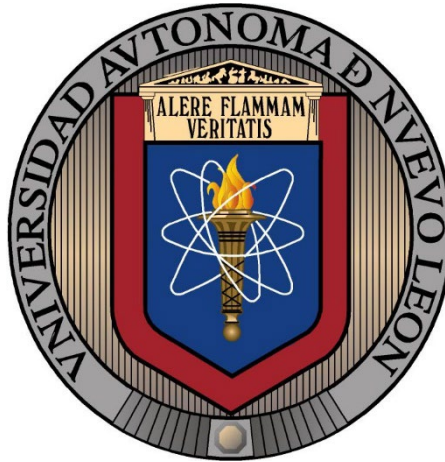


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**ESTIMACIÓN DE CARBONO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL  
DE CAFÉ EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS**

**POR:**

**PABLO MARROQUÍN MORALES**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES**

**Linares, Nuevo León, México**

**Agosto, 2023**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**

**ESTIMACIÓN DE CARBONO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL  
DE CAFÉ EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS**

**POR:**  
**PABLO MARROQUÍN MORALES**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES**

Comité de tesis:



---

Dr. Javier Jiménez Pérez

Director



---

Dr. José I. Yerena Yamallel

Co-Director



---

Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Asesor



---

Dr. Oscar A. Aguirre Calderón

Asesor



---

Dr. Rufino Sandoval García

Codirector externo

Linares, Nuevo León, México

Agosto, 2023

Manifiesto que la investigación que se presenta es original y fue desarrollada para obtener el grado de Doctor en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales, donde se utiliza información de otros autores e investigadores donde se otorgan los créditos correspondientes.

Pablo Marroquín Morales

Agosto, 2023

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)**

A la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL por darme la oportunidad de formar parte del Doctorado en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales.

### **Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)**

Al CONAHCYT por haberme otorgado la beca para realizar mis estudios de Doctorado en Ciencias.

### **Al Dr. Javier Jiménez Pérez**

Por todo el apoyo que me ha brindado y su asesoramiento para la elaboración y revisión de esta tesis.

### **Al Dr. José I. Yerena Yamallel**

Por sus consejos en mi formación académica y asesoría en el contenido del presente trabajo, y por todo el apoyo que ha brindado.

### **Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez**

Le agradezco por sus asesorías en la estructura de la presente tesis, así como su apoyo en la investigación.

### **Al Dr. Oscar A. Aguirre Calderón**

Por todos los consejos que me ha dado para la elaboración de la investigación y por formar parte de este comité.

### **Al Dr. Rufino Sandoval García**

Por la revisión y la mejora del escrito, a si también por su amistad.

### **Profesores de la UANL**

Por todos los conocimientos transferidos a mi persona y los consejos que me compartieron para el buen desarrollo profesional.

### **Compañeros y amigos**

Carlos Leal, Nelly Leal, Beatriz Calleja, Bernardo López, Aldren Ventura, Mixer Mejía, Edwin Verdugo, Juan Manuel Camey. Por los buenos momentos que compartimos juntos, y por su valiosa amistad que me han dado.

## **DEDICATORIA**

### **A Dios**

Por darme la vida hasta estos momentos, la salud, la sabiduría en cada paso de mi vida, y la fortaleza por cada adversidad de la vida.

### **A mis padres:**

#### **Nelly Morales Guzmán (†) y Efraín Marroquín Gómez**

Madre a pesar de que no has estado conmigo en los últimos años, siempre te recuerdo en mi corazón. A mis padres les agradezco todos los consejos y el apoyo que me dan para ser una mejor persona, para ustedes es este logro.

### **A mis hermanos:**

#### **José Ángel, Elías, Joel (†) y Karen Maythe**

Por todo el apoyo incondicional que me han dado y porque a pesar de lo que hemos vivido siempre estamos unidos para resolver los problemas y seguir para adelante, muchas gracias por su apoyo.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN GENERAL .....	1
GENERAL ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO GENERAL .....	5
Objetivos específicos .....	5
BIBLIOGRAFÍA.....	6
<b>CAPITULO I. LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON ESPECIAL ÉNFASIS EN MÉXICO.....</b>	<b>8</b>
1. RESUMEN.....	8
ABSTRACT .....	9
2. INTRODUCCIÓN.....	10
3. MATERIALES Y METODOS.....	12
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	12
4.1 Los sistemas agroforestales (SAF) .....	12
4.2 Clasificación de los SAF .....	13
4.3 SAF en el mundo.....	13
4.4 SAF en México .....	14
4.5 Proyectos establecidos en los SAF .....	15
4.6 La Investigación en los SAF .....	16

4.7 Establecimiento de un SAF .....	17
4.8 Beneficios de los SAF .....	18
4.9 Conservación de los recursos naturales a través de los SAF .....	18
4.10 El papel socioeconómico de los SAF.....	19
4.11 Los SAF como alternativa al cambio climático .....	19
5. CONCLUSIONES .....	21
6. BIBLIOGRAFÍA .....	22
<b>CAPITULO II. ESTIMAR LA BIOMASA AÉREA POR ESTRATOS EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CAFÉ .....</b>	<b>30</b>
1. RESUMEN .....	30
ABSTRACT .....	31
2. INTRODUCCIÓN .....	32
3. MATERIALES Y METODOS .....	33
3.1 Área de estudio .....	33
3.2 Diseño de muestreo.....	33
3.3 Estimación de biomasa .....	34
3.4 Análisis estadístico .....	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
4.1 Densidad del SAF .....	35
4.1.1 Café.....	35
4.1.2 árboles.....	36
4.1.3 Plátano .....	37
4.2 Variables dasométricas del SAF.....	38
4.2.1 Café.....	38
4.2.2 Árboles .....	38



4.2.3 Plátano .....	39
4.3 Especies registradas en el SAF.....	40
4.4 Estimación de biomasa en café.....	42
4.5 Estimación de biomasa en árboles .....	43
4.6 Estimación de biomasa en el SAF.....	45
4.7 Estimación de biomasa por estratos verticales .....	47
5. CONCLUSIONES .....	50
6. BIBLIOGRAFÍA.....	51
<b>CAPITULO III. ESTIMACIÓN DE CARBONO Y BIOXIDO DE CARBONO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CAFÉ, EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS</b>	<b>58</b>
1. RESUMEN.....	58
ABSTRACT .....	60
2. INTRODUCCIÓN.....	61
3. MATERIALES Y METODOS .....	62
3.1 Área de estudio .....	62
3.2 Diseño de muestreo.....	62
3.3 Concentración de carbono.....	63
3.4 Estimación de carbono.....	63
3.5 Obtención de bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	64
3.6 Análisis estadístico .....	64
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.1 Concentración de carbono por componente por localidad .....	64
4.2 Concentración de nitrógeno por componente por localidad .....	65
4.3 Concentración de carbono total de la especie.....	66
4.4 Concentración de nitrógeno total de la especie .....	66

<b>4.5 Estimación de carbono y bióxido de carbono en café .....</b>	<b>67</b>
<b>4.6 Estimación de carbono y bióxido de carbono en árboles.....</b>	<b>68</b>
<b>4.7 Estimación de carbono y bióxido de carbono en SAF .....</b>	<b>70</b>
<b>4.8 Carbono y bióxido de carbono por estratos verticales .....</b>	<b>73</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Sistemas Agroforestales en el mundo.....	14
<b>Cuadro 2.</b> Densidades de los árboles en los diferentes SAF .....	18
<b>Cuadro 3.</b> Marco de plantación e individuos por hectárea .....	37
<b>Cuadro 4.</b> Variables obtenidas y estimadas en café .....	40
<b>Cuadro 5.</b> Especies registradas en el SAF café.....	41
<b>Cuadro 6.</b> Biomasa por estratos en ambas altitudes.....	48
<b>Cuadro 7.</b> Contenido de carbono (%) por componente por localidad.....	65
<b>Cuadro 8.</b> Contenido de Nitrógeno total (%) por componente por localidad ...	65
<b>Cuadro 9.</b> Carbono y nitrógeno total por componente en café.....	67
<b>Cuadro 10.</b> Carbono y bióxido de carbono por estratos en ambas altitudes....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de los principales SAF (Elaboración propia).....	15
<b>Figura 2.</b> Estados del programa sembrando vida (Elaboración propia) .....	16
<b>Figura 3.</b> Macrolocalización del área de estudio .....	33
<b>Figura 4.</b> Sitios levantados en el premuestreo .....	34
<b>Figura 5.</b> Estimación de biomasa de café por altitud.....	43
<b>Figura 6.</b> Estimación de biomasa de árboles por altitud.....	45
<b>Figura 7.</b> Estimación de biomasa en el SAF por altitud.....	47
<b>Figura 8.</b> Microlocalización del área de estudio .....	62
<b>Figura 9.</b> Estimación de carbono y bióxido de carbono en café .....	68
<b>Figura 10.</b> Estimación de carbono y bióxido de carbono en árboles .....	70
<b>Figura 11.</b> Estimación de carbono y bióxido de carbono en los SAF .....	72

## RESUMEN GENERAL

Los SAF café son potencialmente cultivados en la Sierra Madre de Chiapas, donde el productor obtiene grandes beneficios económicos, sociales y ambientales, estos sistemas aportan grandes servicios, principalmente la captura de carbono, para conocer la fijación de estos SAF café, primeramente, se determina la biomasa (B). El primer capítulo tiene como objetivo realizar un análisis general de los sistemas agroforestales, oportunidades y beneficios de su aplicación en México, a través de diversas fuentes, el capítulo 2 tiene como objetivo estimar la biomasa en los estratos de un SAF café en dos altitudes. El tercer capítulo tiene como objetivo estimar el carbono y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en un sistema agroforestal café en dos gradientes altitudinales, así mismo determinar la concentración de carbono (CC) y nitrógeno. El estudio se desarrolló en dos municipios pertenecientes a la Sierra Madre de Chiapas. El primer municipio denominado Siltepec con una altitud de 1 200 msnm, el segundo Motozintla con una elevación de 1 500 msnm. La biomasa se estimó mediante ecuaciones alométricas en cada una de las especies presentes del SAF café, la concentración de carbono (CC) en café se determinó con un equipo denominado Flash 2000 NC Soils Analyzer, para las especies asociadas al SAF café se investigó su CC correspondiente. En una altitud de 1 200 msnm el SAF café almacena 186.89 toneladas (ton) B ha<sup>-1</sup>, 92.74 ton C ha<sup>-1</sup> y 340.37 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, para la elevación de 1 500 msnm reporta 157.28 ton B ha<sup>-1</sup>, 78.34 ton C ha<sup>-1</sup> y 287.52 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Los resultados indican que no hay diferencias estadísticamente significativas en su estimación en ambas altitudes.

