

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

ESTIMACIÓN DE BIOMASA SUBTERRÁNEA Y CARBONO EN LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN; ORGÁNICA Y MONOCULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao L.*) EN LA ZONA DE ALTO BENI, BOLIVIA.

FANNY EULALIA SUXO HINOJOSA

**La Paz – Bolivia
2014**

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE AGRONOMIA
CARRERA DE INGENIERIA AGRONOMICA**

**ESTIMACIÓN DE BIOMASA SUBTERRÁNEA Y CARBONO EN LOS SISTEMAS DE
PRODUCCION; ORGANICA Y MONOCULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao L.*)
EN LA ZONA DE ALTO BENI, BOLIVIA.**

*Tesis de grado presentado como Requisito
Parcial para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo*

Presentada por:

FANNY EULALIA SUXO HINOJOSA

Asesores:

Ing. Ph.D. David Cruz Choque

Ing. Msc. René Terán Céspedes

Tribunal Revisor:

Ing. Msc. Ramiro Mendoza Nogales

Dr. Abul Kalam Kurban

Ing. Fernando Manzaneda Delgado

APROBADA

Presidente Tribunal Examinador

Dedicatoria

Al pilar fundamental en mi vida Dios padre creador de toda la maravillosa tierra, por cuidarnos y amarnos siempre, permitiendo que Jesucristo nuestro salvador con su infinito amor uniera nuestro corazón con el nuevamente.

A mis amados padres Mateo y Juana, pilares fundamentales en mi vida, gracias a su infinito amor y cuidado condujeron mi vida hacia un camino de mucha dicha, amor y felicidad.

A mis queridísimos hermanos Jhovana, Franz, Milenka, Blanca y a los que ahora son parte de mi familia Rosario y Rómulo, por el apoyo incondicional y que a pesar de cualquier dificultad siempre se mantienen firmes, haciendo que el amor que nos une nos mantenga fuertes siempre, con la bendición de Dios.

A mis queridos y muy amados sobrinos Naomi y Cristhian, por su incomparable alegría y amor, haciendo que los obstáculos se conviertan en oportunidades por que ellos hacen que vea la vida con otros ojos.

Agradecimiento

A Dios por darnos vida eterna y la prueba de amor mas grande, enviando a Jesús para salvarnos y cuidarnos siempre ante cualquier situación, permitiendo así que seamos fuertes ante las adversidades, todo eso gracias a su infinito amor.

A mi familia que con mucho amor, cariño y sobretodo comprensión me fortalecieron y me dieron fuerzas para seguir adelante. A todos ellos les estoy eternamente agradecida, pidiendo a Dios los bendiga siempre en todo momento.

A mis asesores Ing. Ph.D. David Cruz y Ing. Msc. René Terán Céspedes por su loable y categórico asesoramiento para el desarrollo de esta investigación. Además de compartir sus conocimientos y dedicar su valioso tiempo para el desarrollo y culminación de la presente investigación.

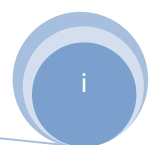
A los miembros del tribunal revisor Ing. Msc. Ramiro Mendoza Nogales, Dr. Abul Kalam Kurban e Ing. Fernando Manzaneda Delgado por las sugerencias y recomendaciones en la redacción final del documento.

A los catedráticos de la Facultad de Agronomía de la universidad Mayor de San Andrés por la eficiente enseñanza impartida.

A mis grandes amigos y compañeros de estudio, Erland M., Armando Ch., Gary B., Aydde C., Melani M., Gladys A., Alejandra M., David P., Juan C. M., Hugo H., Aurelia Q., Verónica E., Margarita E., Vilma A., Maria Isabel P., Isabel y Mauge, y a todos mis demás amigos por toda su ami

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	<i>i</i>
ÍNDICE DE CUADROS.....	<i>v</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<i>vii</i>
ÍNDICE DE ANEXOS.....	<i>x</i>
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	<i>xi</i>
RESUMEN.....	<i>xii</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo general.....	5
2.2. Objetivos específicos	5
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. Cambio Climático.....	6
3.1.1. Consecuencias del cambio climático	6
3.1.2. Cambio climático en Bolivia	10
3.1.3. Causas del cambio climático.....	11
3.2. Ciclo del Carbono	12
3.3. Sumideros de Carbono	14
3.4. Fijación del Dióxido de Carbono	14
3.4.1. Captura de Carbono en Plantas.....	14
3.4.2. Captura de Carbono en suelos	17
3.5. Sistemas de Producción	18
3.6. Producción Orgánica	18
3.6.1. Producción Orgánica en la Región de Alto Beni	19



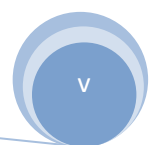
3.6.2. Descripción y manejo del cacao	20
3.6.2.1. <i>Monocultivo</i>	20
3.6.2.2. <i>Sistema Agroforestal Simple</i>	21
3.6.2.3. <i>Sistema Agroforestal Sucesional</i>	23
3.7. Importancia de la Agroforesteria en los flujos de carbono	28
3.8. Biomasa.....	29
3.8.1. Biomasa Subterránea	30
3.8.2. Medición de biomasa subterránea	31
3.8.2.1. Biomasa de raíces arbóreas	32
3.8.2.2. Biomasa de raíces de vegetación no arbórea	33
3.9. Importancia de las raíces	33
3.10. Medición del carbono almacenado.....	34
IV. LOCALIZACIÓN	35
4.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio	35
4.2. Características climáticas	36
4.3. Vegetación.....	36
4.4. Geología y suelos	37
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
5.1. Materiales	38
5.1.1. De campo	38
5.1.2. Equipos	38
5.1.3. De gabinete	38
5.1.4. De laboratorio	39
5.2. Métodos	39
5.2.1. Diseño del muestreo.....	39

5.2.2. Selección de parcelas.....	39
5.2.2.1 Sistemas a ser comparados.....	40
5.2.3. Diseño e Instalación de las Parcelas de Muestreo.....	41
5.2.4. Toma de datos.....	44
5.2.5. Muestreos de Suelos para el análisis de carbono Orgánico.....	44
5.2.6. Análisis de los datos.....	44
5.2.6.1. Estimación de la biomasa subterránea y carbono.....	45
5.2.6.1.1. Biomasa subterránea (raíces).....	45
5.2.6.1.2. Estimación del contenido de carbono.....	48
5.2.6.1.3. Cálculo del carbono equivalente (CO ₂ e).....	48
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
6.1. Estimación del contenido de biomasa radical en los diferentes sistemas de producción Orgánica de cacao.....	49
6.1.1. Biomasa de raíces finas (diámetro < 5mm).....	49
6.1.2. Biomasa de raíces gruesas (diámetro ≥ 5mm).....	51
6.1.3. Biomasa Subterránea total en las diferentes parcelas.....	52
6.1.3.1 Monocultivo.....	52
6.1.3.2 Sistema Agroforestal.....	52
6.1.3.3 Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS).....	53
6.1.3.4 Interacción entre sistemas.....	53
6.2. Estimación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa subterránea (SOC).....	56
6.2.1. Monocultivo.....	56
6.2.2. Sistema Agroforestal (SAF).....	56
6.2.3. Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS).....	57
6.2.4 Interacción de los Sistemas.....	57

6.3. Estimación de la cantidad de CO ₂ capturado por los diferentes sistemas de producción Orgánica de cacao (Theobroma cacao L.).....	61
VII. CONCLUSIONES.....	63
VIII. RECOMENDACIONES.....	65
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	66

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Descripción de la cantidad de especies y biomasa de raíz fina en promedio 0-30cm de profundidad en los sistemas de producción Orgánica de cacao.	49
Cuadro 2. Biomasa de raíces gruesas de las parcelas del Sistema de Monocultivo.....	51
Cuadro 3. Biomasa Subterránea del Sistema de Monocultivo	52
Cuadro 4. Biomasa Subterránea del Sistema Agroforestal.....	52
Cuadro 5. Biomasa Subterránea del Sistema Agroforestal Sucesional.....	53
Cuadro 6. Análisis de varianza para la biomasa subterránea de Sistemas de Producción Orgánica de cacao.....	53
Cuadro 7. Pruebas de comparación de medias para la biomasa subterránea de sistemas agroforestales método Duncan (alfa=0.05).....	54
Cuadro 8. Pruebas de comparación de medias para la biomasa subterránea de sistemas agroforestales método Duncan (alfa=0.05).....	54
Cuadro 9. Carbono total Subterráneo del Sistema de Monocultivo	56
Cuadro 10. Carbono Subterráneo total del sistema SAF	56
Cuadro 11. Carbono Subterráneo total del sistema SAFS	57
Cuadro 12. Análisis de varianza para la Estimación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa subterránea (SOC)... ..	57
Cuadro 13. Pruebas de comparación de medias para SOC, método Duncan (alfa=0.05).....	58



Cuadro 14. Pruebas de comparación de medias para SOC, método Duncan (alfa=0.05).....	58
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Comparación entre los cambios a escala continental y mundial observados en la temperatura superficial y los resultados simulados por modelos climáticos que utilizan forzamientos naturales y antropógenos.....	7
Figura 2. Cambios observados en: a) El promedio mundial de la temperatura en superficie b) El promedio mundial del nivel del mar según datos mareográficos y c) La cubierta de nieve del Hemisferio Norte en el periodo Marzo-Abril.....	9
Figura 3. Emisiones mundiales de GEI antropógenos b) Parte proporcional de diferentes GEI antropógenos en las emisiones totales en el año 2004, en términos de CO ₂ eq. c) Parte proporcional de diversos sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO ₂ eq.....	12
Figura 4. Ciclo del carbono (Oliva y García 1998).....	13
Figura 5. Ciclo de Calvin-Benson (Biología 1M, 2009).....	15
Figura 6. Instalación de una parcela del sistema de monocultivo	21
Figura 7. Sistemas de la sucesión natural (Augstburger, 2007)	25
Figura 8. Sucesión de consorcios en los sistemas	25
Figura 9. Densidad de especies según la estratificación correspondiente	26
Figura 10. Instalación de una parcela bajo el sistema agroforestal sucesional.....	27
Figura 11. Diagrama simplificado de los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal.	28
Figura 12. Mapa de la zona de Alto Beni, La Paz - Bolivia.....	35

Figura 13. Materiales usados en la realización de la presente investigación.	38
Figura 14. Ubicación del área de estudio en el municipio de Alto Beni, La Paz, Bolivia.....	42
Figura 15. Ubicación de la línea principal y demarcación de las subparcelas, esquinas marcada con cintas de color rojo.....	43
Figura 16. Esquema de Instalación de las Parcelas de Muestreo	43
Figura 17. Diversidad de especies en el Sistema Agroforestal Sucesional – Alto Beni.	44
Figura 18. Colecta de muestras para el análisis de raíces finas en los diferentes sistemas de Producción.....	47
Figura 19. Biomasa de raíces finas a tres profundidades de suelo los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en diferentes parcelas productoras de cacao en la Zona de Alto Beni, perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.	50
Figura 20. Biomasa de raíces gruesas en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.....	51
Figura 21. Biomasa subterránea en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.	55
Figura 22. Carbono total en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de	

productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.59

Figura 23. Captura de Dióxido de Carbono por los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.....61

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1** Lista de especies presentes en los diferentes Sistemas de producción de cacao.
- ANEXO 2** Edades de las parcelas.
- ANEXO 3** Mapa de Ubicación del proyecto.
- ANEXO 4** Sistemas de Producción Orgánica de cacao (*Theobroma cacao L*), en la zona de Alto Beni, Bolivia.

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AB	Área basal
AGB	Biomasa aérea
BRG	Biomasa de raíz gruesa
BRF	Biomasa de raíz fina
COS	Carbono orgánico del suelo
Fig.	Figura
GEI	Gases de efecto invernadero
<i>g.l.</i>	Grados de libertad
IPCC I	Intergovernmental Panel on Climate Change
t	Toneladas
t /ha	Toneladas hectárea
tC / ha	Toneladas de carbono hectárea

RESUMEN

Los Sistemas de producción, además de proporcionar al hombre una abundancia de productos, desempeñan una importante función dentro de los ecosistemas ya que son generadores de una serie de servicios ambientales, tales como: la fijación de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, la protección a cuencas (conservación de suelo , agua y biodiversidad), el ecoturismo y la recreación .

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una estimación del contenido de carbono almacenado en biomasa subterránea, en los sistemas de producción orgánica y Monocultivo de Cacao (*Theobroma cacao L.*) en la zona de Alto Beni, dicha región se encuentra dentro el territorio corresponde a la cuarta sección municipal de la Provincia Sud Yungas, Alto Beni esta dividido en siete áreas de colonización que forman cinco grupos: I-III, II, IV, V-VI, VII. Este estudio no incluyó el área V por ser de muy reciente colonización.

Se considero que es un valor significativo el cual los Sistemas Agroforestales nos ofrecen a partir de una variedad de bienes y servicios; tales que se han aprovechado desde hace muchos años y que continuamente se busca mejorar su aprovechamiento par allegar a un mejor manejo de nuestros recursos naturales.

Se tomaron muestras en diferentes sistemas de producción de cacao: en monocultivo, Sistema Agroforestal Simple y Sistema Agroforestal Sucesional, Se tomaron datos de biomasa subterránea, diversidad de arboles y el suelo en 9 parcelas de 48*48m.

El contenido de biomasa subterránea se realizo mediante el muestreo de cilindros para las raíces finas y el uso de ecuaciones alometricas para las raíces gruesas, se observo que en el caso de el Sistema Agroforestal Simple se tiene un almacenamiento de 33.60 Tn/ha, para el caso de el Sistema Agroforestal Sucesional que en este caso es el que mayor contenido de biomasa subterránea tiene presenta 46.89 Tn/ha, mientras que el monocultivo almacena menos que los demás sistemas con 12.19 Tn/ha.

En el suelo se estimó carbono a través del cálculo de densidad aparente y carbono orgánico del suelo, además del aporte de la biomasa subterránea correspondiente a raíces gruesas y finas. Obteniéndose carbono subterráneo en monocultivo 43.78 tC/ha, Sistema Agroforestal Simple 53.99 tC/ha y para el Sistema Agroforestal Sucesional 50.86 tC/ha.

SUMMARY

The production Systems, besides providing the man an abundance of products, carry out an important function since inside the ecosystems they are generating of a series of environmental services, such as: The fixation of dioxide of carbon (CO₂) of the atmosphere, the protection to basins (floor conservation, dilutes and biodiversity), the ecotourism and the recreation.

The present work has as objective to carry out an estimate of the content of carbon stored in underground biomass, in the systems of organic production and Monocultivo of Cocoa (*Theobroma cocoa L.*) in the area of Alto Beni, this region is inside the territory it corresponds to the fourth municipal section of the County South Yungas, Alto Beni this divided in seven colonization areas that form five groups: I-III, II, IV, V-VI, VII. This study didn't include the area V to be of very recent colonization.

You considers that it is a significant value the one which the Systems Agroforestales offers us starting from a variety of goods and services; such that have taken advantage for many years and that continually it is looked for to improve their even use to collect to a better handling of our natural resources.

They took samples in different systems of production of cocoa: in monocultivo, System Simple Agroforestal and System Agroforestal Sucesional, took data of underground biomass, diversity of you hoist and the floor in 9 parcels of 48*48m.

The content of underground biomass one carries out by means of the sampling of cylinders for the fine roots and the use of equations algometrical for the thick roots, one observes that in the case of the System Simple Agroforestal one has a storage of 33.60 Tn/ha, for the case of the System Agroforestal Sucesional that is the one that bigger content of underground biomass has 46.89 Tn/ha in this case presents, while the monocultivo stores less than the other systems with 12.19 Tn/ha.

In the floor you estimates carbon through the calculation of apparent density and organic carbon of the floor, besides the contribution of the underground biomass corresponding to thick roots and you die. Being obtained underground carbon in monocultivo 43.78 tC/ha, System Agroforestal Simple 53.99 tC/ha and for the System Agroforestal Sucesional 50.86 tC/ha.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las amenazas más preocupantes para el medio ambiente global, debido su posible impacto negativo sobre la salud humana, la seguridad alimentaría, la economía, los recursos naturales y la infraestructura física (Eguren, 2004). El cambio climático es causado por el incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera debido a las acciones antropicas, especialmente dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2000).

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO₂ es responsable del 50 % del calentamiento global debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Jobbágy y Jackson, 2000).

Alrededor del mundo se han creado numerosas políticas para mitigar el efecto del cambio climático, entre las que destaca el Protocolo de Kyoto que reconoce que las emisiones de Carbono (C) pueden disminuir si se reducen las tasas de emisión de gases a la atmósfera o bien incrementado la tasa por la cual estos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Dicho acuerdo reconoce como principales sumideros de C a los suelos agrícolas y forestales (ONU, 1998). Los estudios revelan que la deforestación y el cambio de uso de suelo forestal a agrícola contribuyen 17,4% del efecto invernadero mundial con las emisiones de gases (IPCC, 2007).

Los sistemas agroforestales han sido considerados como sumideros de carbono y prometedores piscinas de la biodiversidad y pueden desempeñar un papel importante en la adaptación al cambio climático y su mitigación (Tscharrntke *et al* 2011; Nair *et al* 2009), y así también la agricultura orgánica (FAO 2011; Leifeld y Fuhrer, 2010). Ambos conceptos, la agricultura orgánica y los sistemas agroforestales, son con frecuencia asociados con un potencial de secuestro de carbono superior a la agricultura común y también con una contribución positiva a la biodiversidad agrícola y biodiversidad natural (FAO, 2011). La combinación de la agricultura orgánica y la agroforestería en los

trópicos parece ser una solución lógica para potencialmente reducir las emisiones de carbono, secuestro y aumento de la productividad (Scialabba y Mueller- Lindenlauf 2010; Niggli et al. 2007).

Nair *et al.* (2009) señala que el potencial de la agroforestería para el secuestro de carbono es elevado, sobre todo para las zonas tropicales húmedas. El uso de la agroforestería para el secuestro de carbono sigue siendo sin embargo subestimado y subutilizado debido a la falta de datos sobre las reservas de carbono y los ciclos de carbono, debido a la alta variabilidad de los datos disponibles y métodos

Las prácticas agroforestales han sido señaladas por su potencial de reducir las consecuencias negativas del calentamiento global a través de la fijación del carbono. Estos sistemas pueden retener y aumentar las reservas de carbono en la vegetación y el suelo, con tasas de fijación de entre 0,1 y 4,3 t C/ha-año (Beer *et al.*, 2003).

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono se presenta como una opción más en la lista de acciones para reducir o estabilizar el aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (FAO, 2006).

En proyectos de medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales generalmente no se mide el compartimiento subterráneo, debido a las dificultades para su extracción y a los altos costos; por tanto, se usan valores reportados en la literatura (MacDiken 1997, Brown *et al.* 1999, de Jong *et al.* 2000., Salimon & Brown 2000). Sin embargo, la biomasa de raíces es un importante sumidero de carbono (Sierra, 2001).

La estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa subterránea resulta importante en los proyectos de fijación de carbono, ya que ésta representa una fracción importante de la biomasa aérea. Según distintos autores la proporción ronda entre un 10 y 40% de la biomasa total (MacDiken 1977); un 10 al 30% de la biomasa aérea (Dixon, 1995); 20 a 30% de la aérea para distintos lugares del mundo (Cairns *et al.*, 1997).

La biomasa radical es un parámetro que expresa la cantidad de biomasa (gramos de materia seca), en una unidad de área determinada en la profundidad de muestreo

(g/m²), por lo que se puede tomar como parámetro para estimar la fijación de carbono en el ecosistema (Morales, 1997).

En el estudio de sistemas radicales se han separado las raíces en finas y gruesas, debido a que tienen características muy diferentes en cuanto a su crecimiento, mortalidad y función (Morales 1997, Vogt *et al.*1997, Gill & Jackson 2000). Esta separación se hace a partir de un diámetro determinado pero este límite no es muy claro y varía entre los diferentes autores.

Para que se pueda clarificar la capacidad de carbono secuestrado por determinada especie, bajo condiciones específicas de plantación, sitio y manejo, es necesario que sean realizadas determinaciones de biomasa y análisis del contenido de carbono existentes en la misma. Sin embargo determinaciones de biomasa implican en el uso de métodos destructivos, lo que impone grandes dificultades operativas y costos elevados. Una alternativa es realizar determinaciones directas en menor escala y emplear modelos de regresión (ecuaciones alométricas), que pueden proporcionar estimaciones bastante razonables con menores dificultades.

