrientes, temperatura). Luego, se puede establecer una densidad a partir de la cual la competencia empieza a incidir sobre el rendimiento; llamaremos a este punto p . Si se continuase incrementando la densidad, se llegará a un punto en el que el efecto de la competencia sobre la producción se vuelve perjudicial para el agricultor al afectar la producción global del grupo de individuos. Llamaremos a este punto q . A partir del punto q , si se incrementa aún más la densidad, se tiende hacia un monocultivo improductivo (Figura 4).

Conforme se va incrementando la densidad aumenta la competencia entre individuos, y consecuentemente, la producción va a ir disminuyendo. Entonces, tomando como referencia los puntos p y q establecidos previamente, se espera una producción individual alta ante una baja competencia, y conforme se incrementa la competencia, dicha producción irá disminuyendo hasta caer drásticamente con una competencia alta.

Este comportamiento viene a describir el manejo dado por el agricultor de acuerdo con las densidades para cada cultivo. Para plantaciones de un cultivo en una determinada región, las costumbres de manejo establecidas muestran cierta regularidad en la densidad de siembra por hectárea, convirtiéndose así en densidades estándar para determinadas condiciones. Con valores de densidad por encima de dicho estándar, se espera una menor productividad debida al exceso de competencia o, dicho de otra forma, a la insuficiencia de recursos biofísicos; mientras que por debajo de dicha densidad existe una condición subóptima de productividad, lo que implica que existen recursos biofísicos disponibles que no se aprovechan.

Estas relaciones en realidad son curvas continuas que van variando suavemente conforme aumenta la densidad; pero se opta por expresarlas como líneas con tramos rectos y vértices en los lugares en donde corresponden los puntos p y q , con fines de facilitar la explicación de los conceptos, así como la modelación.

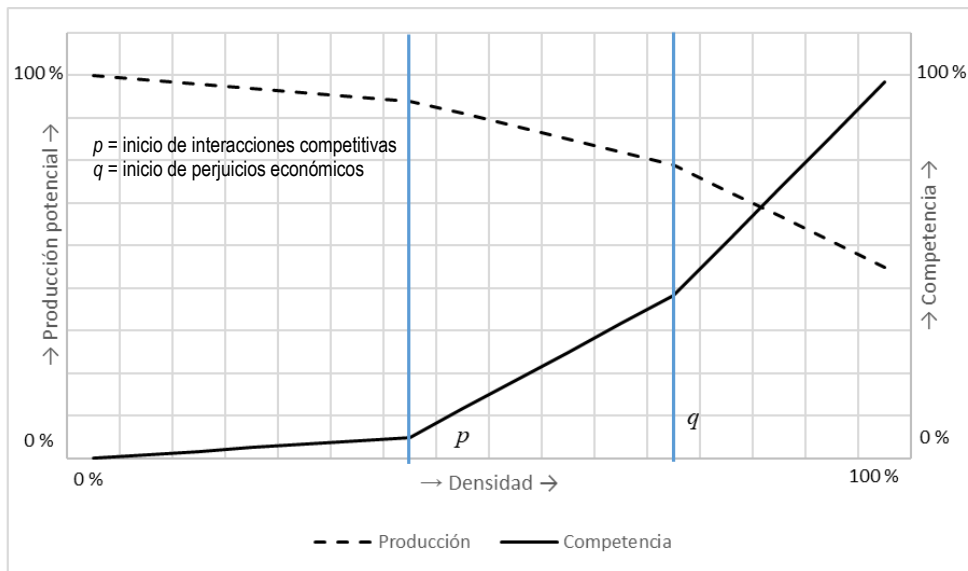


Figura 4. Relación entre densidad del cultivo con la producción de un individuo y la competencia (en un monocultivo). Se muestran los puntos p y q .

Definidas estas ideas acerca de los niveles de competencia y su relación con la productividad que se esperan observar en un monocultivo, podemos aplicarlas a los SAF con cacao para expresar la producción individual. Para ello se hacen algunas simplificaciones tales como: considerar cada componente agroforestal como un “monocultivo” y definir funciones polinómicas de primer grado que describan la producción entre los puntos 0, p , q y *máximo* y asignar datos referenciales para la especie más abundante dentro de cada componente. En el Cuadro 4 se indica la información para la estimación pertinente de valores de producción por individuo dentro de la posible abundancia observable de un componente. El Cuadro 5 muestra los valores de densidad y su equivalente en área basal.

Cuadro 4. Producción a distintos niveles de densidad para cada componente en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Componente	Cacao	Musáceas	Frutales	Servicios	Maderables
Especie representativa	<i>Theobroma cacao</i>	Gros Michel	<i>Bactris gasipaes</i>	<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Cordia alliodora</i>
Densidad por ha en límite <i>inicial</i>	161	108	59	-	39
Densidad por ha en <i>p</i>	536	287	236	-	195
Densidad por ha en <i>q</i>	1126	790	493	-	494
Densidad por ha en límite <i>máximo</i>	1608	1005	630	-	520
Rendimiento esperado en límite <i>inicial</i>	1,5 kg/planta	48 kg/planta	35 kg/planta	-	0,050 m ³ / planta
Rendimiento esperado en <i>p</i>	1 kg/planta	45 kg/ planta	30 kg/planta	-	0,041 m ³ / planta
Rendimiento esperado en <i>q</i>	0,8 kg/ planta	40 kg/ planta	20 kg/ planta	-	0,026 m ³ / planta
Rendimiento en límite <i>máximo</i>	0,4 kg/ planta	28 kg/ planta	16 kg/ planta	-	0,024 m ³ / planta

Basado en: Somarriba y Beer (1987); Somarriba et ál. (1996); Ramírez et ál. (2001); Cordero y Boshier (2003); Somarriba et ál. (2008); Cárdenas et ál. (2013a; Cárdenas et ál. (2013b); Cárdenas et ál. (2013c); Cerda et ál. (2013); Orozco et ál. (2015); Flores (2016) y datos de Proyecto Cacao Centroamérica (Orozco et ál. 2014).

Cuadro 5. Área basal (m²·ha⁻¹) equivalente a la densidad para los puntos *inicial*, *p*, *q* y *máximo* en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Componente	Cacao	Musáceas	Frutales	Servicios	Maderables
Especie representativa	<i>Theobroma cacao</i>	Gros Michel	<i>Bactris gasipaes</i>	<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Cordia alliodora</i>
Área basal por ha en límite <i>inicial</i>	3	3	3	-	3
Área basal por ha en <i>p</i>	10	8	12	-	15
Área basal por ha en <i>q</i>	21	22	25	-	38
Área basal por ha en límite <i>máximo</i>	30	28	32	-	40

Con los valores del Cuadro 4 se generó el mecanismo para la estimación de la producción individual, dependiente de la densidad por hectárea de cada componente, y representado por su especie más abundante (Cuadro 6). Las ecuaciones (2), (3) y (4) son el resultado de la estimación con base al modelo general de la ecuación lineal de primer grado ($y = ax + b$). El origen en detalle de las ecuaciones (2), (3) y (4) se la muestra en el Anexo 1.

Cuadro 6. Detalle de las ecuaciones de ajuste del rendimiento para cada tramo de la recta de la curva de rendimiento de la Figura 4

Para el tramo <i>valor inicial a p</i>	$y_i = x \cdot \frac{y_p - y_{ini}}{x_p - x_{ini}} + \left[y_{min} - \frac{y_p - y_{ini}}{x_p - x_{ini}} \cdot x_{ini} \right]$	(2)
Para el tramo <i>p a q</i>	$y_i = x \cdot \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p} + \left[y_p - \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p} \cdot x_p \right]$	(3)
Para el tramo <i>q a máximo</i>	$y_i = x \cdot \frac{y_{max} - y_q}{x_{max} - x_q} + \left[y_q - \frac{y_{max} - y_q}{x_{max} - x_q} \cdot x_q \right]$	(4)

Donde

y_i = rendimiento individual

x = variable densidad por ha

$x_p; x_q; x_{ini}; x_{max}$ = valores correspondientes a coordenadas de densidad en los puntos *inicial*, *p*, *q* y *max*.

$y_p; y_q; y_{ini}; y_{max}$ = valores correspondientes a coordenadas de rendimiento en los puntos *inicial*, *p*, *q* y *máximo*.

Nótese que hasta el momento se propone un mecanismo para estimar la producción individual, afectada únicamente por la competencia de los demás individuos del mismo componente.

2.2.2.2. La competencia inter-componentes

Para estimar el efecto de la competencia entre componentes, es necesario considerar el grado de competencia de cada uno, tal como se esquematiza en la Figura 3. En principio, es importante el efecto de la biomasa debido a que un componente cuyos individuos sean de mayor tamaño ejercerá sobre los demás una competencia mayor; mientras que componentes con individuos pequeños tendrán efectos competitivos menores. También se debe considerar el efecto de la abundancia de individuos en cada componente pues, entre mayor sea, mayor será su capacidad de ejercer competencia sobre los demás individuos y viceversa. Para simplificar el funcionamiento del SAF, se considera que las variaciones tanto de biomasa como de abundancia de individuos son características capaces de causar variaciones lineales del efecto competitivo, sin importar de cual componente se trate.

Para la determinación de un índice de competencia se debe calcular y relacionar una estimación aproximada de las biomásas aéreas totales de los componentes, para lo cual se utiliza el área basal y ponderadores de densidad de madera y altura total (fórmula en el Anexo 2). Los valores ponderadores de densidad y altura total están orientados a la especie más abundante tomada como representativa de cada componente (Cuadro 7).

Cuadro 7. Ponderadores de altura y densidad de la madera por especie representativa de cada componente en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Componente	Especie/variedad representativa	Ponderador de altura	Ponderador de densidad de la madera
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	3,0	0,45
Musáceas	Gros Michel	3,5	0,10
Frutales	<i>Bactris gasipaes</i>	8,0	0,60
Servicios	<i>Gliricidia sepium</i>	12,0	0,65
Maderables	<i>Cordia alliodora</i>	18,0	0,45

Con información de Cordero y Boshier (2003). Valores de Gros Michel son estimaciones.

Entonces, en términos aritméticos, para valorar la competencia de varios componentes sobre alguno, se propone la generación de un índice que oscila entre 0 y 1 y que actúa como multiplicador de la producción individual promedio. La ecuación propuesta es la (5):

$$C_{SAF} = \frac{AB_i \cdot h_i \cdot d_i}{AB_1 \cdot h_1 \cdot d_1 + AB_2 \cdot h_2 \cdot d_2 + AB_3 \cdot h_3 \cdot d_3 + AB_4 \cdot h_4 \cdot d_4 + AB_5 \cdot h_5 \cdot d_5} \quad (5)$$

Donde:

C_{SAF} = índice de competencia ejercida sobre el componente i

AB_i = área basal del componente sobre el cual se está calculando la competencia

AB_{1-5} = área basal del componente 1 al 5 en el caso en observación (incluye componente i)

h_i = ponderador de altura del componente sobre el cual se ejerce la competencia

d_i = ponderador de densidad de madera del componente sobre el cual se ejerce la competencia

h_{1-5} = ponderadores de altura de los componentes 1 al 5 (incluye componente i)

d_{1-5} = ponderadores de densidad de madera de los componentes 1 al 5 (incluye componente i)

Misma que se puede resumir como:

$$C_{SAF} = \frac{AB_i \cdot h_i \cdot d_i}{\sum_{c=1}^{c=5} AB_c \cdot h_c \cdot d_c} \quad (6)$$

Donde:

C_{SAF} = índice de competencia ejercida sobre el componente i

AB_i = área basal del componente sobre el cual se está calculando la competencia

AB_c = área basal de los componentes c (del 1 al 5, incluye componente i)

h_i = ponderador de altura del componente sobre el cual se está calculando la competencia

d_i = ponderador de densidad de madera del componente sobre el cual se ejerce la competencia

h_c = ponderador de altura del componente c (del 1 al 5, incluye componente i)

d_c = ponderador de densidad de madera del componente c (del 1 al 5)

El valor estimado de C_{SAF} da como resultado un valor entre 0 y 1. Tiende a 0 cuando hay mayor competencia y a 1 cuando la competencia es menor. Para poder pasar valores de área basal a individuos, se usan las equivalencias y los promedios establecidos a partir de los datos de las fincas (Cuadro 8).

Cuadro 8. Área basal (m²) y dap promedio (m) promedios de los individuos por componentes en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Componente	Área basal promedio por individuo	Dap promedio por individuo	Equivalencia de individuos por m ² de área basal
Cacao	0,0187	0,1541	53,6
Musáceas	0,0279	0,1884	35,9
Frutales	0,0507	0,2542	19,7
Servicios	0,0693	0,297	14,4
Maderables	0,0772	0,3135	13,0

Datos del proyecto Cacao Centroamérica de Costa Rica, Guatemala Alta Verapaz y Nicaragua

Nótese que se ha construido un indicador inter-componentes para estimar la competencia que generan los componentes del SAF sobre un componente determinado.