## GENERAL ABSTRACT

The coffee SAF are potentially cultivated in the Sierra Madre de Chiapas, where the producer obtains great economic, social and environmental benefits, these systems provide great services, mainly carbon capture, to know the fixation of these coffee SAF, firstly, it is determined the biomass (B). The first chapter aims to carry out a general analysis of agroforestry systems, opportunities and benefits of its application in Mexico, through various sources, chapter 2 aims to estimate the biomass in the strata of a brown SAF at two altitudes. The third chapter aims to estimate carbon and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in a brown agroforestry system in two altitudinal gradients, likewise determine the concentration of carbon (CC) and nitrogen. The study was developed in two municipalities belonging to the Sierra Madre de Chiapas. The first municipality called Siltepec with an altitude of 1,200 meters above sea level, the second Motozintla with an elevation of 1,500 meters above sea level. The biomass was estimated by means of allometric equations in each of the species present in the coffee SAF, the carbon concentration (CC) in coffee was determined with a device called Flash 2000 NC Soils Analyzer, for the species associated with the coffee SAF their CC was investigated. correspondent. At an altitude of 1,200 masl the coffee SAF stores 186.89 tons B ha<sup>-1</sup>, 92.74 tons C ha<sup>-1</sup> and 340.37 tons CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, for elevations of 1,500 meters it reports 157.28 tons B ha<sup>-1</sup>, 78.34 tons C ha<sup>-1</sup> and 287.52 tons CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. The results indicate that there are no statistically significant differences in their estimation at both altitudes.

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Las prácticas agroforestales se han practicado en la antigüedad, pero en 1977 se propone la palabra agroforestería, el cual se define como la combinación de cultivos agrícolas, árboles, arbustos y pastos, en un área determinada, incrementando la producción total (Bene et al., 1977).

Las zonas agroecológicas juegan un papel fundamental en los SAF ya que son las bases para la distribución, extensión y adopción de un sistema. Los sistemas agroforestales (SAF) son similares debido a las condiciones ecológicas que estas presentan, a pesar de las diferentes actividades socioculturales que existen en las distintas áreas geográficas. Los SAF se clasifican en secuenciales, simultáneos, cercas vivas y cortinas rompevientos (Montagnini et al., 1992).

Los SAF simultáneos son utilizados principalmente en el sur de México, en este sistema se incluyen los cultivos perennes, como es el caso del café. El café es un cultivo agrícola, que necesita sombra para poder desarrollarse, por ello se le considera una especie umbrófila.

El cultivo de café en México se encuentra en 12 estados, 56 regiones, 282 municipios y 4 326 comunidades (Martínez et al., 2006), para el estado de Chiapas el cultivo café se desarrolla principalmente en la zona Sierra Madre de Chiapas, donde los productores obtienen beneficios económicos y ambientales, el café es una fuente de ingreso para los productores, con las ganancias que tienen subsisten a su familia. Así mismo, el SAF café les proporciona leña que es utilizado como combustible para la cocina, además de la madera que extraen para la construcción de sus casas. Sin embargo, estos sistemas brindan servicios como la captura de carbono, debido a la cobertura vegetal que conservan.

Para determinar el almacenamiento de carbono en un SAF café, es necesario conocer la biomasa de las especies presentes. La biomasa es el peso seco que se obtiene de una especie y puede ser determinada de manera directa e indirecta; cuando se habla del método directo, se refiere a derribar la especie, dividirla por componente, pesar y obtener datos de las muestras. El método indirecto es a través de ecuaciones alométricas, esta puede ser una ecuación lineal, no lineal,

exponencial o logarítmica, así mismo se puede estimar por el volumen, la densidad básica y el factor de expansión.

Las prácticas agroforestales en café conservan la biodiversidad y capturan el carbono por la complejidad de los estratos verticales que integran y por la diversidad de especies (Goodall et al., 2014). Las prácticas agroforestales fijan más carbono en comparación con los monocultivos, esto se debe a la incorporación de los árboles (Soto & Jiménez, 2018), estos sistemas permiten la mitigación de gases de efecto invernadero y merman el cambio climático (Ehrenbergerová et al., 2017).

En un SAF café entre 800 y 1 250 msnm en el Valle central de Costa Rica, un SAF café almacena en las fincas 93 ton C ha<sup>-1</sup>, esto contribuye a la mitigación de los gases de efecto invernadero, además de conservar la biodiversidad (Häger, 2012). En la república de Togo un SAF café fija 81 ton C ha<sup>-1</sup>, y para el cultivo café al aire libre se reporta 22.9 ton C ha<sup>-1</sup>, con ello se enfatiza que los árboles juegan un papel importante en la captura de carbono (Dossa et al., 2008).

En el sur de México se presentan los SAF café, donde investigadores han reportado que estos sistemas almacenan 25.21, 64.4, 100.46 y 114, ton C ha<sup>-1</sup>, el carbono capturado depende de condiciones ambientales, topográficas, el manejo del sistema, la densidad de plantación, entre otros (Espinoza et al., 2012; Hernández et al., 2012; Ruiz et al., 2022; Valdés et al., 2022).

Actualmente en México existe un programa social denominado sembrando vida, el cual se basa en la implementación de parcelas con sistemas productivos agroforestales, sin embargo, hasta el momento no hay ningún programa que pague por la captura de carbono en los SAF café, este sistema puede ser una opción debido a las cantidades de carbono que secuestran los cafetales.



## **HIPÓTESIS**

Existen diferencias en el almacenamiento de carbono y bióxido de carbono debido a la altitud.

## **OBJETIVO GENERAL**

Estimar el carbono y bióxido de carbono en un sistema agroforestal en dos gradientes altitudinales.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los sistemas agroforestales, oportunidades y beneficios de su aplicación en México.
- Estimar la biomasa en café y árboles en un sistema agroforestal café.
- Determinar la concentración de carbono y nitrógeno en café.
- Cuantificar el carbono y bióxido de carbono en los estratos del sistema agroforestal café.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bene, J. G., Beall, H. W. & Côté, A. (1977). Trees, food, and people: land management in the tropics. Ottawa. IDCR. 52 p. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10625/930>
- Dossa, E. L., Fernandes, E. C. M., Reid, W. S., & Ezui, K. (2008). Above- and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agroforest Syst*, 72, 103–115. doi: 10.1007/s10457-007-9075-4
- Ehrenbergerová, L., Šenfeldr, M., & Habrová, H. (2017). Impact of tree shading on the microclimate of a coffee plantation a case study from the Peruvian Amazon. *Boiset forets des tropiques*, 334(4), 13-22. doi: 10.19182/bft2017.334.a31488
- Espinoza, D. W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A. A., & Torres, R. A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57–70. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- Goodall, K. E., Bacon, C. H. M., & Ernesto, M. V. (2014). Shade tree diversity, carbon sequestration, and epiphyte presence in coffee agroecosystems: A decade of smallholder management in San Ramón, Nicaragua. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 200–206. doi: 10.1016/j.agee.2014.09.002
- Häger, A. (2012). The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforest Syst*, 86, 159-174. doi: 10.1007/s10457-012-9545-1
- Hernández, V. E., Campos, A. G. V., Enríquez, del V. J. R., Rodríguez, O. G., & Velasco, V. V. A. (2012). Captura de carbono por *Inga jinicuil* schldl. en un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11–21. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n9/v3n9a2.pdf>

- Martínez, P. D., Pérez P. E., Partida, S. J. G. & Läderach, P. (2006). Algunos impactos de los efectos abióticos, bióticos y de proceso industrial sobre características relacionadas con la calidad del café en Veracruz, México. En: Pohlan, H. A. J., Soto, P. L. & Barrera, J. F. (Ed.). El cafetal del futuro; realidades y visiones. (pp. 177-188). Shaker Verlag. Aachen, Alemania.
- Montagnini, F., Prevetti, L., Thrupp, L. A., Beer, J., Borel, R., Budowski, G.,...Nichols, D. (1992). Sistemas agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos, Organización para Estudios Tropicales - OET-, San José, Costa Rica. Consultado en <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/1689>
- Ruiz, G. P., Monterroso, R. A. I., Valdés, V. E., Escamilla, P. E., & Gómez, D. J. D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3), 1–23. doi: 10.15517/am.v33i3.48671
- Soto, P. L., & Jiménez, F. G. (2018). Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosque*, 24 (especial), 1-15. doi:10.21829/myb.2018.2401887
- Valdés, V. E., Vázquez, D. L. P., Tinoco, R. J. A., Sánchez, H. R., Salcedo, P. E., & Lagunes, F. E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 28, 287–297. doi: 10.29312/remexca.v13i28.3283

