

# Estudio de Línea Base de Carbono en Cafetales



Elaborado por:  
Dr. Edwin Castellanos  
Ing. Alma Quilo  
Diego Pons

Abril de 2,010

#### Equipo de trabajo CEA-UVG

Dr. Edwin Castellanos, coordinador del proyecto

Ing. Alma Quilo

Diego Pons

Luis Barrios

María Fernanda Sazo

Ing. Sergio Quemé, análisis estadístico

Oscar González, elaboración de mapas

Gabriela Alfaro, dibujos de Figuras 1-7

#### **Agradecimientos a:**

#### Equipo de Apoyo ANACAFE

Dr. Francisco Anzueto

Ing. Rosa María Aguilar

Ing. Virginia Aguilar

Ing. Oscar García (Laboratorio SIG)

Técnicos regionales

#### Instituciones participantes:

EFICO – Renaud Cuchet, Katrien Delaet.

Rainforest Alliance (RA) – Gianluca Gondolini, Mario López.

Fundación Interamericana de Investigación Tropical (FIIT) – Lucía Jurado,  
Ana Judith Ramírez.

#### Técnicos de las Cooperativas

Valdemar Lemus del Cid – Cooperativa Nuevo Sendero

Augusto Dávila – Cooperativa Dos de Julio.

César Amílcar Aguilar Reynoso – Cooperativa Las Brisas.

Eusebio Aguilar – Cooperativa Unión Duraznito.

Edvin Obdulio Marcos Román – Cooperativa Esperanza del Futuro.

A todos los productores dueños de las parcelas evaluadas.

A todos los trabajadores e individuos que apoyaron en campo.

#### Administradores de Fincas

Ing. Jorge Mansilla – Finca El Platanillo

Luz Egurrola de Mackenney – Finca Australia

## INDICE

<b>1. Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
2.1. Acerca del proyecto .....	2
2.2. Objetivos del presente estudio .....	3
<b>3. Metodología .....</b>	<b>4</b>
3.1. Pre-selección de sitios piloto.....	4
3.2. Propuesta del diseño del muestreo .....	4
3.3. Capacitación de técnicos sobre uso del GPS .....	5
3.4. Determinación de las coordenadas de las parcelas al azar .....	6
3.5. Metodología de campo para estimar carbono en cafetales .....	7
3.5.1 Biomasa arriba del suelo .....	8
3.5.2. Muestreo de Maleza, hojarasca y suelo.....	9
3.5.3. Muestreo de Cafetales .....	10
3.6. Metodología para estimar ecuaciones de biomasa .....	11
3.6.1. Ecuación de biomasa para cafetales .....	11
3.6.2. Ecuación de biomasa para árboles de sombra .....	12
3.7. Determinación de humedad y contenido de carbono en laboratorio.....	13
3.7.1. Muestras de vegetales .....	13
3.7.2. Muestras de suelos .....	14
3.8. Cálculos finales de contenido de carbono por área .....	15
3.8.1. Cálculo de biomasa seca .....	15

3.8.2. Cálculo del contenido de carbono en maleza y hojarasca .....	15
3.8.3. Cálculo de biomasa para árboles y cafetales .....	16
3.8.4. Cálculo de la densidad de carbono en el suelo .....	17
3.8.5. Cálculo de la densidad y total de carbono para el sistema .....	17
<b>4. Resultados .....</b>	<b>18</b>
4.1. Ecuaciones de Biomasa .....	18
4.1.1. Ecuación para <i>Ingas sp.</i> .....	18
4.1.2. Ecuación para <i>Grevilea robusta</i> .....	20
4.1.3. Ecuación para Cafetales .....	22
4.2. Resultados de parcelas de medición de carbono.....	25
4.2.1. Resultados por productor o lote de cada sitio evaluado .....	25
4.2.2. Comparación entre sitios evaluados .....	29
4.2.3. Comparación entre sitios evaluados y sitios de control.....	31
<b>5. Discusiones .....</b>	<b>32</b>
5.1. Ecuaciones de biomasa .....	32
5.2. Resultados de estimaciones de carbono.....	34
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>40</b>
<b>7. Literatura Citada .....</b>	<b>42</b>
<b>8. Anexos .....</b>	<b>44</b>

## 1. RESUMEN

Se realizó una estimación del carbono fijado en cafetales de seis diferentes sitios de Guatemala localizados en los departamentos de San Marcos, Santa Rosa y Jalapa. En San Marcos se trabajó la Finca Platanillos y en Santa Rosa y Jalapa se trabajó con 5 cooperativas que agrupan a pequeños productores. Todos los sitios tienen en común el estar certificados o estar en proceso de certificación para el sello de Rainforest Alliance RA. Se estudiaron en total 36 productores diferentes con un total de 153 parcelas anidadas de medición para estimar el carbono presente en la biomasa viva arriba y debajo del suelo, en los 10 cm. superiores del suelo y en la biomasa muerta en la superficie del suelo. Adicionalmente, se desarrollaron tres modelos alométricos que relacionan la biomasa de una planta o árbol con sus medidas de diámetro o altura. Esto se hizo para *Inga sp.*, *Grevilea robusta* y para *Coffea arabica* de diferentes variedades. La biomasa del resto de las plantas fue calculada con ecuaciones publicadas en la literatura. Se recomienda desarrollar nuevas ecuaciones para otras especies importantes en estudios futuros.

En promedio, los cafetales estudiados contienen  $80.5 \pm 5.2$  ton C/Ha. Los árboles de sombra son los elementos que contienen más carbono (45% del total) seguido del suelo (40% del total) aunque se observaron variaciones locales importantes donde en algunos casos el suelo presenta altas cantidades de carbono y la sombra está muy abierta conteniendo poco carbono. Las plantas de café apenas representan el 9% del carbono del sistema lo que indica que un cafetal con poca o ninguna sombra tiene muy bajo potencial de captación de carbono.

Entre los sitios estudiados, la mayor variabilidad en el contenido de carbono se dio en el suelo. También se encontró una variabilidad significativa aunque no tan alta en el carbono de los árboles de sombra. Los otros componentes resultaron ser más homogéneos en los sitios estudiados. Los productores que pertenecen a una misma cooperativa también mostraron niveles de carbono similares, aunque en limitadas ocasiones se encontraron productores con árboles de sombra muy antiguos que resultaron en grandes cantidades de carbono almacenado. También se encontraron productores con sombras muy podadas que presentaban muy baja cantidad de carbono fijado. En general, el carbono de la sombra se vio muy influenciado por la cantidad de humedad y lluvia presente en los sitios.

Se completó también una medición en sitios control, cercanos a los sitios de estudio pero no pertenecientes a las cooperativas en cuestión y sin tener el certificado RA. Para uno de los sitios de estudio no fue posible ubicar un sitio control adecuado. Tres de los sitios control mostraron cantidades diferentes de carbono fijado, dos con menos carbono y uno con más carbono que los sitios de estudio. El sitio de control con mayor carbono se localiza en un área de alta humedad y presenta poco manejo de la sombra y los cafetos a expensas de una productividad menor. Esto sugiere que un manejo adecuado de acuerdo a las condiciones climáticas puede resultar en una cantidad menor de carbono fijado al requerirse una sombra más abierta. Los dos sitios de control restantes mostraron menor cantidad de carbono fijado, pero las diferencias no fueron estadísticamente significativas. El efecto de la certificación sobre el contenido de carbono deberá entonces estudiarse más en futuras investigaciones.

## 2. ANTECEDENTES

“Promoviendo prácticas amigables con el clima en plantaciones de café” es el lema del que surge el interés de desarrollar un protocolo para reconocer los esfuerzos de la Agricultura Amigable con el Clima (Climate Friendly), específicamente en la producción de café. Concretamente, se busca desarrollar una metodología que permita la valorización en el mercado de las prácticas agrícolas sostenibles que contribuyan a la mitigación de las causas del cambio climático y que resulten en un ingreso adicional directo a los productores de café.

Por medio de prácticas agrícolas sostenibles, basadas en un módulo amigable para el clima, los productores de café pueden adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático. Este módulo es una herramienta para validar los servicios ambientales, al comercializar *Café Amigable con el Clima*.

Las Prácticas Amigables con el Clima consisten en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la cadena producción y comercialización del café, y la promoción del alto valor del carbono almacenado en sistemas agroforestales del café cultivado bajo sombra. Se fomentarán ambas perspectivas de acción en el programa.

El objetivo final es poder integrar el módulo de Amigable con el Clima en los Estándares de la Red de Agricultura Sostenible (RAS), lo que significa que todos los criterios estarán abiertos al público, de manera que todos los agricultores pueden adoptarlos voluntariamente en sus plantaciones de café dándole así un valor agregado a su producto.

### **2.1 Acerca del proyecto “Promoting Climate Friendly Farming”**

“Promoviendo la Agricultura Amigable con el Clima” es una iniciativa promovida por la Asociación Nacional del Café (ANACAFE), Rainforest Alliance (RA) y Efico, para desarrollar una metodología que permita la comercialización de los servicios ambientales generados por el cultivo de café que sigan ciertas prácticas agrícolas sostenibles.

Para poder respaldar el módulo Amigable con el Clima las tres instituciones involucradas a través de ANACAFE solicitaron el apoyo de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), específicamente al Centro de Estudios Ambientales (CEA), para realizar mediciones que permitieran estimar la cantidad de carbono almacenado en seis sitios piloto pre-seleccionados para el país. Se logró también el apoyo de la Fundación Interamericana de Investigación Tropical (FIIT) para la parte de verificación del módulo en campo.

## **2.2 Objetivos del Presente Estudio**

El objetivo general del proyecto aquí reportado fue estimar el carbono almacenado y fijado en el sistema agroforestal de café con sombra, dentro de los sitios piloto pre-seleccionados.

Los objetivos y actividades específicas a completar fueron:

- 1) Estimación de carbono fijado en seis (6) áreas de cultivo de café en donde se desarrolla el proyecto “Promoting Climate Friendly Farming”;
- 2) Completar las mediciones de carbono fijado por productor, por cooperativa y finca con el fin de realizar cuadros comparativos para crear la línea base de carbono;
- 3) Generación de ecuaciones de biomasa para dos árboles de sombra;
- 4) Generación de la ecuación de biomasa para las plantas de café;
- 5) Elaboración de mapas para ubicación de sitios de muestreo y resultados.

Oficialmente el CEA-UVG comienza a implementar el proyecto a partir de Septiembre del 2009 aunque se realizaron varias reuniones y visitas previas para definir los objetivos y alcance del estudio. El Anexo 1.1 muestra el cronograma general aprobado al inicio del proyecto y el Anexo 1.2 muestra una foto de las visitas previas realizadas.

Como parte de las actividades preparatorias al trabajo de muestreo, fue necesario delimitar los polígonos de las plantaciones de café que serían evaluadas. Para lograr esto, se realizó un taller de capacitación sobre el uso del GPS el cual se reporta en el Anexo 1.3.

El presente reporte muestra los resultados obtenidos en la estimación del carbono fijado por los seis sitios piloto incluyendo los sitios de control que fueron usados para fines comparativos. Se incluye además 3 ecuaciones de biomasa para plantas asociadas con el cultivo de café. Finalmente, los anexos incluyen los mapas de ubicación de los sitios de muestreo.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Pre-selección de sitios piloto

Al inicio del proyecto, se presentó el Cuadro 1 como parte de los términos de referencia del estudio con las cooperativas y finca piloto pre-seleccionados. Estos sitios que fueron elegidos por ser proveedores de Efico y se encuentran certificados bajo RA o están en proceso de certificación.

Cuadro 1: Descripción general de los sitios piloto.

	Cooperativas					Finca	Total
	1	2	3	4	5	6	
Nombre	Dos de Julio	Las Brisas	Esperanza del Futuro	Unión Duraznito	Nuevo Sendero	El Platanillo	
Área con café (Ha.)	352	153	53	55	247	320	1,180
Número de productores	42	60	59	47	135	1	344

**Ubicación:** 1) Barrio El Centro, Santa Cruz Naranja, Santa Rosa. 2) Los Magueyes, Mataquescuintla, Jalapa. 3) El Rodeo, Jalapa, Jalapa. 4) El Duraznito, Jalapa, Jalapa. 5) Chapas, Nueva Santa Rosa, Santa Rosa. 6) San Rafael Pie de la Cuesta, San Marcos.

#### 3.2 Propuesta del diseño de muestreo

Se realizó una reunión inicial con el equipo de ANACAFE y RA con el fin de discutir la propuesta de muestreo y explicar cada uno de los pasos necesarios para poder llegar a conocer el contenido de carbono en las plantaciones de café.

El Cuadro 2 muestra la propuesta inicial de muestreo donde la unidad de análisis es el productor de una cooperativa y donde se propone muestrear el 10% de los productores. Cada productor sería evaluado mediante tres parcelas de medición de carbono. Este diseño produce un número de parcelas adecuado al tiempo y los recursos financieros disponibles.

Esta propuesta inicial fue sujeta a cambios dependiendo las condiciones reales encontradas al momento de hacer las mediciones. Por ejemplo, el número de productores reales a incluir vino determinado por la cantidad de productores dispuestos a participar en el estudio. Esto implica que la muestra de productores seleccionados no fue una muestra al azar, sino más bien una muestra determinada con la ayuda de la misma cooperativa. Este sesgo en la muestra limita la generalización de los resultados al momento de completar el análisis estadístico. Por otro lado, esta es una limitante que es muy difícil de evitar ya que es prácticamente imposible trabajar en campo sin la autorización del productor en cuestión. El diseño final incluyó a un productor control que no pertenece a la cooperativa. Este productor fue utilizado para probar la efectividad si estar asociado y en proceso de



certificación por RA influía en la cantidad de carbono almacenado en el cafetal. El número final de productores y parcelas se muestra en el Cuadro 7 en la sección de resultados.

Cuadro 2: Propuesta de muestreo con respecto a la cantidad de productores.

	Cooperativas					Finca	Totales
	1	2	3	4	5	6	
Nombre	Dos de Julio	Las Brisas	Esperanza del Futuro	Unión Duraznito	Nuevo Sendero	El Platanillo	
Área con café (has)	352	153	53	55	247	320	1,180
Número de productores	42	60	59	47	135	1	344
Productores a evaluar (10%)	4	6	6	5	13	1	35
Parcelas a realizar (3/prod)	12	18	18	15	39	48	150

Se hizo una segunda reunión en ANACAFE solicitando la presencia de los representantes de las cooperativas y el de la finca con el fin de darles a conocer más a detalle el proyecto “Climate Friendly” y sobre todo para explicarles la metodología que se utilizaría para levantar la información en cada uno de las parcelas. Fue importante informarles que para generar las ecuaciones de biomasa requeríamos cortar 6 árboles de sombra por sitio y 12 cafetales lo que implica que cada productor involucrado en el estudio debía estar anuente a cortar al menos un árbol de sombra y dos plantas de café.