2.2.2.3. Modelo de competencia

Con lo expuesto en los acápitos 2.2.2.1 y 2.2.2.2 (ecuaciones (2), (3), (4) y (6)); y el esquema de competencia al interior de los SAF (Figura 3), se plantea un modelo de producción individual en función de la competencia para SAF con cacao (7). Aquí se está usando al índice de competencia inter-componentes C_{SAF} como multiplicador del rendimiento individual que ya viene corregido por las condiciones competitivas intra-componentes.

$$P_i = Y_i \cdot C_{SAF} \quad (7)$$

Donde

P_i = producción de un individuo de determinado componente c

Y_i = producción de un individuo del componente c ajustado por la competencia intra-componente

C_{SAF} = índice de competencia inter-componentes sobre el componente al que pertenezca i

Sin embargo, se debe tener en cuenta que este modelo está explícitamente desarrollado sobre supuestos propios de un sistema, principalmente porque lo que exprese un determinado individuo en términos de producción viene ligado a las características del SAF. Entonces, es necesario llevar los valores a producción por componente en una determinada área. Para ello se incluye al término $D_{c,a}$ que expresa la densidad por área del componente al que pertenezca el individuo sobre el cual se ha calculado el término Y_i .

$$P_{c,a} = Y_{i,c} \cdot D_{c,a} \cdot C_{SAF} \quad (8)$$

Donde

$P_{c,a}$ = producción de un componente c en un área a

$Y_{i,c}$ = producción de un individuo del componente c ajustado por la competencia intra-componentes

$D_{c,a}$ = densidad de individuos del componente c en un área a

C_{SAF} = índice de competencia inter-componentes sobre el componente c

Es conveniente volver a indicar que con la información del Cuadro 8, se puede pasar de área basal a individuos.

2.2.2.4. Simulación de la competencia y la producción

Con base en los planteamientos propuestos y en la base de datos descrita inicialmente, se realizó una simulación con el fin de observar comportamientos predichos por el modelo con datos abundantes y distribuidos regularmente. Se consideran los cinco componentes mencionados: cacao, musáceas, frutales, servicios y maderables. Inicialmente se establecieron los valores mínimos y máximos redondeados a metros cuadrados enteros de área basal para cada componente tal como se describe en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Áreas basales mínimas y máximas redondeadas por componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

	Cacao	Musáceas	Frutales	Servicios	Maderables
Área basal mínima	3	0	0	0	0
Área basal máxima	24	20	8	26	20
Rango	21	20	8	26	20

La combinación de los rangos de área basal de los componentes variando de uno en uno, generan 1.727.200 posibles combinaciones, que resulta poco apropiado para procesar. Para simplificar, la combinación se hizo con valores a intervalos regulares de 3 m². Esto quiere decir que para los componentes se usaron solamente los niveles en valores enteros y cada múltiplo de tres dentro del rango observado en los SAF reales. Los valores se describen en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Valores de área basal tomados para la simulación por componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

	Cacao	Musáceas	Frutales	Servicios	Maderables
	3	0	0	0	0
	6	3	3	3	3
	9	6	6	6	6
	12	9	9	9	9
	15	12		12	12
	18	15		15	15
	21	18		18	18
	24	21		21	21
				24	
				27	

Los niveles obtenidos por componente corresponden a 8 (cacao, musáceas y maderables), 4 (frutales) y 10 (servicios). Al combinarlos todos, nos da un total de 20.480 posibles combinaciones. Sin embargo, con base en la información procesada, se eliminaron todos aquellos casos cuya sumatoria de área basal total superara 40 m^2 , pues se consideró arbitrariamente que a partir de este valor no existen parcelas con SAF. Bajo este supuesto, resultaron 4505 combinaciones con los cuales se trabajó en la simulación. El límite de área basal de $40 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ es similar al observado en los datos previos, donde se observa un máximo de $41,72 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Con las condiciones generadas se trabajó en una hoja de cálculo en la cual se aplicó el modelo propuesto en la ecuación (8) y se generan datos de producción esperada por componente, dependientes de la competencia intra e inter componentes. Con la información disponible para todos los 4505 casos, se elaboraron gráficos de la producción predicha por componente para cada uno de los niveles de área basal simulados, que muestran cuál es la producción afectada por diferentes niveles de competencia de otros componentes. En este análisis se excluyó el componente servicios dada la complejidad conceptual al momento de determinar un valor de producción.

2.2.2.5. Comparación de la producción predicha por el modelo y los datos reales de las parcelas

Una vez construida la hoja de cálculo para la simulación, se incluyeron los datos de las parcelas (valores de área basal de cada componente), para estimar la producción usando el modelo. La producción estimada se usó como variable dependiente con respecto a los datos de producción registrados para cada parcela. Estas regresiones se hicieron con el fin de verificar la capacidad predictiva del modelo de producción construido. Si el modelo fuese perfecto, se esperaría una distribución de puntos que describieran una recta de 45 grados. Se usaron parámetros como el p-valor y el R^2 para valorar la calidad del modelo. Para este proceso se emplearon únicamente los datos provenientes de los SAF de Costa Rica, Guatemala y Nicaragua del componente cacao debido a la disponibilidad y calidad de los datos. Se excluyeron musáceas y frutales debido a su distribución y maderables debido a la ausencia de datos de producción anual.

2.2.3. Análisis de las relaciones competencia-producción con datos de parcelas

Posteriormente al proceso anterior, se exploraron los datos reales de las parcelas. Se elaboraron regresiones de área basal de cada componente y su producción (equivalente al término $Y_{i,c}$ de la ecuación (8)) y entre área basal de los otros componentes y la producción del componente (equivalente al término C_{SAF} de la ecuación (8)). Se usan datos de producción de cacao, musáceas y frutales únicamente, excluyendo maderables ante la ausencia de datos de producción anual. También se hicieron regresiones de área basal de cacao y su dosel versus kg de cacao seco por planta. Estos análisis permitieron observar en qué grado se cumplen las relaciones anteriormente establecidas para expresar la competencia intra e inter componente.

2.2.4. Agrupamiento de las parcelas productivas (cacao seco) y el comportamiento de variables asociadas

Finalmente se hizo un análisis exploratorio para identificar las características propias de las parcelas que se distinguen por ser las más productivas (de cacao seco). El promedio de producción de cacao seco en un grupo de fincas centroamericanas² es de 185 kg por ha⁻¹·año⁻¹. Este valor se usó para discriminar entre las parcelas con baja y alta producción. También se reconoce a las parcelas con una producción superior a 500 kg por ha⁻¹·año⁻¹ con las de muy alta producción. A los estratos se los llamó *a*, *b* y *c* respectivamente conforme van incrementándose.

Una vez agrupadas las parcelas se realizó un análisis de varianza mediante el uso de modelos generales lineales y mixtos. Ese análisis se hizo usando la variable *país* como aleatoria y asumiendo una varianza heterogénea para los tratamientos o para ambos modelos en algunos casos (Anexo 5). Estos análisis se hicieron para las variables área de parcela, área basal de cacao, musáceas, frutales, servicios, maderables y dosel sobre cacao; costos efectivos y no efectivos, costos totales, beneficios familiares del dosel, edad del cacao, densidad por ha de cacao, rendimiento por planta de cacao y riqueza de especies del SAF por parcela. Para el caso concreto de costos efectivos se usó el análisis de Kruskal-Wallis, debido a la dificultad relativa a la normalidad de la variable. De algunas variables se eliminaron casos que contenían datos aislados (*outliers*), o carecían de información. Cuando se detectó falta de normalidad se recurrió a la transformación de datos usando la transformación LN(*x*) en el caso de costos totales o LN(*x*+1), en el caso de área de parcela, área basal de musáceas, frutales, servicios, costos no efectivos y beneficios familiares del dosel. Los modelos en detalle se presentan en el Anexo 5.

Una vez analizados todos estos datos, se complementaron con una tabla de contingencia en la que se analizó la relación existente entre los estratos de productividad y el país según el caso. Luego, concentrando la atención en el grupo más productivo, se graficó la distribución de las áreas basales de los componentes en aquellos casos de mayor productividad de cacao (nivel *c*), así como para el área basal total del SAF.

Con este análisis se pretendió identificar las diferencias y similitudes existentes entre los grupos *a*, *b* y *c* formados *ex profeso*; lo que da más luces al momento de definir escenarios óptimos de desempeño productivo de cacao y su dosel dentro del SAF.

2.3. Resultados

2.3.1. Descripción de los SAF con cacao

En la Figura 5 se observan las características que definen a los SAF estudiados. El área basal de cacao se distribuye especialmente en el rango de 5 a 20 m², el de las musáceas está mayormente por debajo a los 10 m², la de frutales no pasa de 5 m², la de los árboles de servicios se concentran sobre todo abajo los 15 m² y los maderables, en su mayor parte por debajo de 10

² Valor calculado con datos de organizaciones de productores de Guatemala (Adipkakaw y Aproca); Nicaragua (Cacaonica); Honduras (Aprocacaho); Costa Rica (Appta y Acomunita) y Panamá (Cocabo), países con cuyos datos se desarrolló el presente trabajo (Orozco *et al.* 2015).

m². El área basal de los SAF en su conjunto muestra una distribución más normal, concentrándose entre 10 y 30 m². Esto sugiere que los productores le dan énfasis al manejo de ciertos componentes, para acompañar al cacao.

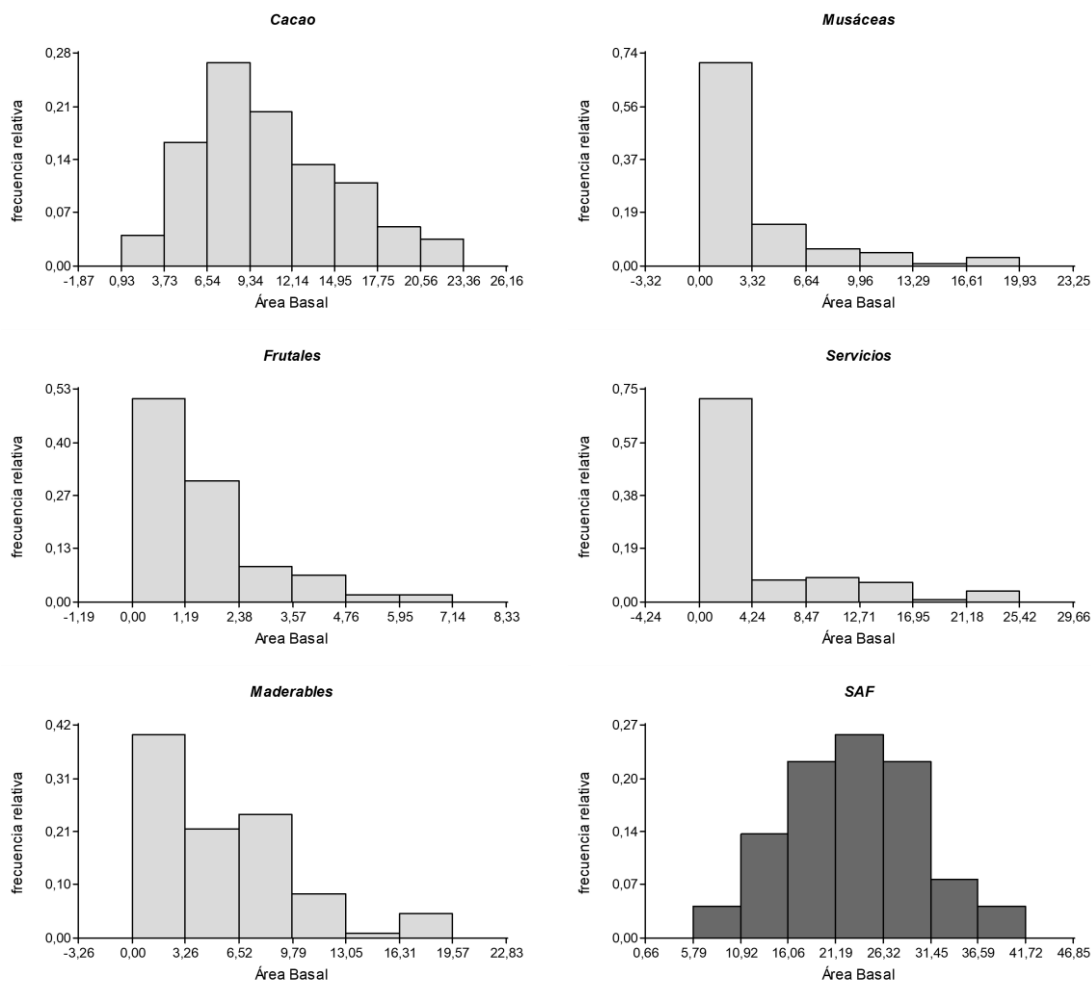


Figura 5. Histogramas de las áreas basales por ha de cada componente y del SAF total de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

En la Figura 6 se complementan los histogramas. Como se observa, existen casos en los que están ausentes algunos componentes (el componente cacao siempre está presente debido a las condiciones del estudio). En este sentido, se destaca el caso de los componentes musáceas y servicios que están ausentes en al menos el 25% de los casos. Adicionalmente se observa que en el rango entre 15 y 33 m² de área basal total se concentra más del 70% de las parcelas y además que cacao es el componente que más regularidad tiene a lo largo del gradiente de área basal.