# CAPITULO I. LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON ESPECIAL ÉNFASIS EN MÉXICO

## AGROFORESTRY SYSTEMS WITH SPECIAL EMPHASIS IN MEXICO

### 1. RESUMEN

Los recursos naturales se ven afectados por las actividades agropecuarias, por ello se deben tomar acciones inmediatas para su conservación, una de ellas son los sistemas agroforestales, ya que mantienen la productividad de los suelos, evitando la degradación de estos. Los SAF también mantienen la biodiversidad, aprovechan el potencial máximo del área y diversifican los productos. Estos sistemas son considerados como un potencial para disminuir el bióxido de carbono, estos sistemas almacenan el carbono en sus tejidos a través de sus estratos verticales, ayudando a contra restar el cambio climático. El objetivo del presente estudio es realizar un análisis general de los sistemas agroforestales, oportunidades y beneficios de su aplicación en México, a través de diversas fuentes. Los sistemas agroforestales abarcan tres grandes grupos, los sistemas agroforestales secuenciales, los simultáneos, cercas vivas y cortinas rompevientos. Los principales sistemas utilizados en México son los simultáneos, cercas vivas y cortinas rompevientos, cabe resaltar que México tiene gran superficie potencial para desarrollar dichos sistemas. Sin embargo, establecer un sistema agroforestal depende de las características ecológicas, las necesidades de los productores y su adopción, estos sistemas proporcionan beneficios sociales, económicos y ambientales.

**Palabras claves:** árboles, beneficios, clasificación, conservación, socioeconómica.

## **ABSTRACT**

Natural resources are affected by agricultural activities, therefore immediate actions must be taken for their conservation, one of them are agroforestry systems, since they maintain soil productivity, avoiding their degradation. SAF also maintain biodiversity, take advantage of the maximum potential of the area and diversify products, these systems are considered as a potential to reduce carbon dioxide, these systems store carbon in their tissues through their vertical layers, helping to counteract climate change. The objective of this study is to carry out a general analysis of agroforestry systems, opportunities and benefits of its application in Mexico, through various sources. The agroforestry systems cover three large groups, the sequential agroforestry systems, the simultaneous ones, living fences and windbreaks. The main systems used in Mexico are simultaneous, live fences and windbreaks, it should be noted that Mexico has a large potential area to develop such systems. However, establishing an agroforestry system depends on the ecological characteristics, the needs of the producers and their adoption, these systems provide social, economic and environmental benefits.

**Keywords:** trees, benefits, classification, conservation, socioeconomic.

## 2. INTRODUCCIÓN

El suelo es afectado principalmente por los seres humanos, degradándose por actividades agrícolas y pecuarias no sustentables, urbanización y actividades industriales. La pérdida de suelo tiene graves consecuencias, debido a la remoción de nutrientes y materia orgánica, reduce el desarrollo de la vegetación y la infiltración del agua (SEMARNAT, 2015), por eso se debe tomar acciones sustentables en las actividades agropecuarias, para garantizar los alimentos a las futuras generaciones a través de las prácticas agroforestales (CONAFOR, 2018). Los sistemas agroforestales es la combinación de cultivos agrícolas con árboles frutales o maderables.

El cultivar árboles, arbustos y cultivos agrícolas combinados en una misma área, es una práctica que ha existido a través del tiempo en el mundo. En Europa se practicó hasta la edad media, en Finlandia y Alemania fue útil hasta los años 1929, en América tropical especialmente en Centroamérica ha sido una práctica tradicional por mucho tiempo, y apoyado científicamente desde 1973 por el Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE) para la investigación en América Latina, en Asia utilizaban los cultivos alternos, dejando ciertos árboles al momento de limpiar el área y posteriormente cultivaban. Para el caso de África principalmente en Nigeria se cultivaba la agricultura bajo el dosel de los árboles (Nair, 1997).

El autor John Bene es quien propone la palabra agroforestería en 1977, así mismo crea el centro internacional de investigación y desarrollo canadiense, tres años después se crea el centro Internacional para la investigación en sistemas agroforestales (ICRAF, siglas en inglés), sin embargo, en 1991 se cambió el nombre a Centro Internacional para la investigación en agroforestería, y en el año 2002 es conocido como centro mundial de agroforestería, aunque oficialmente sigue siendo ICRAF (CONAFOR, 2014).

En 1977 en Quintana Roo México, investigadores empezaron a realizar estudios en agrosilvícola sostenida por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (Chavelas, 1979). En ese mismo año Wilken (1977) describió algunos trabajos

de árboles con la combinación de cultivos agrícolas, implementados en el estado de Oaxaca y Puebla, siendo el maíz el cultivo agrícola. Budowski (1987) menciona que México ha implementado el sistema de cercas vivas, utilizando especies como *Gliricidia sepium*, *Bursera simaruba* y *Jatropha curcas*. En 1981 se realizó el primer curso sobre técnicas agroforestales tradicionales en Campeche y Quintana Roo organizado por el CATIE. En el año de 1989 surge el primer simposio agroforestal en Linares, Nuevo León, donde participaron técnicos, profesionales, académicos e investigadores, demostrando avances del tema agroforestal (UANL, 1989).

Las diferentes combinaciones de cultivos, árboles y pastizales reciben distintas agrupaciones. Actualmente se reconocen 3 diferentes clasificaciones a nivel mundial. La primera fue descrita por Combe & Budowski (1979) considerando los tipos de cultivos asociados (cultivos, forestería y ganadería) y asignándoles en tres sistemas: silvoagrícolas, agrosilvopastoriles y silvopastoriles (SP). La segunda clasificación se base en el arreglo temporal y espacial, teniendo como objetivos la producción y el escenario económico-social, en consecuencia, se categoriza con los criterios de clasificación: estructural, funcional, socioeconómica y ecológica. La última clasificación considera: los SAF secuenciales, simultáneos y las cercas vivas y cortinas rompevientos (Montagnini et al., 1992; Nair, 1997).

El SAF simultáneo es el principalmente utilizado en México, distribuyéndose principalmente en los estados de Chiapas, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Yucatán, Guerrero, San Luis Potosí, Puebla, Nayarit, Nuevo León y Durango (CONAFOR, 2014).

Los SAF son relevantes por los beneficios y oportunidades que brindan, mejoran la producción y conservan los recursos naturales, es por eso el presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis general de los sistemas agroforestales, oportunidades y beneficios de su aplicación en México.

### **3. MATERIALES Y METODOS**

La investigación fue mediante una revisión de literatura de diversas fuentes como: artículos científicos, notas técnicas, documentos de divulgación, informes técnicos de evaluación, libros, entre otros. A través de buscadores científicos como: Google académico, EBSCOhost, Scielo, Scopus, Redalyc, Elsevier, CONRICyT y el apoyo de la biblioteca digital (UANL) (Guzmán et al., 2020). Con el fin de enriquecer y comprender la información de este capítulo, se describe la clasificación de Montagnini et al. (1992) pues se considera la más general para los SAF. Debido a los diferentes SAF que existen en México, se realizó un análisis en los tres ámbitos fundamentales (económicos, sociales y ambientales) a través de estudios.

### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

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

La agroforestería también se define como sistemas agroforestales, esta palabra la define varios autores, debido al uso múltiple de los suelos. Se define como un sistema de manejo de tierras, donde se combina con cultivos agrícolas, árboles y animales, aplicando prácticas culturales, con el objetivo de incrementar la producción total (Bene et al., 1977; Solorio et al., 2010). Otro autor define los sistemas agroforestales como el manejo de los recursos naturales, donde especies leñosas se asocian con cultivos agrícolas o animales en una misma área, de manera simultánea o temporal (Montagnini et al., 1992). Sin embargo, Sotomayor (2008) menciona que los SAF tienen una conexión con la actividad del hombre y el de la naturaleza, utilizando la tierra bajo el principio de uso múltiple, en forma integral, satisfaciendo las necesidades humanas. En la actualidad los SAF deben satisfacer tres condiciones básicas: la primera es que al menos dos especies interactúan biológicamente, la segunda, debe haber una especie leñosa y una herbácea y la última condición es que el dueño de la tierra cumpla los objetivos al manejar los recursos (Somarriba, 2018).



## 4.2 Clasificación de los SAF

La clasificación de Montagnini es la más utilizada y la que detalla cada uno de los sistemas, donde se categoriza en tres grandes grupos; SAF secuenciales, simultáneos, cercas vivas y cortinas rompevientos. A continuación, se describe cada uno de ellos (Montagnini et al., 1992; Nair, 1997).

Sistemas agroforestales secuenciales: los árboles y los cultivos agrícolas se encuentran parcialmente separados en el tiempo, en este sistema abarca la agricultura migratoria y el sistema Taungya.

Sistemas agroforestales simultáneos: la producción de este sistema es simultáneamente, es decir, los árboles, los cultivos o animales crecen y se desarrollan en la misma unidad de terreno, acá se consideran los árboles en asociación con cultivos anuales y perennes, así también la milpa intercalada entre árboles frutales (MIAF), los huertos caseros mixtos y el sistema agrosilvopastoril.

Cercas vivas y cortinas rompevientos: las cercas vivas consisten en plantar árboles o arbustos en los linderos externos o internos de una propiedad, en cambio, las cortinas rompevientos son líneas de árboles que su objetivo es proteger cultivos y animales contra el viento, ambas producen forraje, leña, madera, frutos, postes, entre otros.

La silvoentomología se ha considerado como un sistema agroforestal especial, debido a la relación que tienen las abejas con la floración de los árboles (apicultura) (Ferrere et al., 2020).