Se acordó que tanto ANACAFE y FEDECOCAGUA harían trabajo de promoción del proyecto en cada cooperativa además de ir seleccionando a los socios donde se llevarían a cabo los muestreos. Es importante enfatizar que esta selección se realizo en base al interés y voluntad de participar por parte de los productores.

### **3.3 Capacitación para técnicos de las cooperativas y de ANACAFE sobre el uso del GPS**

Contar con el área (Ha) de los sitios a evaluar es uno de los pasos primordiales para poder generar diseñar un muestreo adecuado para cada uno de los sitios y poder llegar a una estimación adecuada del carbono total fijado. Tanto en las cooperativas como en la finca no se contaba con esta información por lo que se vio necesario iniciar con un taller práctico para explicarles a los productores participantes cómo utilizar un GPS para poder obtener un polígono de los límites de los sitios a trabajar.

Se programó dicho taller el 31 de agosto en la cooperativa Nuevo Sendero donde fueron invitados todos los técnicos del resto de las cooperativas y los que correspondían a las regiones de ANACAFE (ver Anexo 1.3).

Además de enseñarles a los técnicos el uso del GPS uno de los logros del taller también fue la planificación y asignación de los responsables por cooperativa para delimitar las áreas que se estarían muestreando. La información de este trabajo se detalla en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Cantidad de polígonos a delimitar por cooperativa y responsables de darle seguimiento.

Sitio	Cooperativa				
	1	2	3	4	5
<b>Nombre</b>	Dos de Julio	Las Brisas	Esperanza del Futuro	Unión Duraznito	Nuevo Sendero
<b>Polígonos parcelas de muestreo</b>	3	5	5	4	12
<b>Parcelas "control"</b>	1	1	1	1	1
<b>Total parcelas</b>	4	6	6	5	13
<b>Responsable</b>	Cruz Humberto Corado (FEDECOCAGUA)	Marco Tulio Martínez (SIG-ANACAFE)	Marco Tulio Guerra (FEDECOCAGUA)	Boris Leonel Ortiz (SIG-ANACAFE) y Luis Barrios (CEA-UVG)	Candelario Carrillo (FEDECOCAGUA) y Diego Pons (CEA-UVG)

### **3.4 Determinación de las coordenadas de las parcelas al azar**

Se completó la lista de los polígonos de los productores a evaluar procesados por el laboratorio de Sistemas de Información Geográfico (SIG) de ANACAFE. Esta información se analizó a mayor detalle en el laboratorio SIG del CEA-UVG sobreponiendo el polígono sobre la fotografía aérea respectiva (año 2006) con el fin de tener una mayor panorámica sobre el sitio en sí como el de sus alrededores (ver Mapas con polígonos de productores en Anexo 2).

Conociendo el área de cada polígono se generaron puntos al azar utilizando un herramienta del programa ArcGIS. En cada polígono se generaron al menos dos puntos al azar para tener un replicado de la medición por productor. El Anexo 2.10 muestra las coordenadas de todas las parcelas evaluadas por productor y sitio. El Cuadro 4 se detallan las fechas específicas durante las cuales se levantó la información de campo con ayuda de los productores seleccionados.

Cuadro 4: Fechas de muestreo de campo para cada uno de los sitios.

<b>Sitio de Estudio</b>	<b>Fechas de Muestreo (año 2,009)</b>
Coop. Nuevo Sendero	10-28 de sept. y 12-13 de oct.
Coop. Dos de Julio	14-16 de octubre
Coop. Las Brisas	21-23 de octubre
Coop. Esperanza del Futuro	3-8 de noviembre
Coop. Unión Duraznito	17-19 de noviembre
Fca. El Platanillo	24-28 de noviembre
Fca. Australia	28-30 de noviembre

### **3.5 Metodología de campo para estimar carbono en cafetales**

Para poder muestrear y calcular la biomasa y carbono por medio de parcelas debemos de tener en cuenta varios aspectos.

1. ¿Qué tipo de sistema vamos a evaluar? (bosques, plantaciones forestales, sistemas agroforestales)
2. ¿Cuál es la extensión total (ha)?
3. ¿Será necesario estratificar antes de muestrear?
4. ¿Cuántas parcelas se deben hacer?

El número de parcelas a completar depende de la extensión del área a muestrear y de la variabilidad intrínseca del sistema. Esta variabilidad solo puede estimarse con un pre-muestreo aunque en el caso de un sistema agroforestal como el café, se espera que se tenga una variabilidad mucho menor que un sistema natural. Al final, la cantidad de parcelas a realizar viene limitada por el tiempo y los recursos financieros disponibles. En el presente estudio, se estimó que la variabilidad al interno de un productor debería ser baja ya que cada productor implementa prácticas similares en todo su terreno. Se decidió así completar el mínimo de dos o tres parcelas por productor para poder maximizar el número de productores a muestrear, asumiendo que se observaría una mayor variabilidad entre productores.

5. ¿Qué componentes dentro de la parcela puedo muestrear?

Los componentes de medición los podemos dividir en cuatro grandes categorías como:

- a. Biomasa arriba del suelo (maleza, arbustos, árboles)
- b. Biomasa por debajo del suelo (raíces)
- c. Materia muerta (hojarasca y material leñoso residual o troncos caídos)
- d. Suelo, medido a los 10-20 ó 30 cm de profundidad.

Limitaciones de tiempo y costo hacen que componentes difíciles de medir como raíces o material leñoso muerto sean usualmente dejados fuera del proceso de medición. En el presente estudio, las raíces serán medidas solo para las plantas de café y serán estimadas para los árboles de sombra mediante aproximaciones derivadas de publicaciones disponibles.

En resumen, para el presente estudio se usará el siguiente diseño para completar el muestreo:

Sistema a evaluar	Sistema agroforestal de café bajo sombra.
Extensión (ha)	1,180 Ha distribuidas entre 5 cooperativas y una finca más los sitios de control.
¿Estratificación para muestrear?	No se estratificó al interior de cada productor asumiendo que la práctica agrícola es uniforme en todo el terreno de un productor. Si se estratificó en la finca por la extensión de la misma.

¿Cuántas parcelas serán completadas?	Se propusieron 150 parcelas para cubrir el 10% de los productores; al final se completaron 153 parcelas incluyendo los controles.
¿Componentes a muestrear?	Todos los componentes, excepto el material leñoso residual y las raíces de árboles de sombra. El suelo fue muestreado a 10 cm de profundidad.

Los procedimientos de campo descritos a continuación se derivan de las experiencias previas de medición de carbono del equipo CEA-UVG (Márquez et al., 2000 y Castellanos et al., 2007).

### **3.5.1 Biomasa arriba del suelo**

Para coleccionar la información de la biomasa arriba del suelo se utilizaron parcelas rectangulares anilladas como se observa en la Figura 1 y se describe en detalle en el Cuadro 5.

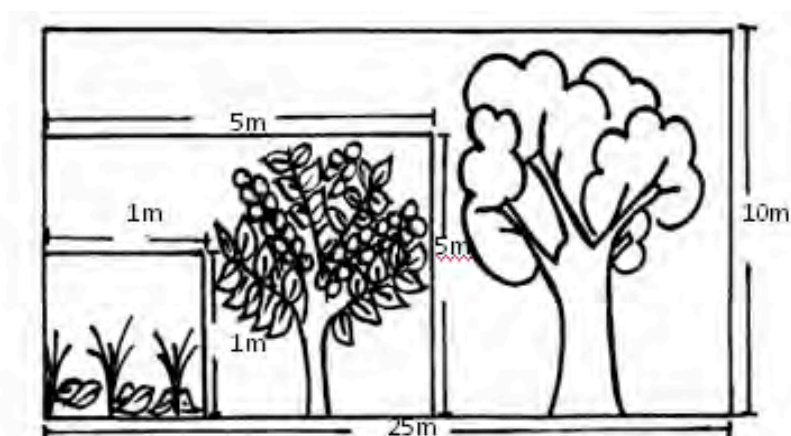


Figura 1: Diseño de parcelas rectangulares anilladas utilizadas para muestrear los distintos componentes del sistema agroforestal de café.

La razón de escoger parcelas rectangulares en este caso fue debido a que el sistema agroforestal de café es un sistema bastante ordenado por lo que se facilita delimitar estas parcelas utilizando las calles o surcos como referencia, a diferencia de parcelas circulares, más adecuadas al muestreo en bosques naturales.

Cuadro 5: Tamaño y componente a evaluar dentro de cada subparcela.

No.	Tamaño	Componente evaluado
1ra subparcela	1 x 1m = 1m <sup>2</sup>	Maleza, hojarasca y suelo.
2da subparcela	5 x 5m = 25m <sup>2</sup>	Diámetro a la base del tocón de las ramas del cafetal; altura y diámetro de copa de los cafetales.
3ra subparcela	10 x 25m = 250m <sup>2</sup>	Altura y diámetro a la altura del pecho de los árboles de sombra.

En cada parcela es necesario tomar datos generales como la referencia geográfica (coordenadas con GPS), pendiente, orientación de la pendiente, nombre del colector y del sitio muestreado y fecha (ver foto Anexo 4.10). Otra cosa muy importante es la identificación/nombre que se le dará a la parcela, los códigos de estas deben de definirse previamente para utilizar el mismo sistema en todo el muestreo.

Para este trabajo se numeró correlativamente a todos los productores evaluados del 1 al 36; el identificador de la parcela fue la combinación del Código del Productor + Número de Parcela (ver Anexo 2.10 para el listado completo de parcelas).

### **3.5.2. Muestreo de Maleza, hojarasca y suelo**

En la primera subparcela de 1m x 1m el objetivo es llegar a cuantificar la biomasa de tres componentes y es necesario separar la hojarasca y maleza encontrada en ese metro cuadrado.

Ya separados los componentes, se pesan para obtener el peso húmedo en campo. Luego se colecta una muestra para llevar al laboratorio para determinar contenido de humedad y poder determinar posteriormente el peso total seco (ver foto Anexo 4.3).

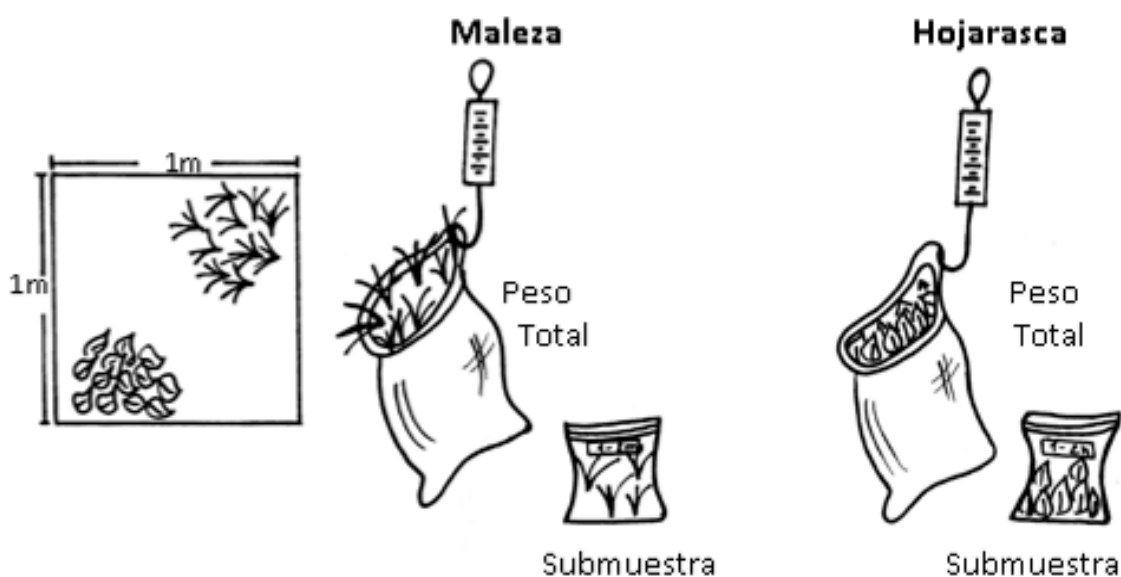


Figura 2: Separación, peso total y colecta de submuestras de la maleza y hojarasca encontradas en la parcela de 1m<sup>2</sup>.

Para el suelo, se debe limpiar bien el área asegurándose de levantar toda la materia orgánica. Utilizando un tubo muestreador de suelo con volumen conocido se introduce este en la tierra hasta los 10cm de profundidad. La muestra se coloca en una bolsa plástica para llevarla al laboratorio para su posterior análisis.

### **3.5.3. Muestreo de Cafetales**

Utilizando una esquina en común con la anterior subparcela se delimitan los 5m x 5m para realizar las mediciones de los cafetales que se encuentren dentro de estos 25m<sup>2</sup>.

Para los cafetales utilizamos 3 variables de medición: diámetros a la base (DAB-cm), altura (H-m) y diámetro de copa (DC-m).

Criterios a considerar para la toma de datos:

- ✓ Si la mata de café, ya fue recepada, tomar el DAB (cm) a los 15cm aproximadamente y la H del tocón principal.
- ✓ Tomar el DAB (cm), H (m) y DC (m) de cada uno de los hijos.

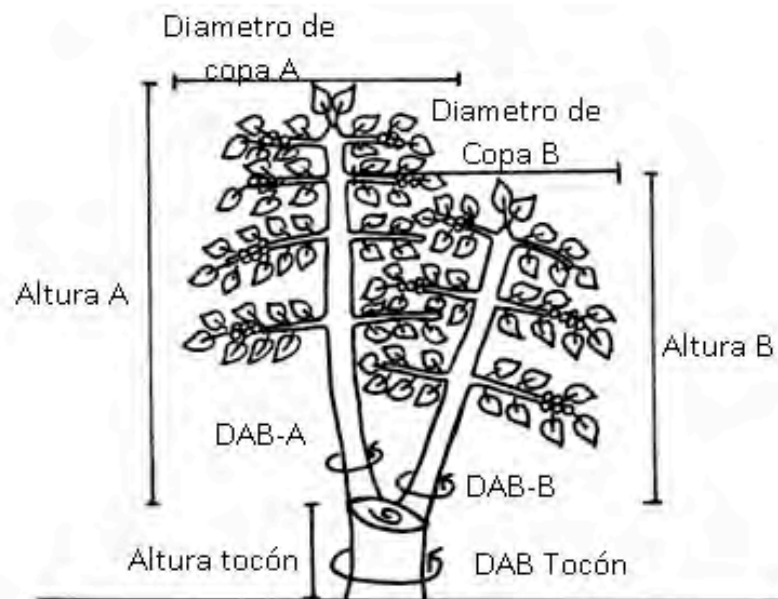


Figura 3: Ilustración sobre las variables de medición para una mata de café.

### **3.5.4. Muestreo de árboles de sombra**

Por último, se muestrean los árboles de sombra en la subparcela de 10m x 25m

Criterios a considerar para la toma de datos:

- ✓ Diámetro a la altura del pecho (DAP), en centímetros.
- ✓ Altura comercial (m), definida en nuestro caso como la altura hasta donde aparece una de las ramas laterales principal o se bifurca el fuste.
- ✓ Altura Total, en metros.
- ✓ Especie del árbol, nombre común y científico.