Los estudios sobre los beneficios ambientales de los sistemas agroforestales en el trópico son abundantes (Clough *et al.* 2011, Tscharntke *et al.* 2011, Soto- Pinto *et al.* 2010). Sin embargo, los estudios sobre los efectos y los desafíos de la agricultura orgánica en las zonas tropicales siguen siendo escasos (FAO 2011; Mueller- Lindenlauf 2010; Leifeld y Fuhrer 2010).

Dada la larga experiencia de alrededor de 30 años con las cooperativas de cacao y más de 20 años en la certificación orgánica en Alto Beni y la diversidad resultante con el que los agricultores locales manejan sus parcelas de cacao, es posible realizar una investigación de tipo comparativo, debido a la existencia de diferentes formas de producción Orgánica, no solo por los ingresos económicos que generan las familias, sino también por su contribución a la conservación de la biodiversidad y mejora de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Somarriba y Trujillo, 2005).

Estos sistemas de producción han demostrado mayor adaptabilidad, rendimientos de producción en cultivos que crecen bajo sombra de otras especies arbóreas, como el café y el cacao (CATIE, 2000). Por ejemplo un estudio realizado por Göch (1985) demostró que la implementación del sistema agroforestal sucesional en cultivos de cacao logró la conservación y mejora de suelos degradados al sur del Brasil (Vaz, 2001).

En el presente trabajo se compara las reservas de carbono en el estrato subterráneo, almacenado en sistemas de producción Orgánica de cacao (monocultivo, Sistema Agroforestal Simple y Sistemas Agroforestales Sucesionales) y así enriquecer la escasa información existente de estudios de captura de C en los diferentes sistemas de producción orgánica manejados por los agricultores y para que los resultados sirvan para poder compararse con otros como el proyecto comparaciones de sistemas de producción de cacao a largo plazo, mismo que se realiza en la finca de Sara Ana impulsado por FiBL, AOPEB, PIAF-EL CEIBO, ECOTOP, INSTITUTO DE ECOLOGIA DE LA UMSA y PROIMPA.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Estimar la Biomasa subterránea y carbono en los sistemas de producción orgánica y Monocultivo de Cacao (*Theobroma cacao L.*) en el contexto de cambio climático en la zona de Alto Beni, Bolivia.

2.2. Objetivos específicos

- Estimar la biomasa de raíces en los diferentes sistemas de producción de cacao (*Theobroma cacao L.*), SAFS, SAF y Monocultivo.
- Estimar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa de raíz del estrato subterráneo en los diferentes sistemas del presente estudio.
- Determinar la cantidad estimada de CO₂ capturado por los sistemas de producción orgánica de cacao.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cambio Climático

El clima es un fenómeno que depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática o cambio climático, ocasionada por forzamientos internos como inestabilidades en la atmósfera y el océano (Greenfacts, 2007).

El cambio climático es el principal problema ambiental global al que enfrenta la humanidad. Entre otros muchos efectos, el calentamiento global multiplica los fenómenos climáticos extremos (inundaciones, sequías, olas de calor y de frío) agrava los procesos de desertificación, erosión y supone una pérdida generalizada de la biodiversidad (Carreras, 2007).

La evidencia científica no solamente demuestra la existencia del fenómeno del cambio climático, sino que permite afirmar que ha sido causado por las actividades humanas. Los cambios en el uso de la tierra y la quema de combustibles fósiles son las actividades que mayor influencia han tenido (Martino, 2007).

La última vez que las regiones polares atravesaron un largo periodo con un clima notablemente más cálido que el actual (hace 125.000 años), el nivel del mar aumentó entre 4 y 6 metros. Es muy probable que el grueso del aumento de la temperatura del planeta observado durante los últimos cincuenta años se deba a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la actividad del hombre (Greenfacts, 2007).

3.1.1. Consecuencias del cambio climático

Según IPCC (2007), el calentamiento del sistema climático es inequívoco y las principales consecuencias son:

- ✓ **El aumento de la temperatura media global.** La tendencia lineal de la temperatura a cien años (1906 - 2005), es de 0,74 °C. De los doce últimos años (1995 - 2006), once figuran entre los doce años más cálidos de los registros instrumentales de la temperatura mundial en superficie (Figura 1). Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es mayor en latitudes septentrionales altas. En la región ártica, el promedio de las temperaturas ha aumentado a un ritmo que duplica casi el promedio mundial de los últimos cien años. Las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos. Las observaciones efectuadas desde 1961 indican que en promedio la temperatura del océano mundial ha aumentado hasta en profundidades de 3000 m como mínimo, habiendo absorbido los océanos más del 80% del calor incorporado al sistema climático. En promedio, las temperaturas del Hemisferio Norte durante la segunda mitad del siglo XX fueron muy probablemente superiores a las de cualquier otro período de cincuenta años de los últimos 500 años, y probablemente las más altas de los últimos 1300 años, como mínimo.

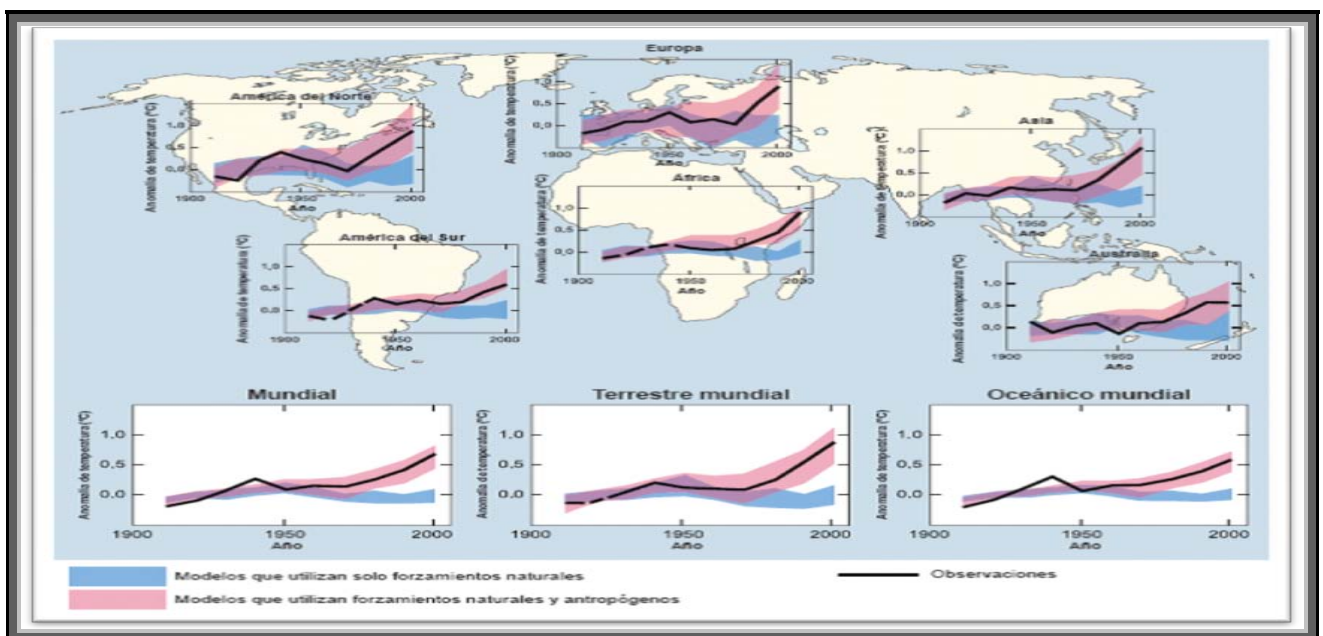


Figura 1. Comparación entre los cambios a escala continental y mundial observados en la temperatura superficial y los resultados simulados por modelos climáticos que utilizan forzamientos naturales y antropógenos. (IPCC 2007).

- ✓ **El aumento del nivel del mar.** Los aumentos del nivel del mar concuerdan con el calentamiento (Figura 2), el promedio mundial del nivel del mar aumentó a una tasa de 1.8 mm anuales entre 1961 y 2003 y de 3.1 mm anuales entre 1993 y 2003.
- ✓ **La disminución de la extensión de nieves y hielos.** La disminución observada de la extensión de nieves y hielos concuerda también con el calentamiento (Figura 2), los datos satelitales obtenidos desde 1978 indican, en promedio, la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2.7 % por decenio y en mayor medida en los veranos (7.4 % por decenio).
- ✓ **La variación en las precipitaciones.** Se han observado las tendencias de la precipitación entre 1900 y 2005, en este periodo, la precipitación aumentó considerablemente en algunas partes orientales de América del Norte, del Sur, en el norte de Europa y en el Asia septentrional y central. Sin embargo, disminuyó en el Shael, en el mediterráneo, en el sur de África y en la parte del sur del Asia. En términos mundiales, la superficie afectada por las sequías probablemente ha aumentado desde los años 70.
- ✓ **Aumento de la actividad ciclónica tropical.** Las observaciones evidencian un aumento de la actividad ciclónica tropical intensa en el Atlántico Norte desde aproximadamente 1970.
- ✓ En todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que muchos sistemas naturales (aumento de la escorrentía en numerosos ríos alimentados por glaciares, adelanto de la migración de las aves y peces, y los brotes de los vegetales tienden a aparecer más temprano en primavera) están siendo afectados por los cambios climáticos regionales y particularmente por el aumento de la temperatura.

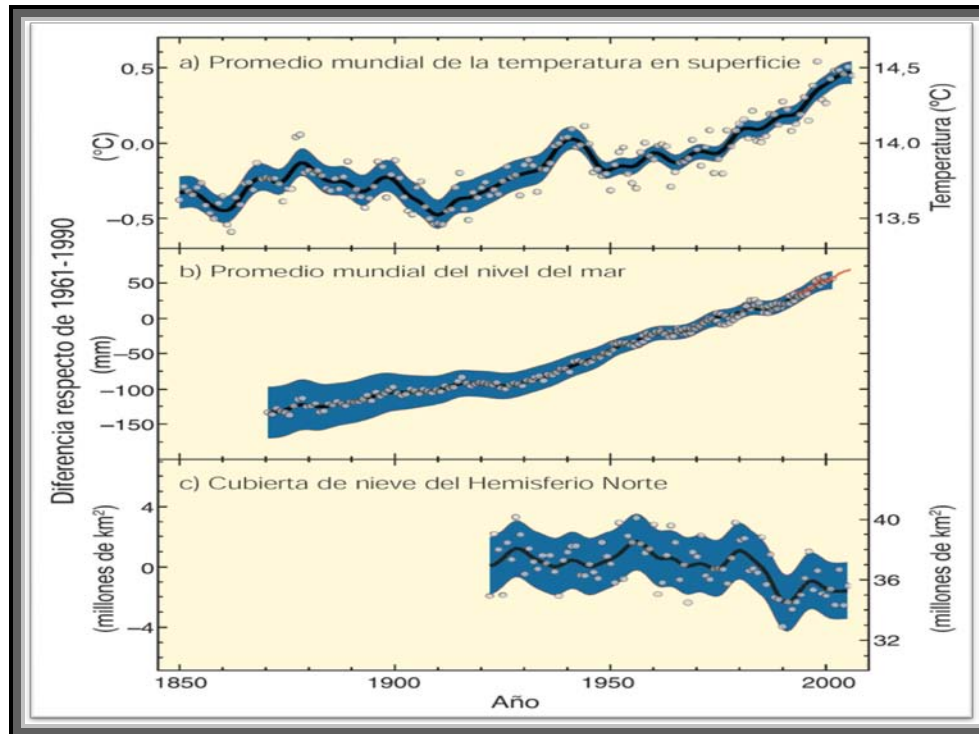


Figura 2. Cambios observados en: a) El promedio mundial de la temperatura en superficie b) El promedio mundial del nivel del mar según datos mareográficos y c) La cubierta de nieve del Hemisferio Norte en el periodo Marzo-Abril (IPCC, 2007).

Están advirtiéndose también otros efectos de los cambios climáticos regionales sobre el entorno natural y humano. Por ejemplo: daños causados por los incendios y plagas en la agricultura y forestal, exceso de mortalidad causada por el calor en Europa y otros. Las consecuencias del cambio climático serán peores de lo que se pensaba hasta el momento, según un estudio elaborado por un equipo de científicos internacionales en el que han participado algunos del Instituto del Cambio Climático de Potsdam (PIK), "Debemos tener más en cuenta las consecuencias negativas del cambio climático, tanto en las personas como en la naturaleza. Los científicos demostraron que todos los ecosistemas son sensibles, como por ejemplo los arrecifes de coral, están reaccionando más al calentamiento global y al aumento de las emisiones de CO₂ que antes (FAO, 2007).

La FAO (2007) señala, que el calentamiento global podría provocar cambios a todos los niveles de organización ecológica: cambios poblacionales, cambios en la distribución de los organismos, en la composición de las especies y cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. El efecto en las plantas incluye, entre otros, disminución de la productividad primaria, cambios en la tasa fotosintética, sesgos en los límites de distribución de las especies, cambios en la germinación y cambios en la estructura y dinámica de las comunidades.

3.1.2. Cambio climático en Bolivia

Seiler (2013), menciona que los desastres naturales relacionados con el clima en Bolivia son frecuentes, severos y diversos, y afectan a grandes segmentos de la población, la economía y los ecosistemas. Potencialmente amplificadas por el cambio climático, los peligros naturales son de creciente preocupación.

La variabilidad climática impacta a los sistemas humanos y naturales en Bolivia, principalmente a través de inundaciones y sequías, con eventos como El Niño (EN) y La Niña (LN) afectando a miles de personas y causando pérdidas económicas de millones de dólares (\$US). Los eventos EN de 1982-1983 y 1997- 1998 y LN de 2007-2008 afectaron a cerca de 1.6 millones, 135 mil y 619 mil personas, con pérdidas económicas de alrededor de 837, 515 y 758 millones de \$US, respectivamente (UNDP, 2011).

En estudios realizados por Seiler (2013), se encontró que las temperaturas son mayores durante la oscilación Decenal del pacifico faces positiva, el fenómeno del niño y la oscilación del Antártico faces positivas en los Andes. En las tierras bajas, las cantidades totales de precipitación pluvial así como el número de eventos extremos, fueron mayores durante la Oscilación decenal del pacifico faces positiva, Fenómenos del niño y la Niña. Durante el verano Austral Diciembre a Febrero, el niño causó condiciones más secas en los Andes, con precipitaciones más variables. Las temperaturas se incrementaron a una tasa de 0.1°C por década, con mayores incrementos en los Andes y durante la época seca. Las precipitaciones pluviales se incrementaron desde 1965 a 1984 [12% en los meses diciembre, enero y febrero y 18%

entre Junio y Agosto] y decrecieron luego (-4% en diciembre – febrero y -10% en Junio - agosto), aproximándose al patrón de la oscilación decenal del pacífico. Las tendencias de extremos climáticos generalmente corresponden a las tendencias de las medias climáticas.

Los descubrimientos sugieren que el clima en Bolivia será más cálido y seco que el promedio en un futuro próximo. Habiendo entrado a la oscilación decenal del pacífico en su fase negativa en 2007, se pueden esperar sequías e inundaciones relacionadas con el fenómeno de la niña en las tierras bajas, mientras que los incrementos de temperatura sugieren mayores riesgos de sequía en los Andes, las tendencias para 2030 son aumento de T (1-2.5°C) y mayor irregularidad de pp.

Evidencias en Bolivia:

- Derretimiento acelerado de glaciares
- Aumento T, déficit hídrico en Altiplano y Cordillera
- Incremento de eventos extremos, con desastres
- Irregularidad en la época de lluvias
- Mayor frecuencia de sequías

3.1.3. Causas del cambio climático

Las causas del calentamiento global son los GEI, los principales GEI son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y los gases fluorados (HFCs, PFC, SF₆). El vapor de agua es un potente gas de efecto invernadero, pero por su origen natural lo hace más difícil de controlar, no está regulado por el Protocolo de Kioto (Carreras, 2007). Según, IPCC (2007), las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 (Figura 3). Entre 1970 y 2004, el aumento más importante de las emisiones de GEI proviene de los sectores de suministro de energía, transporte e industria, mientras

que la vivienda y el comercio, la silvicultura (incluida la deforestación) y la agricultura crecieron más lentamente.

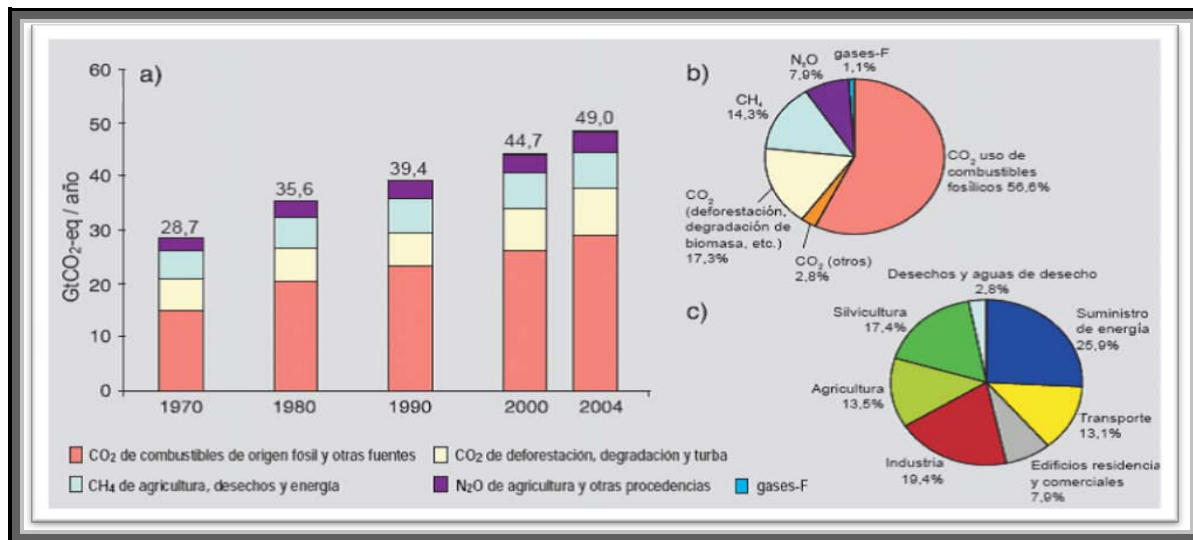


Figura 3. Emisiones mundiales de GEI antropogénicos b) Parte proporcional de diferentes GEI antropogénicos en las emisiones totales en el año 2004, en términos de CO₂ eq. c) Parte proporcional de diversos sectores en las emisiones totales de GEI antropogénicos en 2004, en términos de CO₂ eq. (IPCC, 2007).

3.2. Ciclo del Carbono

Ordoñez (1999), menciona que, este ciclo gira especialmente alrededor del dióxido de carbono, ya que constituye la especie química predominante en la atmósfera.

El ciclo funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones por quema de combustibles fósiles y fenómenos naturales como las erupciones volcánicas, en la figura 1, se muestra su representación.

A sí mismo afirma que, el ciclo del carbono es el responsable de la cantidad de CO₂ contenido en la atmósfera, ya que es el mecanismo que equilibra las cantidades de carbono presentes en los diferentes reservorios o almacenes de carbono en el planeta. Como consecuencia se establece todo un balance de carbono a través de procesos fijadores/almacenadores de carbono y otros que a su vez lo emiten.

Oliva y García (1998), afirman que, en los ecosistemas terrestres, la vía más importante del flujo de carbono atmosférico a la vegetación y el suelo es biológica, por medio de la fotosíntesis y la descomposición, respectivamente. Este flujo involucra muchos procesos interactuantes, los cuales mantienen el equilibrio dinámico del intercambio de gases atmósfera planta suelo (figura 4). Como se mencionó anteriormente, la deforestación puede afectar este equilibrio dinámico de intercambio de gases, por lo que es muy importante conocer cuáles son los mecanismos que lo controlan.



Figura 4. **Ciclo del carbono (Oliva y García 1998).**

Oliva y García-Oliva (1998), mencionan que, la incorporación del C al ciclo biológico se da por medio de la fotosíntesis que produce energía bioquímica para los procesos fisiológicos y de formación de materia biológica (biomasa) a partir del CO₂, energía radiante y nutrientes. El CO₂ es tomado directamente de la atmósfera y su asimilación por la planta es conocida como fotosíntesis gruesa. Pero no todo el CO₂ asimilado es transformado a biomasa, sino que una parte es regresada a la atmósfera por medio de la respiración que se lleva a cabo durante los procesos fisiológicos

Castellanos, *et al.* (1991), afirman que el carbono fijado por las plantas se transforma en moléculas móviles, que se asignan a las diferentes estructuras de la planta para satisfacer sus demandas fisiológicas y estructurales. Esta asignación determina las rutas por las cuales se dará posteriormente el flujo de C al suelo. Cada especie de planta asignará más o menos C para producir biomasa en la parte aérea o en la parte subterránea.