## 4.3 SAF en el mundo

En el mundo aproximadamente mil millones de hectáreas son ocupadas por los sistemas agroforestales, en América Latina la superficie es superior a 300,000,000 hectáreas, las principales asociaciones son árboles y arbustos, con cultivos agrícolas y pasturas para el ganado (Peri et al., 2015). Los SAF en el mundo coinciden mayormente debido a las zonas agroecológicas, ya sea por el clima, suelo y por su potencial biofísico en la producción agrícola (FAO, 1997). En el

Cuadro 1 se representan la clasificación de los SAF utilizados por continentes (Montagnini et al., 1992; FAO, 2022).

**Cuadro 1.** Sistemas Agroforestales en el mundo

Clase de sistema	Europa	Asia	África	América	Oceanía
• SAF secuenciales	✓	✓	✓	✓	
• SAF simultáneos	✓	✓	✓	✓	✓
• Cercos vivos y cortinas rompevientos	✓	✓	✓	✓	✓
• SAF especiales		✓	✓	✓	

#### 4.4 SAF en México

En 1977 investigadores empezaron a realizar estudios en agrosilvícola sostenida por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales en Quintana Roo (actual nombre, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) (Chavelas, 1979). En ese mismo año se describió algunos trabajos de árboles asociados a los cultivos agrícolas, para el caso de Oaxaca y Puebla el cultivo fue el maíz, para Chiapas y Veracruz el café (Wilken, 1977). Otro sistema implementado son las cercas vivas, donde se han utilizado especies como *Gliricidia sepium*, *Bursera simaruba* y *Jatropha curcas* (Budowski, 1987). En 1981 en Campeche y Quintana Roo se realizó el primer curso sobre técnicas agroforestales tradicionales organizado por el CATIE. Pero hasta el año de 1989 se organizó el primer simposio agroforestal en Linares, Nuevo León, donde participaron técnicos, profesionales, académicos e investigadores, demostrando avances del tema agroforestal (UANL, 1989).

En México principalmente se han utilizado los huertos familiares, barbechos mejorados, cercos vivos, árboles de sombra con cultivos agrícolas, cortinas

rompevientos, cultivos y pastizales en callejones (Romo et al., 2012). Los sistemas que se presentan especialmente en el sur son asociaciones de árboles con cultivos perennes (café y cacao) y huertos familiares, en las zonas del norte donde la vegetación es árida y semiárida domina el sistema silvopastoril (SSP) o pastorilsilvícolas, utilizando árboles o arbustos de uso múltiple para la producción de alimento, forraje y leña (Sáenz et al., 2019).

La superficie potencial para los sistemas agroforestales maderables en México es de 3, 980, 000 hectáreas (ha), en cultivos perennes y arbóreos (café y cacao) de 3, 379, 856 ha, en cultivos anuales con asociación de árboles de 11, 365, 361 ha, para el SSP es de 65, 308, 077 ha (CONAFOR, 2014; SEMARNAT, 2016). A través de la Figura 1 se visualiza la distribución de los SAF de manera general en México.

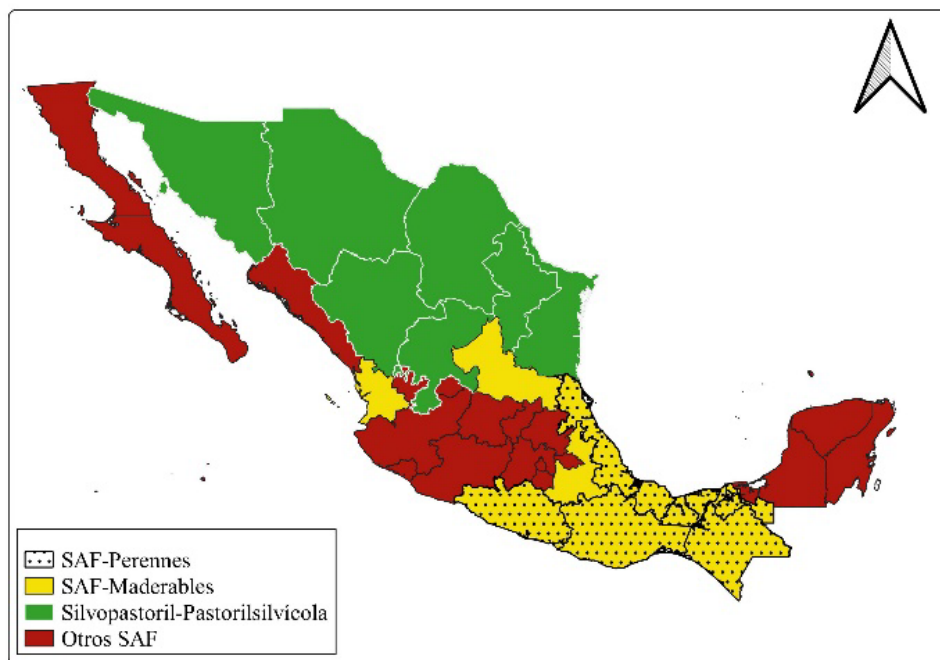


Figura 1. Distribución de los principales SAF (Elaboración propia)

#### 4.5 Proyectos establecidos en los SAF

En la actualidad México cuenta con proyectos aplicados a los SAF, como el que realiza Biopasos que su objetivo es promover la conservación de la biodiversidad a través de prácticas agrosilvopastoriles climáticamente inteligentes en paisajes

dominados por la ganadería en tres estados (Jalisco, Chiapas y Campeche) de la república mexicana, donde capacitan a los productores para desarrollar, fortalecer y garantizar la ganadería tradicional y extensiva (BIOPASOS, 2017). Una dependencia gubernamental que ha apoyado es CONAFOR (2021) donde ha destinado apoyos económicos para establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles. Actualmente se tiene el programa sembrando vida que tiene como objetivo disminuir la degradación ambiental a través de la implementación de parcelas con sistemas productivos agroforestales, utilizando los SAF de árboles maderables y frutales y el sistema MIAF, estos sistemas están establecidos en 21 estados de la república (Figura 2) mexicana donde se pretende establecer una superficie total de 1, 139, 372 ha (CONEVAL, 2020). El programa consiste que un ciudadano mexicano tenga legalmente una superficie de 2.5 ha, y por ello recibe la cantidad de 5, 000 pesos mensualmente como apoyo para realizar sus trabajos en su parcela beneficiaria.

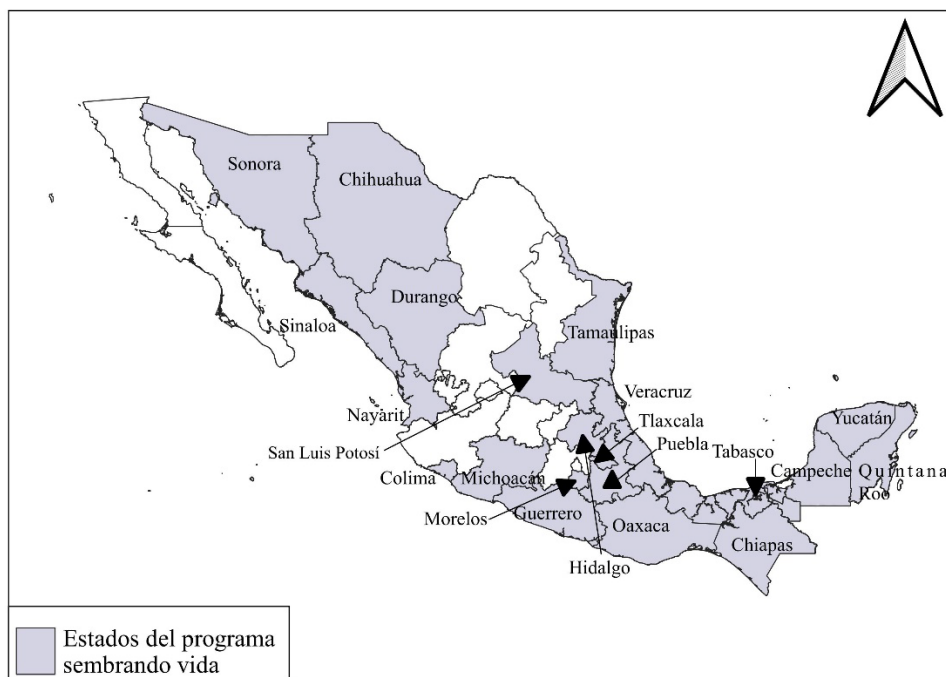


Figura 2. Estados del programa sembrando vida (Elaboración propia)

#### 4.6 La Investigación en los SAF

En la actualidad existen 50 028 documentos relacionados a los SAF, los temas más investigados son en el ámbito ecológico, económico y social, en lo ecológico

comprende la conservación de la biodiversidad y el cambio climático, en lo económico y social engloba el desarrollo comunitario (Rajagopal et al., 2021). En los últimos años en América latina se ha investigado sobre temas agroforestales, donde investigadores e instituciones educativas han destacado grandes aportaciones (Rojas et al., 2022). México cuentan con aproximadamente 450 documentos relacionados a la investigación en SAF, donde la mayoría se trata de artículos científicos, tesis de licenciatura y posgrado, las investigaciones más sobresalientes son de caracterización ecológica, manejo, socioeconomía y captura de carbono, a pesar de lo que se ha publicado, aún falta temas por investigar como formas de propagación, estudios de mercado y comercialización nacional e internacional de los SAF (CONAFOR, 2020).