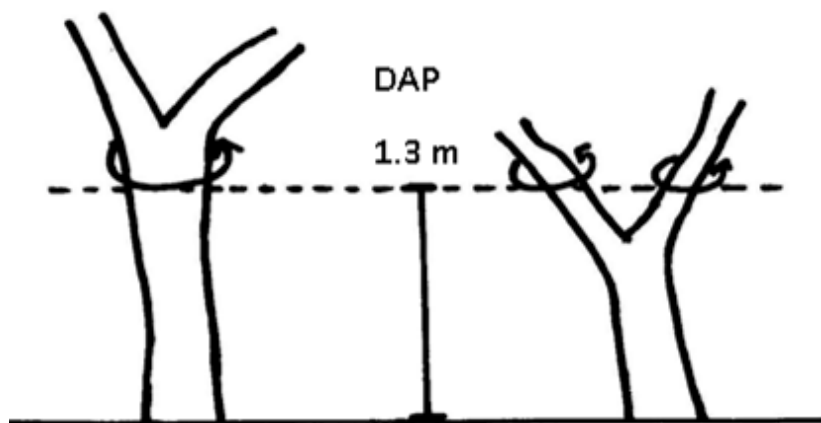


Figura 4: Forma de medir el DAP dependiendo la forma del árbol.

### **3.6 Metodología para estimar Ecuaciones de biomasa**

Todo el proceso de medición descrito en la sección anterior se enfoca a estimar tamaño de la vegetación mediante mediciones de diámetro o altura. Es necesario poder traducir estas medidas de tamaño a medidas de masa. Esto se hace mediante una ecuación de biomasa que es una regresión entre variables de tamaño (diámetro y altura) y la masa medida de la planta en cuestión. La medición de esta masa implica la destrucción de la planta para poder pesar separadamente cada uno de sus componentes. Se toma una muestra de cada componente pesado para llevar al laboratorio y poder determinar contenido de humedad y así poder determinar el peso total seco.

#### **3.6.1. Ecuación de biomasa para cafetales**

A continuación se describe el proceso en detalle; también se pueden ver las fotos del anexo 4 y la Figura 5:

- 1) Identificar una mata de café que sea representativa del lote. Se eligieron matas adultas que estuvieran en la etapa productiva. 12 cafetales por sitio de estudio para tener información de aproximadamente 72 individuos.
- 2) Levantamiento de la información básica de la planta: ubicación (coordenadas con GPS), DAB, HA y DC, de la misma manera como se hizo en la fase de parcelas.
- 3) Cortar el cafetal con el fin de obtener el peso húmedo total de cada uno de los componentes de la planta mediante la separación y peso de las hojas, frutos, bandolas y fuste. De cada uno de estos se deben tomar muestras para laboratorio.
- 4) Habiendo dejado únicamente el tocón de la planta sembrado, se procede a aflojar el suelo para extraer la raíz, la cual se pesa y se colecta una muestra.
- 5) El tocón que sirvió para extraer la raíz debe ser sumado al peso del fuste. Identificando bien que solo sea la parte que estaba arriba del suelo, el resto que queda se considera como parte de la raíz.

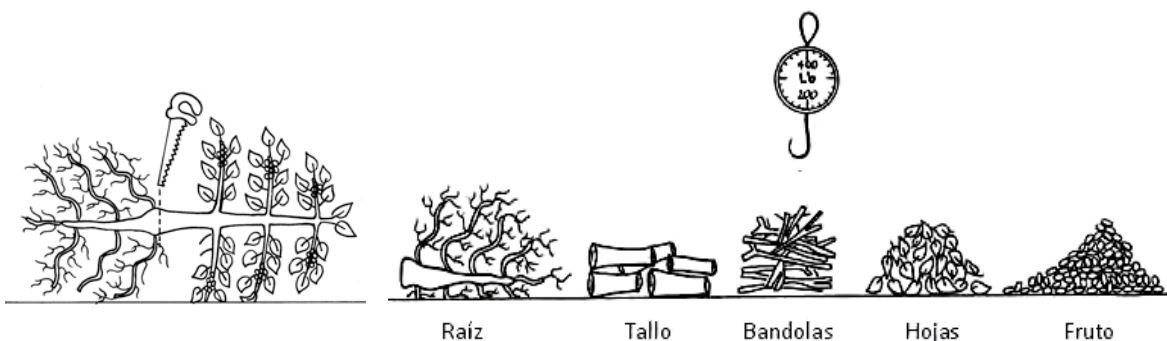


Figura 5: Ilustración del proceso de separación de componentes para obtener el peso total de una mata de café.

### 3.6.2 Ecuación de biomasa para árboles de sombra (*Inga sp.*, *Grevilea robusta*)

Dado el esfuerzo necesario en cortar y pesar un árbol y considerando el grado de perturbación del cafetal que esto puede causar, se decidió hacer un muestreo destructivo solo para árboles del género *Inga* que son los más comúnmente usados en la sombra de los cafetales seleccionados. Durante el proceso de medición también se decidió trabajar algunas árboles de *Grevilea* que fueron comunes en la Cooperativa Unión Duraznito.

Se busca cortar individuos de diferentes tamaños con el fin de determinar una regresión que sea válida para un rango amplio de tamaños. La selección final del individuo a cortar siempre estuvo supeditada a la autorización del dueño de la parcela en cuestión.

Los pasos a seguir son similares a los descritos para las plantas de café con la diferencia significativa de que para los árboles no se extrajo la raíz para pesarla y muestrearla. Los detalles del proceso pueden verse en las fotos del Anexo 4 y en las Figuras 6 y 7.

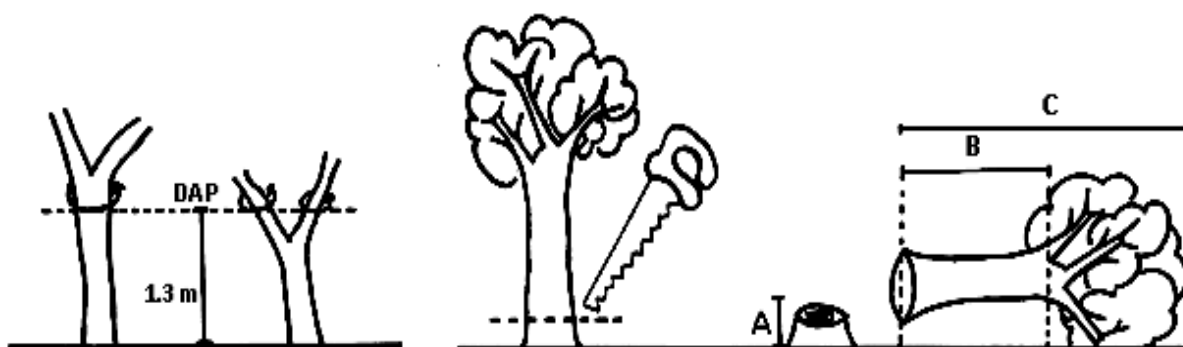


Figura 6: Medición de diámetros a la altura del pecho (DAP's). Procedimiento de tumba y medición de los distintos largos del árbol.



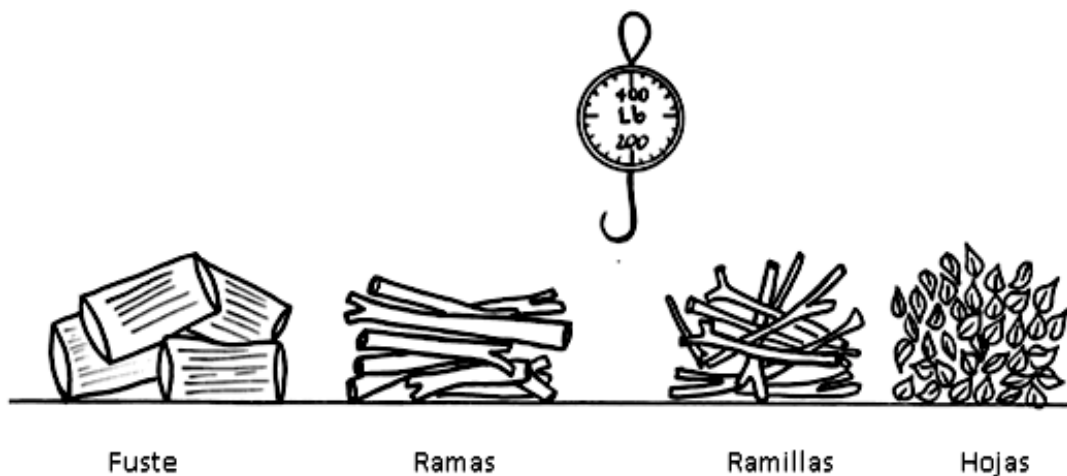


Figura 7: Separación de cada uno de los componentes de los árboles y toma del peso húmedo total para los árboles de *Inga* o *Grevilea*.

### **3.7. Determinación de humedad y contenido de carbono en Laboratorio**

Todos los pesos medidos en campo son de materia húmeda. Es necesario posteriormente determinar el contenido de humedad de la biomasa para poder estimar el peso seco. Esto se hace mediante el secado en horno de convección de todas las muestras de biomasa viva o muerta colectadas. El secado se hace a una temperatura media de 50 °C para evitar la oxidación de las muestras.

Por aparte, las muestras de suelo deben llevar un proceso de secado al aire y luego analizadas para determinar su contenido de carbono orgánico de acuerdo al procedimiento detallado más adelante.

#### **3.7.1 Muestras de vegetales**

Estas muestras siguen el siguiente proceso:

- 1) Pesar la muestra para obtener el PESO HÚMEDO (puede hacerse en campo).
- 2) Para secar las muestras en el horno se colocan en bolsas de papel kraft.
- 3) Habiendo calentado los hornos de convección a 50°C o 60°C, se colocan las muestras (ver Figura 8).
- 4) Día a día se monitorea el peso hasta lograr un peso constante, que es el PESO SECO registrado. Este peso es usado junto con el peso húmedo para determinar porcentaje de humedad y corregir el peso húmedo total medido en campo.



Figura 8: Muestras secándose en horno de convección y determinación de peso seco

### **3.7.2. Muestras de suelos**

Para calcular el carbono orgánico del suelo los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Los suelos se colocan en recipientes abiertos para secarse al aire (3-5 días) cuidado de no colocarlos bajo el sol para evitar la oxidación de la materia orgánica. También es importante romper los agregados de suelo antes de que se seque.
- 2) Pasar el suelo seco al aire por un tamiz # 10 (apertura de 2 mm) para separar las rocas del suelo fino.
- 3) Pesar las rocas y el suelo fino por separado. Las rocas se descartan porque se asume que no tienen cantidades significativas de carbono orgánico.
- 4) El suelo fino es almacenado en bolsas plásticas selladas hasta el momento de la determinación del contenido de materia orgánica.
- 5) La determinación del contenido de carbono orgánico se hizo con un Analizador elemental de carbono y nitrógeno (Flash EA 1112 de CE Elantech, Figura 9). Para poder ingresar las muestras al analizador deben molerse finamente pasándolas por un tamiz #100.
- 6) En esta muestra tamizada se hace una determinación del contenido de humedad residual secando una muestra de 1 g por dos horas a 105°C. Este valor es necesario sólo si se desea reportar el contenido de carbono orgánico en base seca de suelo.
- 7) El analizador de carbono y nitrógeno se calibra con un estándar y un suelo estándar de acuerdo a los procedimientos sugeridos por el fabricante. Se ingresan 25-35 mg de suelo finamente molido y el instrumento reporta el porcentaje de carbono y nitrógeno de la muestra ingresada.
- 8) Se siguen protocolos estandarizados de control de calidad haciendo duplicados e inyectando blancos y suelo estándar a intervalos pre-determinados para asegurar la adecuada calibración del instrumento y la reproducibilidad de los resultados.



Figura 9: Analizador de Nitrógeno y Carbono, Flash EA 1112.

### **3.8 Cálculos finales de contenido de carbono por área**

#### **3.8.1 Cálculo de biomasa seca**

Luego de haber registrado el peso húmedo y peso seco de las muestras de hojarasca y maleza, se calcula el cociente de ambos para obtener la materia seca según la siguiente ecuación:

$$MS = PS/PH$$

(Ecuación 1)

Donde: MS = materia seca de la muestra; PS = Peso seco de la muestra (g); PH = Peso húmedo de la muestra (g).

Con la materia seca se convierte el peso húmedo total que se tomó en campo a biomasa seca utilizando la siguiente ecuación:

$$BT = PHc \times MS$$

(Ecuación 2)

Donde: BT = Biomasa Total seca (Kg.) de la hojarasca, maleza; PHc = Peso húmedo total registrado en campo (Kg.); MS = materia seca de la muestra.

#### **3.8.2. Cálculo del contenido de carbono por área en maleza y hojarasca**

Con los resultados de la biomasa seca total de hojarasca y maleza evaluada en el metro cuadrado, es necesario convertir el dato a carbono y pasarlo a las unidades de toneladas por hectárea (ton C/ha), término conocido como densidad de carbono.

Para convertir la biomasa en carbono utilizamos el factor de 0.5 que es una aproximación universalmente aceptada.

La Ecuación 3 nos indica los pasos a seguir para obtener la densidad de carbono.

$$\text{Ton C/Ha} = (\text{Kg biomasa seca} * 0.5/1000) / \text{área parcela (ha)}$$

(Ecuación 3)

Donde: ton C/Ha, se conoce como Densidad de Carbono. El área parcela debe ingresarse en hectáreas.

Para conocer el total de toneladas de carbono fijadas por el sistema agroforestal es necesario conocer el área total plantada para multiplicarla por la densidad de carbono (ton C/ha) que se obtuvo en el paso anterior.

$$\text{Ton C} = \text{Densidad de carbono} * \text{área total del sistema evaluado (ha)}$$

(Ecuación 4)

Donde: Ton C es el total de toneladas de carbono fijado; Densidad de carbono (ton C/ha).

### **3.8.3. Cálculo de biomasa para árboles y cafetales**

Para calcular la biomasa seca de los árboles de sombra y cafetales se utilizaron ecuaciones de biomasa publicadas en otros estudios y las ecuaciones que se generaron durante este proyecto. Las ecuaciones permiten traducir una medición de tamaño (diámetro, altura) en una estimación de biomasa seca. Para el caso de cafetales, la ecuación incluye el componente raíces; para los árboles de sombra, las raíces se estimaron como 27% del total de la biomasa arriba del suelo de acuerdo al factor publicado por el Panel Gubernamental de Cambio Climático para inventarios de carbono (IPCC, 2003).

Cuadro 6: Ecuaciones de biomasa utilizadas para árboles de sombra.