3.3. Sumideros de Carbono

Se conoce como sumidero todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros de Carbono por su función vital principal, la fotosíntesis. Mediante esta función, los vegetales absorben CO₂ que compensa tanto las pérdidas de este gas que se producen por la respiración como las emisiones producidas en otros procesos naturales (descomposición de materia orgánica).

El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y el CO₂ emitido por la atmósfera durante la respiración. Esta diferencia es convertida en biomasa y suele oscilar entre el 45-50 % del peso seco de la planta. Por lo tanto, mientras el crecimiento sea alto, la vegetación natural y los cultivos agrícolas se convierten en los sumideros de carbono. Teniendo esto en cuenta, la agricultura se puede convertir en un mecanismo efectivo para mitigar el incremento del CO₂ atmosférico (IPCC, 2000).

Los sistemas Forestales y Agroforestales pueden funcionar como sumideros de CO₂ almacenando en promedio 95 Mg C*ha⁻¹ en zonas tropicales para un total de 2,1 billones de Mg de Carbono por año (Oelbermann et al., 2004). Sin embargo, hay pocos estudios de estimación de Carbono en la parte subterránea (raíces y suelo), mantillo y árboles muertos debido a la complejidad de los sistemas (Brown, 2002).

Esquivel (2005) reportó que los sistemas agrícolas pueden almacenar entre 86 y 124 Mg C*ha⁻¹. El sistema de barbecho natural puede almacenar entre 14 y 191 Mg C*ha⁻¹ en dos y 25 años, respectivamente.

3.4. Fijación del Dióxido de Carbono

3.4.1. Captura de Carbono en Plantas

La captura de Carbono (C) en las plantas se lleva a cabo por medio de las reacciones foto-dependientes del Ciclo de Calvin-Benson (Figura 5), que son parte de la

fotosíntesis. En este proceso, las moléculas de ATP (Trifosfato de Adenosina) entregan la energía requerida para dichas reacciones, las moléculas de NADPH (Reducción del Fosfato de Nicotinamida Adenil Dinucleótido) transportan el hidrógeno requerido y electrones. El CO₂ en el aire provee a las células fotosintéticas C y oxígeno (Starr y Taggart, 2004).

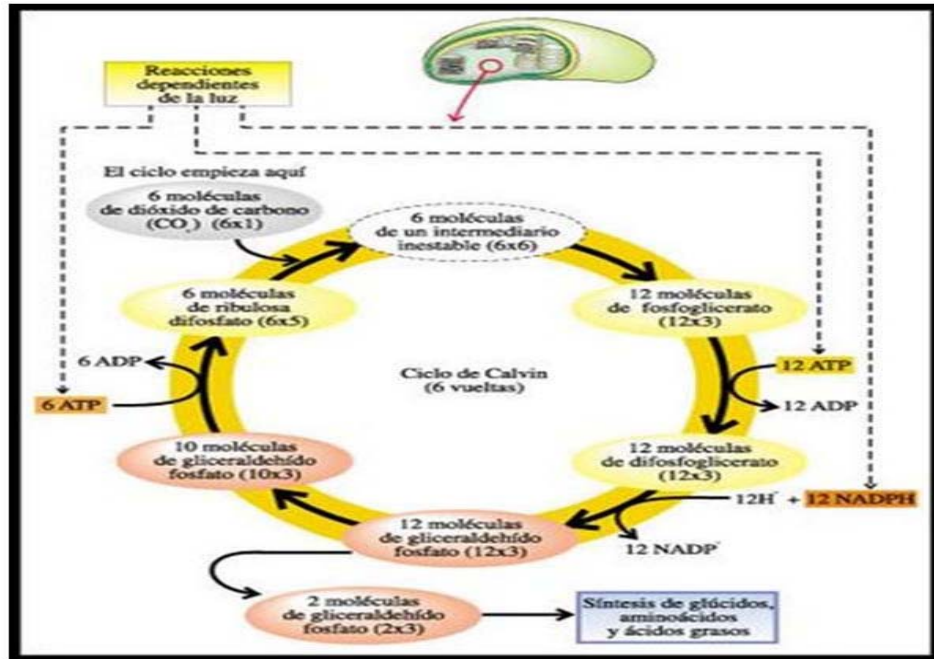


Figura 5. Ciclo de Calvin-Benson (Biología 1M, 2009)

Una vez que el CO₂ se encuentra dentro de una célula fotosintética se difunde a lo largo de una estructura plasmática y dentro del estroma de un cloroplasto; las reacciones fotodependientes inician cuando el átomo de C de la molécula de CO₂ se adhiere a una RuBP (ribulosa bifosfato), molécula con un enlace de 5 átomos de C. Este proceso es conocido como fijación de CO₂ (Starr y Taggart, 2004).

Esta unión de C con RuBP se divide en dos moléculas de PGA (Fosfoglicerato), el ATP dona un grupo fosfato a cada grupo PGA. El NADPH dona hidrógeno y electrones al resultado intermedio formando PGAL (Fosfoglicelalaldehído). El PGAL combinado forma un azúcar fosfatado de 6 C (Starr y Taggart, 2004).

El azúcar formado en el ciclo participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol o la planta pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento, así como su altura y el grosor de su tronco o tallo. Todos estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando CO₂ al suelo y a la atmósfera, (Ordoñez, 1999 citado por Rodríguez *et al*, 2006).

El C en vegetación es la suma del contenido de la biomasa aérea de la biomasa de las raíces. La biomasa aérea comprende el tronco, las hojas, las ramas y el follaje, mientras que el C contenido en las raíces es definido como biomasa de las raíces, (Ordoñez, 1999). La producción de biomasa por las plantas es la mayor fuente de captación de C atmosférico, el crecimiento y sucesión de las comunidades vegetales en turno juega un rol importante en la moderación del actual y futuro incremento del CO₂. Más del 90% de la materia seca (biomasa) producida por la planta proviene de CO₂ asimilado (Luo and Money, 1999).

Las plantas asimilan el CO₂ de la atmósfera conforme fotosintetizan y crecen. La vegetación aérea contiene entre 5-25 t C/ha. A medida que crecen las plantas, las hojas y tallos secos o muertos (hojarasca) caen al suelo y se descomponen. Las raíces (que a menudo contienen más C que la biomasa aérea) también crecen, y algunas de las raíces subterráneas mueren y se descomponen año tras año. Los microorganismos del suelo contribuyen a la descomposición de la materia orgánica, (Tennigkeit y Wilkes, 2006).

El C de estas fuentes se asimila en reservas de C del suelo y contribuye a la acumulación de C orgánico del suelo. Por tanto, los modelos comunes de C se centran generalmente en tres o cuatro “reservorios” de C: C almacenado en la vegetación viva (incluyendo la biomasa aérea y las raíces subterráneas vivas), la hojarasca y el C del suelo (Tennigkeit y Wilkes, 2006).

3.4.2. Captura de Carbono en suelos

Los suelos son importantes fijadores de carbono a largo plazo, almacenados en mayor cantidad, que en la biosfera y la atmósfera combinadas. Al igual, cambios mínimos de flujos del carbono de suelos podría afectar considerablemente concentraciones atmosféricas del CO₂ (IPCC, 2000). Es posible que cambios climáticos, a causa del calentamiento global, puedan alterar el ciclo natural del carbono en los suelos (Ascarrunz & Reed, 2007).

Durante el último siglo, aproximadamente 150 Pg de C ha sido liberado a la atmósfera como consecuencia de los cambios en el uso de la tierra. Esto equivale en proporciones actuales a aproximadamente 30 años de emisiones de combustible fósil (Kanninen 2001).

El carbono orgánico presente en los suelos naturales representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción (1%) del que ingresa (55 Pg año⁻¹) se acumula en la fracción humica estable (0,4 Pg año⁻¹) (Robert 2002).

Oades (1988) indica que varios factores favorecen la retención del C en el suelo y permiten mayores tasas de recambio y tiempos de residencia. Estos incluyen, distribución por debajo de la superficie del suelo, asimilados con bajo contenido de nutrimentos, materiales ricos en lignina y ceras, inundación, bajas temperaturas, texturas arcillosas, alta saturación de bases, agregación y superficies de cargas variables. Mientras que los factores que aceleran el flujo hacia el suelo de asimilados de C en las plantas son: hojarasca con concentraciones altas de asimilados, asimilados ricos en nutrimentos, carbohidratos, aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga. La magnitud con la cual el suelo puede ser un sumidero de C depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición y la tasa de rotura tanto de C resistente como de C adquirido (FAO, 2000).

Un buen sistema agropecuario es el que secuestra mas carbono del que emite (Mora, 2001). Las pasturas con base en gramíneas mejoradas secuestran mas carbono en partes profundas del perfil del suelo, generalmente debajo de la capa arable (10-15 cm). Esta característica hace que este carbono este menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto su pérdida como gas invernadero (Fisher *et al.* 1994).

3.5. Sistemas de Producción

Los sistemas agrícolas cuando son manejados adecuadamente pueden constituir en importantes fuentes de acumulación de carbono, compensando las pérdidas inherentes a la agricultura. Según Schroeder (1994), hay básicamente tres mecanismos para la acumulación: a) por intermedio de acumulación en la materia orgánica en el suelo; b) a través de la propia biomasa vegetal; y c) cuando la biomasa vegetal es utilizada para fuente de energía, sustituyendo los combustibles fósiles.

3.6. Producción Orgánica

De acuerdo a la FAO (2003) el término agricultura orgánica tiene varios sinónimos: ecológica, biológica, etc. según los idiomas. Los principios de la agricultura orgánica están en armonía con los principios de la agricultura biodinámica y la permacultura. Se puede definir la agricultura orgánica como un proceso que utiliza métodos que respetan el ambiente, desde las etapas de producción hasta las de manipulación y procesamiento. La producción orgánica no solo se ocupa del producto, sino también de todo el sistema que se usa para producir y entregar el producto al consumidor final.

Las Normas Básicas de la Federación Internacional del Movimientos de Agricultura Orgánica (IFOAM) del 2002, define la agricultura orgánica como "un enfoque integral basado en un conjunto de procesos que resulta en un ecosistema sostenible, alimentos seguros, buena nutrición, bienestar animal y justicia social. La producción orgánica es, por lo tanto, mucho más que un sistema de producción que incluye o excluye un determinado insumo" (FAO, 2003).

De acuerdo con el *Codex Alimentarius*, "la agricultura orgánica se basa en un sistema de manejo holístico de la producción que promueve y mejora la salud del ecosistema, incluyendo los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo" (FAO 2003). Lo característico de la agricultura orgánica, es que se basa en el uso mínimo de insumos externos, evita los fertilizantes y plaguicidas sintéticos, y se utilizan métodos para reducir al mínimo la contaminación del aire, suelo y el agua. Éste sistema de producción no permite las prácticas de irradiación de los cultivos y el uso de ingeniería genética en el mejoramiento genético de plantas y animales (Sosa *et al.* 2004).

3.6.1. Producción Orgánica en la Región de Alto Beni

La región del Alto Beni presenta un potencial natural de producción debido a las condiciones de clima, suelos y topografía, donde la principal actividad es la agricultura, ya que el 74% de la población se dedica a esta práctica (INE, 2001 y Vega, 2005). Los agricultores dependen de la comercialización principalmente de seis cultivos: cacao, cítricos, banano, papaya, café y arroz citados en orden de importancia (Somarriba y Trujillo, 2005). En el año 1999, el Alto Beni produjo el 90% de la producción total de cacao en Bolivia (2400 t), por lo que se convirtió en la región productora de cacao del país (Pinto, 2005).

En la producción del cacao en Alto Beni se evita el uso de fertilizantes químicos debido a que se siguen los requerimientos de una certificación orgánica. Por lo tanto en estos sistemas de producción la biomasa que aportan las especies asociadas al cultivo (árboles del dosel de sombra) son la principal vía de adición de materia orgánica al suelo. En consecuencia, el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la producción del cultivo de cacao en Alto Beni, dependen del ciclaje de biomasa y nutrientes que brinde el sistema de producción. A su vez, la composición y calidad de biomasa depende de las especies que conforman el dosel de sombra, de la edad de plantación, de las condiciones de sitio y del manejo que se realiza (Nair, 1997).

3.6.2. Descripción y manejo del cacao

Actualmente el cacao es cultivado entre 400 y 800 m.s.n.m, aunque la producción en general se encuentra por debajo de los 600 m.s.n.m, altura que pertenece a un bosque alto 30-40 m denso, siempre verde y compuesto de varios estratos (Ortiz, 2006).

El cacao se clasifica en tres tipos genéticos: nacional o criollo, híbrido e injerto (Somarriba y Trujillo, 2005). El ciclo agrícola empieza en época de invierno, mediante la poda que se realiza por lo general entre los meses de agosto y octubre. La floración del cacao nacional ocurre en octubre y del cacao híbrido e injerto en el mes de diciembre, cuando empiezan las lluvias (Somarriba y Trujillo, 2005). La cosecha del cacao nacional sucede en los meses de enero a abril y del cacao híbrido e injerto en los meses de mayo y agosto (Somarriba y Trujillo, 2005).

3.6.2.1. Monocultivo

En los años 80, la inestabilidad que presenta el sistema de producción de monocultivo resultó en la disminución de 5000 ha de cacao a 2500 ha, un 50%, por el ataque de una enfermedad fungosa *Crinipelis pernicioso* y la caída de los precios en el mercado internacional de cacao (Somarriba y Trujillo, 2005). A partir del año 1990 al 2000 el cacao se cultiva en asociación con cultivos de banano, plátano, cítricos, café, entre otros (López, 2001). Actualmente los cultivos tradicionales de cacao en Alto Beni, tienen una superficie de 1,6 - 2,3 ha aproximadamente, la dimensión y densidad de siembra es de 4 x 4 m y 625 pl/ha y el rendimiento promedio es de 368 kg/ha año (Orozco, 2005).

La preparación del terreno según el uso histórico de suelo en la región, indica que un 10% de los agricultores establecieron su cacaotal sin chaqueo aplicando solo una tala selectiva, el 90% restante lo hizo mediante prácticas de roza, tumba, quema (Pinto, 2005). Después del chaqueo se siembran cultivos anuales como arroz, maíz, yuca, posteriormente se siembran cultivos semiperenes, como banano, plátano, papaya y finalmente se instalan los plantines de cacao (Pinto, 2005).

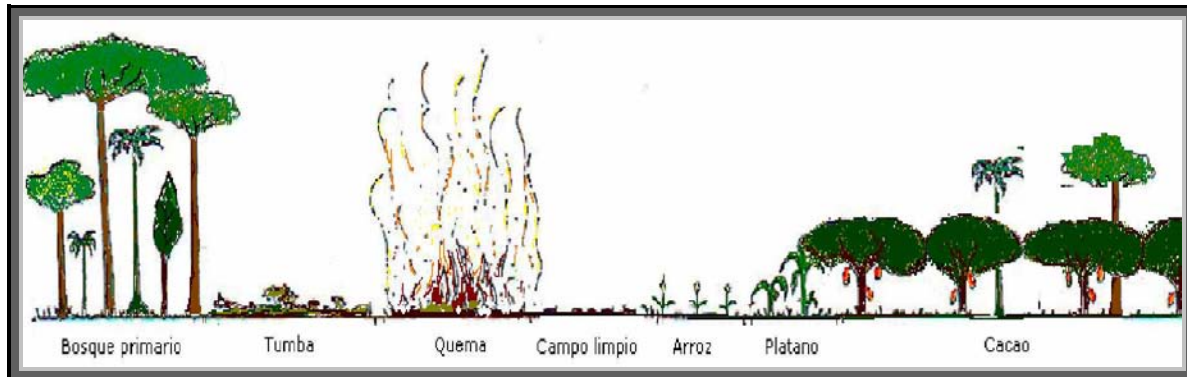


Figura 6. Instalación de una parcela del sistema de monocultivo (En base a CUMAT, 1985)

Básicamente el manejo se realiza en periodos anuales, el mismo consta de tres deshierbes, una poda de formación para cacaotales jóvenes, una poda de mantenimiento para inducir la fructificación en cultivos adultos y en algunos casos una poda de saneamiento (Orozco, 2005).

De acuerdo con Ortiz (2006), gran mayoría de los agricultores no tiene sombra en sus cacaotales o la tiene mal distribuida, además esta sombra es generada por especies de regeneración natural, que contienen poca utilidad para el agricultor.

Atanacioh (2000), indica que este sistema de producción es intensivo y provoca la disminución de la fertilidad del suelo, cuando esto sucede las familias se ven obligadas a abandonar sus tierras en busca de otras nuevas, primero porque los cultivos de descanso se han ido reduciendo y segundo porque no se practican prácticas de conservación de suelos, como residuos de cobertura, abonamiento o riego en época seca (Citado por Gruberg, 2007 y López, 2001).

3.6.2.2. Sistema Agroforestal Simple

A partir del 2002, se inició una nueva fase de cambio tecnológico en el cultivo del cacao, basado en el uso masivo de plantas de cacao injertado, plantadas en diseños agroforestales para la producción de cacao, (Somarriba y Trujillo 2005). El sistema consiste en establecer cultivos agrícolas con árboles, de tal manera que el aprovechamiento del espacio y suelo sea simultáneo, tratando que los árboles no

compitan directamente con los cultivos por luz y nutrientes. Los árboles pueden plantarse en contorno o formando hileras alrededor de los cultivos. Se acostumbra a sembrar con sombra temporal al inicio de la plantación con plantas de Plátanos, Maíz y Yuca; y como sombra permanente árboles de Huasicucho (*Centrolobium tomentosum*), Toco (*Schizolobium parahyba*), Roble (*Amburana cearensis*), Mara (*Swietenia macrophylla*), Nogal (*Juglans boliviana*), Cedro (*Cedrela odorata*) y otras diferentes especies, para luego ser aprovechado como madera (Gonzales, 2007). Para el establecimiento del sistema primeramente se plantan los árboles con las respectivas distancias, esta práctica dependerá de los cultivos a asociarse. Como promedio pueden establecerse entre 40 y 60 árboles/ha.

El Sistema Agroforestal (SAF) debe cumplir con el criterio de que los aspectos agroforestales prevalezcan, o sea que se trata de un manejo combinado y deliberado de los componentes forestales y agropecuarios, cuyo objetivo es optimizar la producción total en la finca. También podemos decir que es una forma de trabajar la finca en donde se maneja muy bien la tierra. El fundamento principal de la Agroforestería se basa, en primer lugar, en la recuperación y protección del suelo para un manejo integral de la finca. Los SAF son alternativas válidas para el productor como herramienta indispensable para el mejoramiento de la producción, su economía familiar y su calidad de vida. Las formas de producción agroforestal son aplicables tanto en ecosistemas frágiles como estables (Mantanini, *et al.*, 1996).

El éxito de todo sistema agroforestal depende de la interacción ecológica y económica de los diferentes componentes, de la combinación de especies, motivación y entendimiento de la gente, todo integrado en un manejo adecuado. Los sistemas agroforestales poseen generalmente tres atributos (Nair, 1997):

- ✓ Productividad, para mantener o aumentar la producción y la productividad de la tierra, a través de la mejora del rendimiento con cultivos asociados, reducción de insumos y aumento de la eficiencia de mano de obra.

- ✓ Sostenibilidad, conservando el potencial de producción de los recursos, mediante los beneficios de las perennes leñosas, para mantener y conservar la fertilidad del suelo.
- ✓ Adaptabilidad, debido a que la implicación de tecnologías mejoradas o nuevas se deben adecuar a las prácticas agrícolas locales.

Francois y Stadler (2007) aluden que los sistemas agroforestales manejados en esta zona han demostrado ser efectivos para el mejoramiento del suelo, incrementando tanto la calidad como la cantidad de los productos principales. Sin embargo, se necesita apoyar conceptos y metodologías de difusión de estas prácticas agroforestales probados. Otro apoyo que debe darse es a la transformación de los productos de especies asociadas; al cultivo del cacao, café y plátano, al desarrollo de su mercado para obtener ingresos seguros durante todo el año y muchos años (citado por Mollo 2010).