#### **4.7 Establecimiento de un SAF**

Para establecer un SAF se requiere conocer las necesidades que tienen los productores, así también las características ecológicas y productivas, una vez considerado lo anterior se eligen los objetivos del productor. Así también se considera las condiciones socioeconómicas (mano de obra y superficie total), las especies a utilizar (factores climáticos, fisiográficos y de suelo) y la densidad del cultivo y entre árboles (Cuadro 2) (ONF, 2013). A continuación, se describe un ejemplo de un SAF café. Primeramente, hay que conocer el desarrollo óptimo del cultivo. El café se desarrolla a una altitud óptima de 1 200 a 1 700 con precipitaciones de 1 000 a 3 000 mm y una temperatura media anual de 17 ° C a 23 ° C, los suelos deben ser profundos y bien drenados, la variedad de café a plantar dependerá de la zona y del interés del productor (Díaz et al., 2013). En este sistema los objetivos principales del productor son ingresos económicos, alimento y leña. La sombra que debe aportar los árboles son del 20 al 40 % (depende de la altitud), las especies que se pueden plantar son leguminosas (*Inga spp* y *Glericidia sepium*), maderables y (*Swietenia macrophylla*, *Cedrela spp* y *Gmelina arbórea*) frutales (*Citrus limón* y *Persea americana*), la densidad de los árboles es de 6 x 6 metros y la del café de 2 metros de calle x 1 metro entre planta (arábigo), aunque puede variar, debido a la costumbre de la zona,

así también en el Cuadro 2 se observa la distancia de siembra que debe tener respecto al sistema de producción (CONAFOR, 2011).

**Cuadro 2.** Densidades de los árboles en los diferentes SAF

Sistema de producción	Espaciamiento sugerido (metros)
Plantaciones forestales	3 - 4 x 3 - 4
Árboles en asocio con cultivos perennes	6 – 9 x 6 – 9 (raleo) o 10 -12 x 10 – 12 (sin raleo)
Cercas vivas	2 - 6
Cortinas rompevientos	1 – 2.5
Silvopastoril	10 – 15 x 10 - 15

#### 4.8 Beneficios de los SAF

Los SAF proporcionan grandes beneficios como: conservación de la biodiversidad, agua, suelo, materia orgánica, reciclaje de nutrientes, mejoramiento del clima, protegen los suelos contra la erosión y degradación, aprovechamiento óptimo del área y una gran diversidad de productos (madera, leña, forraje y frutos) dándole una estabilidad económica al productor y sostenibilidad (ONF, 2013; SEMARNAT, 2019). Sin embargo, hay que considerar que algunos beneficios se obtienen a mediano o largo plazo (Frutos y madera) debido al crecimiento y desarrollo de los árboles (Soto & Jiménez, 2018).

#### 4.9 Conservación de los recursos naturales a través de los SAF

Las prácticas agroforestales permiten mantener los recursos naturales, aunque el modelo es conservación-productiva, esto se debe a la integración de los recursos naturales con la diversidad de objetivos que tiene el productor (Moreno et al., 2020). Los SAF proporcionan diversidad de especies, reportando especies dentro de la NOM. - 059 (Rojas et al., 2021). Por ejemplo, en el estado de Guerrero, Navarro et al. (2012) encontraron en un SAF café alrededor de 81 especies pertenecientes de 34 familias con un índice de Shannon de 3.5, reportando una diversidad alta. Otro ejemplo es en un SAF de cacao en Chiapas, donde se identificaron más de 35 especies referentes a 24 familias (Suarez et al.,

2019). Para el caso del SSP, los árboles aportan cobertura a los animales, dándoles sombra y protección, así mismo conservan los suelos, ya que no permiten la erosión y mejoran la fertilidad a través de la materia orgánica (Canizales et al., 2019).

#### **4.10 El papel socioeconómico de los SAF**

La adopción social de un SAF está estrechamente ligada con los ingresos económicos que genera el sistema, esta economía depende de los diversos productos que se obtienen como: leña, forraje, medicina, elaboración de utensilios, madera, frutos, alimentos, entre otros, estos productos contribuyen a la economía del productor y el sustento de su familia (Bautista et al., 2011; Navarro et al., 2012). De la misma manera los huertos familiares satisfacen las necesidades internas de la familia y este sistema se establece en condiciones rurales y urbanas (Moreno et al., 2014; Rajagopal et al., 2021). Los sistemas silvopastoriles también proporcionan ganancias, un ejemplo es el SSP conformado con cedro y pasto, donde se obtiene una relación beneficio-costos de 1.56, donde por cada peso invertido se obtiene 0.56 pesos de ganancia (Romo et al., 2012). Sin embargo, para el SSP de *Leucaena leucocephala* y pasto se obtiene una relación beneficio-costos de 1.21, es decir el productor obtiene 21 centavos de ganancia por cada peso invertido (Cuevas et al., 2020), esto se debe a que las especies leguminosas aportan grandes proteínas y proporcionan un complemento alimenticio al ganado (Castillo et al., 2021). Así también las ganancias son porque incrementan la producción de carne y leche por unidad de área, esto se debe al microclima que generan los árboles, reduciendo el estrés calorífico en los animales y el pastoreo racional (López et al., 2019). Este sistema garantiza una ganancia de peso entre 0.42 y 1.10 kg animal día, para la producción de leche el SSP es superior en 3 litros ha<sup>-1</sup> contra un área sin árboles (Barragán et al., 2016; López et al., 2017).

#### **4.11 Los SAF como alternativa al cambio climático**

Las prácticas agroforestales aumentan la captura de carbono en comparación con los monocultivos, esto se debe a la incorporación de los árboles, los SAF

permiten la mitigación de gases de efecto invernadero, disminuyendo el cambio climático (Soto & Jiménez, 2018). En Tabasco los SAF de cacao con 10 años almacenan 36 ton C ha<sup>-1</sup> de carbono (C), para el mismo SAF, pero con edades de 70 años estos secuestran 75 ton C ha<sup>-1</sup>, esto nos indica que al transcurrir los años el almacenamiento de carbono es mayor (Salvador et al., 2020). Con edades de 10 a 15 años en un SAF de cacao en Tabasco registran 41.17 ton C ha<sup>-1</sup>, sin embargo, a 40 años logra alcanzar un valor de 51.35 ton C ha<sup>-1</sup>, el 75 % del carbono almacenado se sitúa en los árboles de sombra y el resto en el cacao (Salvador et al., 2019). En cambio, en un SAF café en Veracruz, este almacena 64.4 ton C ha<sup>-1</sup>, siendo la especie *Inga jinicuil* la que predomina y da sombra al cultivo, por otra parte, el SAF café-cedro secuestra 114 ton C ha<sup>-1</sup> en Oaxaca (Espinoza et al., 2012; Hernández et al., 2012). Los SSP almacenan 7.3 ton C ha<sup>-1</sup> en Montemorelos, Nuevo León, donde predomina la especie *Ebenopsis ébano* (Telles et al., 2020). Sin embargo, Torres et al. (2011) reportaron 2.86 ton C ha<sup>-1</sup> en un sistema silvopastoril en Veracruz. A través de los estudios se afirma que los diferentes sistemas agroforestales capturan carbono en sus tejidos (Hassán et al., 2017), aunque, hay sistemas que absorben más que otros, esto se debe a la estructura, la densidad, la edad y altitud que presentan los SAF (Soto & Jiménez, 2018).



## **5. CONCLUSIONES**

Las prácticas agroforestales son una herramienta para combatir el cambio climático, por ello se debe retomar acciones para mantener estas prácticas, puede ser mediante subsidios a los productores a través de pago de servicios de bióxido de carbono, con esto no solo estarían mitigando el cambio climático si no también conservando los recursos naturales.

Los seres humanos debemos tomar conciencia y reconciliarnos con el planeta, pues somos parte de ella, por lo que la sociedad debe implementar estos sistemas. En México se puede adoptar los huertos familiares a través de los distintos hogares, esto sería de gran ayuda para las familias del país, propiciando de manera directa o indirecta la conservación de la cultura y los recursos naturales, además de promover la economía.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Barragán, H. W., Mahecha, L. L., & Cajas, G. Y. (2016). Efecto de sistemas silvopastoriles en la producción y composición de la leche bajo condiciones del valle medio del río sinú, Colombia. *Revista Colombiana De Ciencia Animal - RECIA*, 8(2), 187–196. doi: 10.24188/recia.v8.n2.2016.186
- Bautista, T. M., López, O. S., Pérez, H. P., Vargas, M. M., López, M. F. G., & Gómez, M. F. C. (2011). Sistemas agro y silvopastoriles en la comunidad el limón, municipio de paso de ovejas, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(1), 63–76. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93915703005>
- Bene, J. G., Beall, H. W., & Côté, A. (1977). Trees, food, and people: land management in the tropics. Ottawa. IDCR. 52 p. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10625/930>
- Biodiversidad y Paisajes Ganaderos Agrosilvopastoriles Sostenibles (Biopasos). (2017). Consultado el 22-01-2023 en <https://www.biopasos.com/>
- Budowski, G. (1987). The development of agroforestry in Central America. In: Stepler, H. A. y Nair, P. K. R. (eds.). *Agroforestry: a decade of development*. (pp. 69-99). ICRAF, Nairobi, Kenya.
- Canizales, V. P. A., Aguirre, C. O. A., Alanís, R. E., Rubio, C. E., & Mora, O. A. (2019). Caracterización estructural de una comunidad arbórea de un sistema silvopastoril en una zona de transición florística de Nuevo León. *Madera y Bosque*, 25(2), 1–14. doi: 10.21829/myb.2019.2521749
- Castillo, L. E. B., López, H. M. A., Izquierdo, A. V., & Hernández, J. O. (2021). Sistema silvopastoril de cosecha y acarreo como alternativa para la producción ovina sostenible en el trópico húmedo. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 12(66), 5-25. doi:10.29298/rmcf.v12i66.872
- Chavelas P. J. (1979). Módulo de uso múltiple del suelo en regiones tropicales (Agrosilvicultura). *Ciencia Forestal en México*. 4(19), 14.