Cultivo/Especie	Ecuación	Referencia
Latifoliadas bosques con 900-1,500 mm de lluvia	Biomasa = 0.1359 * (DAP) <sup>2.32</sup> DAP Diámetro a altura del pecho 5-40 cm	Brown, 1997.
Pinos y ciprés	Biomasa = 0.07921 * (DAP) <sup>2.4349</sup> DAP hasta 180 cm	Jenkins et al., 2003
Plátano <i>Musa paradisiaca</i>	Biomasa = 0.03 * (DAP) <sup>2.13</sup> DAP 7-28 cm	van Noordwijk et al., 2002
<i>Inga sp.</i> (Cuje)	Generadas en este proyecto (ver sección de Resultados). Para <i>Inga</i> y <i>Gravilea</i> fuera de los rangos de las ecuaciones generadas se usó la ecuación de Brown, 1997.	Castellanos et al., 2010
<i>Grevilea robusta</i>		
Cafetales		

Para poder generar las ecuaciones de *Inga sp.*, *Grevilea robusta* y cafetales es necesario evaluar cuál de las variables de tamaño medidas en campo tiene mayor relación con la biomasa total. Por esta razón se hicieron pruebas utilizando el DAP (cm), diámetro de

copa (cm), altura (m) y varias combinaciones de estas variables para así poder evaluar la relación matemática que mejor se ajusta al modelo de regresión. Esto se hizo con el programa CurveExpert 1.3<sup>®</sup>.

Las ecuaciones de biomasa proveen pesos secos en kilogramos (Kg.); se debe multiplicar por los factores de 0.27 y 0.5 (IPCC, 2003) para agregar la biomasa de raíces y convertir la biomasa total a carbono. La sumatoria de todos los individuos de cada parcela evaluada (árboles 10x25m, cafetales 5x5m) debe ser dividida dentro del área muestreada, en hectáreas de acuerdo a la Ecuación 3.

#### **3.8.4. Cálculo de la densidad de carbono en el suelo**

En el suelo los cálculos se centran en la fracción fina separada al pasar por el tamiz #10 luego de secar el suelo al aire. Primero es necesario calcular la densidad de suelo fino:

$$D = PSf / Vol$$

(Ecuación 5)

Donde: D = Densidad del suelo fino (g/cm<sup>3</sup>); PSf = Peso seco de la fracción fina (g); Vol = Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>).

El cálculo de la densidad de carbono se hace multiplicando el porcentaje de carbono determinado en laboratorio por la densidad de suelo fino y multiplicando por la profundidad de muestreo de 10 cm. Esto se muestra en la Ecuación 6. Este cálculo asume que las rocas separadas no tienen carbono orgánico y que el suelo fino no tiene carbono inorgánico. De existir carbono inorgánico, este tendría que ser determinado por separado para restarse del valor reportado por el analizador elemental ya que el instrumento determina carbono total (orgánico más inorgánico).

$$Cs = Prof. \times D \times \%C.O.$$

(Ecuación 6)

Donde: Cs = Carbono orgánico total en los primeros 10 cm de suelo (ton C/ha); Prof. = Profundidad del muestreo (cm); D = Densidad suelo fino (g/cm<sup>3</sup>); %C.O. = Contenido porcentual de carbono orgánico en el suelo.

#### **3.8.5. Cálculo de la densidad y total de carbono para el sistema**

La densidad de carbono total del sistema es la suma de los componentes medidos (Ecuación 7). El carbono total del sistema se calcula por la Ecuación 4.

$$\text{Ton C/ Ha total} = \text{Árboles (tC/ha)} + \text{cafetales (tC/ha)} + \text{maleza (tC/ha)} \\ + \text{hojarasca (tC/ha)} + \text{suelo (tC/ha)}$$

(Ecuación 7)

## 4. RESULTADOS

En el Cuadro 7 muestra un resumen indicando las fechas en las cuales se trabajó en campo con el fin de levantar la información de parcelas, árboles y cafetos (ecuaciones biomasa). Se observa que en la Cooperativa Nuevo Sendero se completaron 16 parcelas más de las originalmente planificadas. Esto se debió a la alta variabilidad observada entre productores, particularmente entre las parcelas localizadas en lugares de montaña y lugares bajos. Este aumento en el número de parcelas en Nuevo Sendero resultó en una disminución de las parcelas completadas en las cooperativas de Esperanza del Futuro y Unión Duraznito, así como en la Finca Platanillo. De cualquier manera, el total de parcelas evaluadas fue mayor al número de parcelas originalmente planificadas.

Cuadro 7: Resumen sobre las fechas de trabajo de campo, cantidad de productores y parcelas completadas así como árboles y cafetos cortados y medidos.

Fechas de Muestreo	Coop./Finca	Productores	Parcelas	Árboles Sombra	Cafetos
10-28 sept 12-13 oct 09	Coop. Nuevo Sendero	13	55	6	11
14-16 oct 09	Coop. 2 de Julio	4	12	8	12
21-23 oct 09	Coop. Las Brisas	6	18	6	12
3-8 nov 09	Coop. Esperanza del Futuro	6	12	6	12
17-19 nov 09	Coop. Unión Duraznito	5	13	10	10
24-30 nov 09	Fca Platanillo/Fca Autralia	2	43	6	12
DICIEMBRE	Digitalización de datos y trabajo de Laboratorio.	-----	-----	-----	-----
	<b>TOTAL</b>	<b>36</b>	<b>153</b>	<b>42</b>	<b>69</b>

### 4.1 Ecuaciones de Biomasa

Para el caso de los árboles de sombra se calculó el factor de expansión de biomasa (FEB), el cual se define como el cociente del total de la biomasa dividido la biomasa del fuste. Este valor puede ser utilizado para convertir inventarios forestales normales (que miden volumen del fuste) a biomasa. Para los árboles de sombra no se midieron raíces; el valor final de biomasa arriba del suelo fue multiplicado por el factor 1.24 para obtener la biomasa total de los árboles de sombra incluyendo raíces.

#### 4.1.1 Ecuación para *Inga sp.*

En base a la información de 32 árboles de *Inga sp.* (Chalum, Cuje, Cushin, Caspirol), que cubren un rango diamétrico de 10 a 29 cm de DAP se evaluó la biomasa seca de cada uno

de sus componentes (fuste, ramas, ramillas y hojas) para poder obtener la biomasa seca total de cada individuo que se muestra en el Cuadro 8.

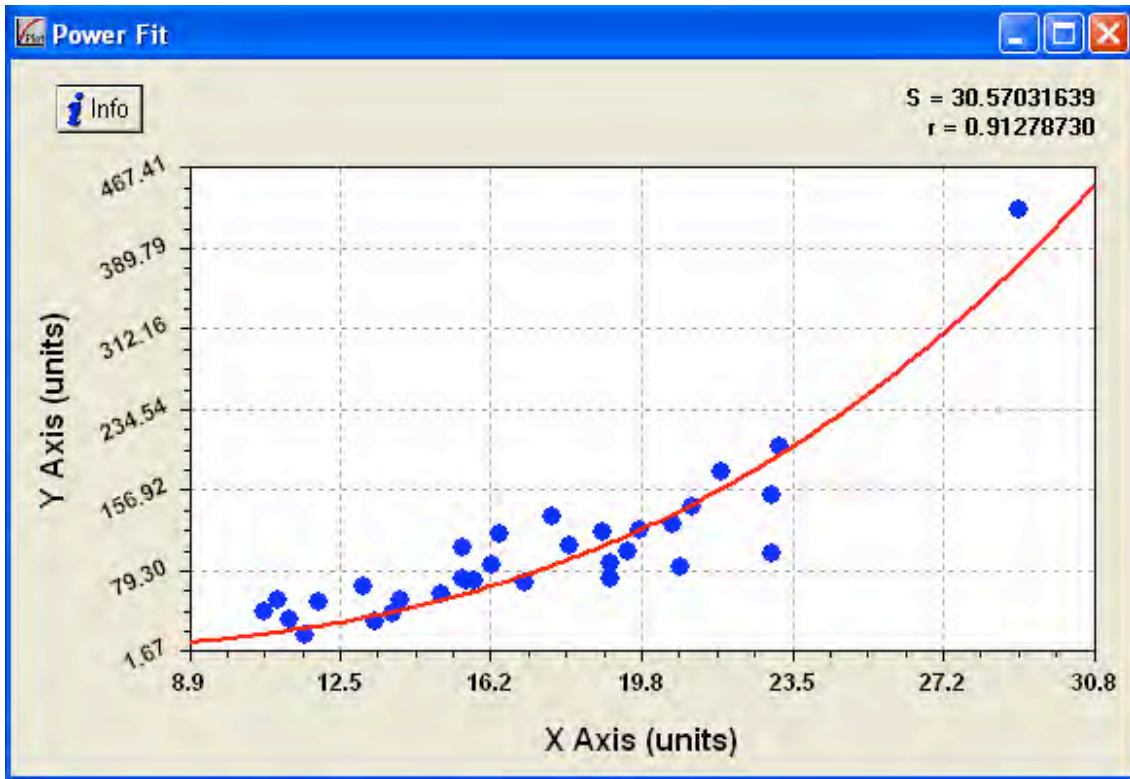
Cuadro 8: Variables alométricas y biomasa (Kg.) para cada uno de los individuos de *Inga sp.* cortados.

No.	DAP (cm)	Altura (m)	Biomasa (Kg.)				TOTAL
			Fuste	Ramas	Ramillas	Hojas	
1	19.1	15.40	64.70	17.34	3.45	1.28	<b>86.77</b>
2	19.1	10.80	29.58	31.34	9.87	0.76	<b>71.56</b>
3	15.5	11.90	40.52	14.66	10.13	7.17	<b>72.48</b>
4	15.0	10.50	36.92	9.87	6.56	4.17	<b>57.52</b>
5	17.7	11.80	47.10	62.27	10.52	10.86	<b>130.74</b>
6	16.2	12.50	54.86	17.44	9.66	3.39	<b>85.35</b>
7	15.5	12.80	20.68	58.03	10.23	12.97	<b>101.90</b>
8	21.8	13.80	139.41	23.24	7.70	3.62	<b>173.97</b>
9	19.8	13.10	100.67	8.77	6.15	3.23	<b>118.82</b>
10	23.0	14.75	132.58	7.27	6.07	6.17	<b>152.09</b>
11	23.0	14.75	70.13	9.11	7.81	9.59	<b>96.64</b>
12	20.6	19.00	99.34	10.94	10.56	4.18	<b>125.03</b>
13	15.6	11.93	55.76	7.62	6.04	1.80	<b>69.41</b>
14	13.1	12.60	45.22	8.41	5.94	5.51	<b>65.08</b>
15	12.0	12.00	25.20	15.01	5.43	2.92	<b>48.56</b>
16	29.0	15.30	268.75	128.26	19.96	9.47	<b>426.44</b>
17	19.5	10.00	61.22	24.26	11.71	0.72	<b>97.91</b>
18	11.3	9.00	15.53	10.01	4.67	1.44	<b>31.65</b>
19	11.7	8.10	10.76	2.95	2.39	0.62	<b>16.73</b>
20	21.1	11.82	73.26	36.82	10.30	20.05	<b>140.43</b>
21	11.0	10.30	15.20	18.17	5.78	11.54	<b>50.69</b>
22	10.7	10.40	17.56	8.79	6.53	6.68	<b>39.56</b>
23	14.0	8.95	10.87	28.88	4.11	8.18	<b>52.05</b>
24	15.8	9.46	25.05	33.88	1.86	9.47	<b>70.26</b>
25	13.8	8.10	18.30	9.55	4.22	6.15	<b>38.22</b>
26	13.4	7.90	14.08	4.28	4.49	7.49	<b>30.35</b>
27	17.0	11.00	40.82	14.75	6.05	6.49	<b>68.10</b>
28	23.2	7.95	123.80	43.88	11.58	20.33	<b>199.60</b>
29	18.9	11.95	58.09	27.33	12.85	18.72	<b>116.99</b>
30	20.8	11.25	54.98	14.37	7.66	6.40	<b>83.42</b>
31	16.4	7.45	38.17	34.24	20.65	22.38	<b>115.44</b>
32	18.1	12.50	69.30	17.94	8.79	7.85	<b>103.88</b>

La Gráfica 1 muestra la curva que mejor representa para la *Inga sp.* la relación entre la biomasa y la variable DAP en cm. La ecuación resultante está resumida en el Cuadro 9 donde se muestra que la regresión explica un 83% de la variabilidad de los datos ( $R^2$ ) y que el factor de expansión para convertir la biomasa del fuste a biomasa total es de 2.02. La ecuación es válida para rangos de DAP de 10 a 29 cm. Este tamaño de árbol de sombra fue predominante en las plantaciones evaluadas.



Gráfica 1: Relación entre biomasa total arriba del suelo (eje Y) y DAP (eje X) de los árboles de *Inga sp.* (La línea roja es la regresión con la ecuación del Cuadro 9).



Cuadro 9: Ecuación de biomasa arriba del suelo para *Inga sp.*

Especie	Ecuación	Variable	R <sup>2</sup>	FEB
<i>Inga sp.</i>	$Y = 0.01513 * X^{3.0054}$	X = DAP, cm Y = Biomasa seca, Kg	0.83	2.02

(Ecuación 8)

#### **4.1.2 Ecuación para *Grevilea robusta***

Para generar la ecuación de gravilea (*Grevilea robusta*), se cortaron 10 árboles (Cuadro 10); sin embargo, los datos de un árbol no fueron tomados en cuenta por mostrar demasiada desviación respecto al resto de árboles medidos. Esto puede ser el resultado de un manejo muy diferente (o la falta de manejo total) de este productor específico respecto a la poda de la sombra. El rango diamétrico que abarcan los 9 árboles restantes es de 10 a 31 cm de DAP. Los resultados se resumen en el Cuadro 10 y la regresión respectiva se muestra en la Gráfica 2. En este caso, la relación matemática que mostró mejor correlación fue una ecuación exponencial utilizando el DAP. Esta forma matemática es la más comúnmente usada en ecuaciones de biomasa. La regresión explicó un 88% de la

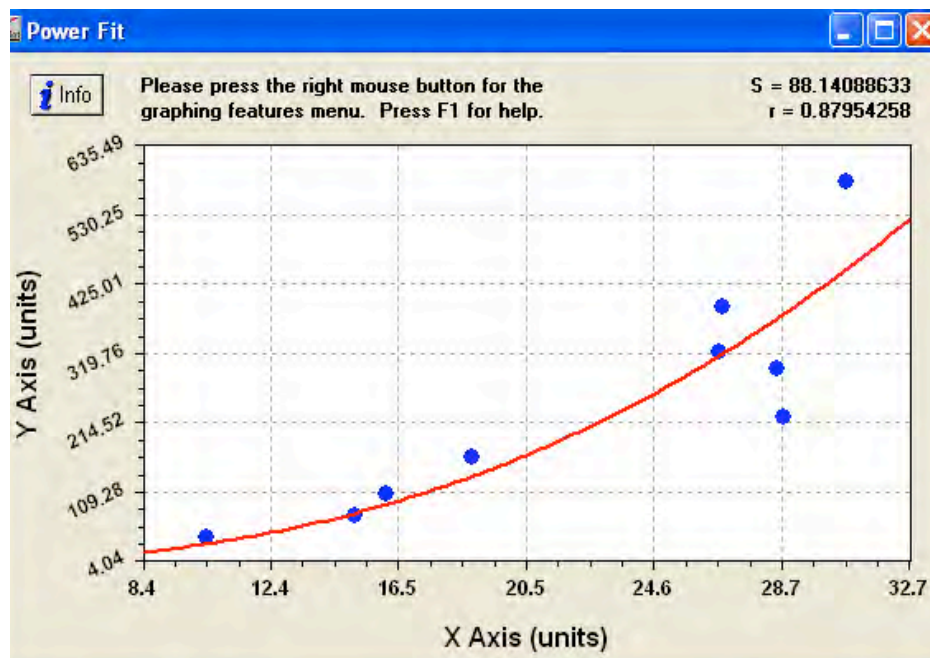


variabilidad de los datos (Cuadro 11), un valor bastante alto dado el bajo número de individuos muestreados.