3.6.2.3. Sistema Agroforestal Sucesional

A partir de 1996 se inició la promoción e implementación de sistemas agroforestales sucesionales como una alternativa de producción en la zona por la Inter Institucional de Alto Beni. Actualmente estas parcelas se encuentran instaladas en las siete áreas de colonización, hasta el año 2002 se instalaron 385 ha, con una superficie media por finca de 0,35 ha para cada agricultor (Obrador, 2002). Las parcelas agroforestales sucesionales se instalan en terrenos nuevos (barbechos), en citricales jóvenes y en cacaotales adultos como un proceso de rehabilitación (Wilkes, 2007).

La agroforestería sucesional es el comportamiento que adopta esta disciplina en el espacio y tiempo, al basarse en los principios de la sucesión natural. Según Odum (1986), cuando la sucesión inicia en un área o sustrato que nunca antes había sido ocupado, se denomina “sucesión primaria”, y cuando la sucesión se inicia a partir de un área previamente ocupada o perturbada, se denomina “sucesión secundaria”. La

sucesión secundaria es el tipo de sucesión del sistemas agroforestal sucesional, planteado por Ernest Göch en 1985.

Ernest Göch en su experiencia y convivencia con la naturaleza, entendió que las especies de plantas y animales siguen una sucesión natural. Esta sucesión permite la acumulación de la fertilidad del suelo, diversidad, energía y vitalidad, a través de un proceso continuo y dinámico al que lo llamó como “sucesión natural de especies” (Vaz, 2001). Según Milz (1997) “ *la sucesión natural de especies es el vehículo en el que la vida se mueve en el espacio y en el tiempo*”. Ésta es la razón, por la que se dice que la agroforestería sucesional sigue la estructura, composición y dinámica de los bosques naturales, en los que observamos a especies de diferentes consorcios y estratos que crecen en forma conjunta y no solas como en el sistema agrícola de monocultivo (Milz, 1997). En consecuencia, la agroforestería sucesional es una asociación masiva de cultivos anuales y perennes con especies arbóreas de diferentes hábitos de crecimiento, usos o beneficios, que busca optimizar el uso de recursos y aumentar la productividad por unidad de terreno (López, 2001).

Por lo tanto “el ser humano obtiene beneficios de la naturaleza aprendiendo a convivir con ella” (Milz, 1997).

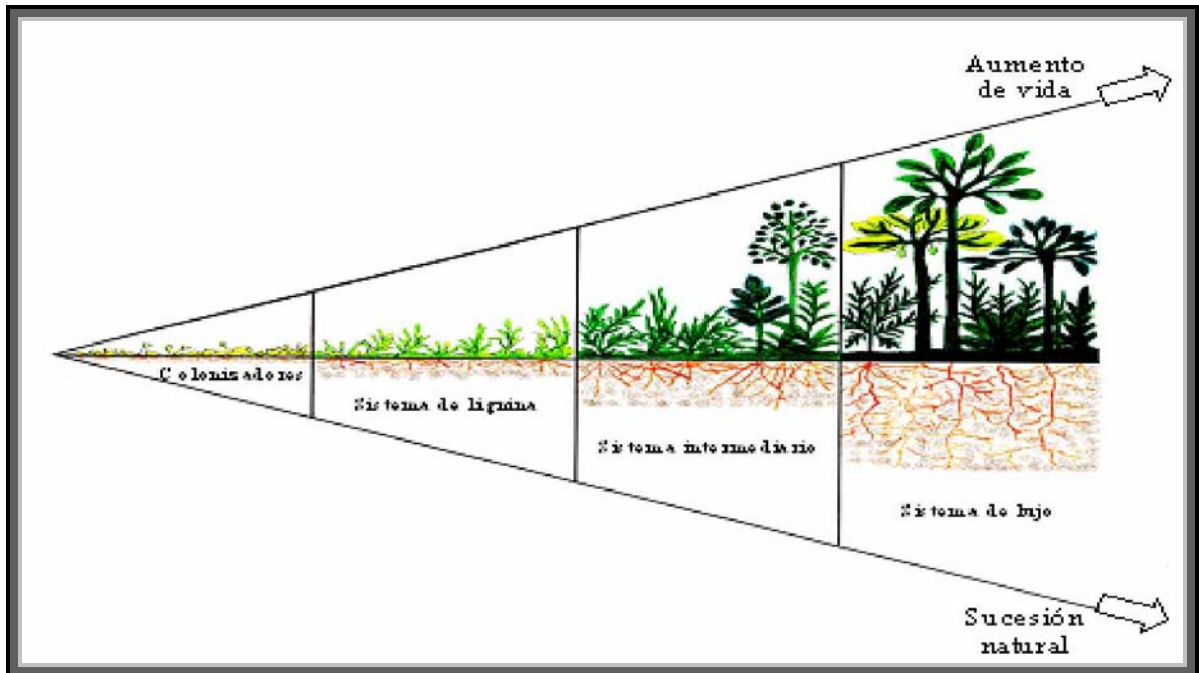


Figura 7. Sistemas de la sucesión natural (Augstburger, 2007)

Dentro de cada sistema existe una secuencia de consorcios, que sigue una sucesión natural al igual que los sistemas. Los consorcios son: pionero, secundario (secundario I), transicional (secundario II, secundario III) y primario, cada uno está determinado por el anterior y determina el siguiente (Yana y Weinert, 2003 y Vaz, 2001).

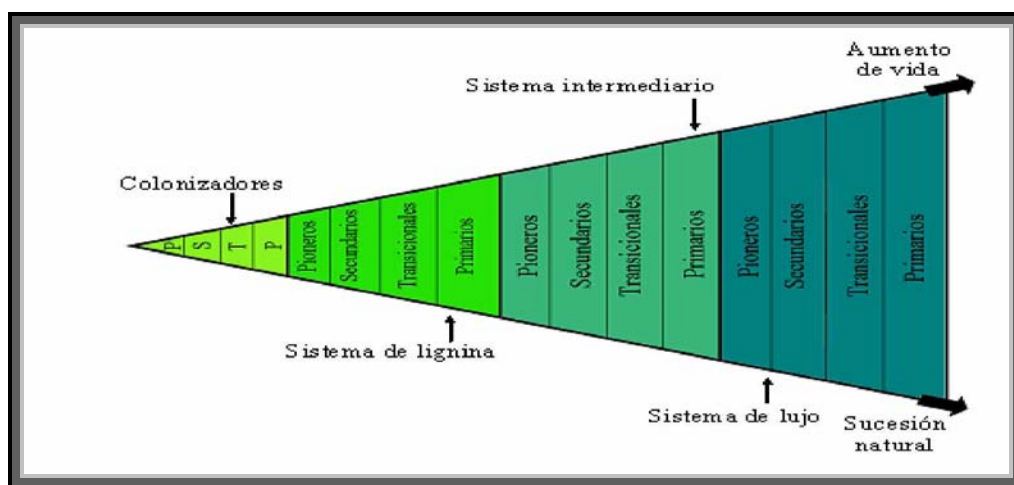


Figura 8. Sucesión de consorcios en los sistemas (En base a Milz, 1997 y Augstburger, 2007)

A su vez, un consorcio está caracterizado por especies de un ciclo de vida específico y un estrato en el cultivo que depende de su altura máxima (figura 7) (Weinert y Yana, 2003).

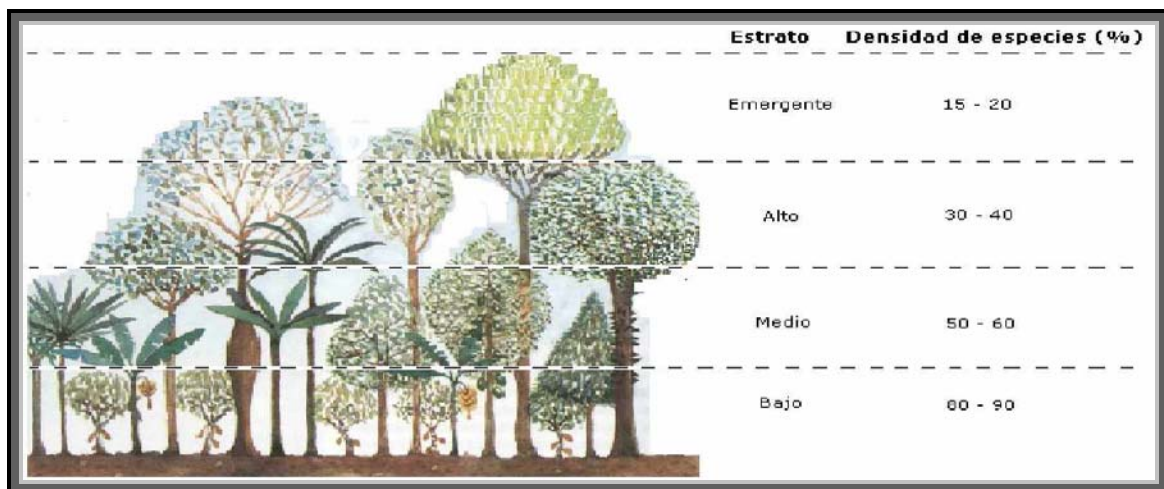


Figura 9. Densidad de especies según la estratificación correspondiente (En base a Milz, 1997).

Las especies pioneras crecen fácilmente en suelos pobres, como una defensa inmediata que la naturaleza utiliza para cubrir los espacios abiertos con materia orgánica (Milz, 1997). La función de las plantas pioneras es mejorar las condiciones del suelo para que puedan crecer especies del consorcio secundario. Así gradualmente se produce suficiente materia orgánica y se crean condiciones más específicas para el desarrollo de bosques secundarios, los cuales a su vez, crearán las condiciones necesarias para dar paso a especies del bosque primario (Yana y Weinert, 2003 y Vaz, 2001). Según Milz (1997) “*los principios de la sucesión son los mismos en cada ecosistema*”, por lo tanto es posible introducir especies naturales locales de cada región.

El diseño de la plantación inicialmente forma parcelas bastante densas y diversificadas, debido a que las especies de todos los consorcios se instalan al mismo tiempo, de esta forma el sistema funcionará como un organismo (Yana y Weinert, 2003).

Para la instalación se prepara todas las semillas correspondientes a especies de todos los consorcios, porque se siembran al mismo tiempo en octubre ya que la época de

lluvia inicia en noviembre y esto favorece a la germinación de las semillas (Yana y Weinert, 2003).

Este sistema de producción plantea la instalación de parcelas sin realizar la práctica de quema, puesto que ésta va en contra de la sucesión natural y porque causa efectos adversos al medio ambiente, sin embargo, este sistema puede ser instalado en un terreno chaqueado (figura 10). Para el proceso de instalación sin quema, se siguen los siguientes pasos: primero se roza del terreno, se siembran de las semillas de todas las especies según el diseño de la parcela y se tumban los árboles. Seguidamente se pican los árboles tumbados para distribuir uniformemente la materia orgánica al suelo, y después de un tiempo se introducen algunas especies del consorcio primario (café, cacao, cítricos) mediante plantines (Wilkes, 2007).

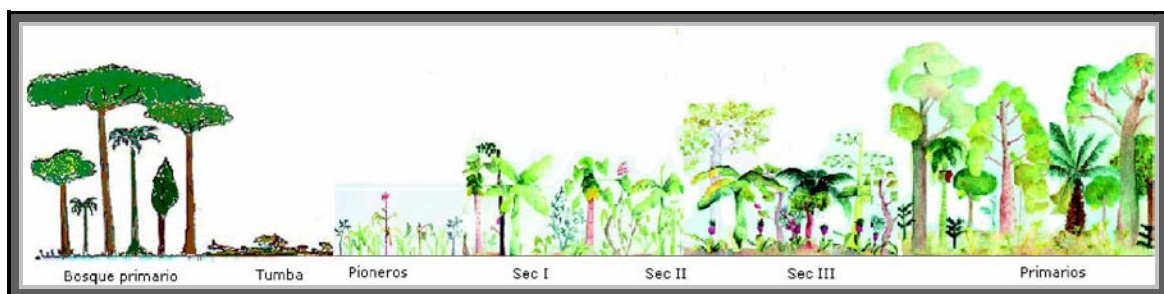


Figura 10. Instalación de una parcela bajo el sistema agroforestal sucesional (En base a Yana y Weiner, 2003 y CUMAT, 1985)

Con el tiempo se realizan trabajos de manejo que controlen la estratificación y sincronización para que no exista competencia entre especies, sino al contrario exista una complementación de especies (Milz, 1997).

Algunas prácticas de manejo que se realizan en las parcelas son específicas y están establecidas en épocas determinadas. En los cultivos del sistema agroforestal sucesional especies de regeneración natural, el plátano y el banano, forman parte del sistema siempre y cuando sean manejados correctamente (Yana y Weinert, 2003).

3.7. Importancia de la Agroforestería en los flujos de carbono

IPCC, (1995); Lashof y Ahuja, (1990); Mintzer, (1992) y Dixon, *et al* (1994), citan que, el panorama actual del incremento de CO₂ atmosférico y la tendencia a que pueda aumentar más la tasa de emisión neta es desalentador. Sin embargo, afortunadamente es posible reducir dichas emisiones a la atmósfera por medio del ciclo biológico conocido como el ciclo del carbono. Estimar con precisión la dinámica de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (es decir, el balance emisión-captura) es uno de los problemas abiertos más importantes en la discusión sobre cambio climático.

Ordóñez (1999), describe que, esto es resultado, del complejo ciclo biogeoquímico del carbono en los ecosistemas forestales. En efecto los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal, donde el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos, los productos y el humus estable son almacenes de carbono, figura (11) mismos que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal.

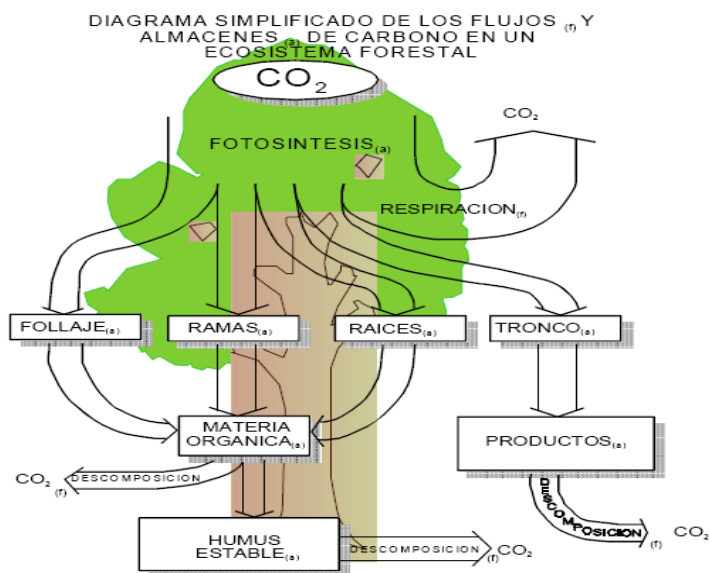


Figura 11. Diagrama simplificado de los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Ordóñez, 1999).

Los sistemas agroforestales podrían remover cantidades significativas de CO₂ de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera. Algunos autores consideran que estos sistemas podrían acumular entre 1.1 y 2.2 Pg en los próximos 50 años en todo el mundo (Albrecht y Kandji, 2003) con tasas de fijación de entre 0.1 y 4.3 t C/ha-año (Beer *et al.*, 2003; Arce *et al.*, 2008). Los sistemas agroforestales pueden fijar y almacenar entre 12 y 228 t C/ha, incluyendo el carbono orgánico del suelo, lo cual representa entre el 20 y 46 % del carbono secuestrado en bosques primarios (Alegre *et al.*, 2000; Beer *et al.*, 2003; Ortiz *et al.*, 2008).

3.8. Biomasa

Biomasa se define como la cantidad de organismos vivos de una o mas especies o de todas de una comunidad, por unidad de superficie en un momento dado (Zamora & Quiroz 2000), aunque también en materia meramente forestal se define como la masa total de los componentes de un árbol que se encuentra en un momento dado, tanto por encima como por debajo de la superficie del suelo (Schelegel *et al.*, 2000)

Wadsworth (2000), menciona que la biomasa total es solo parcialmente fitomasa (la porción de tejido vivo o muerto). Aunque el termino biomasa se refiere a organismos que existe sobre y debajo del suelo, en la practica común se utiliza al termino biomasa.

La biomasa de un bosque esta distribuida en una gran variedad de componentes agrupados como biomasa aérea (tallos y hojas de árboles, palma, lianas, hierbas), biomasa subterránea (raíces gruesas y finas) y biomasa muerta o necromasa (hojarasca, árboles muertos en pie o caídos), los cuales requieren de diferentes métodos para su cuantificación, expresados en términos de peso verde o seco al horno, preferiblemente este ultimo (Wadsworth, 2000).

La estimación de las densidades de la biomasa (t ha⁻¹) también proporcionan los medios para calcular la cantidad de dióxido de carbono que se puede quitar de la atmósfera, estableciendo los índices de producción de la biomasa y de los limites superiores para el secuestro del carbono (Brown, 1997).

3.8.1. Biomasa Subterránea

Biomasa de las raíces, esta la representan los sistemas radiculares, constituyen otro sumidero de carbono (Medina, 2006).

Las raíces, como componentes subterráneos de las plantas, son el soporte de todo el crecimiento aéreo y juegan un rol vital en el abastecimiento y almacenamiento de agua y nutrientes (Karizumi, 1974, citado por Guerra *et al.*, 2005). No obstante, la biomasa de raíces de muchas especies (en su mayoría forestales) ha sido poco estudiada, seguramente por la dificultad y lo costoso de la extracción de los sistemas radicales completos (Guerra *et al.*, 2005).

Investigaciones referidas al tema señalan que existe gran variabilidad en la producción de raíces finas y gruesas, según sea el tipo de clima donde se desarrollan, tipo de especie, estado de desarrollo o edad de los individuos (Guerra *et al.*, 2005).

Existen dos compartimientos de almacenamiento del carbono en la biomasa subterránea: las raíces gruesas y las finas. Las raíces finas (diámetro ≤ 5 mm) son consideradas biológicamente activas y exhiben un rápido recambio (crecimiento y mortalidad), pero su contribución a la biomasa total de un bosque es muy baja (menos del 1%); en contraste, las raíces gruesas (diámetro > 5 mm) representan alta contribución a la biomasa total del bosque (20%), pero su tasa de recambio es lenta (Cairns *et al.* 1997).

También, factores del suelo son determinantes para explicar las diferencias en productividad (Massmann, 2000), especialmente aquellos que afectan la elongación de las raíces, el abastecimiento de agua, la aireación y la composición química de la solución del suelo.

Factores como textura y estructura condicionan las características de la porosidad y drenaje interno, las cuales son importantes al momento de evaluar la fertilidad del suelo

para la producción de biomasa subterránea, como así también lo son las actividades de uso anterior de estos suelos (Massmann, 2000, citado por Guerra *et al.*, 2005).

Así también, las características genéticas de la especie son influyentes en la forma y distribución de los sistemas radicales (Donoso, 1993), ya que pueden determinar que una especie presente raíces axomorfas o fasciculadas, o bien, algunas especies presenten raíces profundas y otras superficiales (Massmann, 2000, citado por Guerra *et al.*, 2005).

La superficie del sistema radical en general es muy inferior a la correspondiente de los constituyentes del suelo, pudiendo ser del orden de 1000 a 10000 veces menor; por consiguiente el movimiento de la solución del suelo (agua más solutos) hacia las superficies absorbentes de las raíces, y una buena colonización de las mismas juegan un rol protagónico en la nutrición de las plantas. Al mismo tiempo, el crecimiento del sistema radical esta estrechamente ligado a la provisión de glúcidos de la parte aérea, por lo tanto, todo factor que actúe sobre esta última, también incidirán sobre el crecimiento y funcionamiento de la parte subterránea (Gil, 2007).

3.8.2. Medición de biomasa subterránea

En proyectos de medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales generalmente no se mide el compartimiento subterráneo, debido a las dificultades para su extracción y a los costos; por tanto, se usan valores reportados en la literatura. Sin embargo, la biomasa de raíces es un importante sumidero de carbono. En los bosques tropicales se puede encontrar en un rango entre 100 y 630 t/ha con promedio de 301,7 t/ha, aportando en promedio 18% de la biomasa total, con un amplio rango entre 11 y 54% (Sierra *et al.*, 2001).

Por esta razón, la información relacionada con los contenidos de carbono que se presentan en este compartimiento y en los bosques naturales, aún se encuentra pobremente estimada (Cairns *et al.* 1997). De esta manera, la existencia de métodos indirectos se convierte en una buena opción realizar la estimación de los contenidos de carbono a partir de la información obtenida de la biomasa aérea.