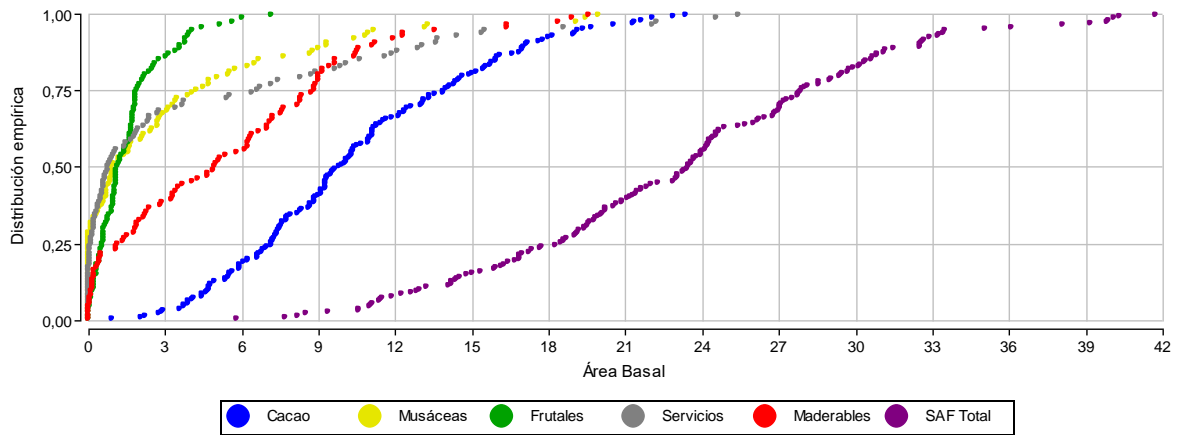


Figura 6. Distribución empírica de las áreas basales por ha de cada componente y del SAF total de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

En el Cuadro 11 se describen las especies más abundantes de frutales, maderables, servicios y musáceas. El porcentaje corresponde a la participación de la especie dentro del componente; solo se muestran especies que representan al menos 2% del total de individuos de cada componente. Cabe señalar que en las parcelas de donde proviene esta información hay registradas 160 especies entre maderables, frutales y servicios y 21 variedades de musáceas. Estos datos provienen de Costa Rica, Guatemala y Nicaragua y corresponden a 103 parcelas distribuidas en 89,19 ha.

Cuadro 11. Especies más abundantes de cada componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica (entre paréntesis el total de individuos por componente).

Componente	Especie/Variiedad	Abundancia dentro del componente (%)
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	100,0
Total de individuos de cacao		1 especie (49.153 individuos)
Musáceas³	Gros Michel	19,1
	Patriota	18,3
	Primitivo	13,2
	Filipinos	12,3
	Lacatán	9,3
	Congo	7,3
	Caribe	4,6
	Cuadrado	3,2
	Cuadrado	5,6
	Plátano	2,1
Resto de variedades de musáceas		5,0
Total de variedades de musáceas		21 variedades (15141 individuos)
Frutales	<i>Bactris gasipaes</i>	26,0
	<i>Citrus sinensis</i>	17,2
	<i>Persea americana</i>	10,6
	<i>Mangifera indica</i>	6,7
	<i>Coffea arabica</i>	3,9
	<i>Melicoccus bijugatus</i>	3,3
	<i>Citrus nubilis</i>	3,2
	<i>Pouteria sapota</i>	2,8
	<i>Spondias mombin</i>	2,4
	<i>Sizygium malacensis</i>	2,4
	<i>Rollinia mucosa</i>	2,3
	<i>Annona muricata</i>	2,2
	<i>Cocus nucifera</i>	2,0
Resto de especies de frutales		15,0
Total de especies de frutales		51 especies (3561 individuos)
Servicios	<i>Gliricidia sepium</i>	82,5
	<i>Erythrina berteroana</i>	5,4
	<i>Acacia</i> sp.	4,2
	<i>Pimenta dioica</i>	2,2
	Resto de especies de servicios	
Total de especies de servicios		29 especies (3907 individuos)
Maderables	<i>Cordia alliodora</i>	38,5
	<i>Inga jinicuil</i>	19,6
	<i>Cedrela odorata</i>	6,3
	<i>Thouinidium decandrum</i>	4,3
	Cachillo ⁴	3,2
	Guabilla ⁵ ?	2,1
Resto de especies de maderables		26,0
Total de especies de maderables		80 especies (6379 individuos)

En este Cuadro se puede destacar que musáceas y frutales presentan la mayor cantidad de variedades y especies abundantes respectivamente; en el componente de servicios, *Gliricidia sepium* se muestra como una especie muy abundante entre las demás del componente. Esta

³ Para musáceas se usa únicamente el nombre común de la variedad.

⁴ Especie de la cual no existe información concluyente de su nombre científico. Propia de Costa Rica.

⁵ Especie de la cual no existe información concluyente de su nombre científico. Presumiblemente del género *Inga*.

información se complementa con la del Cuadro 12 en donde se muestra la densidad por hectárea de los individuos de cada componente y su importancia relativa dentro del contexto del SAF. Estos datos también corresponden solamente a Costa Rica, Guatemala y Nicaragua.

Cuadro 12. Valores promedio de densidad por hectárea de individuos de cada componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

	Componentes					Total
	Cacao	Musáceas	Frutales	Servicios	Maderables	
Densidad promedio por ha	551,1	169,8	39,9	43,8	71,5	876,1
Densidad total (%)	62,9	19,4	4,6	5,0	8,2	100

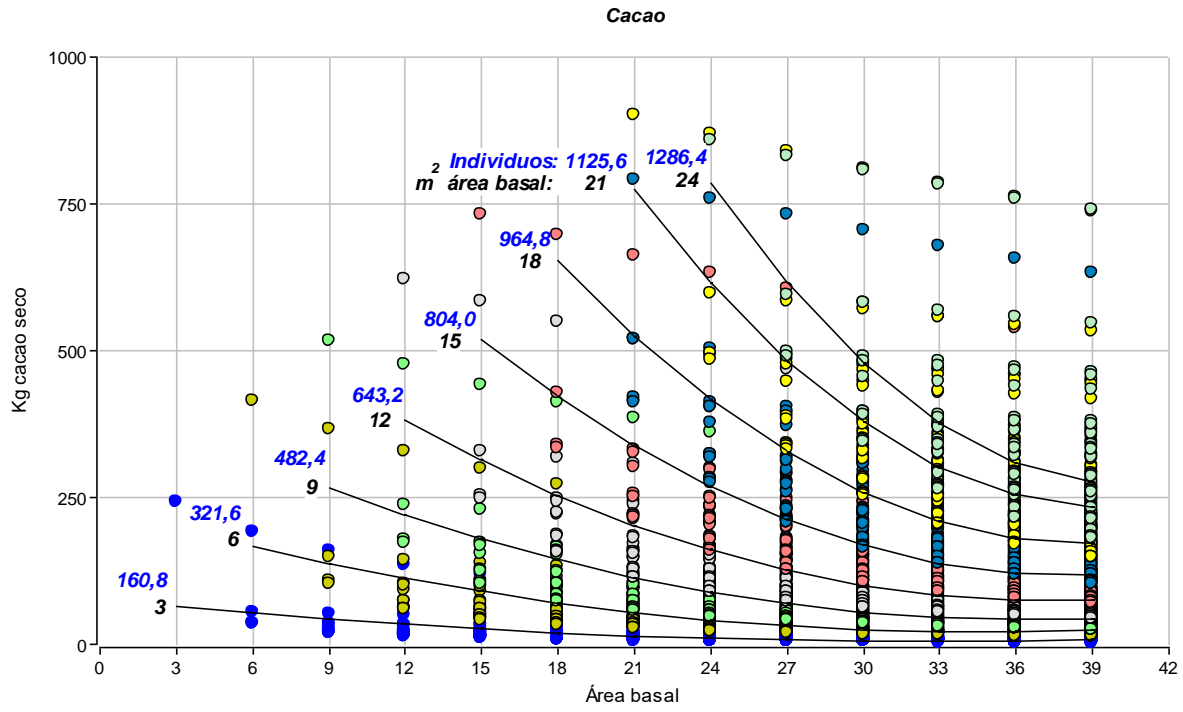
Cacao es el componente con la mayor densidad por hectárea con 551,1 individuos por ha (62,9% del total); le siguen las musáceas y los maderables con 170 y 72 individuos por ha respectivamente

2.3.2. Simulación del modelo competencia-producción

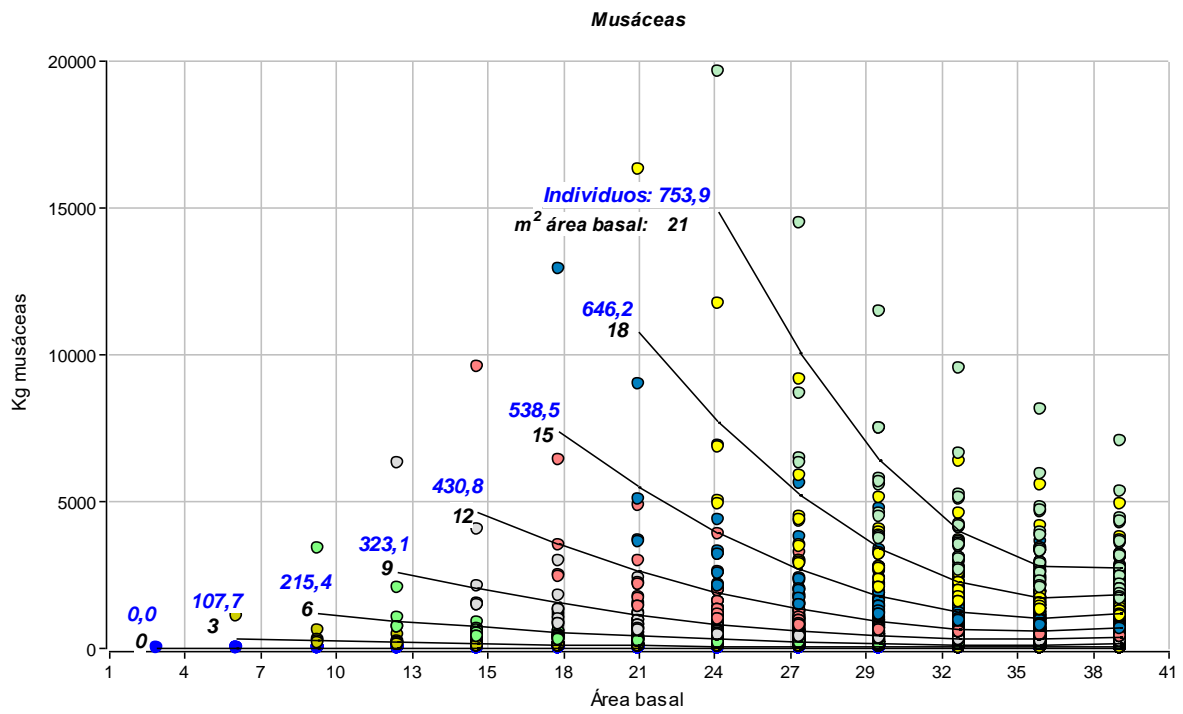
En la Figura 7 se presentan los resultados de la simulación para la producción de cada componente en el contexto establecido. Se usó la ecuación (8) y los parámetros de la simulación para la obtención de los datos. En el caso de cacao (A), la curva inferior representa en el eje vertical a la producción que resulta de 3 m² de área basal de cacao; la segunda curva desde abajo corresponde a la producción generada por 6 m² de cacao (tal como indica el número) y así sucesivamente para curvas y también para los demás componentes (B, C y D). Conforme estas curvas avanzan en el eje horizontal van siendo sometidas a una competencia progresivamente mayor (que se puede deducir por diferencia) en el eje horizontal, en el que se representa el área basal total del SAF. Así, todas las curvas llegan hasta 39 m² de área basal total, participando el área basal del componente correspondiente conforme se indica a la izquierda de la curva, y la porción correspondiente a los demás componentes.

Se puede observar como varía la producción conforme se ejerce mayor competencia sobre el componente observado y manteniendo fija su área basal. Para todos los componentes la interpretación es similar, aunque con las diferencias establecidas sobre los rangos previamente señalados para cada uno de ellos. En el caso de musáceas, frutales y maderables se observa la línea horizontal que por defecto representa un área basal con valor 0. Los rangos de áreas basales sobre las que se ejerce competencia provienen de los rangos observados en las parcelas, redondeados y de tres en tres (Cuadro 10). Usando los promedios de individuos por m² de área basal (Cuadro 8), se incluye el equivalente a individuos sometidos a competencia en cada una de las curvas simuladas.