Cuadro 10: Variables alométricas y kilogramos de biomasa para cada uno de los individuos de *Grevilea robusta* muestreados.

No.	DAP (cm)	Altura (m)	Biomasa (Kg.)				TOTAL
			Fuste	Ramas	Ramillas	Hojas	
1	16.1	11.55	60.81	19.45	13.45	13.46	107.17
2	26.8	20.40	310.20	56.11	12.01	12.77	391.09
3	18.8	15.40	88.63	43.68	12.07	17.80	162.17
4	28.7	10.10	138.43	57.15	10.64	16.56	222.78
5	10.4	9.75	23.50	7.39	4.36	5.18	40.43
6	15.1	12.80	62.89	-----	5.12	6.42	74.43
7	30.7	13.80	345.25	161.10	40.44	34.60	581.39
8	28.5	12.70	184.85	70.54	19.27	21.58	296.24
9	26.7	10.95	282.58	19.88	7.14	11.45	321.05

Gráfica 2: Relación entre biomasa total arriba del suelo (Eje Y) y DAP (Eje X) de los árboles de *Grevilea robusta* (ecuación de la línea roja en el Cuadro 11).



Cuadro 11: Ecuación de biomasa arriba del suelo para *Grevilea robusta*.

Especie	Ecuación	Variable	R <sup>2</sup>	FEB
<i>Grevilea robusta</i> .	$Y = 0.09517 * X^{2.47013}$	X = DAP, cm Y = Biomasa seca. Kg	0.77	1.56

(Ecuación 9)

### 4.1.3 Ecuación para Cafetales

Se colectaron 69 matas de café proporcionadas por los productores de las distintas cooperativas. Todas las matas de café que se evaluaron estaban en edad productiva y esto permitió evaluar todos los componentes de la planta (tallo, bandolas, hojas, frutos, tocón y raíz).

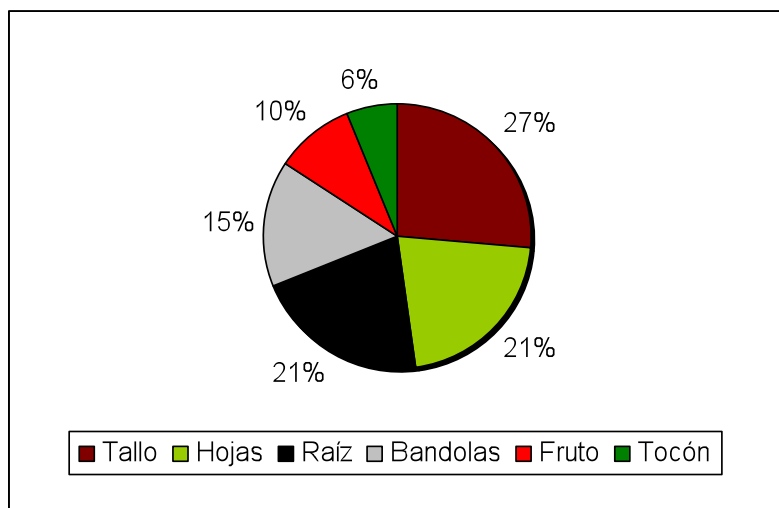
El Cuadro 12 muestra el promedio y el rango de variación de la biomasa seca de todas las plantas de café cortadas. Como se indicó anteriormente, el carbono se estima como el 50% de la biomasa seca. Este dato es muy conveniente ya que permite rápidamente calcular el carbono fijado en un cafetal (sin incluir la sombra) sabiendo únicamente la densidad de siembra de cafetos y le área total sembrada, siempre que los cafetos estén en una edad productiva.

Cuadro 12: Promedio de biomasa y contenido de carbono para una mata de café.

Biomasa (kg)		Carbono (kg)	
Prom	Error 95%	Prom	Error 95 %
3.30	±0.52	1.65	±0.26

La Gráfica 3 muestra cómo se divide el carbono en los diferentes componentes de la planta de café. La mayoría del carbono está en el tallo y las hojas y raíces contienen una cantidad similar de carbono. El 21% del total del carbono en las raíces equivale a un 26.6% del carbono arriba del suelo (21 g raíces/ 79 g resto) que es igual al factor de 27% proveniente de la literatura y usado para árboles de sombra. Los frutos que se cosechan anualmente representan apenas el 10% del total del carbono de la planta.

Gráfica 3: Proporción que representa cada componente de una mata de café en base a su biomasa total para las 69 plantas de café cortadas.



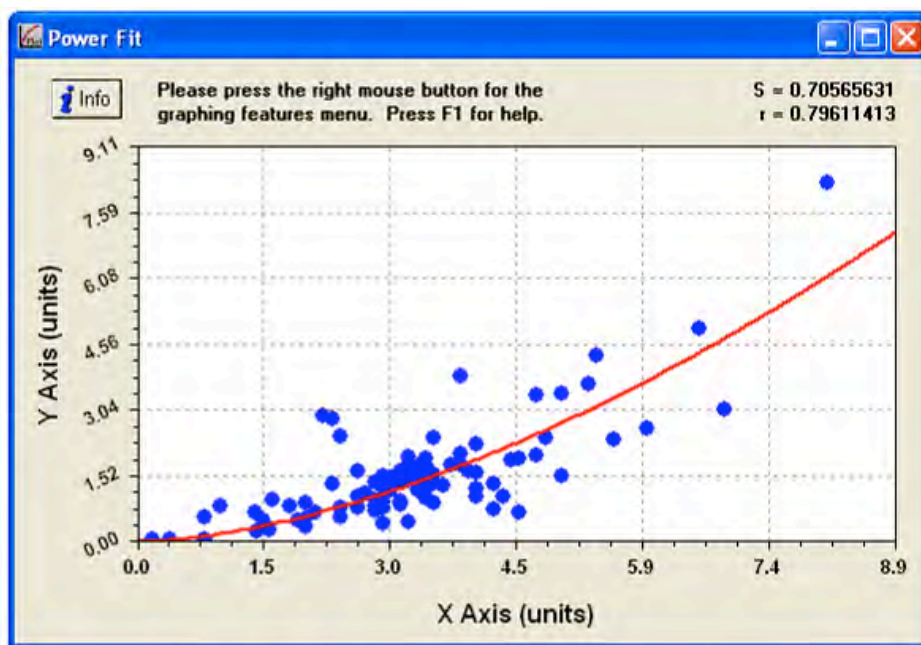
Utilizando todos los componentes de la planta del café fue imposible lograr una ecuación de biomasa que representara adecuadamente la relación entre variables de tamaño y masa. La mejor correlación apenas logró explicar un 60% de la variabilidad de los datos. Se probó entonces separar en dos componentes la ecuación de biomasa para las plantas de café.

La primera relación se muestra en la Gráfica 4 fue para los “hijos” que retoñan de un tocón luego de una poda. En esta ecuación se incluyó la biomasa del tallo, las bandolas, hojas y fruto relacionadas con el DAB del retoño. La mejor correlación fue una ecuación exponencial (Cuadro 13).

Una segunda ecuación fue usada para relacionar la biomasa de tocones con sus medidas de diámetro y altura y se muestra en la Gráfica 5. La mejor regresión ocurrió con una ecuación exponencial utilizando el producto del DAB por la altura del tocón (Cuadro 14).

El componente de raíces no fue incluido en ninguna de las ecuaciones de biomasa y fue adicionado posteriormente usando el valor de 26.6% de la biomasa arriba del suelo derivado de las mediciones de las plantas de café cortadas.

Gráfica 4: Relación entre biomasa total arriba del suelo de los retoños (Eje Y) de los cafetales y DAB del retoño (Eje X).

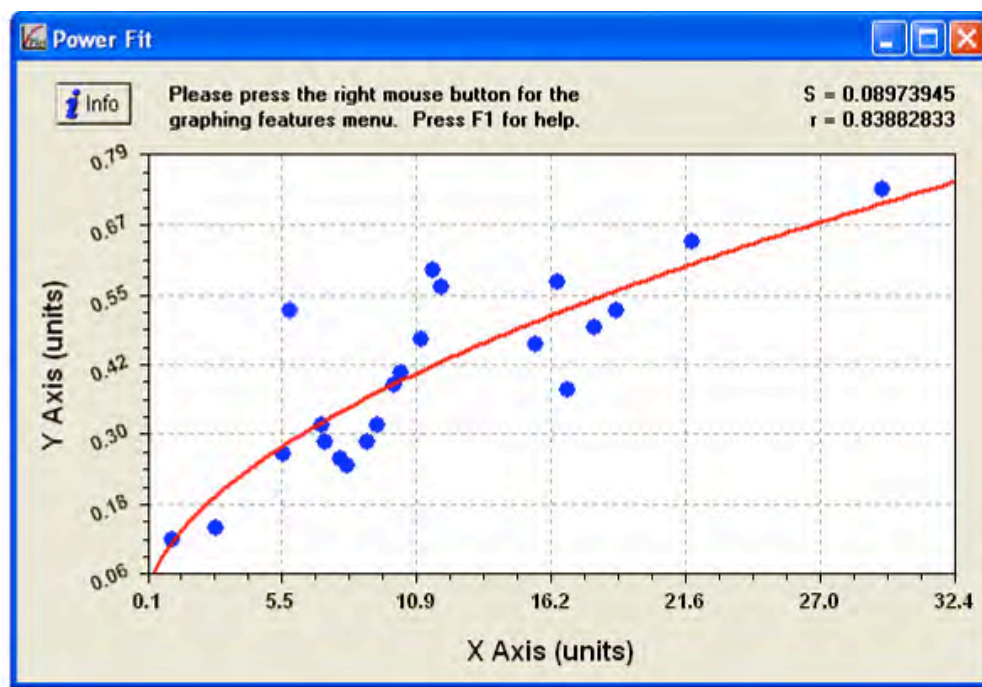


Cuadro 13: Ecuación de biomasa arriba del suelo para los retoños de una mata de café.

Especie	Ecuación	Variable	R <sup>2</sup>
Café (Retoños)	$Y = 0.1955 * X^{1.648}$	X = DAB, cm Y = Biomasa seca, Kg	0.63

(Ecuación 10)

Gráfica 5: Relación entre biomasa total arriba del suelo (Eje Y) y  $DAB^2 \cdot \text{Altura}$  (Eje X) de tocones de los cafetales.



Cuadro 14: Ecuación de biomasa arriba del suelo para *los tocones* de una mata de café.

Especie	Ecuación	Variable	R <sup>2</sup>
Café (TOCONES)	$Y = 0.1124 * X^{0.5435}$	X = $DAB^2 * H$ , cm <sup>2</sup> , m Y = Biomasa seca, Kg	0.70

(Ecuación 11)

Por lo tanto, para obtener el total de la biomasa de cada mata de café se aplicó la Ecuación 10 para cada retoño de la planta y la Ecuación 11 al tocón y la suma de estos componentes resultó en la biomasa del cafeto arriba del suelo. Este total se multiplicó por 1.266 para incluir la biomasa de las raíces y obtener el total de la planta (Ecuación 12). Separar la ecuación de biomasa en tres componentes (tocón, retoños, raíces) fue la única forma de lograr una ecuación con un poder de predicción adecuado.

$$[\sum \text{biomasa hijos (Ecuación 12)} + \text{biomasa tocón (Ecuación 11)}] * 1.266 = \text{Biomasa total cafeto (kg)}$$

(Ecuación 12)

## 4.2 Resultados de parcelas de medición de carbono

### 4.2.1 Resultados por productor o lote de cada sitio evaluado

A continuación se presentan los promedios de los resultados de cada uno de los productores evaluados en las cinco cooperativas. Para el caso de la finca, se presentan los promedios a nivel de lote de la finca. Estos lotes presentan manejos diferentes y por tanto fueron una forma adecuada de estratificar las parcelas de medición. Como medida de dispersión de los resultados se incluye la desviación estándar para cada productor y el error al 95% (intervalo de confianza utilizando una distribución de t) para el total de cada cooperativa.

#### 4.2.1.1 Cooperativa Nuevo Sendero (Chapas, Nueva Santa Rosa, Santa Rosa).

Los resultados de los productores de la cooperativa Nuevo Sendero fueron divididos de acuerdo a su localización en la parte baja (alrededor de Chapas) y la parte alta en la montaña al norte de Chapas (ver Mapa Anexo 2.4). Los productores de zonas bajas mostraron un total de carbono de  $98 \pm 16$  ton C/Ha contra  $73 \pm 10$  ton C/Ha de los productores en zonas altas. La principal diferencia proviene de tener más del doble de carbono en los árboles de sombra en la zona baja.

Cuadro 15: Resultado promedio (x) y desviación estándar (s) de cada uno de los componentes muestreados para productores de la Cooperativa Nuevo Sendero.