3.8.2.1. Biomasa de raíces arbóreas

La medición y estimación de la biomasa de raíces arbóreas es considerada una ardua tarea que demanda mucho tiempo y alto costo. De acuerdo con Schegel *et al.* (2001), el costo es de cerca US\$ 120 por raíz muestreada. Para inventariar raíces es necesario realizar excavaciones completas. Siendo así, algunos proyectos optan por utilizar relaciones entre la biomasa subterránea y la biomasa sobre el suelo por medio de ecuaciones alométricas obtenidas en la literatura científica. En este sentido, la lógica para esta etapa consiste en buscar información sobre ecuaciones alométricas para estimar la biomasa subterránea de especies o ecosistemas similares a los encontrados en el área del proyecto, o del estrato. Hay una mayor posibilidad de encontrar este tipo de información para especies forestales utilizadas en plantaciones comerciales (Chacon *et al.*, 2009).

Por otra parte los mismos autores describen las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de raíces de bosques que son las siguientes:

Fórmula para todos los tipos de bosques:

$$y = \exp[-1.085 + 0.9256 \cdot \ln(BA)]$$

Fórmula válida para bosques tropicales:

$$y = \exp[-1.0587 + 0.8836 \cdot \ln(BA)]$$

Donde:

Y=	Biomasa de la raíz en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha)
ln =	Logaritmo natural; exp = "elevado a potencia de"
BA =	Biomasa aérea en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha) Tamaño de la muestra para construcción de los modelos: 151 individuos (árboles)

Fuente: IPCC 2003 citando a Cairns *et al.* 1997

3.8.2.2. Biomasa de raíces de vegetación no arbórea

No es posible estimar la biomasa de raíces de vegetación no arbórea a partir de los datos de la biomasa sobre el suelo. Por tanto, se recomienda realizar mediciones de campo. El método de muestreo (local y tamaño de parcela) debe ajustarse a los procedimientos detallados para el método de muestreo de biomasa de vegetación no arbórea. La medición de la biomasa subterránea requiere la colecta de muestras de suelo por medio de cilindros de diámetros y profundidad conocidos o barrenos especiales para colecta de raíces. Los rizomas y tubérculos también son considerados parte del depósito de biomasa subterránea. Como la concentración de raíces de vegetación no arbórea es mayor en la capa superior del suelo, disminuyendo exponencialmente a la medida que aumenta la profundidad, se recomienda muestreos hasta 40 cm, estratificados de acuerdo con las siguientes cuatro profundidades del suelo: 0-10, 10- 20, 20-30 y 30-40 cm, se debe registrar claramente la profundidad correspondiente de cada capa por muestra colectada. En el laboratorio, las muestras de campo pasarán por un proceso de tamizado y lavado para eliminar suelo y piedras, restando únicamente raíces. Las raíces serán secadas en horno a 70°C hasta obtenerse un peso constante, para determinar la relación entre materia seca y húmeda y la cantidad de carbono. Posteriormente las raíces serán pesadas, determinando la biomasa por unidad de superficie. Con los valores obtenidos se calcula el total de toneladas de materia seca por hectárea (t MS/ha) (Chacon *et al.*, 2009).

3.9. Importancia de las raíces

Investigaciones referidas al tema señalan que existe gran variabilidad en la producción de raíces finas y gruesas, según sea el tipo de clima donde se desarrollan, tipo de especie, estado de desarrollo o edad de los individuos. También, factores del suelo son determinantes para explicar las diferencias en productividad Además aquellos que afectan la elongación de las raíces, el abastecimiento de agua, la aireación y la composición química de la solución del suelo. Factores como textura y estructura condicionan las características de la porosidad y drenaje interno, las cuales son importantes al momento de evaluar la fertilidad del suelo para la producción de biomasa

subterránea, como así también lo son las actividades de uso anterior de estos suelos (Schlatter,2003).

3.10. Medición del carbono almacenado

La medición del carbono en bosques tropicales ha adoptado dos enfoques complementarios, ambos relevantes para el futuro de la conservación y restauración de los bosques tropicales. El primero se relaciona con el interés científico por evaluar con precisión la contribución de los bosques tropicales al ciclo global del carbono, un tema sobre el que existen enormes incertidumbres (Clarc 2004, citado en Vallejos et al., 2005), y el segundo con el cumplimiento de compromisos aceptados en el cambio climático (CCC).

IV. LOCALIZACIÓN

4.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

La presente investigación se realizó en las localidades de Santa Ana, Sapecho y Covendo pertenecientes a la región de Alto Beni ubicada al noreste del Departamento de La Paz, a 270km de la ciudad, entre las coordenadas 15°10' y 15°55' latitud sur y 66°55' y 67°40' longitud oeste (Somarriba y Trujillo, 2005). Comprende las provincias de Sud Yungas, Caranavi y Larecaja, con una superficie de 250.000 km² (López, 2001 y PIAF, 2001). Se divide geográficamente en siete áreas de colonización, que se subdividen en tres grupos: I-III; II, IV-V y VI-VII, en donde se encuentran 19 localidades y 93 colonias (PIAF, 2001 y Somarriba y Trujillo, 2005).

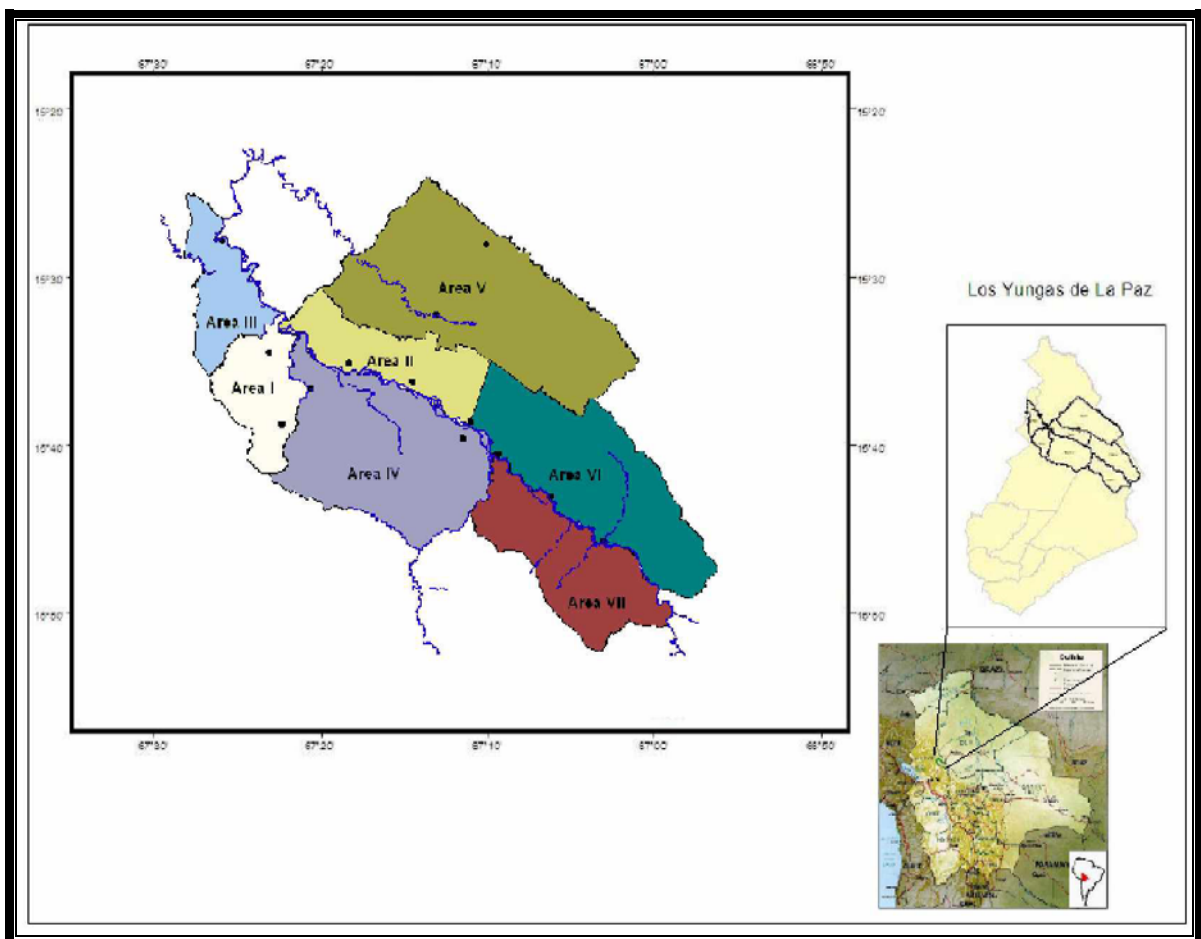


Figura 12. Mapa de la zona de Alto Beni, La Paz - Bolivia (En base a Orozco, 2005).

El paisaje está conformado por valles aluviales, pie de monte y colinas de elevada altura que varían entre 300 y 1400 metros de altitud, y 1.5% a 60% de pendiente (López, 2001 y PIAF, 2001).

4.2. Características climáticas

El clima es cálido y húmedo, la temperatura media anual es 26°C, con mínima en época de invierno entre los meses de junio-agosto desciende hasta 16°C con presencia de vientos fríos que provienen del sur “surazos” y máxima 36°C (Somarriba y Trujillo, 2005). La precipitación promedio anual varía de 1300mm en el valle (estación Covendo, 15°47', altitud 560m) hasta 200 mm en las colinas altas (estación Entre Ríos, 15°39', altitud 1000m) (Somarriba y Trujillo, 2005). El periodo de lluvias ocurre entre los meses de noviembre a marzo, seguido de un periodo de transición con lluvias ocasionales entre abril y junio y finalmente un periodo seco entre los meses de julio a octubre (Somarriba y Trujillo, 2005). La humedad relativa promedio anual es 85%, presentando una mínima de 79% en septiembre y máxima de 89% en mayo, el brillo solar es de 4,7 hrs/día (Somarriba y Trujillo, 2005 y Vega, 2005).

4.3. Vegetación

La vegetación de Alto Beni forma parte de los Yungas, que hace referencia a una unidad vegetal boscosa de la ladera de los Andes, la cual se divide en tres pisos altitudinales; ceja de la montaña, bosques de medio Yungas y bosques de Yungas verdaderos (Somarriba y Trujillo, 2005). Alto Beni pertenece al tercer piso de Yungas verdaderos ubicados por debajo de los 2000 msnm. (Ortiz, 2006) donde se encuentran cinco bosques: transición amazónico, sub montano, húmedo montañoso, montano muy húmedo y nublado (PIAF, 2001). Se constituye como una región de alta diversidad cultural y natural, representada por especies amazónicas y subandinas (Vega, 2005). El Alto Beni es caracterizado como una zona de producción agrícola, las fincas se dedican a la producción de cacao, cítricos, banano, plátano, maíz y arroz. La superficie promedio por finca es de 13ha, bajo bosque 4,60 ha, barbecho 2,5 ha, cacao 2 ha, naranja 1,1 ha, pastos 0,9 ha, banano 0,7 ha, plátano 0,7 ha, papaya 0,4 ha y arroz

0,35 ha. Según Seidel (1995), la agricultura causa un porcentaje alto de terrenos con vegetación secundaria de barbecho y de pastizales debido a la ganadería (Citado por Gruberg, 2007).

4.4. Geología y suelos

Según Somarriba y Trujillo (2005), los suelos derivan de areniscas calcareas del Terciario, de las órdenes Alfisoles, Inceptisoles y Entisoles, los cuales forman dos grupos en cuanto a su fertilidad: 1) Acrisoles hálpicos y Cambisoles dístricos, que se caracterizan por ser franco arenosos, poco fértiles, muy ácidos, pobres en nutrientes y con baja capacidad de intercambio cationico (CIC) y saturación de bases (SB) 2) Cambisoles crómicos y Lixisoles hálpicos, caracterizados como franco a franco arcillosos de textura más fina, buena fertilidad, moderadamente ácidos, con mayor CIC y baja SB (Somarriba y Trujillo, 2005 y López, 2001).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales



Figura 13. Materiales usados en la realización de la presente investigación.

5.1.1. De campo

- ✓ Martillo
- ✓ Pala
- ✓ Machete
- ✓ Cinta métrica (50 m)
- ✓ Cuerdas plásticas
- ✓ Bolsas de polietileno
- ✓ Mochila
- ✓ Guantes de cuero

5.1.2. Equipos

- ✓ Global Positioning System (G.P.S.)
- ✓ Cámara fotográfica
- ✓ Cilindro metálico (8cm de diámetro)

5.1.3. De gabinete

- ✓ Material de escritorio
- ✓ Computadora
- ✓ Planillas de campo
- ✓ Lápices y marcadores
- ✓ Marcadores indelebles
- ✓ Libreta de campo

5.1.4. De laboratorio

- ✓ Estufa
- ✓ Pinzas
- ✓ Tamices
- ✓ Recipientes
- ✓ Balanza

5.2. Métodos

5.2.1. Diseño del muestreo

El aspecto espacial que determina el arreglo o distribución de las unidades de muestreo, concretamente en parcelas, es de suma importancia en la planeación de un estudio ecológico, de ahí el uso de un diseño de investigación “no experimental descriptivo”, a través de un muestreo al azar estratificado. De acuerdo con Jongman *et al.*, (1987) citado por Chapi, 2008, un buen diseño de muestreo puede ayudar a reducir los costos al estudiar sólo una fracción de la población biológica y estadística en un período más corto de tiempo.

La investigación no experimental es sistemática y empírica en la que las variables independientes no se manipulan porque ya han sucedido. Las inferencias sobre las relaciones entre variables se realizan sin intervención o influencia directa y dichas relaciones se observan tal y como se han dado en su contexto natural, para después analizarlas, es decir no hay condiciones o estímulos de los cuales se expongan los sujetos del estudio, estos se observan en su ambiente natural (Hernández *et al.*, 2003).

5.2.2. Selección de parcelas

Los criterios para elegir las parcelas fueron: ubicación cerca del río, edad se 5 a 20 años y una parcela representante de cada sistema de producción en cada estrato de acuerdo a los centros de población a lo largo del rio Alto Beni para encontrar fincas en la terraza aluvial, también fueron elegidos por la complejidad ecológica para la comparación de parámetros biofísicos y socioeconómicos, estas parcelas fueron

seleccionadas por el Proyecto de investigación titulado “La contribución del cultivo orgánico a la resiliencia de ecosistemas y productores – Comparación de diferentes sistemas de cultivo de cacao en el contexto de cambio climático en Alto Beni, Bolivia” de KPFE Berna y la Universidad de Berna, Suiza de la cual la presente investigación es parte.

5.2.2.1 Sistemas a ser comparados

- 1) **Monocultivo, certificado orgánico.-** Plantas de cacao jóvenes son asociados con musáceas como sombra temporal en la fase de establecimiento, con coberturas vivas (leguminosas), pero no son muy comunes, el manejo orgánico incluye aplicación de compost y control biológico de enfermedades y plagas. Los arboles de cacao por lo general son podados una vez al año después de la cosecha principal. El cacao se planta normalmente a una distancia de 4x4m, lo que resulta en 625 plantas por hectárea (en monocultivo y en agroforestería). A veces, los árboles frutales individuales rodean la parcela de cacao. Las parcelas seleccionadas tienen un gradiente de edades de 5 a 8 años.
- 2) **Sistema Agroforestal simple de El Ceibo (SAF), certificado orgánico.-** Es un sistema de producción practicado por muchos pequeños productores en la región de Alto Beni y en el mundo cacaotero en general. Esta caracterizado por un sombreado permanente como *Inga spp.* y *Erythrina poeppigiana* como principales leguminosas, frutales asociados como *Rheedia spp.*, *Nephelium lappaceum*, *Theobroma grandiflorum*, *Persea americana*, y los árboles maderables como *Swietenia macrophylla*, *Hymenaea courbaril*, *Centrolobium ochroxylum*, *Cedrela odorata*, y *Amburana cearensis* del cultivo de cacao con un manejo orgánico. Las plantas de cacao y árboles de sombra por lo general son podados una vez al año para inducir la floración de cacao y para regular la sombra. Las parcelas seleccionadas tienen un gradiente de edades 8 a 17 años.
- 3) **Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS), certificado orgánico.-** Es el sistema de producción mas complejo que trata de imitar en lo mejor posible el

ecosistema natural del bosque, tiene una densidad alta de especies de arboles frutales, maderables y de regeneración natural. El manejo orgánico de este sistema se orienta en los principios de la sucesión natural de especies. Las especies que se dan en el proceso de sucesión natural se pueden agrupar en pioneros, especies forestales secundarias y primarias, en función de su ciclo de vida. No se aplica ninguna clase de insumos aparte de semillas. En este sistema donde el cacao es el principal cultivo, el proceso a menudo se inicia con el maíz y el arroz en combinación con yuca (*Manihot esculenta*) y quinchoncho (*Cajanus cajan*), que están pronto seguido de plátano (*Musaceae*) y la papaya (*Carica papaya*), la cual luego son seguidos por la piña (*Ananas comosus*) e Ingasp., a cuya sombra crece más lentamente especies de bosque primario como el cacao y *Swietenia macrophylla* pueden crecer vigorosamente. Estas últimas especies dominarán el sistema después de 10 a 15 años. Este proceso asegura que durante los primeros años, el agricultor puede obtener cosechas de los cultivos pertenecientes a los pioneros y de las especies del bosque secundario.

Además, la alta diversidad proporciona una serie de servicios ambientales, tales como el suelo preservación y la regeneración (Vieira et. al 2009), la acumulación de materia orgánica, y el control de plagas (Milz 2010). Las parcelas seleccionadas tienen un gradiente de edades de 13 a 16 años.

5.2.3. Diseño e Instalación de las Parcelas de Muestreo

El Número de puntos de muestreo fue de tres para cada sistema de producción (Monocultivo, Sistema Agroforestal y Sistema Agroforestal Sucesional), que resultan tres repeticiones por sistema de producción. (Figura 14).

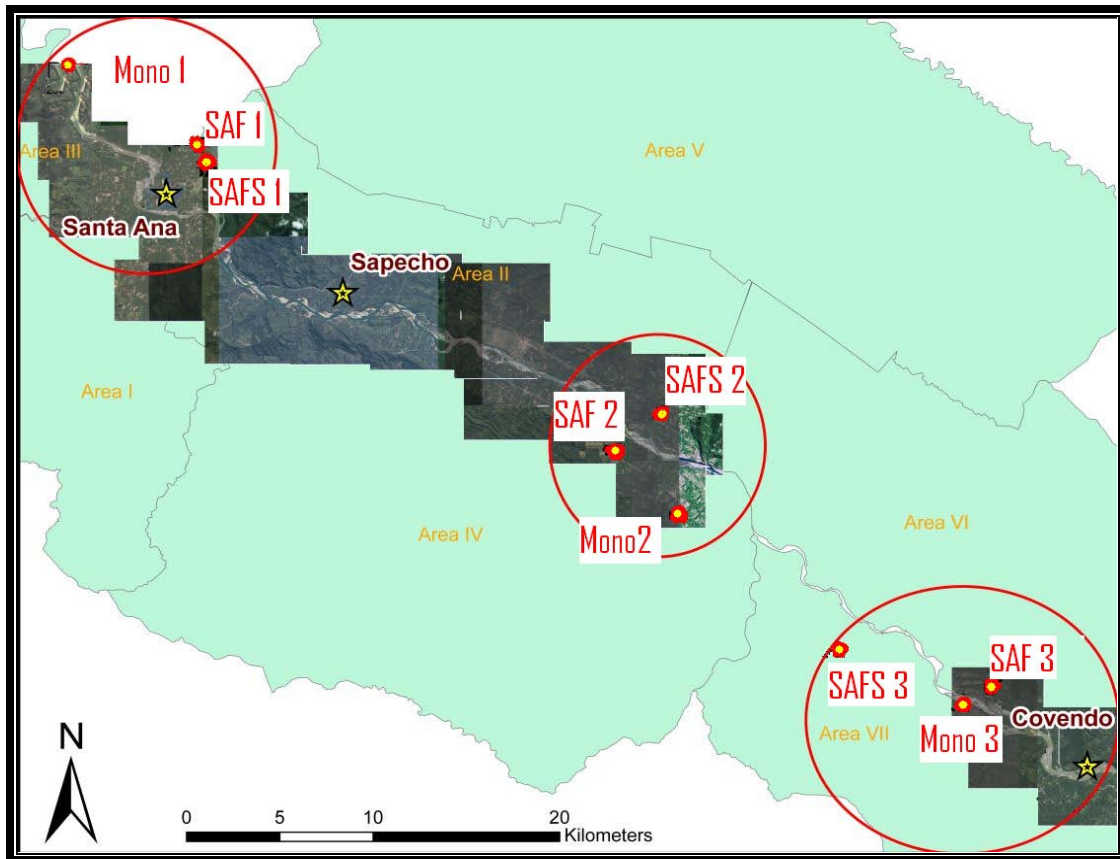


Figura 14. Ubicación del área de estudio en el municipio de Alto Beni, La Paz, Bolivia.