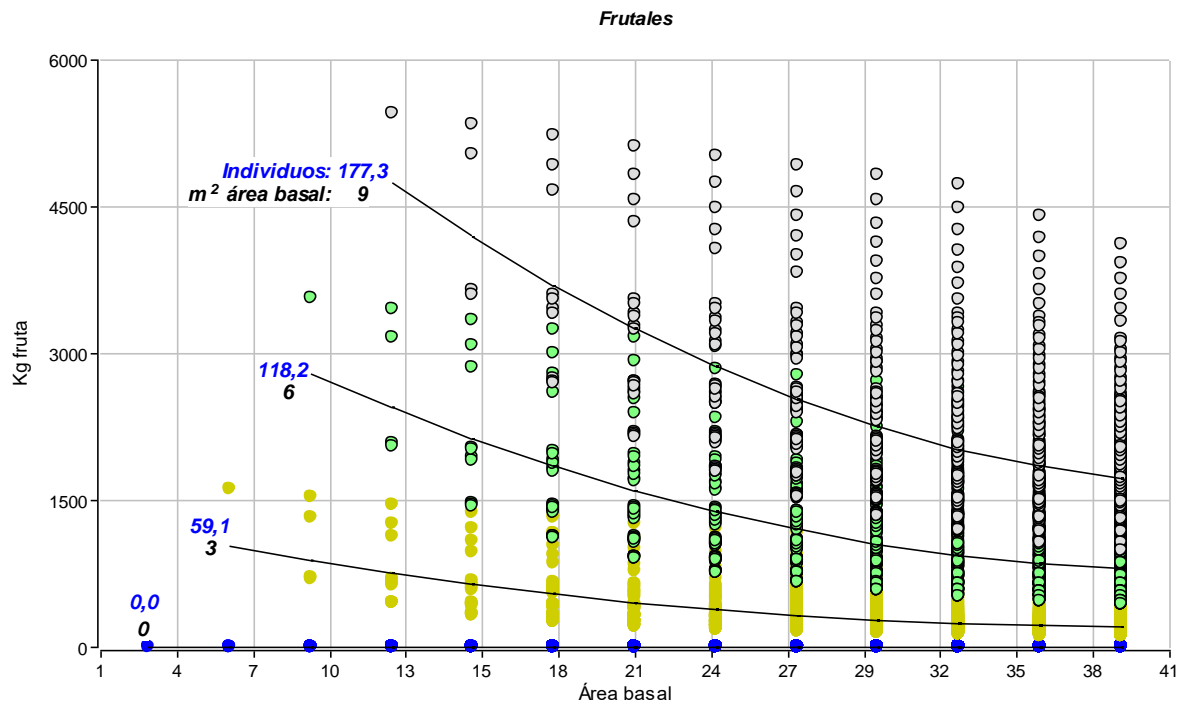
A:



B:



C:



D:

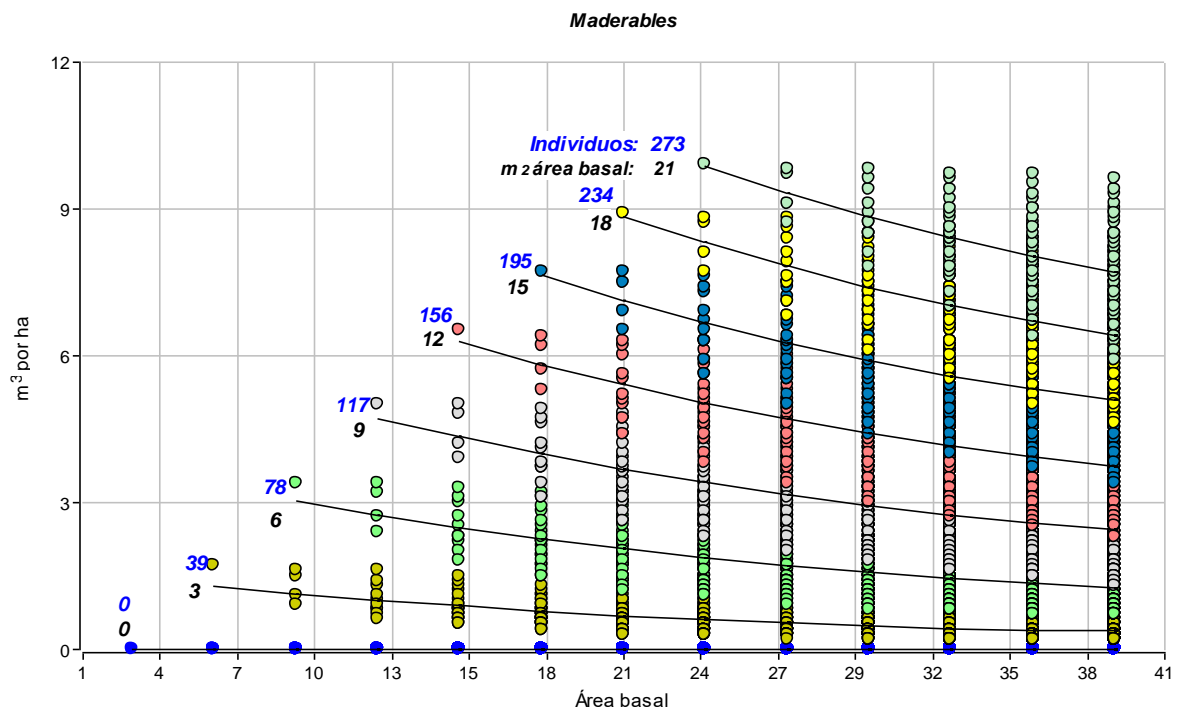


Figura 7. Tendencias suavizadas de producción para áreas basales en m² fijas de cada componente (líneas numeradas), conforme varía el área basal de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica. Datos simulados para A: cacao, B: musáceas, C: frutales y D: maderables

Comparativamente, las figuras difieren en el grado de decrecimiento de producción al aumentar la competencia. Mientras más bajos sean los componentes en el gradiente de altura del SAF, su producción decrece muy rápido al verse expuestos a competencia; mientras los componentes de mayor altitud son menos afectados por la misma.

2.3.3. Comparación de producción predicha por el modelo y los datos reales de parcelas

Para comparar la producción modelada y la observada, se corrió el modelo usando los datos reales de producción de cacao; la regresión obtenida no mostró ninguna correlación (Figura 8). Este análisis se realizó solamente para Costa Rica, Guatemala y Nicaragua que son los países que tienen información de área basal para los cinco componentes y permiten hacer la simulación.

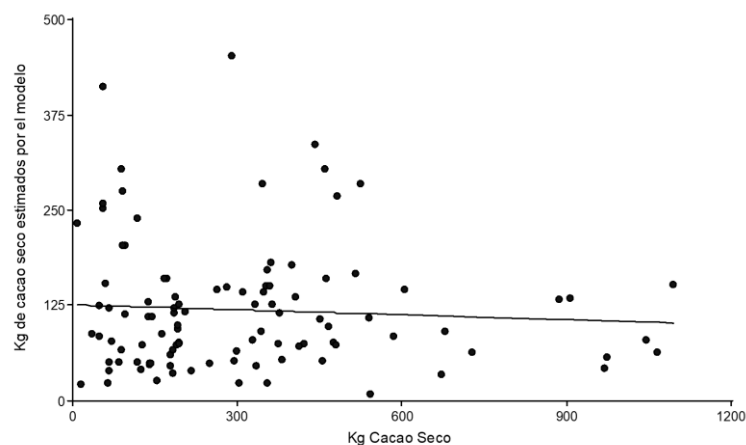


Figura 8. Regresión entre producción observada y producción modelada de cacao en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

La regresión planteada con datos de 103 parcelas logró un p-valor igual a 0,5235. Eso significa que en términos generales no existe ninguna tendencia de relación como se hubiese esperado si el modelo tuviese alguna capacidad predictiva para la producción de los componentes (se esperaba una línea de tendencia de 45 grados), lo cual significa que el modelo y los parámetros en los cuales se basa, no lograron representar lo suficientemente bien el funcionamiento de la competencia al interior de los SAF.

2.3.4. Análisis de la relación competencia-producción con datos de parcelas

Al analizar las relaciones existentes entre las variables de las parcelas (Cuadro 13), se observa que hay una correlación significativa únicamente en el caso del componente de musáceas, aunque con coeficientes de correlación bajos. Para cacao (principal componente de interés), no existe correlación entre su propia área basal y la producción, ni entre el área basal del dosel y la producción. Los gráficos se presentan en el Anexo 3.

Cuadro 13. Parámetros estadísticos de las regresiones entre las variables área basal de componentes y sus doseles versus la producción del respectivo componente de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Variable independiente	Variable dependiente	n	p-valor	R ²	Modelo
Área basal de cacao	Kg de cacao seco	173	0,2286		
Área basal de dosel sobre cacao	Kg de cacao seco	173	0,4026		
Área basal de musáceas	Kg de musáceas	54	0,0249	0,0931	$\text{Kg Mus.} = e^{0,0798 \cdot \text{ABMus}} + 656,22$
Área basal de dosel sobre musáceas	Kg de musáceas	54	0,0007	0,2007	$\text{Kg Mus.} = e^{-0,1040 \cdot \text{ABDMus}} + 8140,44$
Área basal de frutales	Kg de frutales	83	0,0946		
Área basal de dosel sobre frutales	Kg de frutales	83	0,0629		

Los resultados de las regresiones entre área basal de cacao y rendimiento por planta, así como entre área basal del dosel de cacao y rendimiento por planta, se muestran en el Cuadro 14. Como se observa, existe únicamente correlación entre área basal de cacao y kg de cacao por planta; sin embargo, el coeficiente de correlación resulta bastante bajo. Los gráficos se muestran en el Anexo 4.

Cuadro 14. Parámetros estadísticos de las regresiones entre áreas basales de cacao y de su dosel versus la producción por planta de cacao de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Variable independiente	Variable dependiente	n	p-valor	R ²	Modelo
Área basal de cacao	Kg de cacao seco por planta	173	0,0014	0,0578	$\text{Kg cacao-planta} = e^{-0,0486 \cdot \text{ABcac}} + 0,479$
Área basal de dosel sobre cacao	Kg de cacao seco por planta	173	0,1996		

Todos estos análisis se realizaron con una transformación $\text{LN}(x)$, aplicada a las variables: kg de cacao seco, kg de musáceas y kg de frutas. Se excluyeron los casos con valores de 0 en ambas variables. Para el caso de musáceas y frutales, se excluyeron la totalidad de parcelas de Panamá y Honduras, pues no contaban con datos de área basal estratificado para estos componentes. Para maderables no se hace ninguna verificación al no disponerse de datos de producción anual de madera en las fincas.

2.3.5. Agrupamiento de las parcelas productivas y el comportamiento de variables asociadas

Sobre el gráfico de distribución empírica para kg de cacao seco por ha, se incluyó la división mencionada en la metodología (Sección 2.2.4), separando los datos en los valores 185 y 500 (Figura 9).

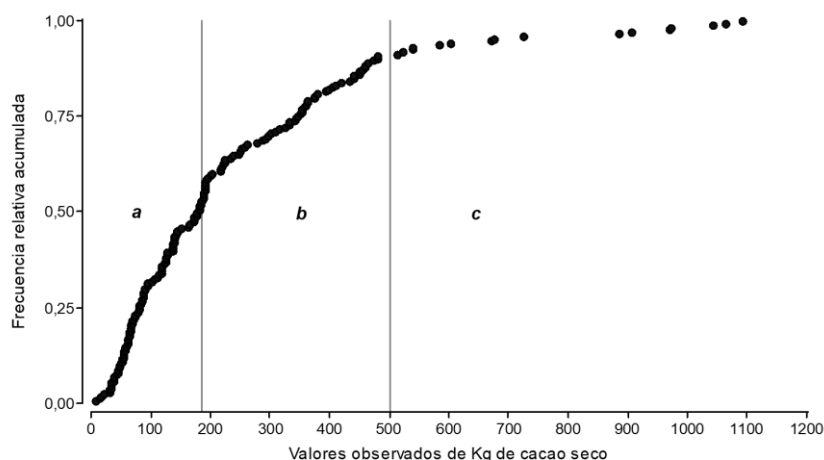


Figura 9. Distribución de los casos que dividen a la variable kg de cacao seco en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Al aplicar el análisis de varianza a los tratamientos *a*, *b* y *c* de la variable kg de cacao seco sobre las variables área de parcela, área basal de cacao, área basal de dosel sobre cacao, costos efectivos de manejo del SAF, costos no efectivos de manejo del SAF, costos totales del SAF, beneficios familiares del dosel, beneficios familiares del SAF, densidad por ha de cacao y kg de cacao seco por planta, se obtuvieron los resultados indicados en el Cuadro 15. Los modelos de los análisis de varianza se muestran en el Anexo 5.

Cuadro 15. Resultados de los análisis estadísticos aplicados usando como tratamientos los niveles establecidos para kg de cacao seco⁶ (*a*, *b* y *c*) de sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Variable	n	p-valor	Tratamientos		
			a [9,76 – 185]	b (185 – 500]	c (500 - 1094,97]
Área de parcela (ha)	173	0,0046	1,34±0,11A	0,84±0,09B	0,80±0,12B
Área basal de cacao (m ²)	173	0,0023	11,60 ±1,51 A	9,60 ±1,51 B	9,10 ±1,60 B
Área basal de musáceas (m ²)	103	0,1944	1,59±0,52 A	1,72±0,52 A	1,18±0,54 A
Área basal de frutales (m ²)	103	0,6487	1,12±0,2 A	1,32±0,19 A	1,46±0,22 A
Área basal de servicios (m ²)	103	0,6889	1,59±0,88 A	1,75±0,88 A	1,59±0,88 A
Área basal de maderables (m ²)	102	0,8847	5,29±2,53 A	5,38±2,52 A	5,59±2,55 A
Área basal de dosel sobre cacao (m ²)	173	0,7930	12,23±1,22 A	12,81±1,27 A	13,41±1,97 A
Costos efectivos de manejo del SAF (\$)	173	0,6122	52,54±101,29 A	72,18±130,9 A	92,24±163,73 A
Costos no efectivos de manejo del SAF (\$)	170	0,2087	554,57±0,23 A	734,1±0,25 A	698,24±0,35 A
Costos Totales del SAF (\$)	173	0,0687	572,49±1,19 B	828,82±1,2 A	749,95±1,32 AB
Beneficios familiares del dosel (\$)	173	0,0287	118,10±1,41 B	222,63±1,41 A	185,79±1,48 AB
Edad (años)	128	0,2402	18,06±5,93 A	17,64±5,93 A	17,41±5,93 A
Densidad por ha de cacao	173	0,5689	616,93±21,06 A	590,22±21,61 A	620,62±23,94 A
Kg de cacao seco por planta	173	<0,0001	0,17 ±0,01 C	0,57 ±0,3 B	1,29 ±0,11 A
Riqueza de especies	173	0,3167	18,68±3,26 A	17,18±3,25 A	16,74±3,35 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

⁶ En gris los p-valores no significativos. Existen algunas variables que se debieron transformar para su análisis. Aquí solo se muestra las medias y el E.E en la escala de la variable. En la Metodología se muestran mayores detalles del análisis y en el Anexo 5 se pueden observar los modelos utilizados.