Productor		toneladas C / ha					
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	TOTAL
<b>Productores de Zona Baja</b>							
1	x	39	6	0.1	12.1	30	<b>88</b>
	s	3	3	0	5.3	6	<b>7</b>
2	x	63	10	0.1	7.5	17	<b>98</b>
	s	23	3	0	3.7	12	<b>37</b>
3	x	50	4	0	9.9	17	<b>81</b>
	s	21	1	0	3	4	<b>19</b>
5	x	81	6	3.4	2.7	23	<b>115</b>
	s	40	2	1.6	2.6	7	<b>39</b>
<b>Promedio zona baja</b>		<b>62</b>	<b>6</b>	<b>1.2</b>	<b>7.3</b>	<b>21</b>	<b>98</b>
<b>Error 95%</b>		<b>19</b>	<b>2</b>	<b>1.2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>19</b>
<b>Productores de Zona Alta</b>							
4	x	33	11	0.1	12	23	<b>79</b>
	s	18	3	0	6	4	<b>11</b>
6	x	32	3	1.6	5.7	21	<b>63</b>
	s	40	2	1.7	7.2	3	<b>47</b>

7	x	24	15	1.5	4.8	23	<b>68</b>
	s	9	5	2	3.2	4	<b>10</b>
8	x	50	12	0.1	9.5	17	<b>88</b>
	s	4	2	0	0.7	0	<b>1</b>
9	x	56	8	0.2	9.5	26	<b>100</b>
	s	54	4	0.3	5.4	5	<b>54</b>
10	x	26	9	0.3	3.7	18	<b>57</b>
	s	19	2	0.4	2.2	6	<b>25</b>
11	x	11	15	0.5	6	29	<b>62</b>
	s	10	7	1	1.8	4	<b>17</b>
12	x	25	12	0.1	7.3	34	<b>79</b>
	s	14	5	0	1.3	13	<b>5</b>
13	x	26	8	0.3	2.2	37	<b>74</b>
	s	22	4	0.4	2.5	15	<b>21</b>
<b>Promedio zona alta</b>		<b>31</b>	<b>10</b>	<b>0.6</b>	<b>6.1</b>	<b>26</b>	<b>73</b>
<b>Error 95%</b>		<b>9</b>	<b>2</b>	<b>0.3</b>	<b>1.4</b>	<b>3</b>	<b>10</b>
<b>Promedio total</b>		<b>38</b>	<b>9</b>	<b>0.7</b>	<b>6.3</b>	<b>25</b>	<b>79</b>
<b>Error 95%</b>		<b>9</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>1.3</b>	<b>3</b>	<b>9</b>

#### 4.2.1.2 Cooperativa Dos de Julio (Barrio El Centro, Santa Cruz Naranjo, Santa Rosa)

La localización de los productores de la cooperativa Dos de Julio se muestra en el Mapa del Anexo 2.5.

Cuadro 16: Resultado promedio (x) y desviación estándar (s) de cada uno de los componentes muestreados para productores de la Cooperativa Dos de Julio.

Productor		toneladas C / ha					TOTAL
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	
14	x	31	6	0.4	5.7	20	<b>63</b>
	s	0.5	2	0.2	3.8	1	<b>1</b>
15	x	40	4	0.1	7.7	27	<b>79</b>
	s	23	2	0	8.9	5	<b>21</b>
17	x	43	7	0.1	4.2	26	<b>81</b>
	s	39	4	0	5.3	13	<b>35</b>
<b>Promedio total</b>		<b>40</b>	<b>6</b>	<b>0.2</b>	<b>5.9</b>	<b>25</b>	<b>76</b>
<b>Error 95%</b>		<b>19</b>	<b>2</b>	<b>0.1</b>	<b>4.5</b>	<b>6</b>	<b>18</b>

#### 4.2.1.3 Cooperativa Las Brisas (Los Magueyes, Mataquescuintla, Jalapa)

La localización de los productores evaluados en la cooperativa Las Brisas se muestra en el Mapa del Anexo 2.6

Cuadro 17: Resultado promedio (x) y desviación estándar (s) de cada uno de los componentes muestreados para productores de la Cooperativa Las Brisas.

Productor		toneladas C / Ha					
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	TOTAL
18	x	24	9	0.7	4.9	12	<b>51</b>
	s	21	2	0.9	3.6	4	<b>21</b>
19	x	18	11	0.1	11.7	20	<b>61</b>
	s	14	1	0.1	15.0	4	<b>26</b>
20	x	15	7	0.4	3.4	20	<b>46</b>
	s	14	2	0.2	2.1	6	<b>19</b>
22	x	36	7	0.1	1.4	20	<b>64</b>
	s	24	3	0.1	1.2	3	<b>19</b>
23	x	41	8	0.2	2.9	14	<b>67</b>
	s	25	2	0.3	2.0	3	<b>28</b>
<b>Promedio total</b>		<b>27</b>	<b>8</b>	<b>0.3</b>	<b>5.1</b>	<b>18</b>	<b>59</b>
<b>Error 95%</b>		<b>11</b>	<b>1</b>	<b>0.2</b>	<b>4.3</b>	<b>3</b>	<b>11</b>

#### 4.2.1.4 Cooperativa Esperanza del Futuro (El Rodeo, Jalapa, Jalapa)

La localización de los productores evaluados en la cooperativa Esperanza del Futuro se muestra en el Mapa del Anexo 2.7

Cuadro 18: Resultado promedio (x) y desviación estándar (s) de cada uno de los componentes muestreados para productores de la Cooperativa Esperanza del Futuro.

Productor		toneladas C / Ha					
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	TOTAL
25	x	58	5	0.7	3.1	29	<b>97</b>
	s	5	0	0.6	1.8	8	<b>11</b>
26	x	43	15	0.3	4.0	22	<b>84</b>
	s	26	8	0.3	1.7	3	<b>32</b>
27	x	26	10	0.0	3.5	31	<b>70</b>
	s	10	5	0.1	2.7	4	<b>9</b>
28	x	9	8	0.1	1.9	29	<b>47</b>

	s	5	3	0.0	0.5	3	<b>4</b>
29	x	72	5	0.2	3.8	30	<b>111</b>
	s	30	3	0.1	3.9	7	<b>16</b>
<b>Promedio total</b>		<b>41</b>	<b>9</b>	<b>0.3</b>	<b>3.3</b>	<b>28</b>	<b>82</b>
<b>Error 95%</b>		<b>20</b>	<b>4</b>	<b>0.2</b>	<b>1.4</b>	<b>4</b>	<b>19</b>

#### 4.2.1.5 Cooperativa Unión Duraznito (El Duraznito, Jalapa, Jalapa)

La localización de los productores evaluados en la cooperativa Unión Duraznito se muestra en el Mapa del Anexo 2.8

Cuadro 19: Resultado promedio (x) y desviación estándar (s) de cada uno de los componentes muestreados para productores de la Cooperativa Unión Duraznito.

Productor		toneladas C / Ha					
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	TOTAL
30	x	122	6	0.1	7.3	21	<b>156</b>
	s	12	7	0.1	3.0	1	<b>9</b>
32	x	45	9	0.2	4.1	13	<b>72</b>
	s	21	2	0.2	2.8	3	<b>20</b>
33	x	73	7	0.0	10.5	16	<b>106</b>
	s	21	3	0.0	7.2	2	<b>18</b>
34	x	45	9	0.3	4.1	19	<b>77</b>
	s	13	3	0.5	1.7	3	<b>11</b>
<b>Promedio total</b>		<b>64</b>	<b>8</b>	<b>0.2</b>	<b>5.9</b>	<b>17</b>	<b>95</b>
<b>Error 95%</b>		<b>23</b>	<b>2</b>	<b>0.2</b>	<b>2.7</b>	<b>3</b>	<b>24</b>

#### 4.2.1.6 Finca Platanillo (San Rafael Pie de la Cuesta, San Marcos)

La localización de la Finca Platanillo se muestra en el Mapa del Anexo 2.9

Cuadro 20: Resultado promedio (x) y desviación estándar (s) de cada uno de los componentes según los distintos lotes en que se divide la Finca Platanillo.

Lotes de finca		toneladas C / Ha					
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	TOTAL
Norte	x	22	4	0.6	1.5	61	<b>89</b>
	s	15	1	0.5	2.3	14	<b>20</b>
San Antonio	x	33	6	0.1	3.2	73	<b>116</b>
	s	8	5	0.1	3.3	14	<b>22</b>



Platanillo	x	31	3	0.3	0.6	60	<b>95</b>
	s	9	2	0.3	0.6	23	<b>19</b>
Pensamiento	x	47	4	1.4	4.1	55	<b>111</b>
	s	13	1	1.3	0.7	11	<b>12</b>
Barranca	x	7	3	0.6	3.8	54	<b>69</b>
	s	6	2	0.5	2.5	16	<b>18</b>
San Francisco	x	14	3	0.5	1.7	43	<b>62</b>
	s	4	2	0.6	1.6	14	<b>14</b>
<b>Promedio total</b>		<b>25</b>	<b>4</b>	<b>0.6</b>	<b>2.4</b>	<b>58</b>	<b>90</b>
<b>Error 95%</b>		<b>6</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.8</b>	<b>6</b>	<b>9</b>

#### 4.2.2 Comparación entre sitios evaluados

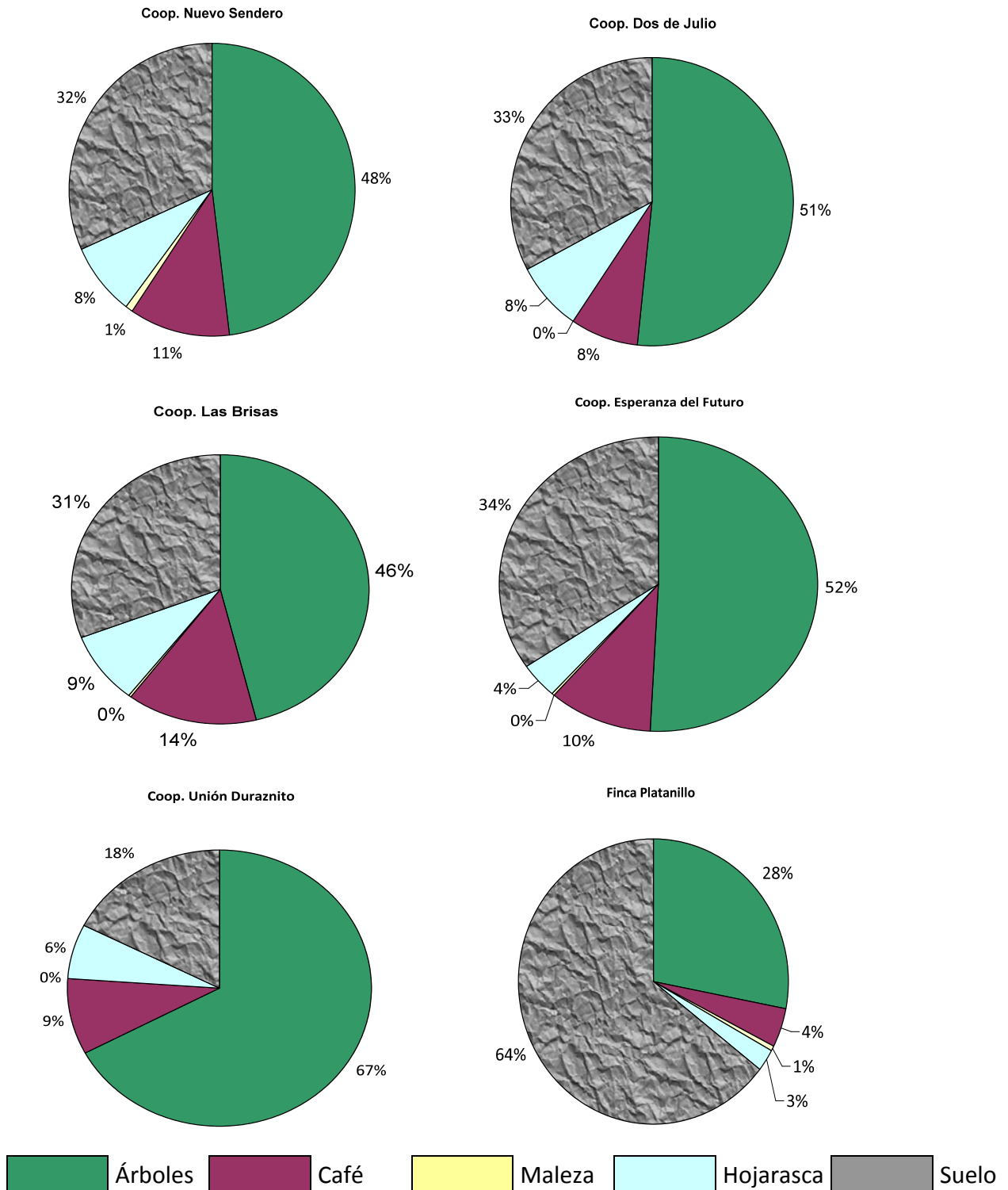
El Cuadro 21 muestra el resumen de los promedios e intervalos de confianza al 95% del contenido de carbono de los diferentes componentes evaluados para los seis sitios de estudio. Estos resultados ya se mostraron en las últimas dos filas de los Cuadros 15 al 20 pero se muestran agrupados en el Cuadro 21 para facilidad de comparación entre sitios.

Cuadro 21: Resumen de resultados del promedio y error al 95% por componente evaluado para los seis sitios de estudio.

Sitio de Estudio		Contenido de carbono ton C/Ha					Total
		Árboles	Café	Maleza	Hojarasca	Suelo	
Nuevo Sendero	<b>Promedio</b>	<b>38</b>	<b>9</b>	<b>0.7</b>	<b>6.3</b>	<b>25</b>	<b>79</b>
	Error 95%	9	1	0.3	1.3	3	9
2 de Julio	<b>Promedio</b>	<b>40</b>	<b>6</b>	<b>0.2</b>	<b>5.9</b>	<b>25</b>	<b>76</b>
	Error 95%	19	2	0.1	4.5	6	18
Las Brisas	<b>Promedio</b>	<b>27</b>	<b>8</b>	<b>0.3</b>	<b>5.1</b>	<b>18</b>	<b>59</b>
	Error 95%	11	1	0.2	4.3	3	11
Esperanza del Futuro	<b>Promedio</b>	<b>41</b>	<b>9</b>	<b>0.3</b>	<b>3.3</b>	<b>28</b>	<b>82</b>
	Error 95%	20	4	0.2	1.4	4	19
Unión Duraznito	<b>Promedio</b>	<b>64</b>	<b>8</b>	<b>0.2</b>	<b>5.9</b>	<b>17</b>	<b>95</b>
	Error 95%	23	2	0.2	2.7	3	24
Finca Platanillo	<b>Promedio</b>	<b>25</b>	<b>4</b>	<b>0.6</b>	<b>2.4</b>	<b>58</b>	<b>90</b>
	Error 95%	6	1	0.3	0.8	6	9

El contenido de carbono porcentual de cada componente del cafetal con respecto al total se muestra para cada sitio evaluado en la Gráfica 6.

Gráfica 6: Porcentaje que representa cada uno de los componentes del cafetal con respecto al carbono total fijado en los sitios evaluados.



### **4.2.3 Comparación entre sitios evaluados y sitios de control**

Los seis sitios evaluados fueron pre-seleccionados por ser proveedores certificados o en proceso de certificación con Rainforest Alliance. Los resultados para los productores de estos seis sitios fueron comparados contra productores que no pertenecen a las cooperativas evaluadas y para el caso de Finca Platanillo contra una finca contigua que no está certificada. Esta comparación permite evaluar si el proceso de certificación resulta en algún cambio significativo en cuanto a la cantidad de carbono fijado en los cafetales. La comparación del promedio total de contenido de carbono por sitio evaluado contra el respectivo sitio control se muestra en el Cuadro 22. Para la cooperativa Nuevo Sendero no fue posible lograr la participación de un productor no asociado. Al no existir un sitio de control directo para esta cooperativa, se incluyó en el Cuadro 22 el promedio de los cuatro sitios de control para las cooperativas restantes evaluadas en la región de Santa Rosa-Jutiapa.