Primero se delimito las esquinas señalándolas con unas cintas de color rojo, a su vez cada 24 m se colocaron cinta de color para fines de orientación dentro la subparcelas, A partir de las cintas ubicados en la línea principal, se trazaron líneas perpendiculares para formar las subparcelas de 24 x 24 m. (Fig. 15).



Figura 15. Ubicación de la línea principal y demarcación de las subparcelas, esquinas marcadas con cintas de color rojo.

Cada parcela se estableció en una extensión de 2304 m² (48x48 m) donde se delimitó 4 subparcelas de 576 m² (24 x 24 m) (ICRAF 2005 ; Pearson et al 2005, (Figura 16).

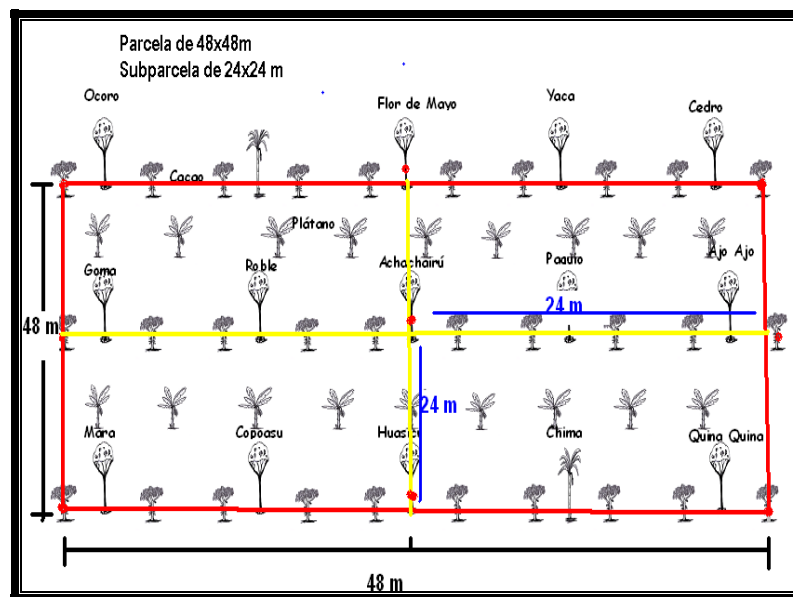


Figura 16. Esquema de Instalación de las Parcelas de Muestreo

5.2.4. Toma de datos

Las especies de arboles fueron identificadas con la ayuda del personal del banco de semillas forestales El Ceibo. Con el fin de mostrar la diversidad de los componentes de los sistemas de producción y estos fueron registrados en planillas de campo (Anexo 1).



Figura 17. Diversidad de especies en el Sistema Agroforestal Sucesional – Alto Beni.

5.2.5. Muestreos de Suelos para el análisis de carbono Orgánico

Se tomo dos muestras de suelo en cada parcela, retirando previamente la capa de hojarasca, la profundidad a la que se extrajeron las muestras fue de 0-25 y 25-50 cm. Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio de Calidad ambiental del Instituto de Ecología de la Universidad de San Andrés, La Paz.

5.2.6. Análisis de los datos

Para el análisis previamente se elaboro una base de datos, cada parcela tiene un área de 0.2304 ha por lo que el volumen de información a manejar es relativamente bajo. El manejo de los datos se realizo mediante el uso del programa no específico Microsoft Excel®.

El enfoque más elemental de las parcelas consiste en efectuar un análisis estático que se lleva a cabo con base en datos de un solo inventario o censo. Con esta información es posible profundizar sobre la fijación de carbono en la biomasa subterránea y la utilización de los recursos del bosque en un momento dado.

5.2.6.1. Estimación de la biomasa subterránea y carbono

El punto de partida para el monitoreo del carbono lo constituye la estimación de la biomasa que contiene el ecosistema en un momento dado, para establecer el inicio de un intervalo de medición, con base en datos de campo provenientes de parcelas (Vallejo *et al.*, 2005).

5.2.6.1.1. Biomasa subterránea (raíces)

Uno de los principales compartimientos en la medición de la cantidad de carbono almacenado en los bosques es la biomasa de raíces (MacDicken 1997). La información con respecto a la biomasa radical es bastante limitada, debido en parte a lo laborioso de su cuantificación por la dificultad de acceso al medio subterráneo (Satoo & Madgwick 1982). En general, la biomasa de las raíces es difícil de medir y consume demasiado tiempo por lo que se han utilizado diferentes métodos que están lejos de ser normalizados (Klinge *et al.*, 1975, Cairns *et al.*, 1997).

La clasificación entre raíces gruesas y finas obedece a un límite relativamente arbitrario. Esta diferenciación se debe principalmente a que las raíces que conforman estas categorías presentan en su superficie tricoblastos que son las estructuras encargadas de la absorción de nutrientes y del agua del suelo por parte de la planta (Jensen 1994).

➤ Biomasa de raíces gruesas (diámetro $\geq 5\text{mm}$)

En general, los estudios de la biomasa subterránea permiten considerar las raíces gruesas como aquellas que tienen diámetro ≥ 5 mm, las cuales juegan un papel fundamental como soporte mecánico del árbol y como medio de transporte de nutrientes y agua (Orrego & Del Valle 2001).

Un análisis posterior efectuado por Brown (2002) con datos de Cairns *et al.*, (1997) mostró que existe una relación estadísticamente significativa ($n = 151$; $r^2 = 0.83$) entre la biomasa aérea y la biomasa de raíces gruesas, relación estadística que se utilizó para las estimaciones de biomasa subterránea, también recomendado por Pearson *et al.* (2005):

$$(BRg)_{est} = \exp^{-1,085+0,926*\ln(AGB)}$$

Donde:

$(BRg)_{est}$ = Biomasa de raíces gruesas en $t\ ha^{-1}$

AGB =Biomasa aérea total en $t\ ha^{-1}$

➤ **Biomasa de raíces Finas (diámetro < 5mm)**

Las raíces finas cumplen una importante función en la absorción de agua y nutrientes por el árbol. No obstante, la determinación de su biomasa es una tarea ardua y laboriosa (Orrego & Del Valle 2001). El procedimiento utilizado para la cuantificación de biomasa de raíces finas fue el propuesto por Schlonvoigt *et al.* (2000). Este es un método directo destructivo que se basa en muestreo por area, las raíces finas se colectaron en tres nucleos de muestreo distribuidos al azar en la parcela de $2304\ m^2$, ya que la concentración de raíces de vegetación no arbórea es mayor en la capa superior del suelo, disminuyendo exponencialmente a la medida que aumenta la profundidad, por esa razón se realizo muestreos estratificados de acuerdo con las siguientes tres profundidades del suelo (0-10, 10-20, 20-30 cm) dos veces en el centro de cada sub parcela (Roncal – García *et al.* 2008). Las dimensiones del cilindro utilizado para la extracción de la muestra fueron 8 cm de diámetro interno por 10 cm de largo.

Para la extracción de raíces finas (Figura. 18), las muestras traídas de campo se colocaron en una bandeja plástica y se homogenizaron independientemente, rompiendo todos los terrones y extrayendo las raíces gruesas y las piedras presentes en la muestra.

El material homogenizado se colocó en un recipiente con agua durante una noche y al día siguiente se movió con los dedos tratando de romper todos los terrones y así dejar libre las raíces, la masa de raíces finas (<0.5 mm) fue separada del suelo con ayuda de tamices de 1 y 0.5 mm, este procedimiento se realizó varias veces hasta que ya no se encontraron raíces en el suelo, restando únicamente las raíces. Posteriormente se llevó las muestras a laboratorio para ser secadas al horno a 60 °C hasta obtener peso constante, luego se realizaron los respectivos cálculos para reportar en toneladas por hectárea de materia seca de raíces (t/ha).



Figura 18. Colecta de muestras para el análisis de raíces finas en los diferentes sistemas de Producción.

5.2.6.1.2. Estimación del contenido de carbono

Después de obtener el valor para la biomasa de en los diferentes componentes de la biomasa subterránea (t/ha) se realizó la multiplicación por el factor 0.5 (IPCC, 2003) para obtener la cantidad de carbono. Este factor es el resultado de un gran número de estudios que han demostrado que en promedio la materia vegetal contiene un 50% de carbono, siendo esta una norma establecida por el panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 1996), (Brown & Lugo, 1992; Brown 1997; Fearnside et al., 1999).

$$CBt = B_{total} * 0,5$$

Donde:

CBt = Carbono contenido en la biomasa en t ha-1

B Total = Biomasa total en t ha-1

5.2.6.1.3. Cálculo del carbono equivalente (CO₂e)

Las reducciones de emisiones resultantes de la actividad de proyectos forestales son contabilizadas en forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CRE's) y negociadas en mercados internacionales de carbono. Un CRE corresponde a una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), calculada en base al potencial de calentamiento global de este gas. Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO₂e (obtenido en razón de los pesos moleculares 44/12). Para saber la cantidad de CO₂e emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito se debe multiplicar esta por 3,67.

Determinación de CO₂ fijado:

$$CO_2 = Kr * C$$

Donde:

CO₂ = Dióxido de Carbono

C = Carbono

Kr = 3.67, Factor de conversión a CO₂, resultante del cociente de los pesos moleculares del dióxido de carbono 44 y del carbono 12.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Estimación del contenido de biomasa radical en los diferentes sistemas de producción Orgánica de cacao.

6.1.1. Biomasa de raíces finas (diámetro < 5mm)

Los diferentes sistemas de producción orgánica de cacao presentaron una diversidad de especies como se presenta en el cuadro 1, detallada en el anexo1.

Cuadro 1. Descripción de la cantidad de especies y biomasa de raíz fina en promedio 0-30cm de profundidad en los sistemas de producción Orgánica de cacao.

SISTEMA	Nº DE ESPECIES	Nº DE INDIVIDUOS	BIOMASA DE RAÍZ FINA (tn/ha) 0-30cm profundidad
Monocultivo	cacao	212	4.06
	chirimoya	4	
	banano	23	
Sistema Agroforestal	25	279	10.96
Sistema Agroforestal Sucesional	27	401	11.70

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la Figura 19 se observa que entre los sistemas de producción, la mayor cantidad de raíces finas se encuentra en el SAFS presentando en los primeros 0-10 cm de profundidad (5.81 tn/ha) y a los 20-30 cm (2.23 tn/ha), este sistema presenta mayor numero de especies en comparación a los otros sistemas, la época de muestreo se realizo en época lluviosa, lo cual estimulo una reacción fenológica del sistema radicular. Dado que las plantas al encontrar bajos contenidos de humedad en el suelo, hay un estimulo en el desarrollo de raíces finas (Van Kanten, 2003).

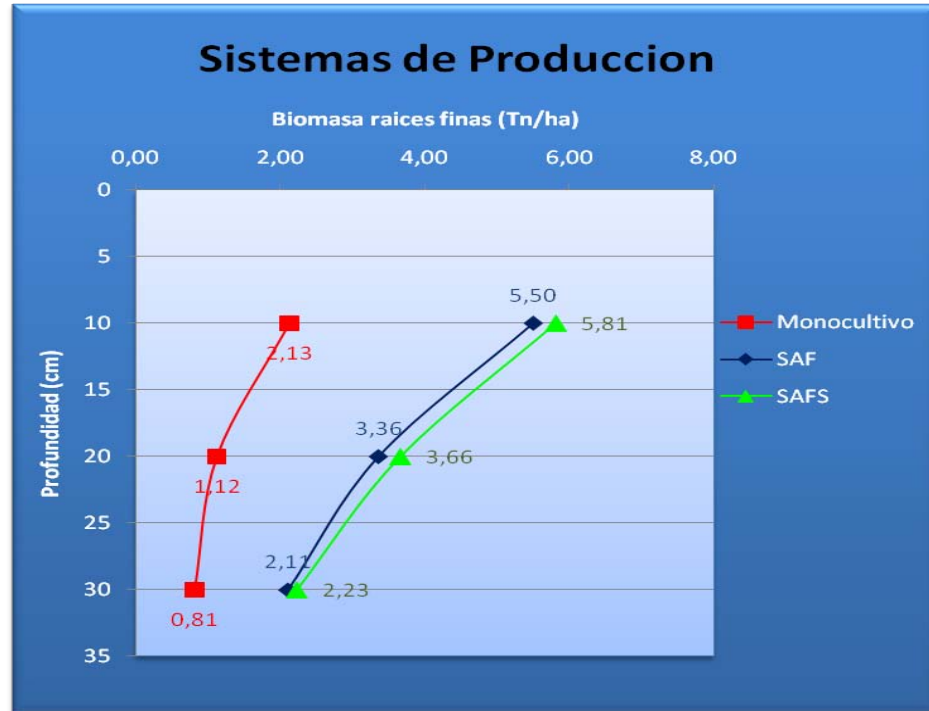


Figura 19. Biomasa de raíces finas a tres profundidades de suelo los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en diferentes parcelas productoras de cacao en la Zona de Alto Beni, perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

Este estudio reveló que la concentración de mayor densidad de raíces finas ocurre en las capas superficiales del suelo, con una tendencia de disminución exponencial conforme se profundiza en el suelo (Hughes y Gandar, citado por Morales 1997), estos datos son parecidos a los reportados en literatura (Persson 1983; Nepstad, *et al.*, 1994; Morales 1997; Kent, 2000 y Schaller 2001) para especies arbóreas, arbustivas y pastos.

En la capa superficial del suelo existe una mayor disponibilidad de nutrientes para la nutrición de las plantas en comparación con las capas más profundas. Así mismo, la diferencia entre los horizontes Ah era más profunda en los SAFS y SAF que en el Monocultivo, lo cual indica que junto con la densidad aparente del suelo, era menos compacto en los sistemas agroforestales.

Las raíces finas son consideradas como un importante componente de entrada de materia orgánica del suelo (Nair *et al.*, 2009). Por lo tanto, en base a los resultados

obtenidos el SAFS tenía mayor cantidad de raíces finas podemos destacar que el potencial de este sistema para secuestro de carbono en los suelos.

6.1.2. Biomasa de raíces gruesas (diámetro $\geq 5\text{mm}$)

Cuadro 2. Biomasa de raíces gruesas de las parcelas del Sistema de Monocultivo

SISTEMA	Nº DE ESPECIES	Nº DE INDIVIDUOS	BIOMASA DE RAÍZ GRUESA (tn/ha)
Monocultivo	cacao	212	8.14
	chirimoya	4	
	banano	23	
Sistema Agroforestal	25	279	22.63
Sistema Agroforestal Sucesional	27	401	27.90

Fuente: Elaboración propia, 2013.

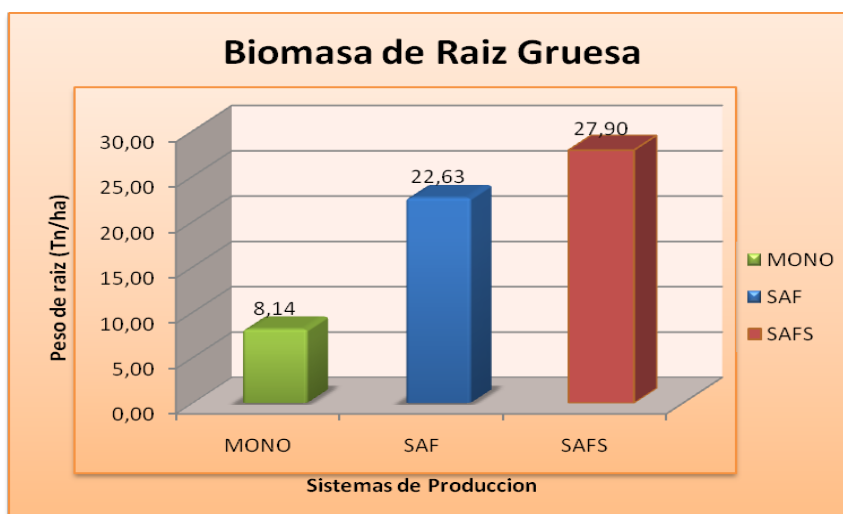


Figura 20. Biomasa de raíces gruesas en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

La Figura 20. Indica que comparando los sistemas de producción, la mayor cantidad de raíces gruesas se encuentra en el Sistema Agroforestal Sucesional presentando 27.90 (Tn/ha) ello se puede deber a que este sistema presenta mayor numero de especies en comparación a los otros sistemas.

6.1.3. Biomasa Subterránea total en las diferentes parcelas.

6.1.3.1 Monocultivo

Las estimaciones de biomasa subterránea para este sistema corresponden al aporte de raíces gruesas (≥ 5 mm) y finas (< 5 mm), con un aporte total de 12.19 Tn/ha como se muestra en el cuadro 3, correspondiendo a raíces finas 33.28% y 66.72% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea de 28.12%.

Cuadro 3. Biomasa Subterránea del Sistema de Monocultivo

Biomasa subterránea (Tn/ha)		Total (Tn/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm	
4.06	8.14	12.19

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.1.3.2 Sistema Agroforestal

Las estimaciones de biomasa subterránea para este sistema (SAF) corresponden al aporte de raíces gruesas (≥ 5 mm) y finas (< 5 mm), con un aporte total de 33.60 Tn/ha como se muestra en el Cuadro 4, correspondiendo a raíces finas 32.63% y 67.37% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea de 26.39%.

Cuadro 4. Biomasa Subterránea del Sistema Agroforestal

Biomasa subterránea (Tn/ha)		Total (Tn/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm	
10.96	22.63	33.60

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.1.3.3 Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS)

Las estimaciones de biomasa subterránea para este sistema (SAFS) corresponden al aporte de raíces gruesas (≥ 5 mm) y finas (< 5 mm), con un aporte total de 39.60 Tn/ha como se muestra en el Cuadro 5, correspondiendo a raíces finas 29.55 % y 70.45% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea de 25.17%.

Cuadro 5. Biomasa Subterránea del Sistema Agroforestal Sucesional

Biomasa subterránea (Tn/ha)		Total (Tn/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm	
11.70	27.90	39.60

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.1.3.4 Interacción entre sistemas

Cuadro 6. Análisis de varianza para la biomasa subterránea de Sistemas de Producción Orgánica de cacao

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
A	1245,165	2	622,583	13,483	,006
Error	277,051	6	46,175		
Total corregida	1522,217	8			

Fuente: Elaboración propia, 2013. Cv=23.87%

El análisis de varianza del cuadro 6 muestra que existen diferencias altamente significativas (nivel de significación 0.6 %, menor a 1%) entre los sistemas agroforestales respecto a la variable biomasa subterránea. El coeficiente de variación fue de 23.87 % lo cual indica que los datos son confiables y el ensayo se realizó dentro de los límites adecuados de precisión.

Cuadro 7. Pruebas de comparación de medias para la biomasa subterránea de sistemas agroforestales método Duncan (alfa=0.05)

	N	Subconjunto	
		1	2
Mono	3	12,1933	
SAF	3		33,5933
SAFS	3		39,6000
Sig.		1,000	,321

Cuadro 8. Pruebas de comparación de medias para la biomasa subterránea de sistemas agroforestales método Duncan (alfa=0.05)

tratamientos	Promedio de biomasa subterránea (t/ha)	Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$)
SAFS	36.6	A
SAF	33.59	A
MONO	12.19	B

En el Cuadro 8 se observa que no existen diferencias significativas entre los sistemas agroforestales SAFS y SAF con promedios de biomasa subterránea de 36.6 y 33.59 t/ha. Pero se encontraron diferencias significativas entre SAFS y MONOCULTIVO con promedios de 36.6 y 12.19 t/ha respectivamente, además entre SAF y MONOCULTIVO con promedios de 33.59 y 12.19 t/ha.