Según los resultados del Cuadro 16, se observa una diferencia significativa únicamente para las variables área de parcela, área basal de cacao, beneficios familiares del dosel y kg de cacao seco por planta. Lo anterior quiere decir que las parcelas más productivas (tratamiento *c*), son en promedio más pequeñas en área, tienen menos área basal de cacao y mayor producción de cacao por planta, en comparación con el grupo de las menos productivas (tratamiento *a*). Así mismo, las parcelas cuya productividad está entre media y alta (tratamientos *b* y *c*), producen mayores beneficios familiares del dosel. El resto de las variables no presentan diferencias significativas con respecto a los niveles de producción de cacao. Llama la atención que los costos y la densidad por área de cacao, sean iguales en promedio para todos los niveles de producción.

En el Cuadro 16 se muestra una tabla de contingencia que muestra la relación entre los grupos de rendimiento y los países considerados en el estudio.

Cuadro 16. Tabla de contingencia que clasifica las fincas de acuerdo con los niveles de productividad por país en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

País	Niveles de productividad			Total
	a	b	c	
Costa Rica	28	5	0	33
Guatemala (Alta Verapaz)	7	24	4	35
Honduras	24	8	0	32
Nicaragua	5	18	12	35
Panamá	25	13	0	38
Total	89	68	16	173

Chi Cuadrado Pearson <0,0001

Según los resultados del Cuadro, se tiene que el grupo más productivo incluye predominantemente fincas de Nicaragua; en el grupo de producción intermedia, se encuentran fincas de Guatemala, Nicaragua y Panamá; mientras que las fincas menos productivas están en Costa Rica, Honduras y Panamá. Existe una relación marcada entre los países y los grupos de fincas clasificadas según su productividad. En la Figura 10 se observa en detalle la distribución de las áreas basales de cada componente en las 16 parcelas con mayor productividad (tratamiento *c*).

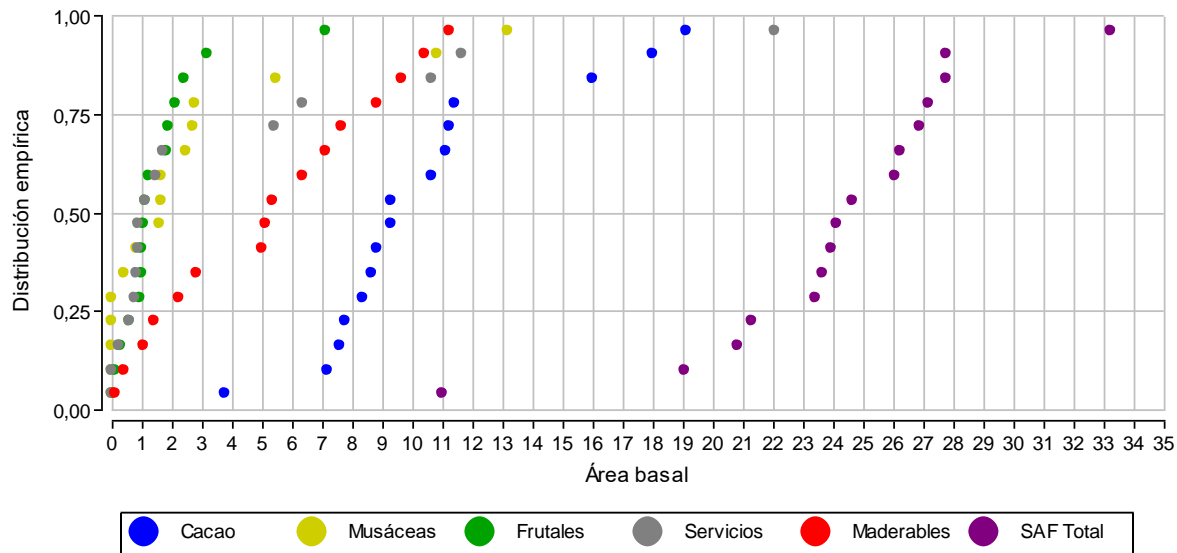


Figura 10. Distribución de las áreas basales por componentes para las fincas de alta productividad en sistemas agroforestales con cacao en Centroamérica

Se observa que los SAF altamente productivos se encuentran entre los 18 y 24 m², en ningún caso superan los 34 m² y oscilan, entre 3 a 20 m², concentrándose entre 7 y 12 m². Con respecto a los componentes del dosel, más del 25% de las fincas carecen de musáceas. Los maderables, por su parte, es el componente que muestra mayor área basal; los demás no alcanzan más de 15 m², agrupándose mayormente entre 0 y 10 m². El componente de servicios llega a alcanzar 22 m².

2.4. Discusión

2.4.1. Características de los SAF con cacao

De acuerdo con los histogramas de las áreas basales tanto de los componentes como del SAF en general, se observó que las parcelas tienden a alcanzar un área basal total con una distribución normalizada, lo cual implica que los agricultores están haciendo variar la participación de los componentes dentro de su SAF de acuerdo con su criterio. En los histogramas también demuestra que, en buena parte de los SAF, la presencia de ciertos componentes es muy baja; lo cual sugiere una cierta especialización productiva que no necesariamente contempla todos los componentes. Cabe recordar que los componentes de los SAF en las parcelas de estudio son cacao, musáceas, frutales, servicios y maderables; el cacao siempre está presente.

Las especies más comunes registradas en los cacaotales centroamericanos son *Cordia alliodora*, *Bactris gasipaes*, *Gliricidia sepium* y la variedad Gros Michel dentro de los componentes maderables, frutales, servicios y musáceas respectivamente. Cerda *et ál.* (2014), encontró estas especies entre las más abundantes en los SAF bajo estudio, lo que atribuye al interés del agricultor en satisfacer sus necesidades alimenticias, de bienes o incluso culturales con la inclusión del madero negro (*G. sepium*). La densidad de los componentes por hectárea es menor que en otros contextos de manejo de SAF con cacao, como es el caso presentado por

Jagoret *et ál.* (2017) en Camerún, África; aunque la diversidad y el área basal con mayores en Centroamérica. Por otro lado, si se comparan los SAF con cacao centroamericanos con el sistema *cabruca* brasileño, se observa que los primeros tienen mayor cantidad de individuos, aunque son más pequeños (Sambuichi 2006).

A pesar de que es posible observar una alta diversidad de especies dentro de los SAF y dentro de cada componente, también existe una especie o un grupo pequeño de especies más abundantes que en la práctica definen al componente. Los frutales y musáceas presentan una distribución de especies o variedades más equilibrada, lo cual sugiere que estos son los componentes de dosel más atractivos para los agricultores como generadores potenciales de beneficios económicos para la familia. Así mismo, la existencia de grupos pequeños de especies predominantes en los componentes de los SAF permite que los sistemas puedan tener una composición botánica variada, y que su productividad no necesariamente se vea afectada al depender de unas pocas especies que son abundantes en el sistema. Lo anterior concuerda con lo indicado por Deheuvels *et ál.* (2012).

A pesar de la diversidad descrita, se reconoce al cacao como la especie – componente principal y presente siempre en los SAF estudiados.

2.4.2. La relación competencia-producción modelada y simulada

Una parte del modelo propuesto consta de un índice que valora la intensidad de la competencia entre componentes, la otra describe el efecto de la competencia entre individuos del mismo componente. El modelo pretende ser una estimación de la respuesta productiva por componentes del sistema a los diferentes niveles de competencia. Considera al individuo, al componente y al SAF en sí mismo, como miembros jerárquicos que se desarrollan dentro de un determinado ecosistema con sus recursos biofísicos. Weigelt y Jolliffe (2003), definen los índices de competencia entre plantas según su capacidad de valorar tres aspectos: la intensidad, el efecto y la respuesta de la competencia. Tal como se planteó, el modelo es un estimador del efecto de la competencia.

A pesar de la inclusión de diversos aspectos relativos a los SAF con cacao, que hacen a este modelo bastante específico, no se alcanzó una capacidad aceptable de predicción. Schwinning y Weiner (1998), indican que, aunque sean conocidos los mecanismos fisiológicos involucrados en la adquisición de recursos por parte de los individuos de una comunidad, eso no implica un entendimiento de las características y los efectos de la competencia que existen a nivel individual, de población o de comunidad, los cuales pueden también incidir en la capacidad de adquirir recursos del ambiente.

En un sistema agrícola en el que se producen simultáneamente dos (o más) cultivos, pueden existir diferentes formas de relación competitiva conforme se incrementa la presencia de alguno de ellos. Puede ocurrir que el incremento de alguno de ellos perjudique el rendimiento del otro, que uno de ellos pueda incrementar su presencia sin perjudicar el rendimiento del otro,

o que el crecimiento de alguno de ellos favorezca el rendimiento del otro (Robinson 1987). Si bien todas estas formas pueden ocurrir en un SAF constituyendo un juego complejo de relaciones tanto sinérgicas, neutrales como competitivas; el modelo planteado en este estudio se concentra en las relaciones competitivas.

El modelo reconoce el área basal como la principal variable tomada de base para estimar los efectos competitivos. Sin embargo, existen efectos diferenciados debidos a las variaciones de área basal sobre la producción de cada uno de los componentes. Por ejemplo, una mayor área basal de cacao no significa mayor producción de cacao seco; pero una mayor área basal de maderables en principio sí significa mayor producción de m³ de madera.

El modelo prescinde de la edad de los individuos de los SAF. Esto implica que deja de lado la posibilidad de valorarlos en ese sentido, pudiendo la senescencia de algún componente o de parte de él, afectar a los resultados estimados (aunque luego se observa que no hay influencia de la edad en el nivel de productividad). Otro aspecto que también se deja de lado es el comportamiento de los gremios ecológicos (esciófitas o heliófitas), que podrían estar actuando diferenciadamente al momento de ejercer competencia, debido a su distinta velocidad de crecimiento y acaparamiento de recursos. Muy relacionado a este aspecto, es la presencia o ausencia de labores de poda, que tampoco se incluyeron en el modelo y que tienen un efecto activador del metabolismo de las plantas. A nivel de follaje, una poda genera en la planta una reacción en forma de rebrotes que pueden incidir en el porcentaje de sombreamiento (inclusive para si misma), lo cual hará variar la capacidad de ejercer competencia. La edad, el gremio ecológico y la poda son condiciones que causan variaciones de la competencia, independientemente del área basal de los individuos.

El modelo simulado es útil para analizar lo que ocurriría con la producción a lo largo de las gradientes tanto de área basal del componente para el cual se predice, como a lo largo de la gradiente del área basal competidora. Si bien el resultado no es totalmente satisfactorio con respecto a los datos de producción observada en campo, el modelo desarrollado si permite describir las variaciones de producción que serían consecuencia de cambios en la distribución del área basal de los componentes, manteniendo los demás factores de producción (manejo, genética, nutrición, sanidad), en condición *ceteris paribus*. Bergez *et ál.* (2010) resaltan las posibilidades que tiene la construcción de modelos simulados en computador de sistemas agrícolas. Para estos autores, el valor radica en la posibilidad de experimentar sin tener que incurrir en gastos ni en tiempo de manejos experimentales.

De lo observado se tiene que el modelo tiende, en promedio, a subestimar en unos casos y a sobreestimar en otros sin que se pueda decir exactamente a que se debe aquello. Se presume que esta condición se debe a que el modelo propuesto no considera información de los SAF relacionada al manejo, sanidad y genética del cultivo, fertilidad del suelo y porcentaje de sombreamiento del sistema, entre otros. Se reconoce que la competencia está siempre presente

en las comunidades y es un mecanismo de autorregulación que incide en las variables productivas del mismo, aunque no es el único que ejerce influencia.

De acuerdo con los criterios incluidos en el modelo, es de utilidad mencionar ciertos supuestos que son necesarios para que se cumpla la lógica de su funcionamiento:

- El modelo está diseñado para estimar la producción del SAF en determinadas condiciones biofísicas. Estas condiciones, que se indican en la metodología, son las que definen al sistema y su comportamiento (SAF con cacao, con hasta cinco componentes).
- El modelo propuesto genera resultados condicionados por los parámetros que le dan forma. En el presente documento, está calibrado para los niveles productivos que se observan en los SAF con cacao de Centroamérica. Cualquier uso en otra zona deberá ser precedido por un ajuste a las condiciones productivas y agroforestales del sitio, y siempre se requerirán de datos de producción real para evaluar la eficacia de cualquier modificación.
- La distribución de individuos de cada componente por unidad de área es aleatoria.
- La distribución de los recursos biofísicos es también uniforme en el área. Esto principalmente implica que los suelos sean relativamente planos.
- El modelo propuesto funciona adecuadamente considerando el límite máximo de 40 m² de área basal entre todos los componentes; aunque este límite se podría mover, modificando el estimador de competencia intra – componente.
- El modelo permite la ausencia de uno o más componentes.

2.4.3. La relación competencia-producción en las parcelas

Al observar que el modelo no logró alcanzar una capacidad predictiva de producción, se exploraron posibles relaciones equivalentes a la competencia intra-componente y la competencia inter-componentes con datos de campo. Se observó que no existe una relación sólida en ningún caso. Esto viene a confirmar el hecho de que los parámetros utilizados en el modelo son insuficientes y que existe mucha variabilidad que no es atribuible a variaciones de área basal de los componentes únicamente.

Aunque se pretendió generar un modelo sencillo, la producción no es resultado únicamente del área basal. Quizás con la inclusión de otras variables se podría mejorar el modelo, a riesgo de complicarlo, lo que incidiría en su utilidad. Si estamos hablando de SAF con cacao en Centroamérica, cualquier modelo que se aplique sobre ellos con fines productivos al menos, debe ser lo suficientemente rentable de utilizar.