Cuadro 22: Comparación del promedio del contenido de carbono total (ton C/ha) en los sitios muestreados con su respectivo sitio de control.

Cooperativas	Diferencia significativa 95%	Sitios Evaluados		Sitios Control	
		Promedio (ton C/Ha)	Error 95% (ton C/Ha)	Promedio (ton C/Ha)	STDEV (ton C/Ha)
Nuevo Sendero	si	79	9	50	14*
2 de Julio	no	76	18	73	3
Las Brisas	no	59	11	49	7
Esperanza del Futuro	si	82	19	35	4
Unión Duraznito	si	95	24	42	11
Finca Platanillo	si	90	9	111	12*

\*Se reporta el error al 95% para los controles de Nuevo Sendero y Finca Platanillo. El control de Nuevo Sendero corresponde al promedio de los cuatro sitios de control para las cuatro cooperativas restantes ya que no se logró un sitio de control adecuado para dicha cooperativa. Para el control del resto de cooperativas, la variación se expresa como desviación estándar por tenerse únicamente dos repeticiones por sitio.

## 5. DISCUSIÓN

### **5.1 Ecuaciones de Biomasa**

#### **5.1.1 Ecuaciones para árboles de sombra**

Al inicio del estudio se propuso desarrollar ecuaciones de biomasa únicamente para los árboles de Inga y Gravilea por dos razones principales. La primera razón es la cantidad de trabajo involucrado en cortar y pesar un árbol y también el impacto negativo que esto tiene sobre el cafetal. Se buscó minimizar este impacto buscando derribar árboles previamente seleccionados por el productor en cuestión. Estadísticamente, esto crea la limitante de no tener una muestra de árboles seleccionada al azar. También se tiene el problema de no contar con un rango muy amplio de diámetros a cortar ya que usualmente árboles muy grandes (arriba de 40 cm de DBH) crearían mucha perturbación al momento de derribarse.

La segunda razón por la que se decidió trabajar únicamente esas dos especies es que se consideró que la mayoría de árboles de sombra en los sitios de estudio pertenecerían a esas especies. Esto fue parcialmente cierto ya que en efecto las Ingas dominaron los árboles de sombra. De un total de 1,409 árboles medidos, 609 fueron de Inga (43%) y solo 79 fueron de Gravilea (5.6%). Esto indica que estas dos especies cubrieron el 49% de los árboles de sombra. Otras especies de importancia fueron el banano (15%) y otros frutales (11%), pero en general, la sombra encontrada en los sitios de estudios presentó una diversidad de especies mucho más alta de lo esperado. De hecho, la base de datos recolectada indica un total de 78 especies con diferente nombre común y 5 especies para las cuales no se tuvo un nombre común. A pesar de que varios árboles con diferente nombre común en diferentes lugares puedan pertenecer a la misma especie, la cantidad total de especies todavía resulta ser bastante alta. Esto implica que será importante desarrollar más ecuaciones de biomasa locales para otras especies de amplio uso en sombra de cafetales de Guatemala, por ejemplo, el banano. Para esta especie existe una ecuación derivada por Márquez (1997) en su estudio de tesis en Guatemala pero la ecuación tiene aplicación muy limitada porque solo se trabajó con la altura total de la planta y no con el diámetro. Por esta razón, en el presente estudio se utilizó la ecuación descrita en el Cuadro 6 para banano que es una ecuación desarrollada en Indonesia.

Las ecuaciones de biomasa desarrolladas en este estudio son válidas para el rango de diámetros de los árboles que fueron cortados para desarrollarlas (29 cm para Inga y 31 cm para Gravilea). Fuera de este rango, se decidió usar la misma ecuación genérica de la literatura usada para el resto de especies latifoliadas (Cuadro 6). La selección de la mejor ecuación publicada a usar es un tema delicado porque implica usar un modelo desarrollado para un país o condiciones diferentes a los sistemas medidos en este estudio. Las ecuaciones publicadas son varias y usualmente se agrupan para diferentes tipos de bosques dependiendo su precipitación. La mayoría de ecuaciones han sido generadas o

compiladas por Sandra Brown y otros investigadores del Instituto Winrock (Pearson et al., 2005).

Para decidir sobre la mejor ecuación de biomasa a usar, la primera decisión fue sobre el tipo de bosque al que pueden pertenecer los árboles de sombra en los sitios de este estudio. Las opciones consideradas incluyeron bosque seco (900-1,500 mm de lluvia anual) y bosque húmedo (1,500-4,000 mm) y para cada tipo se tenían varias opciones de ecuaciones publicadas en diferentes años. Se decidió usar los datos de los árboles cortados y pesados para probar qué ecuación de la literatura se ajustaba mejor a esos números. Este ajuste fue evaluado mediante una regresión entre los datos de biomasa estimados por el modelo y los datos reales de campo. Una pendiente cercana a 1 indica en este caso un mejor ajuste. Con este análisis, se encontró que la ecuación publicada para un bosque seco (900-1,500 mm de lluvia anual) por Brown, 1997 fue la que mejor se ajustó a los datos reales de biomasa medidos para Inga y Gravilea. Se encontró que en promedio, este modelo subestima la cantidad de biomasa para ambas especies, pero aun así fue el que mejor ajuste mostró (pendiente de 0.79 para Inga y 0.67 para Gravilea). El hecho que este modelo subestime la biomasa de los árboles pesados indica que el carbono final reportado para los árboles de sombra representa un límite inferior del carbono real presente que nunca puede conocerse a menos que se cortaran todos los árboles.

### **5.1.2 Ecuaciones para plantas de café**

Desarrollar la ecuación de biomasa para la planta de café fue un reto más grande. Esto se esperaba ya de experiencias previas ya que Márquez (1997), por ejemplo, no logró desarrollar una ecuación y simplemente utilizó el peso promedio de 15 plantas cortadas y pesadas. El peso promedio de las plantas cortadas por Márquez fue de 1.5 Kg (Márquez, comunicación personal) que es menos de la mitad del peso promedio encontrado en este estudio (3.3 Kg). Naturalmente, la biomasa y el carbono del cafeto dependerá fuertemente del manejo, el tiempo de poda y la edad de la planta.

Otro intento de desarrollar una ecuación de biomasa para café en Centroamérica fue el de Ávila (2,000), que en su trabajo de tesis en Costa Rica reportó una alta variabilidad en sus datos y un  $R^2$  en su regresión de apenas 0.28. Damaris Suárez (2002) tuvo mejor suerte en su trabajo de tesis también de CATIE pero desarrollado en Nicaragua. Utilizando dos variables, diámetro del tocón y altura de la planta, desarrolló una ecuación con un  $R^2$  de 0.89. Una ecuación similar fue posteriormente presentada en una publicación derivada del mismo estudio (Segura et al., 2006) con un  $R^2$  de 0.94. Los autores si advierten que la ecuación debe ser validada localmente debido a diferentes características y arquitecturas de las plantas de las plantas de café. Las plantas usadas para desarrollar esta ecuación eran plantas sin proceso de recepa en su mayoría y de tamaño pequeño (la más pesada fue de 2.8 Kg de peso). En el caso de un café recepado, la ecuación aplica a una planta individual retoñada.

Esto indica que la ecuación de Suárez (2002) debe compararse con la Ecuación 10 del presente estudio y no puede aplicarse para la biomasa total de una planta recepada con varios retoños. Al aplicar la ecuación de Suárez a los pesos de las plantas de café cortadas en este estudio, se encontró que se subestimaba la biomasa en un 53% en promedio. La ecuación desarrollada en este estudio también subestima la biomasa de las plantas pero en un 31%. Esta subestimación ocurre principalmente en las plantas grandes con diámetros en la base arriba de 4 cm.

Es importante enfatizar que en su ecuación Suárez no incluyó biomasa del tocón en caso de plantas recepadas; tampoco incluyó información de raíces. La inclusión de estos dos componentes hace que la Ecuación 12 del presente estudio sea más aproximada a la realidad de los cafetales de Guatemala.

## **5.2 Resultados de estimaciones de carbono**

Las ecuaciones de biomasa son el eslabón más débil en la cadena de cálculos para obtener el carbono fijado en un sistema y por tanto el error en esas ecuaciones usualmente aporta la mayor incertidumbre al resultado final. La combinación de ecuaciones generadas en este estudio y las usadas de la literatura resultan en una subestimación de la biomasa de los árboles y cafetales. Se prefirió esto a usar ecuaciones con una sobreestimación de biomasa. Por lo tanto los resultados de contenido de carbono reportado para los diferentes sitios deben interpretarse como el límite inferior de la cantidad de carbono fijado en los cafetales medidos.

### **5.2.1 Variabilidad entre productores o lotes de cada cooperativa**

La primera pregunta que se puede contestar con la información recolectada es ¿qué tanto varían en cuanto a carbono fijado los cafetales que pertenecen a una misma cooperativa? Se puede plantear la hipótesis de que los productores de una misma cooperativa usan prácticas similares de manejo de la plantación y por tanto se espera que no haya diferencia entre ellos.

Para conocer la variabilidad existente entre los productores de cada cooperativa se llevó a cabo un análisis de varianza de una vía con los datos de densidad de carbono (ton C/Ha.) para los componentes de árboles de sombra, cafetales, suelo y total de los productores individuales (datos de Cuadros 15 al 19). Los componentes de maleza y hojarasca no se probaron individualmente, pero están incluidos en el total. En todos los análisis estadísticos aquí discutidos se utilizó un grado de confianza del 95%.

No se encontró diferencia significativa entre los productores de Nuevo Sendero (zona baja), Dos de Julio, Las Brisas y Esperanza del Futuro. Con esto se podría inferir que cuando los productores se incorporan a estas cooperativas, la mayoría adopta prácticas de manejo o técnicas similares que hace que las plantaciones de café en general tengan un mayor grado de homogeneidad.

Sin embargo, esto no siempre es cierto, ya que los productores de la Cooperativa Unión Duraznito si mostraron diferencias significativas en cuanto a carbono en árboles de sombra, suelo y carbono total. En esta cooperativa un productor en particular mostró valores inusualmente altos (arriba de 100 ton C/ha) en los árboles de sombra. El suelo también mostró variaciones significativas, aunque aquí el rango de valores no es tan amplio, de 13 a 21 ton C/ha.

Aunque en general no se encontraron diferencias significativas entre productores de una misma cooperativa, si se encontraron algunos productores con valores inusualmente bajos en cuanto al carbono en árboles de sombra. Esto ocurrió principalmente en caficultores que habían podado recientemente su sombra o que tenían en su mayoría plantas no maderables como banano, que tienen mucho menos carbono que los árboles con madera.

Una diferencia muy interesante a resaltar entre productores de una misma cooperativa se encontró en la cooperativa Nuevo Sendero, donde los productores localizados en zonas bajas aledañas al poblado mostraron un manejo de sombra y de cafeto muy diferente a los productores en la montaña. En zona baja con menos humedad presente, la sombra se mantiene mucho más densa y el carbono en ese componente es prácticamente el doble comparado con los productores en la montaña (62 vs. 31 ton C/ha.). Por el contrario, en la zona alta, la planta del café se mantiene más frondosa y resulta en un carbono más alto (10 vs. 6 ton C/ha.). En general, los productores de zona baja con un clima más seco resultan con más carbono total (98 vs. 73 ton C/ha.).

### **5.2.2 Variabilidad entre lotes de la Finca Platanillo**

La influencia de la humedad o lluvia en la cantidad de sombra también es muy evidente en los resultados para las Fincas en San Marcos donde encontramos que Platanillo fue el sitio con menor cantidad de carbono en árboles de sombra. Es de esperar que esos sitios tengan sombra más abierta ya que reciben tres o cuatro veces más lluvia que los sitios de oriente.

Aun entre los lotes de la misma finca se encontraron diferencias significativas para la cantidad de carbono en árboles de sombra (Cuadro 20). Esto pareciera ser el resultado de diferentes micro-climas que se presentan en la finca, teniendo lugares más húmedos como las barrancas (sitio con menor cantidad de carbono en árboles), pero también el resultado de diferentes historiales de manejo de la sombra o de la edad del cafetal.

Las diferencias en la cantidad de carbono en árboles de sombra hace que el carbono total entre lotes de la finca también sea significativamente diferente, variando desde 62 hasta 116 ton C/ha. El resto de los componentes si muestra un manejo más uniforme y no presenta diferencias significativas de carbono fijado.

### 5.2.3 Variabilidad entre sitios evaluados

La siguiente pregunta a contestar luego de analizar los productores individuales fue ¿qué tanto varían los resultados entre sitios? Es decir, ¿se puede hablar de un contenido de carbono que aplique a todos los cafetales evaluados, y eventualmente a todos los cafetales del país?

Esta pregunta se contestó con un análisis de varianza de los datos del Cuadro 21 que muestra los promedios globales para cada sitio evaluado. El análisis mostró que solo el suelo varía significativamente entre los sitios en cuanto a su contenido de carbono. Esta variación es de esperarse ya que el carbono en el suelo no es únicamente dependiente del manejo, sino también de las características geológicas y morfológicas del sitio. Influye también el tiempo en el que el suelo ha estado bajo cultivo.

El Cuadro 23 resume la comparación múltiple de las medias de carbono en suelo y muestra que Finca Platanillo tiene una media significativamente más alta que el resto de los sitios. Esto es de esperar debido a los suelos volcánicos y la alta precipitación de esa región que resulta en un bosque latifoliado húmedo de alta productividad como vegetación nativa del área. Podemos mencionar también que la finca Platanillo ha disminuido la aplicación de fertilizantes químicos con el tiempo y a su vez ha estado incorporando materia orgánica como abono en los cafetales, compuesta por lombricompost y pulpa de macadamia. El Cuadro 23 también nos muestra que los suelos de Las Brisas y Unión Duraznito son significativamente más bajos en carbono, sugiriendo suelos más pobres para esa región.

Cuadro 23: Comparación múltiple de medias del carbono en suelos para los seis sitios evaluados. Las medias de los sitios con los recuadros sombreados no muestran diferencias significativas.

Finca Platanillo	
Esperanza del Futuro	
2 de Julio	
Nuevo Sendero	
Las Brisas	
Unión Duraznito	

Los sitios también mostraron una diferencia marginalmente significativa al comparar las medias del carbono en los árboles de sombra. Esto también es de esperarse derivado de la discusión que se presentó en los incisos anteriores referente a la influencia de la humedad y lluvia en la cantidad de sombra en los cafetales. La significancia de las diferencias no fue tan alta porque la variabilidad entre productores resulta en un error de estimación más alto para cada una de las medias calculadas.



El Cuadro 24 muestra el resultado de la comparación múltiple de medias para el carbono en árboles. Unión Duraznito es la cooperativa con más carbono en árboles de sombra y Finca Platanillo el sitio con menos carbono en este componente. Es interesante resaltar que el carbono en suelos es exactamente opuesto para estos dos sitios, lo que resulta en un carbono total muy similar para ambos y sin diferencias significativas.