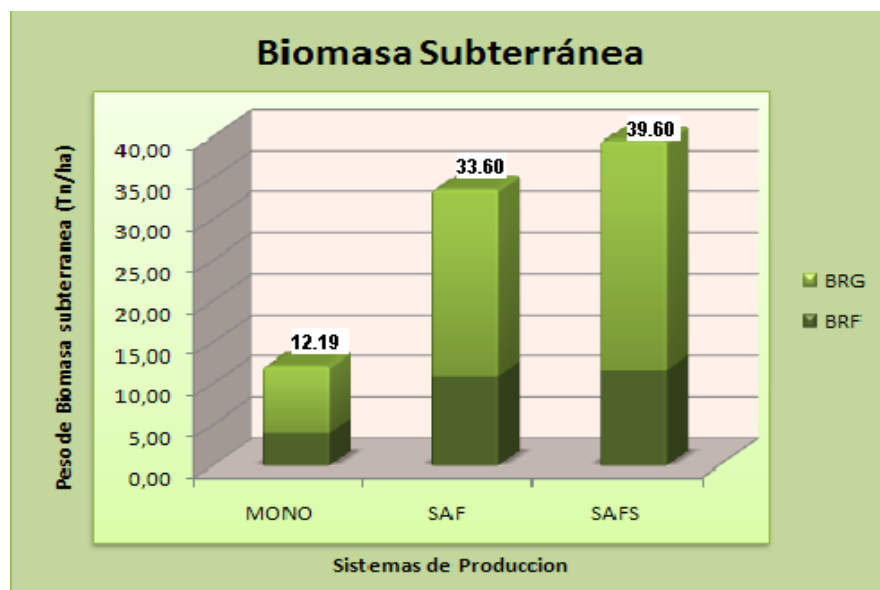


Figura 21. Biomasa subterránea en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

La biomasa radical en el primer sistema Monocultivo (12.19 tn/ha) difirió de los demás sistemas SAF (33.60 tn/ha) y SAFS (39.60 tn/ha), un factor que notablemente esta difiriendo este variabilidad es la presencia de la diversidad de individuos existentes en los sistemas SAF y SAFS ya que este factor hace que a mayor presencia de individuos se asignara una mayor proporción de recursos fotosintéticos para el desarrollo de un potente sistema radical en especial de raíces finas, accediendo así mayores cantidades de agua y de nutrientes. Como el mayor componente de la biomasa subterránea, los árboles de sombra juegan un papel importante para las reservas de carbono en sistemas de cultivo de cacao de Alto Beni. Otro factor que influyo fue también las diferencias de edades de los sistemas de producción: Monocultivo fue el sistema más joven y el que tenía más edad fue el SAFS (Anexo 2). Esto se debía a diversos criterios de selección tuvieron que tomarse en cuenta por lo que es imposible encontrar parcelas representativas de la misma edad, No quisimos incluir una correlación entre la biomasa y la diversidad de árboles por que esta correlación solo hubiera sido impulsado por los monocultivos, que son por definición menos amplia.

Fearnside (1994) & Phillips *et al.*, (1998) indican que la proporción de biomasa aérea respecto a la biomasa del suelo en bosques tropicales es de 3:1 basado en el valor medio de tres estudios realizados en la amazonia brasileña; sin embargo en el presente estudio la relación en el primer sistema fue 2,3:1, para SAF fue de 2,8:1 y SAFS presento 2,5:1.

6.2. Estimación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa subterránea (SOC)

6.2.1. Monocultivo

La cantidad de carbono proveniente de este compartimiento y el edáfico en los primeros 25 cm se presenta en el cuadro 9, donde el 86.07% del total del carbono subterráneo corresponde al edáfico y el restante 13.93% al aporte de raíces gruesas y finas.

Cuadro 9. Carbono total Subterráneo del Sistema de Monocultivo

Carbono subterránea (tC/ha)		Edáfico (tC/ha)	Total (tC/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm		
2.03	4.07	37.68	43.78

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.2.2. Sistema Agroforestal (SAF)

La cantidad de carbono proveniente de este compartimiento y el edáfico en los 25 cm se presenta en el cuadro 10, donde el 68.89% del total del carbono subterráneo corresponde al edáfico y el restante 31.11% al aporte de raíces gruesas y finas.

Cuadro 10. Carbono Subterráneo total del sistema SAF

Carbono subterránea (tC/ha)		Edáfico (tC/ha)	Total (tC/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm		
5.48	11.32	37.19	53.99

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.2.3. Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS)

La cantidad de carbono proveniente de este compartimiento y el edáfico en los 25 cm se presenta en el cuadro 11, donde el 61.07% del total del carbono subterráneo corresponde al edáfico y el restante 38.93% al aporte de raíces gruesas y finas.

Cuadro 11. Carbono Subterráneo total del sistema SAFS

Carbono subterránea (tC/ha)		Edáfico (tC/ha)	Total (tC/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm		
5.85	13.95	31.06	50.86

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.2.4 Interacción de los Sistemas

Cuadro 12. Análisis de varianza para la Estimación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa subterránea (SOC)

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
A	81,726	2	40,863	1,227	,357
Error	199,793	6	33,299		
Total corregida	281,520	8			

En el análisis de varianza de cuadro muestra que no existen diferencias significativas (nivel de significación 0.6%) entre los sistemas de producción con respecto a SOC.

Cuadro 13. Pruebas de comparación de medias para SOC, método Duncan (alfa=0.05)

A		Subconjunto
	N	1
SAFS	3	31,0567
SAF	3	37,1900
Mono	3	37,6800
Sig.		,223
b. Alfa = 0,05.		

Cuadro 14. Pruebas de comparación de medias para SOC, método Duncan (alfa=0.05)

tratamientos	Promedio de la cantidad de carbono (tC/ha)	Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$)
SAFS	43.78	A
SAF	53.99	A
MONO	50.86	A

El cuadro 14 muestra que no existen diferencias significativas entre los sistemas de producción SAFS, SAF y Monocultivo

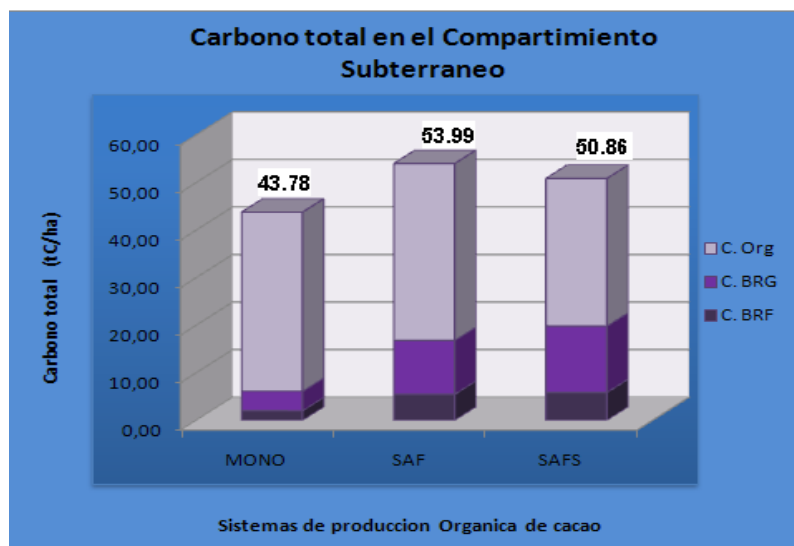


Figura 22. Carbono total en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

Las pruebas mostraron que ningún sistema difería significativamente de otro. Sin embargo, debido a la falta de datos de referencia para las acciones iniciales del SOC de las parcelas no se puede excluir que SOC era bastante determinado por las condiciones previas que por el sistema de cultivo (véase la FAO, 2011). Otro defecto del diseño de la investigación son las diferentes edades de los sistemas de producción: Monocultivo fue el sistema mas joven y el más viejo es el SAFS (anexo 2). Esto se debía a diversos criterios de selección que tuvieron tenerse en cuenta, por lo que es imposible de encontrar parcelas representativas de la misma edad. Se incluyo una correlación entre biomasa y la biodiversidad de arboles esta correlación tendría que estar impulsado por los monocultivos, que son por definición menos amplia.

Las diferencias en los stocks de carbono y los aspectos de diversidad entre los sistemas agroforestales simples y de sucesión son considerables, (SAF 53.99 tC/ha y SAFS 50.86 tC/ha), si bien el SAFS tiene menor cantidad de C en el estrato subterráneo, este sistema tiene mayor cantidad de C en la parte aérea en este los diferentes pisos o estratos están repletos de plantas similares a la selva natural. A partir

de la constatación de que el SAF y SAFS tienen los mayores volúmenes de carbono del estrato subterráneo a comparación del Monocultivo, llegamos a la conclusión de que estos sistemas tienen un potencial especial sobre el clima en la mitigación del cambio climático. Dos de las parcelas de SAFS se han instalado en un suelo pobre de nutrientes en base a los reportes de los productores de cacao, una en pastos y una en monocultivo de cacao (SAF2 y SAFS 3). Viera *et al.*, (2009) ha sugerido que la combinación de los principios de la restauración de los bosques y de sucesión en la agroforestería para acelerar la restauración de la fertilidad del suelo y mejora la seguridad alimentaria de los agricultores, por lo tanto los agricultores participan activamente en los procesos de restauración y el conflicto entre la recuperación del suelo y la producción agrícola puede ser aliviado (Vieira *et al.*, 2009). Con respecto a los aspectos de la diversidad de árboles, las parcelas SAFS tenían, en promedio, el índice más alto de Shannon y la mayor riqueza de especies de todos los sistemas evaluados (Pillco, 2013 tesis en preparación). La biodiversidad agrícola se ha discutido como una característica importante para la capacidad de adaptación de los sistemas agroecológicos al cambio climático (Ifejika Speranza, 2010; Henry et al. 2009 ; Niggli et al . 2007) y por lo tanto , SAFS pueden considerarse prometiendo también en este contexto . Desde las estribaciones orientales de los Andes son considerados como parte de un punto caliente de la biodiversidad (Myers et al. 2000), los sistemas agroforestales en general y de sucesión sistemas agroforestales, en particular, pueden ser considerados como un ecosistema importante amortiguador (cf. Rice y Greenberg, 2000) . La región del Alto Beni une dos parques nacionales (Isibore Segure y Madidi) y sus sistemas agroforestales pueden desempeñar un papel importante para el intercambio de genes. Algunas especies de árboles con un naturalmente gran abundancia en los bosques primarios locales, como *Swietenia macrophylla* tiene casi desaparecido del ecosistema natural por la tala selectiva. Varios autores han argumentado que agroforestería es una oportunidad para que esas especies pueden persistir en el que se enfrentan a la extinción a través sobre explotación (Bhagwat et al 2008; Orozco y Somarriba2005). Asimismo, en nuestro estudio, *Swietenia macrophylla*

era abundante en los sistemas agroforestales, con los agricultores que indica que estaban plantando árboles maderables para el futuro.

6.3. Estimación de la cantidad de CO₂ capturado por los diferentes sistemas de producción Orgánica de cacao (*Theobroma cacao* L.).

Existen varios métodos para estimar la cantidad de CO₂ fijado por la vegetación ; sin embargo, numerosos estudios (Brown *et al.*, 1986; Schroeder *et al.*, 1993; Hoen y Solberg, 1994; Ortiz, 1997; Ramirez *et al.*, 1997) se ha empleado uno simple para evaluar este proceso, en el cual los datos existentes de biomasa por hectárea son multiplicados por un afactor, que involucra el contenido de C (CC, en proporción) en la biomasa seca y la relación entre el peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso atómico de C (12).

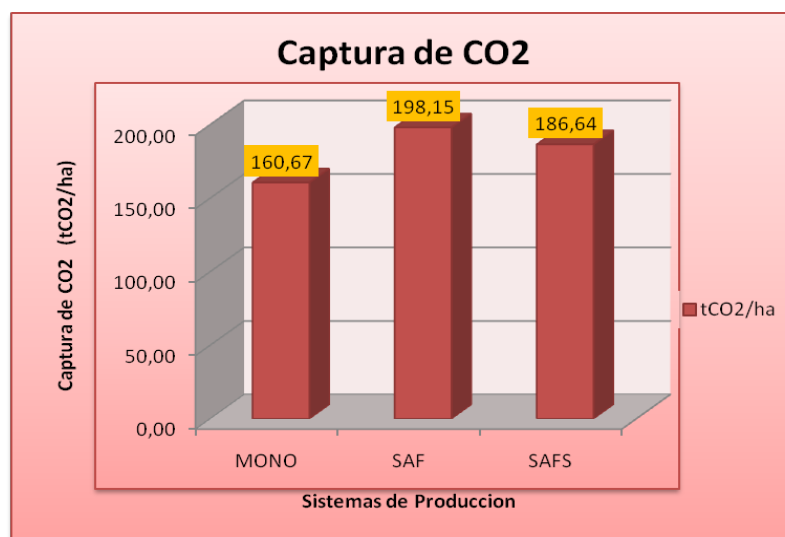


Figura 23. Captura de Dióxido de Carbono por los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

La figura 23 nos muestra que la mayor cantidad de CO₂ capturado por el estrato subterráneo se encuentra en el sistema agroforestal Simple.

Las similitudes en la captura de CO₂ entre las distintas prácticas agroforestales se puede atribuir básicamente a la presencia de las especies forestales más abundantes en las practicas agroforestales seleccionadas para el presente estudio. Debido a que las especies forestales contribuyen con un alto porcentaje en la captura de CO₂ del cacao asociado con especies forestales en la región de Alto Beni. Coincidiendo de esta manera de que las especies es uno de los factores importantes en la captura de CO₂ (Muños, 2002; Saavedra, 2005; Alvarez, 2008). Sin embargo (Pardé, 1980; Goyaso *et al.*, 2002), mencionan que además la biomasa total de un árbol varia considerablemente dependiendo de las especies , la edad y el sitio (Gomez,1976; Madgwick, 1977)

VII. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados y objetivos planteados se tiene las siguientes conclusiones.

- La biomasa de raíces constituye una porción importante de la biomasa total en los sistemas de producción orgánica de cacao, permitiendo su estimación a partir de una variable indirecta como la biomasa aérea (para el análisis de raíz gruesa), encontrándose una relación con esta variable, respecto a la biomasa subterránea de 2,3:1 (Monocultivo), 2,8:1 (SAF) y 2,5:1 (SAFS), diferente a la de bosques amazónicos (3:1). Además el bajo costo al medir estas variables permiten realizar estimaciones con cierto grado de exactitud.
- En base a los resultados obtenidos se encontró que el sistema SAFS presenta un fuerte potencial en la producción de biomasa subterránea (39.6 Tn/ha), en relación a los sistemas SAF y monocultivo, lo cual es importante destacar ello.
- También aludir que el SAFS es el sistema de producción con mayor número de individuos presentes.
- La cantidad de carbono estimado para este estudio, no difirió significativamente entre los sistemas (monocultivo 43.78 Tn/ha; SAF 53.99 Tn/ha; SAFS 50.86 Tn/ha), sin embargo debido a la falta de datos de referencia para las acciones iniciales del SOC de las parcelas no se puede excluir que SOC era bastante determinado por las condiciones previas que por el sistema de cultivo.
- En el suelo de los diferentes sistemas de producción, el contenido de carbono para este bosque a una profundidad de 25 cm, tuvo un rango de aporte de 31,06 – 37.68 tC/ha, con una relación respecto al carbono aéreo de 2:1; relación influenciada por el tipo de suelo y la alta actividad biológica.
- La presente investigación aporta información sobre el potencial que brindan los sistemas de producción orgánica en el almacenamiento y fijación de carbono orgánico estable en el suelo.

- Este estudio compara las existencias de biomasa subterránea y carbono en los sistemas de producción de cacao de diferentes complejidad agroecológica.
- Biomasa subterránea, las reservas de SOC y la riqueza de especies fue mayor en Sistemas Agroforestales Sucesionales.
- Es importante que a mediano plazo los investigadores implicados en el estudio de raíces concentren su esfuerzo al estudio de sistemas agroforestales, y a la importancia practica de los procesos radiculares.

VIII. RECOMENDACIONES

En base a los resultados y conclusiones se tiene las siguientes recomendaciones:

- Realizar viajes a la zona de estudio en diferentes épocas, debido a que puede existir la posibilidad de que en diferentes épocas la cantidad de raíces finas varíe.
- Es necesario tener en cuenta que el cálculo de biomasa subterránea y almacenamiento de carbono del presente estudio, es solo una estimación.
- Ensayar estudios en suelos, a una mayor profundidad (calicatas, análisis de horizontes y otras características edafológicas) para relacionar el tipo de suelo con las especies de plantas leñosas a desarrollarse en estos ambientes, y también para conocer la cantidad de carbono acumulado en estos bosques en profundidades mayores a los 25 cm.
- Reconociendo la cantidad significativa de carbono contenido en la biomasa de raíces, se recomienda estudiar la factibilidad de la utilización de bonos de carbono, y certificados de remisión de CO₂, para beneficiar a los pobladores de la región.
- También es muy importante valorar económicamente los sistemas agroforestales de producción en pie, y que permitan visualizar los costos de oportunidad de tener estos predios en conservación brindando una cantidad de beneficios ecosistémicos y servicios ambientales, esto permitirá generar mayor interés a los tomadores de decisiones respecto a la conservación.
- Con base a nuestros resultados, se propone investigar cuales son las practicas de manejo que favorezcan la acumulación de C (cantidad de podas, raleos, mantenimiento), pero sin demandar al agricultor mucha mano de obra.
- Ajustar los modelos matemáticos (ecuaciones alométricas) a la realidad de la zona.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- ALBRIGHT, A; KANDJI, ST. 2003.** Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 15-27p.
- ALEGRE, J; RICSE ,A; ARÉVALO, L; BARBARÁN, J; PALM, C. 2000.** Reservas de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra en la amazonía peruana. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de Ucayali (CODESU) Boletín informativo. 12: 8-9 p.
- ARCE, N; ORTIZ, E; VILLALOBOS, M; CORDERO, S. 2008.** Existencias de carbono en charrales y sistemas agroforestales de cacao y banano de fincas indígenas bribri y cabécar de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*: 46. 4p.
- ASCARRUNZ, N., & REED, S. 2007.** Efectos de precipitación temperatura y suelo en el ciclo del carbono. En resúmenes del V congreso Nacional de Biología. Santa Cruz, Bolivia. 150pp.
- AUGSTBURGER, H. 2007.** Evaluación de una propuesta para la plantación, manejo y aprovechamiento de bosques familiares de uso múltiple, basada en la agroforestería sucesional, en tres predios familiares de la comunidad de Mal Paso Cochabamaba. Tesis de grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Católica Boliviana San Pablo (UCB), Cochabamba - Bolivia.
- BEER, J; HARVEY, C; IBRAHIM, M; HARMAND, JM; SOMARRIBA, E; JIMÉNEZ, F. 2003.** Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38): 80-87p.
- BROWN S. 1997.** Estimating biomass change of tropical fiorest: Aprimer. Food and Agriculture Organizati3n, Roma (UN FAO Forestry Paper, no. 134).
- BROWN S. 2002.** Measuring carbon in forest: current status and future challenges. *Env. Pollut* 116: 363-372.
- BROWN, S. L., P. SCHROEDER, AND J. K. KERN. 1999.** Spatial distribution of biomass in forest of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123: 81-90.
- CAIRNS, M. BROWN, S., HELMER, E.,BAUMGARDNER, E.1997.** Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecologia* 111: 1-11.

- CARRERAS, J; ALADRO, A; MARTÍN, L; ROSEMBERG, A. 2007.** Consecuencias del cambio climático. Revista Sustainlabour 6 – 46 p.
- CUMAT (CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA CAPACIDAD DE USO MAYOR DE TIERRA). 1987.** Capacidad de uso mayor de la tierra, proyecto Alto Beni. Informe técnico. La Paz - Bolivia.
- CLARK D. A., S. BROWN, D. W. KICKLINGHTER, J.Q. CHAMBERS, J.R. THOMLINSON, A. HALLND. 2001.** net primary production in tropical Forest: An evaluation and Synthesis of existing field data. Ecological Applications 11:371-387.
- CHACON, M., RUGNITZ, M. 2009.** Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Manual Técnico 11.—1.—ed. Lima Peru.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazônica (IA). 2009.79pp.
- CHAPI, N., 2008.** Composición Florística, Biomasa y carbono de un Bosque Montano Pluvial, Sud Oeste de Apolo, Región Madidi. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniería Agronómica. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz - Bolivia.
- DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL AMBIENTAL 2008.** Universidad de Talca. Estimación preliminar de la retención de carbono en raíces finas y mantillo de un renoval de *Nothofagus glauca* de la precordillera andina de la Región del Maule, Chile. Talca- Chile. 7pp.
- DE JONG, B. H. J., R. TIPPER, AND G. MONTOYA-GOMEZ. 2000.** An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forest: evidence from southern Mexico. Ecological Economics 33: 313-327.
- DONOSO, C. 1993.** Bosques templados de Chile y Argentina. Variación estructura y dinámica. 1ra ed., Editorial Universitaria. Chile. 484 p.
- ELBERS, J. (2002):** Agrarkolonisation im Alto Beni. Landschafts- und politisch ökologische Entwicklungsforschung in einem Kolonisationsgebiet in dem Tropen Boliviens. Inaugural- Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Heinrich-Heine Universität Dëutschland.
- EGUREN, L. 2004.** El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas. Santiago, Chile, CEPAL. 83 p. (Serie Medio Ambiente y Desarrollo).