2.4.4. Exploración de los datos de parcelas productivas

Los resultados mostraron que el modelo tal como está planteado no basta para explicar la producción de los SAF. Queda pendiente entonces, comprender mejor qué otras características de los SAF con cacao, aparte del área basal de los componentes y la competencia, podrían influir la producción del sistema. Para ello, aprovechando la estratificación del rendimiento de cacao seco, se analizaron las diferencias existentes en las variables asociadas disponibles (ver Cuadro 15). Sobre este paso en particular, Deheuvels *et ál.* (2012), coinciden en que es

necesario explorar mejor aquellos SAF con cacao altamente productivos para entenderlos y tratar de replicar dicha capacidad. Un grupo definido de 16 fincas producen entre 500 y 1094 kg·ha⁻¹ anuales. Esos SAF se caracterizan por tener parcelas pequeñas; en consecuencia, se podría inferir que las fincas más grandes son las más improductivas, lo cual tiene relación con la disponibilidad de mano de obra para el manejo, pues fincas más grandes requieren mayores labores de manejo que son más difíciles de lograr con mano de obra familiar.

En cuanto a la variable área basal de cacao, se observó que el grupo más productivo no muestra un valor alto de área basal, sino que con apenas 9,1 m² le basta para alcanzar tales niveles de producción; nuevamente interviene la calidad de manejo que se le hace a estas plantaciones. Deheuvels *et ál.* (2012), mencionan que los cambios en la estructura de la vegetación de SAF con cacao en Talamanca, reflejan diferencias en las estrategias de manejo de los productores, que no afectan el rendimiento de cacao o la biomasa aérea del sistema. Los autores reconocen que puede existir una relación entre la sanidad del cultivo y los niveles de sombra. Este criterio es válido en el caso del presente estudio siempre y cuando se agrupe a los productores por región o nivel de productividad. En ambos casos existe una determinada diversidad en la estructura dentro de cada grupo; sin embargo, la producción puede diferir entre los agrupamientos. Al no haber relación clara entre productividad por hectárea y área basal del componente o del dosel, entonces es factible que los SAF con valores intermedios de área basal total y por componente, sean los más productivos.

Al ser el área basal del dosel igual para los grupos de producción de cacao alta, media y baja, se podría esperar un arreglo más conveniente de los SAF con valores bajos de área basal de cacao y valores promedio de área basal de dosel para no afectar la producción de cacao. Se observó que no hace falta necesariamente, alcanzar valores altos de área basal del dosel para lograr altas producciones y que, para los datos disponibles, cualquiera sea el componente, su área basal es similar en todos los grupos de producción.

Los costos efectivos, no efectivos y totales son iguales para todos los niveles de producción. Esto significa que las parcelas con SAF de menor productividad no están haciendo un trabajo eficiente, pues con costos similares no logran la producción de los otros grupos. Con esta información, asumiendo que en el grupo de parcelas de baja producción existen los recursos biofísicos suficientes y que el problema es la eficacia en el manejo de la parcela, es posible afirmar que hay agricultores con margen de mejorar su productividad sin necesidad de variar significativamente la inversión que ya vienen haciendo. De comprobarse esta afirmación se abrirían oportunidades de mejora para los productores con parcelas de baja producción.

Los beneficios familiares proporcionados por el dosel son mayores en las parcelas con producción de cacao media y alta mientras que, para las parcelas con baja producción de cacao, la producción del dosel también es menos productivo. Esta circunstancia tiene que ver probablemente, con el tamaño de estas parcelas que tienden a ser más grandes y con menos disponibilidad de mano de obra, lo que conlleva a un manejo de dosel menos riguroso y

consecuentemente a una menor producción. En este contexto, los beneficios provenientes de los SAF que los agricultores perciben son menores en relación con los recibidos de SAF establecidos en parcelas más pequeña. Hay que recordar que el agricultor de la región tiende a usar mano de obra familiar para las labores en su parcela (Orozco *et ál.* 2015).

La edad de los componentes de los SAF estudiados es similar, lo cual implica que al menos en las condiciones de los SAF con cacao centroamericanos, esta variable no influye sobre la producción. Dado el ciclo normal de las plantas en algún momento estas llegan a la senescencia, lo que conlleva un impacto en la producción. Sin embargo, en el presente estudio no se observa evidencia de ello.

Según los resultados obtenidos, la densidad de plantas de cacao por ha no presentan diferencias, lo cual quiere decir que indistintamente de las demás condiciones, los niveles de producción *a*, *b* y *c* alcanzan las diferencias establecidas con una misma densidad de plantas. Con ello se refuerza la idea de que la diferencia de producción obtenida se debe al manejo que reciben.

El rendimiento por planta de cacao muestra diferencias notables entre los grupos de producción alto, medio y bajo. Mientras que en el primero se alcanza una producción promedio de 1,29 kg por planta, en el segundo la producción alcanzada es de aproximadamente la mitad de este valor, y en el tercer grupo se alcanza menos del 10%. Si asumimos un índice de mazorca⁷ de 25, las plantas de cacao del grupo de producción alta son capaces de llegar a la madurez con al menos 32 mazorcas en promedio al año. Como se mencionó anteriormente, los SAF de este grupo alcanzan la menor área basal de cacao en comparación con los grupos menos productivos. Y como se mencionó anteriormente, la densidad de árboles de cacao por ha es igual estadísticamente para todos los grupos de producción. Esto significa que, en el grupo de alta producción, los individuos de cacao son más pequeños en comparación con los demás grupos; esta diferencia podría estar influyendo sobre el comportamiento productivo y sanitario de los árboles de cacao.

Ngo Bieng *et ál.* (2013) indican que una distribución uniforme o aleatoria de los árboles de cacao puede reducir la incidencia de enfermedades de mazorca; un arreglo en grupos de individuos puede propiciar una mayor producción neta, aunque podría haber mayor incidencia de enfermedades de mazorca. En este punto, hay que considerar que la incidencia de enfermedades de mazorca puede verse disminuida al existir un mayor distanciamiento posible entre plantas de cacao, lo cual genera mayores posibilidades de bloqueo de esporas de hongos patógenos por parte de otras especies. Coadyuva el hecho de que la moniliasis (*Moniliophthora roreri*), es una enfermedad endémica para cacao, que no afecta a los demás componentes del SAF; más bien, la dispersión de esporas podría ser bloqueada con facilidad por una musácea (Vera Vélez 2008). Cualquiera sea el caso de la distribución de los individuos de cacao en las parcelas del grupo de alta producción, al ser pequeños tendrán mayor capacidad para escapar

⁷ Cantidad de mazorcas necesarias para hacer 1 kg de cacao seco al año.

de la infección de sus mazorcas; además de que, por su tamaño, se facilita el manejo, la cosecha y la eliminación de todos los frutos enfermos que, de quedar en la copa, actuarían como una fuente de inóculo por largo tiempo. Estas ventajas debidas al tamaño podrían ser, entre otras, la razón de la alta producción de este grupo.

Según los resultados de la tabla de contingencia que clasifica las fincas por países y nivel de productividad, se observa que las fincas más productivas están en Nicaragua, aunque no todas las fincas nicaragüenses son de alta productividad. En Guatemala también hay casos de fincas con alta producción, aunque en menor medida. Según los resultados obtenidos, se evidencia que no es necesario tener en los SAF un área basal alta (cercana al límite de 40 m²), para lograr una alta productividad de cacao. De acuerdo con la Figura 10, los SAF con 24 m² ha⁻¹ de área basal están entre las fincas más productivas (dentro del contexto estudiado). La distribución promedio por componente del área basal indicada sería 10 m² para cacao, 5 m² para maderables, 3 m² para musáceas, 3 m² para frutales y 3 m² para servicios; y en relación con la abundancia, la distribución equivalente sería de 536 árboles de cacao, 39 maderables 179,5 musáceas, 59,1 frutales y 43,2 individuos del componente servicios, para un total de 856,8 individuos por hectárea.

Queda por establecer si sería posible incrementar la productividad de los SAF subiendo el área basal total. Aquí el tema se vuelve más complejo puesto que influyen aspectos como la distribución de la luz al interior del SAF entre otros, lo que implica un dominio de las técnicas de manejo para no perjudicar la producción. El manejo adecuado de podas es imprescindible en un sistema conducido hacia una intensificación productiva. A efectos comparativos, una plantación clonal de cacao en monocultivo de unos 5 años podría alcanzar de 30 a 35 m² de área basal con una densidad de 1111 plantas por ha, si se asume un dap aproximado a 20 cm. En todo caso, tratar de incrementar el área basal de un SAF se presenta como una posibilidad, pero también como un reto que debe ser resuelto en el sitio, aplicando criterios generales de podas, nutrición vegetal y manejo fitosanitario principalmente; pero sin perder de vista las necesidades y capacidades de la familia productora.

Vaast y Somarriba (2014), indican que el manejo de los *trade-offs* entre rendimiento y otros servicios ecosistémicos que se generan en las parcelas de cacao y a escala de paisaje, requieren de un enfoque multidisciplinario para identificar opciones clave de manejo de los sistemas agrícolas, que vayan más allá del enfoque *land-sharing* vs *land-sparing*. La meta que se persigue es incrementar la producción de cacao sin recurrir al aumento de área cultivada. Una intensificación agrícola mal orientada puede causar deforestación y conducir al sistema hacia situaciones de menor resiliencia en el mediano plazo. En los SAF con cacao de Centroamérica también existen esos riesgos. El hecho de haber encontrado que pequeños productores con parcelas menores a una hectárea son capaces de producir entre 500 y 1000 kg de cacao por ha anualmente, y que al mismo tiempo su dosel de madera, frutas, musáceas y especies de servicios están generando bienes en cantidades superiores a la media, manejando el sistema con una inversión viable, ofrece oportunidades para que la diversidad de estos SAF se

mantenga. Es más, aquellas parcelas grandes y menos productivas, presentan mayor riesgo ante la necesidad de generar recursos económicos Y podrían ser presa fácil de actividades de deforestación agresiva o de cambios drásticos de uso del suelo en busca de aumentar la rentabilidad el terreno.

En los SAF con cacao es relativamente fácil disminuir el área basal de cualquier componente, pero incrementarla puede tomar años. El componente de musáceas es el que mejor podría recuperarse en poco tiempo. Al tratar de aumentar la rentabilidad de las parcelas, indistintamente de su tamaño, puede ocurrir que el productor trate de inducir cambios en la composición de su SAF. Ante esa situación, estos sistemas corren el riesgo de perder diversidad, lo cual afectaría sus aptitudes ecológicas. Clough *et ál.* (2009), mencionan amplias posibilidades de aprovechar los beneficios ecológicos que se generan en un sistema diversificado con cacao. Los productores enfrentan entonces, disyuntivas de carácter económico y ecológico al momento de tratar de equilibrar la distribución de la abundancia y el área basal.

2.5. Conclusiones

Los SAF con cacao centroamericanos se caracterizan por presentar diversos componentes, aunque al interior de cada uno, existen pocas especies o variedades (en el caso de musáceas). Algunos componentes (musáceas, frutales o servicios), presentan mayoritariamente, áreas basales bajas, pudiendo incluso estar ausentes en determinados casos. El componente cacao es el más abundante, seguido por musáceas, maderables, servicios y frutales.

El modelo obtenido describe la competencia intra e inter-componente; si bien no resultó suficientemente capaz de predecir la producción de los componentes, puede ser útil para estimar el efecto de la competencia sobre la producción tomando en cuenta variaciones de área basal y manteniendo fijos los factores de producción como eficiencia de manejo, nutrición, sanidad, genética, clima, entre otros. Tiene la ventaja de permitir correr simulaciones de múltiples casos y eventualmente podría ser ajustado para algún ambiente particular.

A pesar de haber tratado de encontrar correlaciones con los datos disponibles que verificaran la existencia de parámetros de competencia intra e inter-componente, no fue posible. Al utilizarse únicamente variables de producción y de área basal, se presume que hacen falta en el modelo otras variables independientes. Quizás una valoración de la eficacia del manejo, fertilidad del suelo, sombreadamiento, comportamiento ante enfermedades o capacidad genética podrían ser de ayuda.

Se halló que las parcelas más productivas son más pequeñas en área, tienen menor área basal de cacao, árboles más pequeños y un alto rendimiento por planta, en comparación con las parcelas de menor rendimiento.

En este estudio se pudo identificar que los SAF con buenos rendimientos, tanto del cacao como del dosel, son aquellos que tienen un área basal total en valores intermedios. Al menos en las condiciones observadas, no es necesario aumentar el área basal de los SAF para lograr rendimientos altos.