Combe, J., & Budowski, G. (1979). Clasificación de las técnicas agroforestales: una revisión de literatura. en: Gonzalo De las Salas (ed.). Taller sobre Sistemas Agroforestales en América Latina. (pp. 17-48). Turrialba, Costa Rica. Actas. CATIE-UNU.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). Establecimiento de Sistemas Agroforestales. Consultado 27-12-2022 en [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL\\_SISTEMAS\\_AGROFORESTALES.PDF](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL_SISTEMAS_AGROFORESTALES.PDF)

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2014). Sistemas agroforestales Maderables en México. Consultado 13-01-2023 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126296/Sistemas\\_agroforestales\\_maderables\\_en\\_Mexico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126296/Sistemas_agroforestales_maderables_en_Mexico.pdf)

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales. 5 edición. Consultado 13-10-2022 en <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). Sistemas Agroforestales Maderables en México. Coordinación General de Producción y productividad Gerencia de Plantaciones Forestales Comerciales. Consultado 27-09-2022 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/557057/Sistemas\\_Agroforestales\\_Maderables\\_en\\_Mexico\\_\\_\\_1\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/557057/Sistemas_Agroforestales_Maderables_en_Mexico___1_.pdf)

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). Programa apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable. Consultado el 25-02-2023 en [https://www.conafor.gob.mx/apoyos/index.php/inicio/app\\_apoyos#/detalle/2021/92](https://www.conafor.gob.mx/apoyos/index.php/inicio/app_apoyos#/detalle/2021/92)

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2022). Avances y Retos del Programa Sembrando Vida. Consultado el 25-09-2022 en

[https://www.coneval.org.mx/SalaPrensa/Comunicadosprensa/Documents/2020/COMUNICADO\\_11\\_PROGRAMA\\_SEMBRANDO\\_VIDA.pdf](https://www.coneval.org.mx/SalaPrensa/Comunicadosprensa/Documents/2020/COMUNICADO_11_PROGRAMA_SEMBRANDO_VIDA.pdf)

- Cuevas, R. V., Reyes, J. J. E., Borja, B. M., Loaiza, M. A., Sánchez, T. B. I., Moreno, G. T., & Rosales, N. C. (2020). Evaluación financiera y económica de un sistema silvopastoril intensivo bajo riego. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 89-110. doi:10.29298/rmcf.v11i62.759
- Díaz, G.; Guajardo, R., & López, R. (2013). Potencial productivo del cultivo del café en México. En R. López; G. Díaz y A. Zamarripa (eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de reproducción* (pp. 35-54). México: SAGARPA e INIFAP.
- Espinoza, D. W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A. A., & Torres, R. A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57-70. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- Ferrere, P., Signorelli, A., & Cabrini, S. (2020). Análisis productivo y económico de sistemas silvo-apícola pastoriles en el norte de la provincia de Buenos aires. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 46(1), 108-115. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/864/86463754012/html/>
- Guzmán, S. J. C., Aguirre, C. O. A., & Vargas, L. B. (2020). Técnicas de estimación del volumen forestal con especial énfasis en los trópicos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 291-306. doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.07.061
- Hassán, J., Espinosa, T. J., & Ríos, L. (2017). Fijación de carbono en cercas vivas de fincas ganaderas de la cuenca del rio la villa. *Ciencia agropecuaria*, 21, 14–27. Obtenido de <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/cienciaagropecuaria/article/view/19/12>
- Hernández, V. E., Campos, Á. G. V., Enríquez, del V. J. R., Rodríguez, O. G., & Velasco, V. V. A. (2012). Captura de carbono por *Inga jinicuil* Schltdl: En

un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11-21. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S200711322012000100002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711322012000100002&lng=es&tlng=es)

La organización de las Naciones unidad para la agricultura y Alimentación (FAO). (1997). Zonificación Agroecológica, Guía general. Roma: Boletín de Suelos de la FAO No. 73. Consultado 21-11-2022 en <https://www.fao.org/3/w2962s/w2962s00.htm>

La organización de las Naciones unidad para la agricultura y Alimentación (FAO). (2022). Agroforestería. Conjunto de herramientas para la gestión sostenible (GFS). Consultado 27-08-2022 en <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/agroforestry/basic-knowledge>

López, De B. L., Aquino, R. E., Maciel, P. Y., & Ahuja, A. C. del C. (2019). Sobrevivencia de árboles nativos tropicales en un módulo silvopastoril en Veracruz, México. *Agrociencia*, 53(7), 969–989. Obtenido de <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1857/1854>

López, V. O., Sánchez, S. T., G. J. M., Lamela, L. L., Soca, P. M., Arece, G. J., & Milera, R. M. de la C. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 83-95. Obtenido en [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S086403942017000200001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S086403942017000200001&lng=es&tlng=es)

Montagnini, F., Prevetti, L., Thrupp, L. A., Beer, J., Borel, R., Budowski, G.,...Nichols, D. (1992). Sistemas agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos, Organización para Estudios Tropicales - OET-, San José, Costa Rica. Consultado 25-02-2023 en <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/1689>

- Moreno, C. A., Palma, G. J. M, Soto, P. L, Rosales, A. J. J, Sosa, F. V, Montañez, E. P.,...López, M. W. (2020). Los sistemas agroforestales de México. Consultado el 20-07-2022 en <https://www.researchgate.net/profile/Ana-Moreno>
- Moreno, C. A., Galicia, L. V., Casas, A., Toledo, V., Vallejo, M., Fita, D., & Camou-Guerrero, A. (2014). La Etnoagroforestería: el estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología*. Consultado el 28-09-2022 en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5261792.pdf>
- Nair, R. P. K. (1997). *Agroforestería* (1a ed.). México.
- Navarro, G. H., Santiago, S. A., Musálem, S. M. A., Vibrans, L. H., & Pérez, O. M. A. (2012). La diversidad de especies útiles y sistemas agroforestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 71-86. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.11.124
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2013). Guía técnica SAF Para la Implementación de sistemas agroforestales con árboles forestales maderables. Consultado el 26-04-2023 en [https://onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/guia\\_saf\\_onf\\_para\\_web.pdf](https://onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/guia_saf_onf_para_web.pdf)
- Peri, P., Montagnini, F., & Goldfarb. C. (2015). 3° Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles: VII Congreso Internacional Sistemas Agroforestales/ACTAS. Ediciones INTA. Consultado 21-02-2023 en [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-libro\\_actas\\_silvopastoriles\\_-\\_agroforestales.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-libro_actas_silvopastoriles_-_agroforestales.pdf)
- Rajagopal, I., Cuevas, S. J. A., Baca del M. J., Ayala, M. D., Gómez, H. T., & Romo, L. J. L. (2021). Alcances y limitaciones de los huertos familiares para el desarrollo sostenible: una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(76), 1–24. Obtenido de <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/download/3487/1622>

- Rojas, M. J., Ramos, C. P. F., Castro, Z. M. A., Pesca, M. A., Vargas, V. Y., & Escobar, P. L. (2021). Estructura y composición florística de bosques asociados a especies de *Theobroma* en la Amazonía colombiana. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 129–150. doi: 10.29298/rmcf.v12i68.1078
- Rojas, P. M., Beltrán, V. J., & Zafra, M. C. A. (2022). Tendencias metodológicas para la implementación de sistemas agroforestales en el marco del desarrollo sustentable: una revisión. *Madera y Bosque*, 8(1), 1-17. doi: 10.21829/myb.2022.2812279
- Romo, L. J. L., García, C. Y. B., Uribe, G. M., & Rodríguez, T. D. A. (2012). Prospectiva financiera de los sistemas agroforestales de El Fortín, Municipio de Atzalan, Veracruz. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 43-55. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.09.068
- Sáenz, R. J. T., Castillo, Q. D., Ávila. F. D. Y., Castillo, R. F., Muñoz, F. H., & Rueda, S. A. (2019). Áreas potenciales para sistemas silvopastoriles con pino lacio (*Pinus devoniana* Lind.) y pastos introducidos (*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees ó *Chloris gayana* Kunth) en Michoacán, México. *Revista Bio ciencias*, 6(especial), 1-14. doi: 10.15741/revbio.06.e494
- Salvador, M. P., Cámara, C. L del C., Martínez, S. J. L., Sánchez, H. R., & Valdés, V. E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en Sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosque*, 25(1), 1–14. doi: 10.5154/r.rchscfa.2018.12.093
- Salvador, M. P., Martínez, S. J. L., Cámara, C. L., & Zequeira, R. C. (2020). Estructura y carbono específico en una cronosecuencia de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en Tabasco, México. *Madera y bosques*, 26(3), 1-15. doi: 10.21829/myb.2020.2632131
- Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008: Compendio de Estadísticas Ambientales. México. Consultado 13-04-2022

en

[https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15\\_completo.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf)

Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). Superficie ganadera consultado 21-04-2023 en [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2016/archivos/02\\_agrigan/D2\\_AGRIGAN04\\_02.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2016/archivos/02_agrigan/D2_AGRIGAN04_02.pdf)

Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). Experiencias de Agroforestería en México. Red temática de sistemas Agroforestales de México. Consultado el 20-04-2023 en <https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/106048/EXPERIENCIAS%20DE%20AGROFORESTER%C3%8DA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Solorio, F., Petit, A. J., Casanova L. F., & Ramírez, A. L. (2010). Notas de curso: Diseño y Evaluación de Sistemas Agroforestales. doi:10.13140/RG.2.1.4826.0881