- ESQUIVEL E.** 2005. Uso de suelo y almacenamiento de carbono en dos comunidades del municipio de Marquez de Comillas, Chiapas. Tesis. Instituto Politecnico Nacional, Mexico, D.F. 136pp.
- FAO (ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN).** 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 88. Roma 98 p.
- FAO,** 2003. Agricultura orgánica, ambiente y seguridad alimentaria. Roma, Italia. 253 p.
- FAO,** 2006. Los bosques y el cambio climático. Disponible en: <http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2006/1000247/index.html>. Revisada el 15-11-2012.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION).** 2007. Los bosques y el cambio climático. Disponible en <http://www.fao.org/forestry/foris/pdf/infonotes/infofaospanish-losbosquesyelcambioclimatico.pdf>. Revisada el 15-11-2012.
- FISHER, MJ.; RAO, IM.; AYARZA, CE.; SAENZ, JI.; THOMAS, RJ.; VERA, RR.** 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 31:236-238.
- FUJITA, N; YANAGISAWA, N.** 1999. Different distribution patterns of woody species on a slope in relation to vertical root distribution and dynamics of soil moisture profiles. *Ecological Research*. 14:165-177.
- GUERRA, J., GAYOSO, J., SCHLATTER, J., NESPOLO, R.** 2005. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque* 26(1): 5-21. Chile.
- GILL, R. A., AND R. B. JACKSON.** 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147: 13-31.
- GIL, R.** 2007. El ambiente del suelo y el crecimiento de las raíces. Publicación Miscelánea N° 107. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica De Trigo Y Otros Cultivos De Invierno.
- GONZALES, E.** 2007. Consultoría realizada para la FAO y el IICA en el marco del estudio conjunto sobre los productos de calidad vinculada al origen. 21 – 45.

- GREENFACTS. 2007.** Consenso científico sobre el Cambio Climático. IPCC. 17 p. En línea: <http://www.greenfacts.org/es/cambio-climatico-ie4-index.html>. Revisado 15-12-12.
- GRUBERG, H. 2007.** Evaluación comparativa de la sostenibilidad económica, sociocultural y ecológica de la agroforestería sucesional en al zona del Alto Beni, Bolivia. Tesis de grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Católica Boliviana San Pablo (UCB). Cochabamba - Bolivia.
- HERNANDEZ, R., C. FERNANDEZ & P. BAPTISTA. 2003.** Metodología de la investigación, 3ª Edición, Edit. McGRAW – HILL. Interamericana, México DF. 705 p.
- INE (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA). 2001.** Condición de actividad. La Paz, Bolivia. En: < <http://www.ine.gob.bo> > (06.06.12)
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2000)** Land use, Land-use Change, and Forestry. Cambridge University, Press, Cambridge, UK.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). 2007.** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Paris, Francia. s.e. p 2.
- _____. 2000. Land use, Land-use Change, and Forestry. Cambridge University, Press, Cambridge, UK.
- JACKSON *et al* (1997) y RAICH (1983),** describen el comportamiento de la biomasa radical conforme se disminuye la profundidad y demuestran un comportamiento exponencial conforme se avanza verticalmente, dando una idea sobre los coeficientes de extinción de raíces.
- JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. 2000.**The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10: 423-36.
- JONGMAN, R. H., C. J. F. TER BRAAK & O. F. R. VAN TONGEREN. 1987.** *Data analysis in community and landscape ecology*. Pudoc, Wageningen (Los Países Bajos). 299 p.
- KANNINEN, M. 2001.** Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: Potencial para América Latina. En conferencia electrónica en potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. LEAD-CATIE.

- LÓPEZ, A. 2001.** Asistencia técnica y capacitación en sistemas agroforestales tipo multiestratos. ALADI. Montevideo - Uruguay.
- MACDICKEN, K. G. 1997.** A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington.
- MANTANINI, F. 1996.** Sistemas Agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos. Organización para estudios tropicales. San José, CR. 622p.
- MARTINO, D. 2007.** Las masas forestales constituyen un medio eficaz para mitigar el cambio climático. (En línea). Revisado el 27 de Feb. 2012. Disponible en <http://www.basoa.org/datos/documentos/Entrevista%2074.pdf>
- MASSMANN, C. 2000.** Características y variabilidad de sitios con plantaciones de *Pinus radiata* D en suelos graníticos y metamórficos de las regiones VII, IX y X. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 93 p.
- MEDINA, C. 2006.** Indicadores de impactos de los sistemas forestales y agroforestales. POSAF II p 1, 28 p.
- MILZ, J. 1997.** Guía para el establecimiento de sistemas agroforestales en Alto Beni, Yucumo y Rurrenabaque Bolivia. DED. La Paz - Bolivia.
- MOLLO, M. 2010.** Estimación de la Captura de dióxido de carbono en las Principales Prácticas Agroforestales de la Región de Alto Beni, La Paz. Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba - Bolivia.
- MORALES, A. 1997.** Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales. In: Simposio Internacional - Posibilidades del Manejo Forestal Sostenible en América Tropical. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. CATIE. 11 p.
- MORALES, A. 1997.** Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones
- N. LA SCALA, JR.*, A.R. PANOSSO, G.T. PEREIRA. 2003. Modelling short-term temporal changes of bare soil CO₂ emissions in a tropical agrosystem by using meteorological data. *Applied Soil Ecology* 24: 113–116.

- MORA, V. 2001.** Fijación, Emisión y Balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 92 p.
- NAIR, P. Y K. RAMACHANDRAN. 1997.** *Agroforestería*. Centro de agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma, 1ra Edición. Chapingo - México.
- OADES, J.M. 1988.** The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5:35-70.
- OBRADOR, P. 2002.** Informe de evaluación de la experiencia de multiestrato. Periodo de evaluación marzo-septiembre 2002. DED/IIAB, Alto Beni - Bolivia.
- ODUM, E. 1986.** *Fundamentos de la ecología*. 1ra Edición, Nueva Editorial Interamericana S.A. de C. V, México.
- OELBERMANN M., VORONEY P., GORDON A. 2004.** Carbon sequestration in Tropical and temperate agroforestry systems: review with examples from Costa Rica and Southern Canada. *Agric. Ecosyst. Env.* 104: 359-377.
- ONU (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS). 1998.** Protocolo de Kyoto de la convención Marco de las naciones unidas sobre el Cambio climático. 25 p. En línea: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>. Revisado el 28-12-1.
- OROZCO, L. 2005.** Enriquecimiento agroforestal de fincas cacaoteras con maderables valiosos en Alto Beni, Bolivia. Tesis de grado para optar por el titulo de Magíster Scientiae en Agroforestería Tropical. Turrialba - Costa Rica. En :< <http://orton.catie.ac.cr> > (12.05.07).
- ORTIZ, M. 2006.** Conocimiento local y decisiones de los productores de Alto Beni, Bolivia, sobre el diseño y manejo de la sombra en sus cacaotales. Tesis de grado para optar por el titulo de Magíster Scientiae en Agroforestería Tropical. Turrialba – Costa Rica. En :< <http://orton.catie.ac.cr> > (10.06.012).
- ORTIZ, A; RIASCOS, L; SOMARRIBA, E. 2008.** Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas*: 46. 4p.
- PINTO, W. 2005.** Evaluación y consecuencias de sitio y manejo en la fase de

establecimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.) en fincas de productores del Alto Beni. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniería Agrónoma. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz - Bolivia.

RAPPAPORT, J. 1988. Onderzolkingen over de ontwikkeling der wortels by *Lolium perenne* T. (investigations on the development of roots of (*Lolium perenne* L.). Meded. Landb Hoogeschool, Gent. 56: 121.

ROBERT, M. 2002 . Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos no. 96. FAO. Roma, IT. 61 p.

SALIMON, C. I., AND I. F. BROWN. 2000. Secondary forest in western Amazonia: significant sinks for carbon released from deforestation. *Interciencia* 25: 198-202.

SOMARRIBA, E. Y L. TRUJILLO. 2005. El Proyecto "Modernización de la cacaocultura orgánica del Alto Beni, Bolivia". Revista Agroforestería en las Américas. CD- ROM. Centro agronómico de investigación y enseñanza CATIE. Nº 16, 12-16.

SOSA, LM; ESCAMILLA, EP; DÍAZ, SC. 2004. Organic coffee. *In:* Wintgens, JN. Ed. Coffee: growing, processing, sustainable production. Wiley- VCH verlag. DE. p. 339-353.

SEILER, C. 2013. Variabilidad y Tendencias Climáticas en Bolivia. Grupo de Ciencias del Sistema de la Tierra y Cambio Climático, Universidad y Centro de Investigación de Wageningen, Holanda, y Departamento de Cambio Climático y Servicios Ambientales, Fundación Amigos de la Naturaleza, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 19 pp.

SCHELENGEL, B. 2001. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 18 a 20 de octubre del 2000. Valdivia Chile. 13pp.

SIERRA, A., VALLE, J., 2001. Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en Bosques Sucesionales y Maduros tropicales de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia. 16pp.

SCHROEDER, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89 - 97p.

- UNDP, 2011.** Tras las huellas del cambio climático en Bolivia, estado del arte del conocimiento sobre adaptación al cambio climático agua y seguridad alimentaria. 144.
- VALLEJO, M.I., A. C. LONDOÑO- VEGA, R. LOPEZ- CAMACHO,G. GALEANO.E. 2005.** Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogota D.C., Colombia. 310pp.
- VAZ, P. 2001.** Agroforestería en Brasil. Una experiencia de regeneración análoga. Brasil. En: < <http://agriculturas.leisa.info/index> > (Revisado el 28-11-12)
- VEGA, M. 2005.** Planificación agroforestal participativa para el enriquecimiento de fincas cacaoteras orgánicas con especies leñosas perennes útiles, Alto Beni- Bolivia. Tesis de grado para optar por el título de Magíster Scientiae en Agroforestería Tropical. Turrialba - Costa Rica.
- VOGT, K., H. ASBJORSEN, A. ERCELAWN, F. MONTAGNIN, AND M. VALDES. 1997.** Roots and micorrizas in plantation ecosystems. In E. K. S. Nambiar and A. G. Brown (Eds.). Management of soils, nutrients and water in tropical plantation forest, pp. 247-296. ACIAR Monograph No. 43, Canberra.
- WADSWOTRH, F. H. 2000.** Producción Forestal para America Tropical. Departamento de Agricultura de los EE UU. (USDA). Servicio Forestal, Manual de Agricultura. 568pp.
- WILKES, H. 2007.** Guía metodológica para la implementación, el manejo y el aprovechamiento de Sistemas Agroforestales. Servicio alemán de cooperación social- técnica (DED). Interinstitucional Alto Beni. La Paz – Bolivia.
- YANA, W. Y WEINERT 2003.** *Técnicas de sistemas agroforestales multiestrato*. Manual práctico. Tercera Edición. Interinstitucional Alto Beni. La Paz - Bolivia.
- ZAMORA, J. QUIROZ D. 2000.** Terminología Forestal de uso comun en centro America. Manejo Forestal tropical. CATIE. Unidad de manejo de Bosques Naturales.Nº 14. Junio.200. ISSN 1409-3456 pp.

ANEXOS

ANEXO 1

Lista de especies presentes en los diferentes Sistemas de producción de cacao.

SISTEMA	Especies N/comun	Nº especies	SISTEMA	Especies N/comun	Nº especies	SISTEMA	Especies N/comun	Nº especies
SAFS 1	Ambaibo	1	SAFS 2	Achachairú	1	SAFS 3	Achachairú	5
	cabeza de negro	1		Almendrillo	5		Ajo Ajo	1
	cacao	168		cacao	191		cacao	311
	café	18		carambola	24		café	19
	chima	4		chima	64		cedro blanco	5
	colomero	4		flor de mayo	2		cedro colorado	2
	corocho	1		huasicucho	10		ceibo	6
	chuchi medicinal	2		mara	9		chima	74
	cuchi verde	1		naranja	10		chirimoya	3
	cuta blanca	2		nogal	5		colomero	4
	flor de mayo	1		pacai	1		chuchi medicinal	1
	gabu	2		palto	9		cuta blanca	1
	huasicucho	1		paquio	5		flor de mayo	12
	laurel americano	2		banana	1		gabetillo	2
	mango	3		roble	3		gabu	1
	mara	2		n/c	4		guayanaba	1
	motacu	1		total	344		mandarina	1
	nuí	4					mara	15
	pacai	8					mata palo banco	1
	pacai machete	2					nispero	1

	palo batan	1					nogal	4
	palo flecha/cicile	4					ochoo	1
	palo yuca/pirijcho	3					pacai	1
	palo zapallo	1					pacai cola de mono	2
	paquio	2					palto	6
	banana	58					roble	38
	quina quina	2					tarara	1
	roble	8					teca	2
	sangre de toro	2					n/c	2
	siquile	2					total	523
	solanaceae	1						
	sterculiaceae	1						
	toco blanco	2						
	verdolago	1						
	villca blanca	18						
	n/c	1						
	total	335						
SAF 1	Especies N/comun	Nº especies	SAFS 2	Especies N/comun	Nº especies	SAF3	Especies N/comun	Nº especies
	Ambaibo	2		Achachairú grande	1		Ajo Ajo	1
	balsa	2		cacao	242		ambaibo	5
	cacao	175		café	7		cacao	116
	café	16		cedrillo	1		chirca	11
	chirca	1		cedro blanco	5		Flacourtiaceae	1
	chirimoya de monte	1		ceibo	6		flor de mayo	1

	limon	1		chima	21		itapallo	16
	mandarina	12		chima criolla	5		Laurel Americano	1
	mara	3		cuchi medicinal	1		lima	1
	motacú	4		fabaceae	1		mimosaceae	3
	naranja criollo	2		goma	1		motacú	18
	pacai	9		guayabochi	2		pacai	1
	pacai cola de mono	1		huasicucho	8		palo caricari	4
	palo santo	1		jacaranda	8		Palo yuca/Pirijcho	1
	palo santo macho	5		leucaena	3		palta	1
	Palo yuca/Pirijcho	3		mandarina cleopatra	2		papaya	17
	roble	2		manzana brasilera	1		papaya de monte	1
	toco blanco	1		mara	12		plátano	1
	toco colorado	1		nuí	1		toco blanco	1
	toronja	8		pacai siquile	1		villca blanca	1
	verdolago	2		palta	2		n/c	2
	total	252		banana	18		total	204
				roble	7			
				sangre de grado	8			
				sarsaparilla	1			
				teca	1			
				toco blanco	2			
				toronja	4			
				verdolago	1			
				villca blanca	1			

				yaca	4			
				n/c	2			
				total	380			
SISTEMAS	Especies N/comun	Nº especies	SISTEMAS	Especies N/comun	Nº especies	SISTEMAS	Especies N/comun	Nº especies
Mono 1	cacao	147	Mono 2	cacao	214	Mono 3	cacao	275
	total	147		chirimoya	13		banana	70
				n/c	1		total	345
				total	228			

ANEXO 2

Edades de las parcelas

Sistemas	Edad (años)	coordenadas	
		x	y
SAF 1	17,5	67°24'8.926"	15°29'16.939"
SAF 2	8	67°12'10.195"	15°38'13.18"
SAF 3	17	67°1'39.935"	15°45'8.824"
SAFS 1	16	67°24'37.353"	15°29'59.9"
SAFS 2	13	67°10'12.717"	15°37'19.318"
SAFS 3	14	67°5'58.988"	15°44'17.328"
Mono 1	5	67°28'11.704"	15°26'29.484"
Mono 2	8	67°10'17.034"	15°40'1.066"
Mono 3	5	67°3'6.077"	15°45'31.903"

SAFS 1: Vicente Cabrera (Colorado)
SAF 1: Eloy Cutile (Colorado)
Mono 1: Tomas Paredes (Puerto Santa Ana)
SAFS 2: Sabino Apaza Paye (Popoy)
SAF 2: Bernabé Ramos (San Antonio)
Mono 2: Paulina Mamani (San Antonio)
SAFS 3: Sofia Huarina y Placido Alave (Puerto Carmen)
SAF 3: Romolo Ramós (Simay)
Mono 3: Reynaldo Mamani (Cocochi)

ANEXO 3

Mapa de Ubicación del proyecto

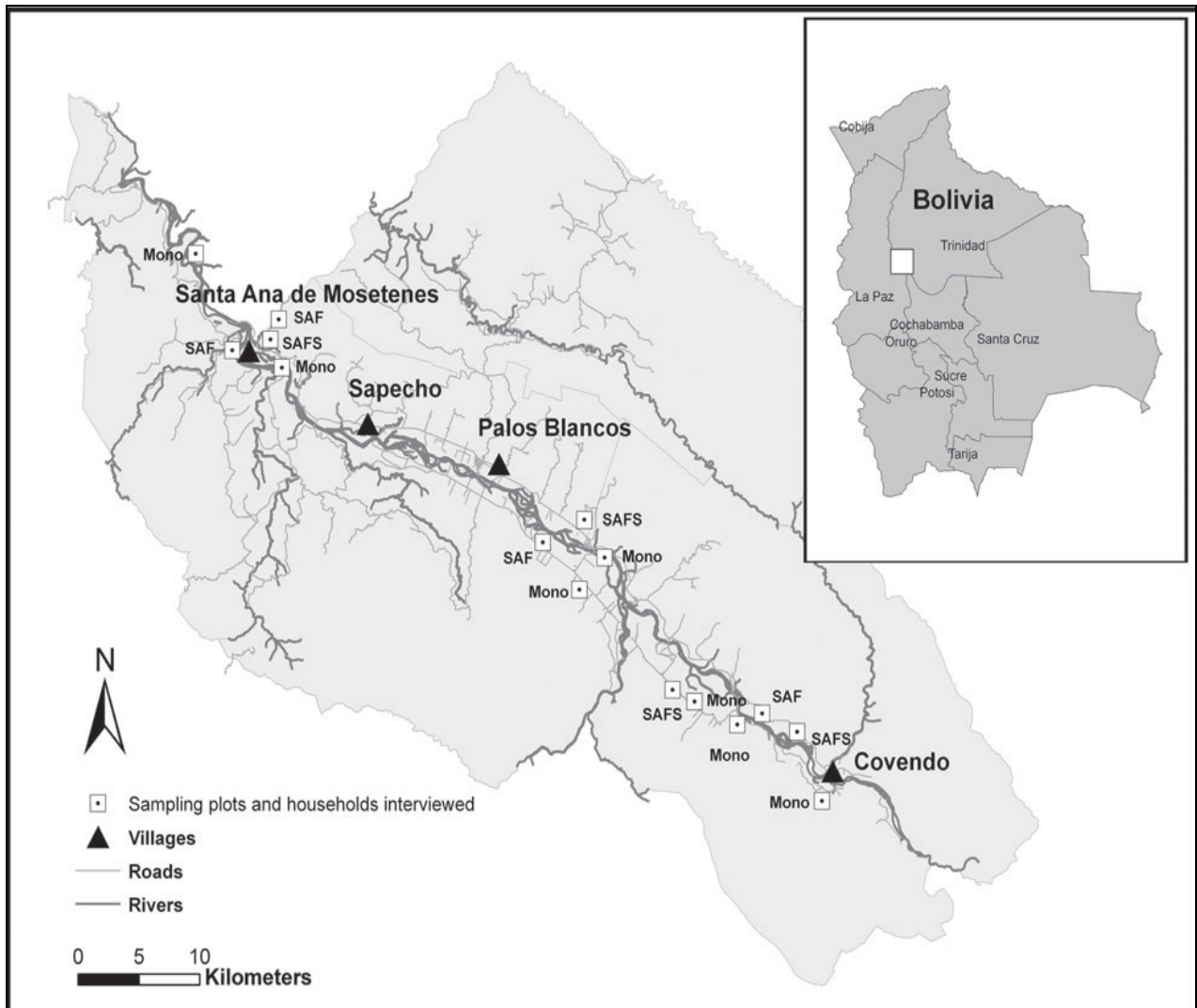


Figure: The study area of Alto Beni. SAFS=successional agroforestry; SAF=simple agroforestry; Mono=monoculture.

ANEXO 4

Sistemas de Producción Orgánica de cacao (*Theobroma cacao* L.), en la zona de Alto Beni, Bolivia.

MONOCULTIVO

SISTEMA AGROFORESTAL SIMPLE

SISTEMA AGROFORESTAL SUCESIONAL