2.6. Bibliografía

- Alvim, R; Nair, PKR. 1986. Combination of cacao with other plantation crops: an agroforestry system in Southeast Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems* 4(1):3–15.
- Babu, SC; Hallam, A; Rajasekaran, B. 1995. Dynamic modelling of agroforestry and soil fertility interactions: implications for multi-disciplinary research policy. *Agricultural Economics* 13(2):125–135.
- Beer, J; Harvey, CA; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38):80-87.
- Bergez, JE; Colbach, N; Crespo, O; Garcia, F; Jeuffroy, MH; Justes, E; Loyce, C; Munier-Jolain, N; Sadok, W. 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32(1):3–9.
- Cannell, MGR; Van Noordwijk, M; Ong, CK. 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry systems* 34(1):27–31.
- Cárdenas, A; Hipólito-Romero, E; Junkin, R; Escobedo, A. 2013a. El rol de los sistemas cacaoteros en los medios de vida de los hogares productores en el Municipio de Waslala, Nicaragua. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 71 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico no. 65).
- Cárdenas, A; Hipólito-Romero, E; Junkin, R; Escobedo, A. 2013b. El rol de los sistemas cacaoteros en los medios de vida de los hogares productores del Cantón de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 58 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico no. 64).
- Cárdenas, A; Hipólito-Romero, E; Junkin, R; Escobedo, A. 2013c. El rol de los sistemas cacaoteros en los medios de vida de los hogares productores en el Municipio de Cortés, Honduras. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 56 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico no. 67).
- Cerda, R; Espín, T; Cifuentes, M. 2013. Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 49:33-41.
- Cerda, R; Deheuvels, O; Calvache, D; Niehaus, L; Sáenz, Y; Kent, J; Vílchez, S; Villota, A; Martínez, C; Somarriba, E. 2014. Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification. *Agroforestry Systems* 88(6):957-981.
- Clough, Y; Faust, H; Tschardtke, T. 2009. Cacao boom and bust: sustainability of agroforests and opportunities for biodiversity conservation. *Conservation Letters* 2(5):197-205.
- Cordero, J; Boshier, DH (eds.). 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1079 p.

- Deheuvels, O; Avelino, J; Somarriba, E; Malezieux, E. 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 149:181-188.
- Flores Osorio, A. 2016. Competitividad de los productores de naranja (*Citrus sinensis*) en el Municipio de Álamo Temapache, Veracruz. Tesis Ing. Agrónomo Administrador. Coahuila, México, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 95 p.
- Jagoret, P; Snoeck, D; Bouambi, E; Ngnogue, HT; Nyassé, S; Saj, S. 2017. Rehabilitation practices that shape cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: key management strategies for long-term exploitation. *Agroforestry Systems* (ene. 2017):1-15
- Malézieux, E; Crozat, Y; Dupraz, C; Laurans, M; Makowski, D; Ozier-Lafontaine, H; Rapidel, B; Tourdonnet, S; Valantin-Morison, M. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29(1):43-62.
- Mead, R; Willey, RW. 1980. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture* 16(03):217-228.
- Muschler, RG. 2001. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 51(2):131-139.
- Ngo Bieng, MA; Gidoin, C; Avelino, J; Cilas, C; Deheuvels, O; Wery, J. 2013. Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic and Applied Ecology* 14(4): 329-336.
- Orozco, L; Somarriba, E; Villalobos, M; Deheuvels, O; Andrade, H. 2014. Recopilación de datos de investigación del Proyecto Cacao Centroamérica (PCC). 2014. Consultado 10 de junio, 2016. Disponible en <http://dx.doi.org/10.7910/DVN/25284>.
- Orozco, L; Deheuvels, O; Villalobos Rodríguez, M; Somarriba Chávez, E. 2015. El sector cacao en Centroamérica: Estado de desarrollo en el año 2007. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 84 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 401).
- Ramírez, OA; Somarriba, E; Ludewigs, T; Ferreira, P. 2001. Financial returns, stability and risk of cacao-plantain-timber agroforestry systems in Central America. *Agroforestry Systems* 51(2):141-154.
- Rao, MR; Nair, PKR; Ong, CK. 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 38(1-3):3-50.
- Robinson Gregory, G. 1987. Resource economics for foresters. New York, United States of America, Wiley. 477 p.
- Sáenz, YI. 2012. Aporte del cacaotal en la economía y nutrición familiar en Waslala, Nicaragua. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 119 p.
- Sambuichi, RHR. 2006. Estrutura e dinâmica do componente arbóreo em área de cabruca na região cacauera do sul da Bahia, Brasil. *Acta Botanica Brasilica* 20(4):943-954.
- Schwinning, S; Weiner, J. 1998. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. *Oecologia* 113(4):447-455.
- Somarriba, EJ; Beer, JW. 1987. Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management* 18(2):113-126.

- Somarriba, E; Beer, J; Bonnemann, A. 1996. Árboles leguminosos y maderables como sombra para cacao: el concepto. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 51p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 274).
- Somarriba, E; Andrade, HJ; Segura, M; Villalobos, M. 2008. ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas en Costa Rica? *Agroforestería en las Américas* 1(46):81–88.
- Somarriba, E; Beer, J. 2011. Productivity of *Theobroma cacao* agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry Systems* 81(2):109–121.
- Somarriba, E; Villalobos, M; Cerda, R; Astorga, C; Orozco, S; Escobedo, A; Say, E; Deheuvels, O; Orozco, L; Junkin, R; Villegas, R; López, A; Salazar, J. 2013. ¿Cómo diseñamos y ejecutamos el Proyecto Cacao Centroamérica para estimular al sector cacaotero de Centroamérica? *Agroforestería en las Américas* 49(1):111-116.
- Vaast, P; Somarriba, E. 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems* 88(6):947-956.
- Vera Vélez, RR. 2008. Efecto de cuatro arreglos espaciales en sistemas de producción mixta cacao, plátano sobre la intensidad de escoba de bruja (*Crinipellis pernicioso*) y sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) durante el primer año de la fase de establecimiento. Tesis Ing. Agropecuario, Santo Domingo, Ecuador, Universidad de las Fuerzas Armadas. 76 p.
- Weigelt, A; Jolliffe, P. 2003. Indices of plant competition. *Journal of Ecology* 91(5):707-720.
- Wojtkowski, PA; Cabbage, FW. 1991. A bordered matrix approach to the bioeconomic modeling of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 14(1):81–97.

2.7. Anexos

Anexo 1. Detalle de las ecuaciones de ajuste del rendimiento para cada tramo de la recta de la curva de rendimiento en la Figura 4. Funciona con los datos del Cuadro 6.

Para el tramo <i>mínimo a p</i>	Para el tramo <i>p a q</i>	Para el tramo <i>q a máximo</i>
$y=ax+b$ $a = \frac{y_p - y_{ini}}{x_p - x_{ini}}$ $a = \frac{y_p - y_{ini}}{x_p - x_{ini}}$ $b = y_{ini} - ax_{ini}$	$y=ax+b$ $a = \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p}$ <i>b</i> tomando <i>p</i> conocido $b = y_p - ax_p$	$y=ax+b$ $a = \frac{y_{max} - y_q}{x_{max} - x_q}$ <i>b</i> tomando <i>q</i> conocido $b = y_q - ax_q$
$y_c = x \cdot \frac{y_p - y_{ini}}{x_p - x_{ini}} + \left[y_{min} - \frac{y_p - y_{ini}}{x_p - x_{ini}} \cdot x_{ini} \right]$	$y_c = x \cdot \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p} + \left[y_p - \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p} \cdot x_p \right]$	$y_c = x \cdot \frac{y_{max} - y_q}{x_{max} - x_q} + \left[y_q - \frac{y_{max} - y_q}{x_{max} - x_q} \cdot x_q \right]$
Donde y_c =rendimiento x = variable área basal $x_{min}, y_{min}, x_p; y_p$ = coordenadas de rendimiento en <i>mínimo</i> y <i>p</i>	Donde y_c =rendimiento x = variable área basal $x_p; y_p; x_q; y_q$ = coordenadas de rendimiento en <i>p</i> y <i>q</i>	Donde y_c =rendimiento x = variable área basal $x_{max}; y_{max}; x_q; y_q$ = coordenadas de rendimiento en <i>q</i> y <i>máximo</i>

Anexo 2. Fórmula simplificada de estimación de biomasa

$$Biomasa\ aérea = AB \cdot d \cdot h \quad (9)$$

Donde:

AB = área basal

d = densidad de madera

h = altura

Anexo 3. Gráficos de regresiones entre áreas basales de componentes y sus respectivos doseles versus la producción de tales componentes. Relacionado con información del Cuadro 13. En escala de las variables.

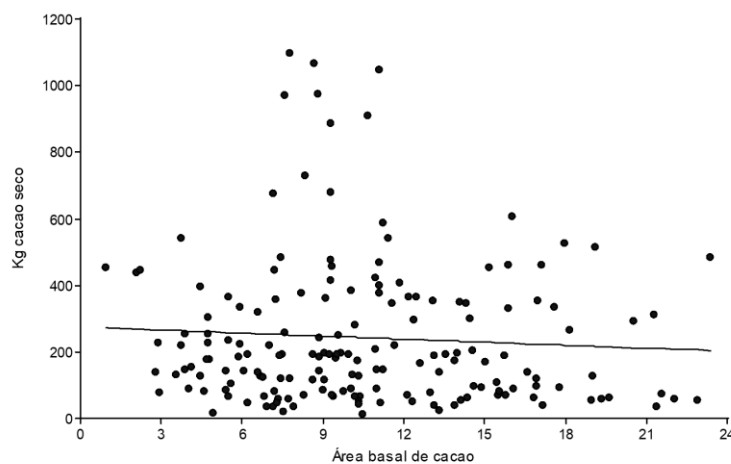


Figura 11. Regresión entre área basal de cacao y kg de cacao seco

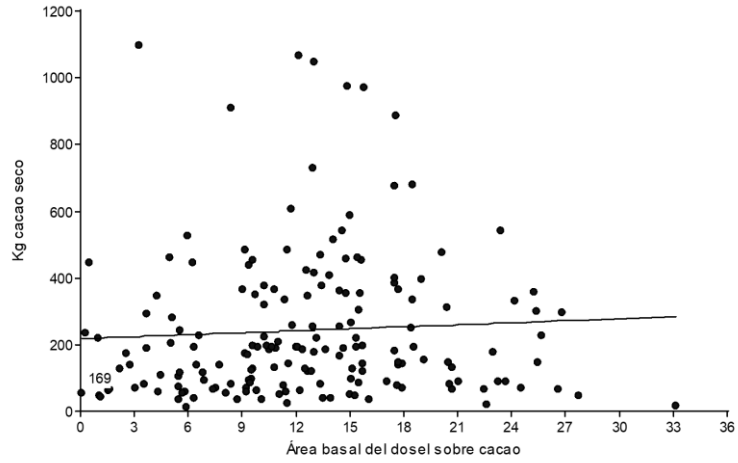


Figura 12. Regresión entre área basal de dosel sobre cacao y kg de cacao seco

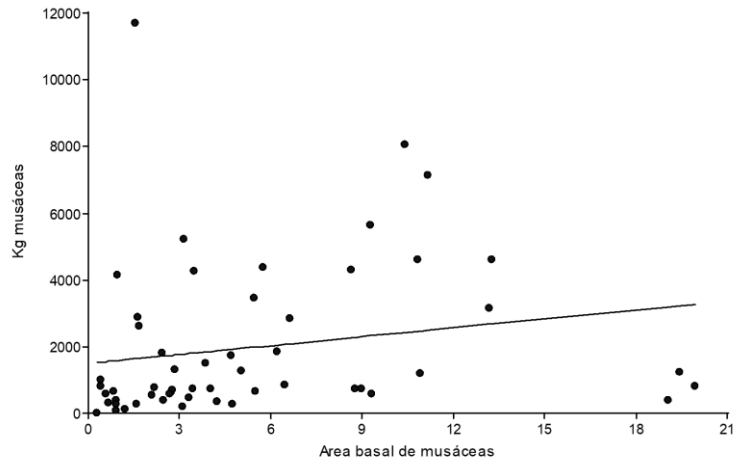


Figura 13. Regresión entre área basal de musáceas y kg de musáceas

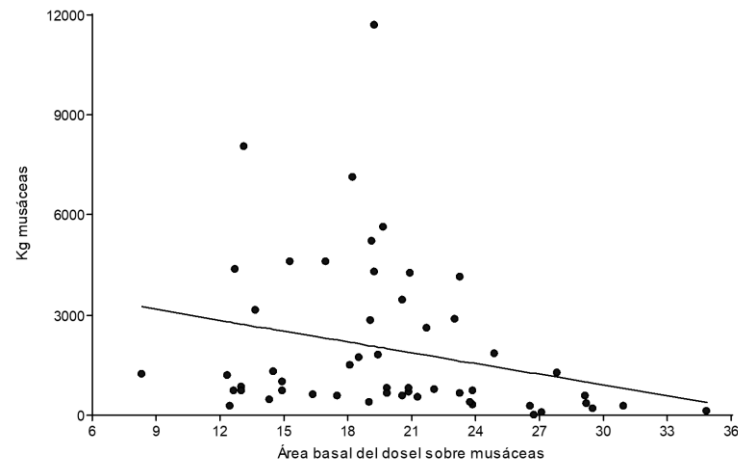


Figura 14. Regresión entre área basal del dosel de musáceas y kg de musáceas.