Somarriba, E. J. (2018). Definición de Agroforestería. Consultado el 20-12-2022 en <https://www.researchgate.net/publication/324363425>

Soto, P. L., & Jiménez, F. G. (2018). Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosque*, 24 (especial), 1-15. doi: 10.21829/myb.2018.2401887

Sotomayor, A., García, E., González, M., & Lucero, A. (2008). "Modelos Agroforestales, alternativa productiva para un desarrollo sustentable de la agricultura campesina en Chile", Mauricio Ponce Donoso, Marcia Vázquez Sandoval (Eds.). 4.º Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Talca, Chile. doi: 10.13140/RG.2.1.4826.0881

Suarez, V. G. M., Avendaño, A. C. H., Ruiz, C. P. A., & Estrada, de los S. P. (2019). Diversidad arbórea y carbono almacenado en sistemas



agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco Chiapas, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(3), 315–332. doi: 10.5154/r.rchscfa.2018.12.093

Telles, A. R., R. M. S., García, G. D. A., Saucedo, R. L., & Villalón, M. H. (2020). Productividad de Biomasa en Sistemas Silvopastoriles en Fincas Ganaderas de Montemorelos, Nuevo León, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 16, 55-60. Obtenido de <http://revista.itson.edu.mx/index.php/rln/article/view/290>

Torres, R. J. A., Reddiar, K. L., Espinoza, D. W., & Vázquez, A. A. (2011). Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 543-549. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93920942033>

Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) (1989). Simposio Agroforestal en México. Linares, Nuevo León. Memorias, Tomos 1 y 2. Consultado 15-12-2022 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126296/Sistemas\\_agroforestales\\_maderables\\_en\\_Mexico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126296/Sistemas_agroforestales_maderables_en_Mexico.pdf)

Wilken, G. C. (1977). Integrating forest and small-scale farm systems in Middle America. *Agro-ecosystems*, 3, 291-302. doi: 10.1016/0304-3746(76)90132-3

## CAPITULO II. ESTIMAR LA BIOMASA AÉREA POR ESTRATOS EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CAFÉ

### ESTIMATING THE AERIAL BIOMASS BY STRATS IN AN AGROFORESTRY SYSTEM COFFEE

#### 1. RESUMEN

La biomasa es fundamental para conocer las existencias reales de carbono en un sistema agroforestal café (SAFC), así mismo es relevante identificar que estrato vertical fija más biomasa dentro de un SAFC, por lo que el objetivo de este capítulo es estimar la biomasa en los estratos de un SAFC en dos altitudes. El estudio se desarrolló en dos municipios pertenecientes a la Sierra Madre de Chiapas. La primera área se localiza en el municipio de Siltepec (1 200 msnm), la segunda área se ubica en Motozintla (1 500 msnm). La biomasa se estimó mediante ecuaciones alométricas en cada una de las especies presentes del SAFC. Una vez obtenida la biomasa por estrato se aplicó la prueba de t Student para verificar las diferencias significativas entre altitudes. La estimación de biomasa en el SAFC fue de 186.89 ton ha<sup>-1</sup> a una altitud de 1 200 msnm, para la elevación de 1 500 msnm la biomasa en el SAFC registra 157.28 ton ha<sup>-1</sup>, los resultados indican que no presentan diferencias significativas en su estimación. Por otra parte, el estrato arbóreo es el que más biomasa almacena, con más del 87.4 % en un SAFC.

**Palabras claves:** árboles, biomasa, estrato, estimación, café.

## **ABSTRACT**

Biomass is essential to know the real stocks of carbon in a brown agroforestry system (SAFC), likewise it is relevant to identify which vertical layer fixes more biomass within a SAFC, so the objective of this chapter is to estimate the biomass in the strata of a SAFC at two altitudes. The study was developed in two municipalities belonging to the Sierra Madre de Chiapas. The first area is located in the municipality of Siltepec (1,200 masl), the second area is located in Motozintla (1,500 masl). The biomass was estimated using allometric equations in each of the species present in the SAFC. Once the biomass per stratum was obtained, the Student t test was applied to verify the significant differences between altitudes. The estimation of biomass in the SAFC was 186.89 tons ha<sup>-1</sup> at an altitude of 1,200 masl, for the elevation of 1,500 masl the biomass in the SAFC registers 157.28 tons ha<sup>-1</sup>, the results indicate that they do not present significant differences in your estimate. On the other hand, the tree stratum is the one that stores the most biomass with more than 87.4 % in a SAFC.

**Keywords:** trees, biomass, stratum, estimation, coffee.

## 2. INTRODUCCIÓN

El cultivo café requiere de sombra para desarrollarse, y con la poca luz solar que recibe este cultivo, realiza el proceso de fotosíntesis (Montagnini et al., 2015). El café se considera un sistema agroforestal ya que se combina con especies herbáceas y arbóreas. En un SAF café la biomasa se encuentra de manera aérea (hojas, ramas y fuste) y subterránea (raíces), la parte aérea es la más estudiada en comparación de la subterránea, esta última es más difícil y costosa al estudiar.

La biomasa es el peso de la materia orgánica que se encuentra en una especie o ecosistema (Schlegel et al., 2000). El método indirecto estima la biomasa más fácil y práctica, esta es estimada por modelos alométricos que anteriormente fueron desarrollados para la especie, se relaciona con variables de fácil medición como el diámetro y la altura (Figueroa et al., 2010).

Las plantas a través de la fotosíntesis almacenan el carbono y el bióxido de carbono en su biomasa, siendo la biomasa la base primordial para estimar el carbono. Para estudiar la biomasa aérea en un SAF café es muy complejo, ya que el sistema tiene varios estratos verticales y para su estimación se requiere evaluar cada estrato, en otras palabras, se necesita determinar la biomasa de todas las especies presentes en los SAF café.

El estrato arbóreo es el más relevante en la estimación de biomasa ya que proporciona la mayor fijación del SAF café, diversos autores afirman que los árboles aportan más del 66 % de biomasa en un SAF café (Andrade et al., 2014; Soto & Aguirre, 2015). Además, los árboles influyen en el crecimiento de los cafetales, promueven la fijación de nutrientes, protegen el cultivo de daños climáticos, entre otros.

La biomasa en el SAF café es variable, donde diferentes autores han estimado valores de 4.96 hasta 250 toneladas de biomasa por hectárea (Corral et al., 2006; Ajit et al., 2016; Ruiz et al., 2022). Los diferentes intervalos de biomasa en los cafetales se deben a la diversidad de especies, el número de individuos, edad, manejo de los cafetales, entre otros.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en dos municipios pertenecientes a la Sierra Madre de Chiapas. La primera área se localiza entre las coordenadas 15°34'10.07" N y 92°20'6.28" O, a una altitud de 1 200 m, ubicada en el municipio de Siltepec. La segunda área con coordenadas 15° 15' 56.7" N y 92° 17' 55.07" O, a una altitud de 1 500 m ubicado en Motozintla (Figura 3). Los terrenos presentan pendientes del 10 al 60 %. Los climas son cálidos subhúmedos, cálidos húmedos y semicálido húmedo, con lluvias abundantes en verano, precipitación pluvial de 1 000 a 3 000 mm, una temperatura media anual mayor de 18° C, los suelos predominantes en la zona son luvisol, regosol y acrisol (García, 2004).

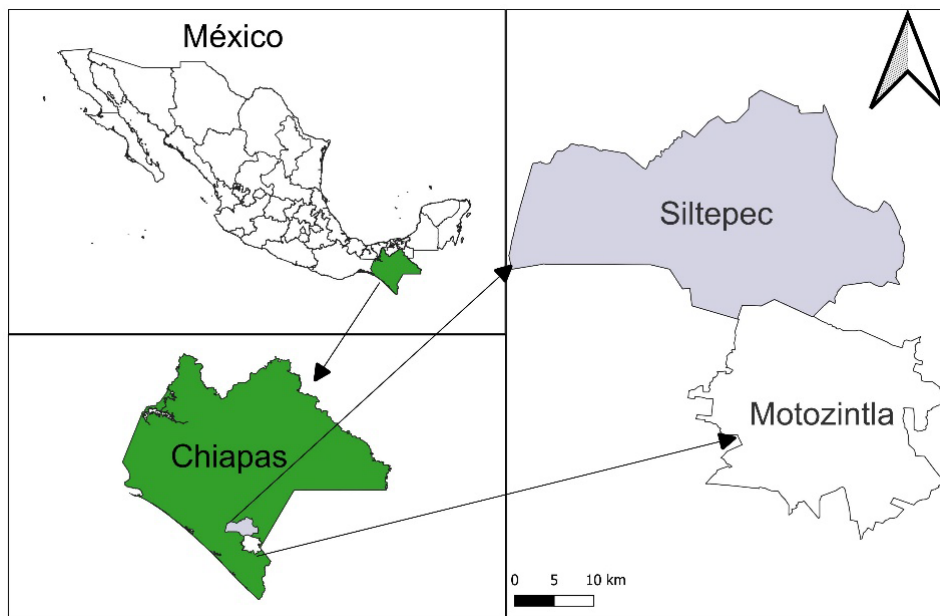


Figura 3. Macrolocalización del área de estudio

#### 3.2 Diseño de muestreo

En cada una de las localidades se realizó un muestreo aleatorio evaluando una superficie de 5 ha, para determinar el tamaño de sitios a inventariar, primero se hizo un premuestreo levantando 10 sitios por cada localidad (Figura 4), utilizando la siguiente ecuación (1) (Ancira y Treviño, 2015).