Cuadro 24: Comparación múltiple de medias del carbono en árboles de sombra para los seis sitios evaluados. Las medias de los sitios con los recuadros sombreados no muestran diferencias significativas.

Unión Duraznito	
Esperanza del Futuro	
2 de Julio	
Nuevo Sendero	
Las Brisas	
Finca Platanillo	

Una observación final interesante al comparar los componentes individuales es el carbono en los cafetos de La Finca Platanillo. Ese sitio mostró una cantidad significativamente más baja en este componente comparado con las cooperativas. Esto sugiere que en ese sitio los cafetales son más jóvenes o se mantiene un régimen de poda más estricto.

Ninguno de los sitios resultó ser significativamente diferente en cuanto al carbono total. Esto sugiere que si se puede hablar de un carbono promedio global para todos los sitios aunque ese promedio global resulte de diferencias significativas entre componentes, principalmente suelo y árboles de sombra. El promedio global de todos los sitios evaluados para el carbono total fijado es de  $80.5 \pm 5.2$  ton C/Ha que resulta de 135 parcelas de medición en 6 sitios diferentes. Por supuesto faltan más mediciones en otras regiones del país antes de poder hablar de un promedio a nivel nacional. Es evidente de este estudio que la lluvia influye mucho en la cantidad de carbono almacenado en los cafetales; asimismo, los suelos pueden tener cantidades de carbono muy diferentes dependiendo el origen geológico y el tiempo y tipo de manejo que haya recibido.

#### **5.2.4 Comparación con sitios control**

La tercera pregunta a contestar es: ¿influye en la cantidad de carbono almacenado la pertenencia o no en un grupo certificado? Esta pregunta está respondida para este estudio en el Cuadro 22 que muestra las comparaciones con los sitios de control, es decir, sitios que no pertenecen a las cooperativas en proceso de certificación.

Cuatro de los seis sitios mostraron diferencias significativas contra sus respectivos controles, incluyendo Nuevo Sendero que no tuvo un control directo sino el promedio del resto de controles para las otras cooperativas. El sitio Las Brisas si mostró más carbono que su control en todos los componentes evaluados y en el total, pero la diferencia no fue

significativa debido a la alta variabilidad de las medias. En el caso de 2 de Julio, el control mostró prácticamente la misma cantidad de carbono que la cooperativa.

La comparación contra un control se hizo difícil por la dificultad de encontrar un productor adecuado que estuviera anuente a participar en el estudio. También se hace difícil la definición de qué es un control adecuado ya que muchos productores pueden tener prácticas similares por estar en la misma región aunque no estén asociados a una misma cooperativa. Finalmente, se tienen una limitación estadística al hacer la comparación porque los sitios control fueron evaluados con únicamente dos parcelas por sitio (excepto la Finca Australia que si tuvo 10 parcelas) lo que hace que los grados de libertad sean muy bajos al momento de hacer la prueba de t para compara medias. Esto hace que solo diferencias muy amplias resulten significativas al hacer una comparación.

El caso de Finca Platanillo es interesante porque si mostró diferencia significativa contra su control, pero fue el control el sitio con más carbono. Esto parece ser el resultado de un menor nivel de manejo de sombra y cafetales en esa finca control, lo que resulta en una menor productividad de café por área pero en un mayor contenido de carbono almacenado al tener sombra y cafetos más frondosos. La Finca control también mostró una cantidad de carbono en suelo mucho más alta que Finca Platanillo (72 vs. 58 ton C/Ha) y fue esta diferencia en el carbono del suelo lo que influyó mayormente en la diferencia en el carbono total. Esto sugiere que un manejo adecuado del cafetal de acuerdo a las condiciones climáticas y edáficas del lugar no necesariamente resultará en un mayor contenido de carbono almacenado especialmente si es el carbono en el suelo el componente dominante del sistema.

#### **5.2.5 Comparación con otros resultados publicados para la región.**

La pregunta final que se puede hacer es ¿cómo se comparan estos resultados con otros estudios similares realizados en la región? Para esto se tiene que recurrir a estudios realizados principalmente en Chiapas por estudiantes e investigadores de ECOSUR y estudios en Nicaragua y Costa Rica realizados en CATIE. En Guatemala se tiene una experiencia previa realizada por ANACAFE donde se evaluaron sitios en las diferentes regionales del país.

La comparación con otros resultados publicados se presenta en el Cuadro 25. La comparación más directa es contra el estudio de ANACAFÉ (1998) que presenta el promedio para las siete regiones del país. Una comparación más específica se puede hacer con los resultados de las regiones específicas donde se encuentran los sitios de estudio. La Finca Platanillo corresponde a la Región I donde ANACAFÉ (1998) reporta 64 ton C/Ha sustancialmente más bajo que las 90 ton C/Ha reportadas para Platanillo en este estudio. El resto de cooperativas pertenecen a la Región IV donde ANACAFÉ (1998) reporta 111 ton C/Ha, el más alto de todas las regiones. Este valor es sustancialmente más alto que el promedio reportado para cualquiera de las cinco cooperativas evaluadas con la posible excepción de Unión Duraznito que reporta  $95 \pm 24$  ton C/Ha. Los altos valores reportados en el estudio de 1998 resultan principalmente de un alto contenido de

carbono en los suelos, 63 ton C/Ha para la región IV. En nuestro estudio, todos los suelos de las cooperativas mostraron en promedio menos de 30 ton C/Ha, menos de la mitad de lo reportado en 1998. Habrá que hacer una evaluación más detallada de la razón de esta diferencia sustancial.

El promedio reportado por ANACAFÉ (1998) a nivel nacional no difiere estadísticamente del promedio reportado en este informe. De cualquier manera, es necesario revisar minuciosamente los cálculos de ambos estudios para asegurarse la comparabilidad de los mismos.

Cuadro 25: Comparación de los resultados de este estudio con otros resultados publicados para la región.

Referencia	Tipo SAF	Densidad de carbono (ton C/Ha)					
		Árboles	Café	Hoja-rasca	Herbá-ceas	Suelo	Total
Soto-Pinto et al., 2010	Café sombra diversificada Chiapas	39.4*		16.5		64.8	120.7
Suárez, 2002	Café Productivo sombra diversificada, Nicaragua	9.6	5.9	6.8		148.5	166.3
Mena, 2008	Sistema de café con Laurel, Costa Rica	22.6**	2.3	1.4	0.3	89.4	107
Márquez, 1997	Cafetales tecnificados	32.9***	0.1	2.5	0.07	15.3	50.81
ANACAFÉ, 1998	Café bajo manejo, promedio nacional	25.7**		6.2		60.8	91.6 (±8.3)
<b>Este Estudio</b> promedio (±error 95%)	135 parcelas de café con sombra diversificada, sello RA	36.1 (±4.9)	7.3 (±0.8)	4.9 (±0.8)	0.5 (±0.2)	31.8 (±3.2)	80.5 (±5.2)

\* Materia viva: toma en cuenta árboles y café

\*\* Incluye raíces

\*\*\* abarca las dos anteriores

La comparación con otros sitios de la región muestra en general niveles más bajos de carbono fijado para los sitios de este estudio. La principal diferencia ocurre en los suelos ya que el resto de los componentes muestran niveles de carbono muy similares a los reportados en este estudio. Particularmente los suelos de Nicaragua resultaron ser muy ricos en carbono (Suárez, 2002). Las diferencias de los resultados para suelos puede deberse a diferencias en metodologías, particularmente por el uso del analizador de carbono en este estudio que es una técnica mucho más exacta y precisa. También se tiene que considerar la alta variabilidad presentada por los suelos debido a factores de tipo geológico, climático, morfológico y de historial de uso.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En promedio, los sitios estudiados muestran una cantidad de carbono fijado de 80 ton C/Ha. Este valor es más bajo que las 92 ton C/Ha evaluadas en el estudio previo de ANACAFÉ (1998). La diferencia no es estadísticamente significativa debido a la incertidumbre de ambos resultados (5 ton C/Ha para este estudio y 8 ton C/Ha para ANACAFÉ, 1998). La comparación también debe hacerse de una forma más minuciosa asegurándose que ambos estudios usen modelos alométricos (ecuaciones de biomasa) compatibles y variables similares para valores estimados como cantidad de raíces.

La cantidad de carbono reportada en los cafetales medidos es ligeramente inferior al carbono de un bosque natural de pino-encino que tiene alrededor de 100 ton C/Ha para el altiplano occidental de Guatemala (Castellanos et al., 2007). Incluso varios de los cafetales individuales medidos sobrepasan este valor de 100 ton C/Ha. Esto indica que, como se ha resaltado en el pasado, los servicios ambientales de un cafetal con sombra son similares a los de un bosque natural. Por otro lado, es importante recordar que muchos cafetales crecen en regiones donde la vegetación original era un bosque latifoliado de tipo nuboso y estos bosques pueden presentar cantidades de carbono incluso arriba de las 200 ton C/Ha (Márquez et al., 2000). Será importante evaluar bosques naturales en sitios cercanos a los sitios de este estudio para hacer una mejor estimación de cuánto carbono permanece almacenado al cambiar el uso de la tierra a caficultura.

El contenido de carbono total no fue estadísticamente diferente entre los seis sitios estudiados, esto en parte por la alta variabilidad mostrada en la mayoría de las medias estimadas. Esta variabilidad de los resultados puede reducirse ampliando la cantidad de parcelas muestreadas en cada sitio, aunque este proceso está limitado por la variabilidad real existente entre los cafetales debido a los diferentes manejos que se aplican. La poca variación del carbono total de los seis sitios se debió en parte a que variaciones internas de los diferentes componentes medidos se cancelaron. El caso más prominente es el de la cooperativa con más carbono en árboles de sombra que tiene la menor cantidad de carbono en el suelo resultando en un carbono total muy similar a la Finca Platanillo que tuvo muy poco carbono en sombra, debido a la alta humedad del sitio, pero mucho carbono en suelos. Es importante entonces evaluar no solo el total de carbono fijado, sino también la forma en que el carbono está distribuido en los diferentes componentes ya que en algunos sitios serán los árboles de sombra los que dominen, y en otros el suelo (ver Gráfica 6).

La estimación del carbono fijado depende grandemente de las ecuaciones de biomasa utilizadas. En este tema se hacen dos recomendaciones puntuales: la primera es aumentar la cantidad de ecuaciones locales disponibles mediante el corte y medición de más árboles de diferentes tamaños y especies. Es particularmente importante buscar agregar más árboles de diámetros grandes para reducir la incertidumbre de la ecuación en la región de valores altos.

Aunque se generen o mejoren las ecuaciones locales, siempre será necesario utilizar ecuaciones publicadas para otros sitios. En este sentido, la segunda recomendación es la de verificar en la medida de lo posible que la ecuación utilizada si aplique al ecosistema en cuestión. Esto debe hacerse utilizando los árboles y plantas cortadas y pesadas en campo. Este estudio muestra el ejemplo claro de la ecuación de café publicada para Nicaragua (Suárez, 2002) que muestra una correlación muy alta para los datos de campo usados en su generación, pero que al momento de aplicarla a los cafetos de Guatemala la ecuación mostró una subestimación muy alta de la biomasa real.

Una de las preguntas principales que este estudio quería contestar es si el hecho de tener una certificación ambiental puede resultar en más carbono almacenado en el cafetal. Desafortunadamente, esta respuesta no pudo ser contestada completamente por varias razones. La primera es que se tuvo mucha dificultad en localizar sitios adecuados de comparación de productores no certificados. También se tuvo la limitante que se completaron pocas parcelas en los sitios de control identificados. Esta segunda limitante es fácil de corregir y la recomendación es entonces realizar más parcelas de medición en sitios de control

La tercera razón para no contestar directamente esta pregunta esta relacionada con el hecho de que el contenido de carbono del cafetal esta directamente relacionado con la frondosidad de las plantas del sistema, pero esta variable depende fuertemente de las condiciones climáticas de la región. Un cafetal muy bien manejado para una región muy húmeda deberá tener una sombra muy abierta y por tanto una cantidad de carbono almacenado más baja. Un ejemplo claro en este estudio es la Finca Platanillo que está certificada pero presenta muy poco carbono en los árboles de sombra y los cafetales. Será importante entonces tomar en cuenta las condiciones de clima y manejo imperantes en la región para poder establecer un estándar adecuado de cuanto carbono debe mostrar un cafetal para poder ser considerado amigable con el clima.

Finalmente, los resultados de este estudio muestran que es necesario hacer más mediciones en otros sitios que tengan condiciones climáticas y edáficas diferentes para lograr una mejor estimación de cuanto carbono hay almacenado en los cafetales del país.

## 7. LITERATURA CITADA

ANACAFE. 1998. Cuantificación Estimada del Dióxido de Carbono Fijado por el Agrosistema Café en Guatemala. 9º Congreso de Caficultura Nacional, publicado por la Asociación Nacional del Café de Guatemala, ANACAFÉ.

Ávila, G. 2000. Fijación y Almacenamiento de Carbono en Sistemas de Café Bajo Sombra, Café a Pleno Sol, Sistemas Silvopastoriles y Pasturas a Pleno Sol. Tesis de Maestría, CATIE.

Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Forestry Paper 134, FAO.

Castellanos, E. C. Bonilla y A. Quilo. 2007. Cuantificación de Carbono Capturado por Bosques Comunales y Municipales de Cuatro Municipios en los Departamentos de San Marcos y Huehuetenango. Informe final Proyecto AGROCYT No. 051-2004 realizado en colaboración con CARE.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Publicado por el Institute for Global Environmental Strategies (IGES) para el IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme.

Jenkins, J., D. Chojnacky, L. Heath y R. Birdsey. 2003. National-scale biomass estimation for United States tree species. *Forest Science* 49:12-35

Márquez, L. 1997. Validación de Campo de los Métodos del Instituto Winrock para el Establecimiento de Parcelas Permanentes de Muestreo para Cuantificar Carbono en Sistemas Agroforestales. Tesis de licenciatura en Ingeniería Forestal. Universidad del Valle de Guatemala.

Márquez, L., A. Roy y E. Castellanos. 2000. Elementos Técnicos para Inventarios de Carbono en Uso del Suelo. Publicación de Fundación Solar con apoyo del Proyecto PROARCA/CAPAS y HIVOS.

Mena, V. 2008. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor Biológico Volcánico Central-Talamanca, Costa Rica. Tesis de Maestría en Agroforestería Tropical, CATIE.

Pearson, T. S. Walker y S. Brown. 2005. Sourcebook for Land Use, Land-Use Change and Forestry Projects. Winrock International.

Segura, M., M. Kanninen y D. Suárez. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Syst.* 68:143-150.

Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jimenez, B. De Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Syst.* 78:39-51.

Suárez, D. 2002. Cuantificación y Valoración Económica del Servicio Ambiental Almacenamiento de Carbono en Sistemas Agroforestales de Café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Tesis de Maestría, CATIE.

van Noordwijk, M., S. Rahayu, K. Hairiah, Y. Wulan, A. Farida y B. Verbist. 2002. Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China C* 45 supp.: 75-86

## 8. ANEXOS