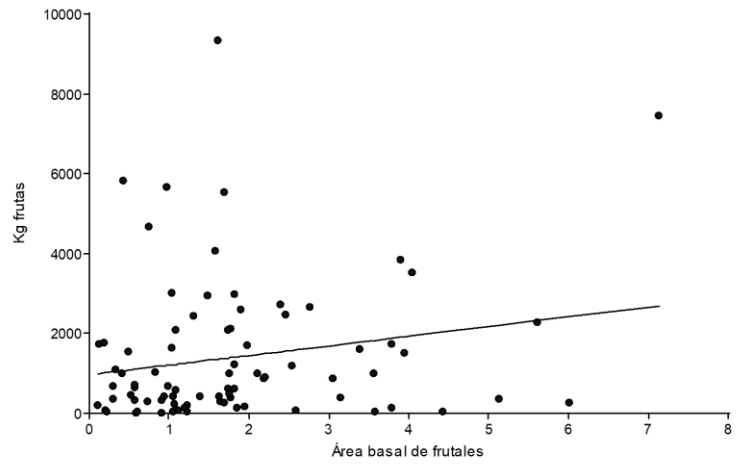


Figura 15. Regresión entre área basal de frutales y kg de frutas

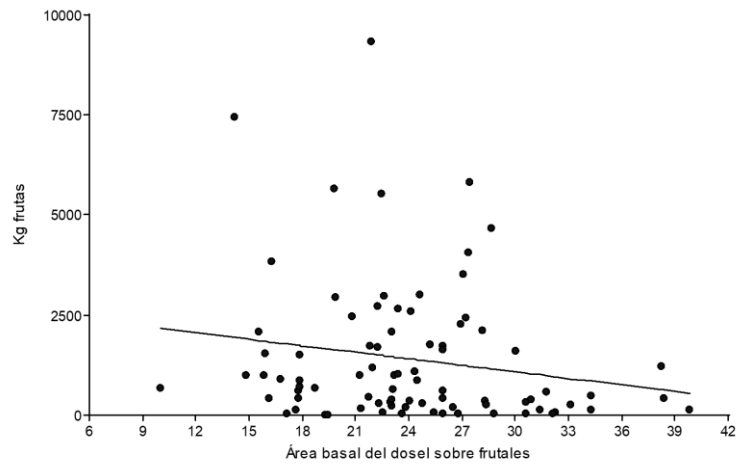


Figura 16. Regresión entre área basal de dosel sobre frutales y kg de frutas.

Anexo 4. Gráficos de regresiones entre áreas basales de componentes y sus respectivos doseles versus la producción por planta de tales componentes. Relacionado con información del Cuadro 14.

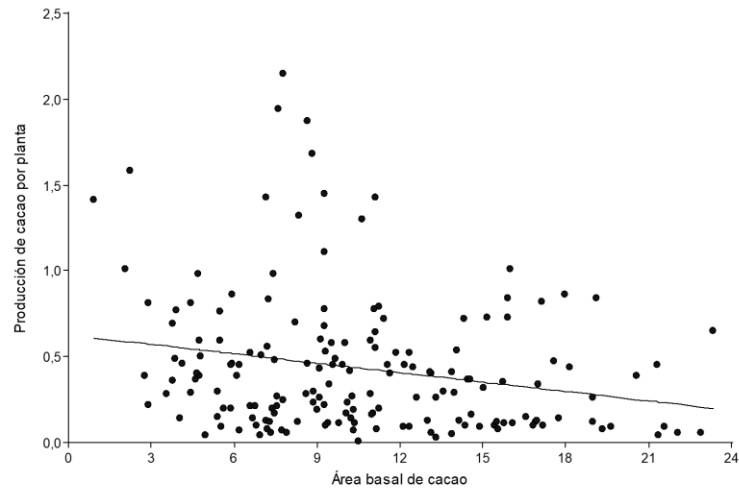


Figura 17. Regresión entre área basal de cacao y kg de cacao por planta

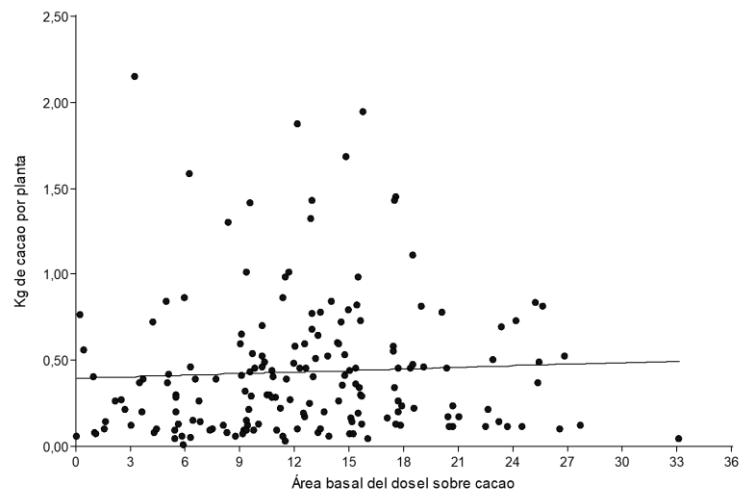


Figura 18. Regresión entre área basal del dosel sobre cacao y kg de cacao por planta

Anexo 5. Análisis de varianza entre segmentos de producción *a*, *b* y *c* con respecto a variables de interés

- Variable área de parcela:

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.046_LN_.area.1_REML<-lme(LN_.area.1~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data46
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.046_LN_.area.1_REML

Variable dependiente: LN_.area.1

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	195,52	217,47	-90,76	0,50	0,12	0,28

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	61,05	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	5,55	0,0046

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	0,18

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	0,63
c	0,49

LN_.area.1 - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
a	0,85	0,10	A
b	0,61	0,09	B
c	0,59	0,11	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Variable área basal de cacao

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_ABCCacao.Ha_REML<-lme(ABCCacao.Ha~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha)
,varIdent(form=~1|Pais))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data01
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.001_ABCacao.Ha_REML

Variable dependiente: ABCacao.Ha

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
173	957,63	992,12	-467,81	4,55	1,8E-03	0,36

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	46,15	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	6,30	0,0023

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Trat.Kg.cacao.ha	2	166	6,30	0,0023

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|Pais

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	3,24

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	0,86
c	0,82

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Pais

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	1,19
HONDURAS	1,08
NICARAGUA	0,50
PANAMÁ	0,67

ABCacao.Ha - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
a	11,60	1,51	A
b	9,60	1,51	B
c	9,10	1,60	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

● **Variable área basal de musáceas**

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.005_Ln.1.abmus_REML<-lme(Ln.1.abmus~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Pais)
,varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data05
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.005_Ln.1.abmus_REML

Variable dependiente: Ln.1.abmus

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
103	208,44	231,89	-95,22	0,91	9,7E-04	0,41

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	98	4,73	0,0320
Trat.Kg.cacao.ha	2	98	1,67	0,1944

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Trat.Kg.cacao.ha	2	98	1,67	0,1944

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent
 Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

(const)	
(const)	0,71

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent
 Fórmula: ~ 1 | País

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	0,24
NICARAGUA	0,68

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	1,33
c	1,10

Ln.1.abmus - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
b	1,00	0,42	A
a	0,95	0,42	A
c	0,78	0,43	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Variable área basal de frutales

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.007_LN.1.ABfrut_REML<-lme(LN.1.ABfrut~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data07
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.007_LN.1.ABfrut_REML

Variable dependiente: LN.1.ABfrut

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
103	150,61	163,64	-70,31	0,45	0,01	0,18

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	98	25,28	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	98	0,43	0,6487

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	98	0,43	0,6487

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|Pais

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	0,27

LN.1.ABfrut - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
c	0,90	0,20	A
b	0,84	0,17	A
a	0,75	0,18	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

• Área basal de servicios

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.011_LN.1.ABser_REML<-lme(LN.1.ABser~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Pais))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data11
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.011_LN.1.ABser_REML

Variable dependiente: LN.1.ABser

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
103	147,10	165,34	-66,55	0,22	0,06	0,77

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	98	2,61	0,1093
Trat.Kg.cacao.ha	2	98	0,37	0,6889

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	98	0,37	0,6889

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	1,09

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | País

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	3,16
NICARAGUA	2,26

LN.1.ABser - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
c	1,09	0,64	A
b	1,01	0,63	A
a	0,95	0,63	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Variable área basal de maderables (eliminado un dato con valor extremo)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.014_ABMaderables.Ha_REML<-lme(ABMaderables.Ha~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Pais))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data14
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.014_ABMaderables.Ha_REML

Variable dependiente: ABMaderables.Ha

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
102	490,96	509,13	-238,48	4,76	0,03	0,55

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	97	4,65	0,0334
Trat.Kg.cacao.ha	2	97	0,12	0,8847

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	97	0,12	0,8847

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|Pais

Desvíos estándares y correlaciones

(const)	
(const)	4,31

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Pais

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	0,24
NICARAGUA	0,57

ABMaderables.Ha - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
c	5,59	2,55	A
b	5,38	2,52	A
a	5,29	2,53	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Variable área basal del dosel sobre cacao

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_AB.Dosel_REML<-lme(AB.Dosel~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data02
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.002_AB.Dosel_REML

Variable dependiente: AB.Dosel

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	1127,33	1143,01	-558,67	6,14	3,5E-03	0,12

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	116,18	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	0,23	0,7930

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Trat.Kg.cacao.ha	2	166	0,23	0,7930

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|Pais

Desvíos estándares y correlaciones

(const)	
(const)	2,23

AB.Dosel - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
c	13,41	1,97	A
b	12,81	1,27	A
a	12,23	1,22	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

- Variable costos efectivos del SAF

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Trat Kg cacao ha	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
CE SAF ha	a	89	52,54	101,29	3,47	0,87	0,6122
CE SAF ha	b	68	72,18	130,90	10,47		
CE SAF ha	c	16	92,24	163,73	26,53		

- Variable costos no efectivos de manejo del SAF (eliminados 3 casos con valor 0)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.008_LN_.CNOE.1_REML<-lme(LN_.CNOE.1~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data08
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.008_LN_.CNOE.1_REML

Variable dependiente: LN_.CNOE.1

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
170	451,04	466,63	-220,52	0,85	4,0E-03	0,17

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	163	973,33	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	163	1,58	0,2087

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	163	1,58	0,2087

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	0,42

LN_CNOE.1 - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.		
b	6,60	0,22	A	
c	6,55	0,30	A	
a	6,32	0,21	A	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- **Variable costos totales del SAF**

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.009_LN_CT.SAF.ha_REML<-lme(LN_CT.SAF.ha~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data09
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.009_LN_CT.SAF.ha_REML

Variable dependiente: LN_CT.SAF.ha

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	461,34	477,02	-225,67	0,87	0,01	0,11

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	1602,11	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	2,72	0,0687

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	166	2,72	0,0687

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	0,30

LN_CT.SAF.ha - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.		
b	6,72	0,18	A	
c	6,62	0,28	A	B
a	6,35	0,17		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Variable beneficios familiares del dosel

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.012_LN_.BFD.1_REML<-lme(LN_.BFD.1~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha)
,varIdent(form=~1|Pais))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data12
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.012_LN_.BFD.1_REML

Variable dependiente: LN_.BFD.1

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	658,06	692,55	-318,03	1,06	0,01	0,48

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	34,64	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	3,63	0,0287

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Trat.Kg.cacao.ha	2	166	3,63	0,0287

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|Pais

Desvíos estándares y correlaciones

(const)	
(const)	1,92

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	0,94
c	0,63

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | País

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	3,01
HONDURAS	2,14
NICARAGUA	1,16
PANAMÁ	0,94

LN_.BFD.1 - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.		
b	5,41	0,88	A	
c	5,23	0,91	A	B
a	4,78	0,88		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

- Variable edad en años (no se toman en cuenta parcelas sin datos)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_Edad_REML<-lme(Edad~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha)
,varIdent(form=~1|Pais))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data02
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.002_Edad_REML

Variable dependiente: Edad

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
128	769,15	797,43	-374,57	13,41	0,10	0,65

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	122	8,93	0,0034
Trat.Kg.cacao.ha	2	122	1,44	0,2402

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	122	1,44	0,2402

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	11,76

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	1,00
c	0,68

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | País

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	0,06
NICARAGUA	0,61
PANAMÁ	0,45

Edad - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
a	18,06	5,93	A
b	17,64	5,93	A
c	17,41	5,93	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

- Variable densidad de cacao por ha

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.029_Dha.Cacao_REML<-lme(Dha.Cacao~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data27
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.029_Dha.Cacao_REML

Variable dependiente: Dha.Cacao

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	2270,66	2292,61	-1128,33	198,70	0,01	0,01

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	2251,69	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	0,57	0,5689

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|Pais

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	0,09

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	0,90
c	0,48

Dha.Cacao - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
c	620,62	23,94	A
a	616,93	21,06	A
b	590,22	21,61	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

- Variable kg de cacao seco por planta

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.020_Ycacao.planta_REML<-lme(Ycacao.planta~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data20
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.020_Ycacao.planta_REML

Variable dependiente: Ycacao.planta

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	-81,87	-59,92	47,93	0,11	0,69	0,69

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	291,29	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	117,33	<0,0001

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	166	117,33	<0,0001

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

(const)
(const) 3,8E-03

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	2,18
c	3,99

Ycacao.planta - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
c	1,29	0,11	A
b	0,57	0,03	B
a	0,17	0,01	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Variable riqueza de especies por parcela

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_Riq.total_REML<-lme(Riq.total~1+Trat.Kg.cacao.ha
,random=list(Pais=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trat.Kg.cacao.ha)
,varIdent(form=~1|Pais))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data01
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.001_Riq.total_REML

Variable dependiente: Riq.total

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
173	1180,82	1215,31	-579,41	8,64	0,07	0,44

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	166	29,71	<0,0001
Trat.Kg.cacao.ha	2	166	1,16	0,3167

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat.Kg.cacao.ha	2	166	1,16	0,3167

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|País

Desvíos estándares y correlaciones

(const)
(const) 7,06

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | Trat.Kg.cacao.ha

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
a	1,00
b	0,80
c	0,62

Modelo de varianzas: varIdent

Fórmula: ~ 1 | País

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
COSTA RICA	1,00
GUATEMALA ALTA VERAPAZ	0,40
HONDURAS	1,05
NICARAGUA	1,19
PANAMÁ	1,13

Riq.total - Medias ajustadas y errores estándares para Trat.Kg.cacao.ha

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trat.Kg.cacao.ha	Medias	E.E.	
a	18,68	3,26	A
b	17,18	3,25	A
c	16,74	3,35	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)