$$n = \frac{t^2 * CV^2}{E^2 \%} \quad (1)$$

Donde:

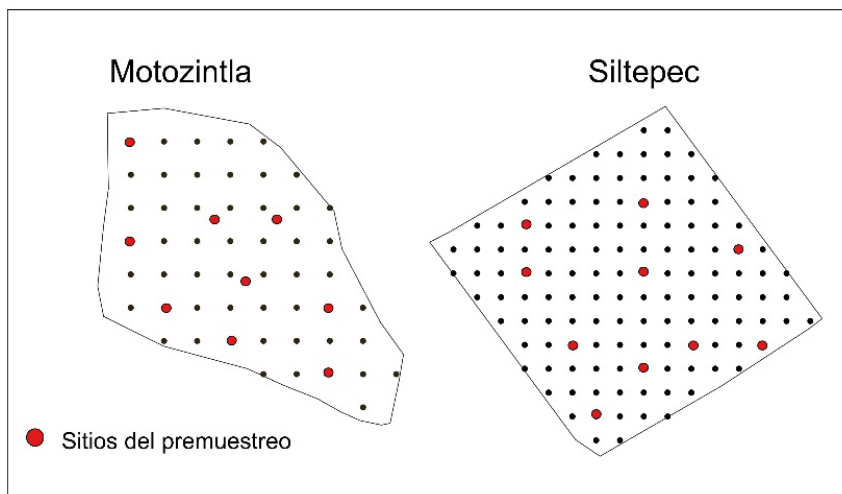
$n$  = tamaño de muestra

$t^2$  = Valor extraído de la tabla de  $t$  de Student ( $P < 0.05$ )

$CV$  = coeficiente de variación

$E$  = error porcentual (20)

El tamaño de muestra se definió, a partir de la variable biomasa. Se establecieron 25 sitios en total por ambas áreas, los sitios fueron rectangulares de 4 x 25 m (100 m) (Espinoza et al., 2012; Timoteo et al., 2016). En cada sitio se evaluaron todos los individuos presentes (árboles, plátano y café). Las variables que se midieron fue el diámetro normal (cm) con una cinta diamétrica modelo 283D/5m Forestry Suppliers y las alturas (m) se midieron con una cinta métrica (Truper FH-5ME) y una pistola haga (W-Germany).



**Figura 4.** Sitios levantados en el pre-muestreo

### 3.3 Estimación de biomasa

La biomasa aérea se estimó de manera indirecta, a través de modelos alométricos en cada una de las especies encontradas. Cada uno de los modelos fueron aplicados respectivamente a la especie; el modelo 1 fue aplicado para los árboles (Arévalo et al., 2003), el modelo 2 para el plátano y el último modelo (3)

para el café (Hairiah et al., 2001). Cada uno de los modelos contempla una sola variable independiente.

$$B = 0.1184 * DAP ^ 2.53 \quad (1)$$

$$B = 0.0303 * DAP ^ 2.1345 \quad (2)$$

$$BT = 0.2811 * DAP ^ 2.0635 \quad (3)$$

Donde:

*BT* = Biomasa aérea total (kg)

*DAP* = Diámetro a la altura de pecho (cm)

### 3.4 Análisis estadístico

La biomasa en cada uno de los estratos (café, árboles y SAF café) se comparó como poblaciones independientes a través de una prueba de t Student para verificar las diferencias significativas entre las altitudes (Hernández et al., 2017). Así también se realizó un análisis de varianza entre los diferentes estratos de ambas altitudes y si presentan diferencia significativa, se procedió a realizar una prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Densidad del SAF

#### 4.1.1 Café

El número de plantas de café en Siltepec registró un promedio de 30 individuos por sitio, teniendo una densidad promedio de 3 014 individuos por  $ha^{-1}$ , en cambio para Motozintla hubo un promedio de 32 individuos por sitio, con 3 211 plantas por  $ha^{-1}$ , esta densidad depende de la forma de plantación utilizada respecto a la topografía del terreno. Para ambas altitudes la distancia de siembra fue de 2.0 x 1.5 m. El marco de plantación en Siltepec fue rectangular y en Motozintla a tres

bolillos, esta diferencia se debe a la topografía que presenta cada altitud (Cuadro 3).

La distancia de siembra en café fue igual a lo reportado por Zavala et al. (2018), obteniendo más de 3 000 individuos de café por ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, otros investigadores han encontrado la distribución de siembra de 1.3 x 1.3 m, teniendo una densidad por arriba de 6 250 individuos de café por ha<sup>-1</sup>, la distancia de siembra es menor al presente estudio, pero no así para la densidad en café (Medina et al., 2009; Jurado et al., 2020).

#### **4.1.2 árboles**

La distancia entre árboles en el SAF café es de 6.0 x 6.0 m, siendo esta distancia similar en ambas localidades, sin embargo, en Siltepec cuenta con 329 árboles, para Motozintla 200 árboles por hectárea. En Siltepec se registró el mayor número de plantas por superficie en comparación con la otra localidad. Cabe resaltar que Siltepec tiene un alto número de árboles, esto se debe a que en el replante de especies no respetaron la distancia de siembra inicial (Cuadro 3).

El espaciamiento de los árboles del presente estudio cumple con lo que recomienda la CONAFOR (2011) donde generalmente los espaciamientos varían de 4.0 x 4.0 hasta 12.0 x 12.0, esto depende de los cultivos con lo que se asocie la especie. La densidad en un SAF café es variable, los árboles pueden estar en una o varias hileras (CONAFOR, 2020). La distancia entre árboles del presente estudio es similar a lo plantado por Garza et al. (2020) donde fue de 6.0 x 6.0, con una densidad de 277 individuos por hectárea, siendo estos individuos menores para la localidad de Siltepec, pero contrario a los árboles reportados en Motozintla. Respecto a ello Terán et al. (2018) reportan una densidad de 304 árboles en promedio en cafetales, este valor es cercano a la localidad de Siltepec, pero mayor para Motozintla. La densidad de árboles que presentó Motozintla es similar a Ruiz et al. (2022) registrando 200 árboles de sombra para los cafetales en el estado de Veracruz. En un SAF café las densidades son variables, donde se pueden encontrar entre 260 y 457 árboles por hectárea en sistemas tradicionales, y entre 176 y 360 árboles por hectárea con árboles del género *Inga*



(Soto & Jiménez 2018). Los árboles de sombra en Siltepec representan en densidad el 10 % del total, para Motozintla el porcentaje es menor (6 %). El porcentaje de Siltepec es similar al porcentaje de árboles que registra un cafetal en la sierra Norte de Oaxaca (Terán et al., 2018).

#### 4.1.3 Plátano

El plátano es una especie que los productores consideran plantar en sus parcelas de café, ya que obtienen un beneficio familiar (Palencia et al., 2006). Sin embargo, en el presente estudio solo se presentó en Siltepec, el cual registró 57 individuos por hectárea. La especie antes mencionada no presenta una distancia de plantación. Bautista et al. (2018) reportan que los productores de café en Huastuco, Veracruz usan la especie plátano en los plantíos de café. En Tlapacoyan, Veracruz los productores hacen el manejo integral de tres componentes (café, plátano y árboles), este manejo considera al plátano como alternativa para sombra al café (Cruz et al., 2015) Los individuos del presente estudio son menores a lo reportado por Ruiz et al. (2022) donde la densidad de plantas en plátano es de 1 260 individuos por hectárea, cabe mencionar que la densidad es alta, ya que la especie es considerada en el diseño agroforestal (árboles, café y plátano). En cambio, en esta investigación los plátanos registrados fueron plantados para consumo familiar.

**Cuadro 3.** Marco de plantación e individuos por hectárea

Localidad	Distancia de planta (m)	Individuos por ha <sup>-1</sup>
café		
Siltepec	2.0 x 1.5 m	3,014
Motozintla	2.0 x 1.5 m	3,211
Árboles		
Siltepec	6 x 6 m	329
Motozintla	6 x 6 m	200
Plátano		
Siltepec	variable	57

---

Motozintla	-	0
------------	---	---

---

## 4.2 Variables dasométricas del SAF

### 4.2.1 Café

Los diámetros de café en Siltepec varían de 2.45 a 3.98 cm, reportando una altura promedio de 2.91 m, estos valores estiman una biomasa promedio de 2.49 kg por individuo. Para la otra localidad los diámetros oscilan de 1.25 a 2.48 cm, y una altura media de 2.24 m, obteniendo una biomasa promedio de 0.88 kg por planta. Los sitios con la altitud de 1 200 m (Siltepec) duplican las estimaciones de biomasa, carbono y bióxido de carbono respecto a los 1 500 msnm (Cuadro 4). Con base en lo anterior, Solórzano y Querales (2010) reportan diámetros en café de 2.02 a 4.10 cm, siendo estos valores similares a esta investigación, pero menor para la variable altura (1.6 m) en ambas localidades. En un estudio realizado en Colombia, una planta de café obtiene una biomasa promedio de 2.0 kg, este valor es similar al que se encontró en Siltepec, pero fue mayor a la biomasa media de reportó Motozintla (Darío, 2011). Zavala et al. (2018) evaluaron café a una altitud de 1 500 m reportando un diámetro promedio de 4.93 cm, con una altura media de 1.75 m, teniendo como resultado una biomasa por planta de 0.81 kg, los resultados de diámetro y altura son mayores a las dos altitudes del presente estudio, caso contrario para la biomasa.

### 4.2.2 Árboles

Las variables de diámetro y altura promedio de los árboles entre las altitudes fueron similares, la primera altitud (1 200 msnm) obtuvo un diámetro promedio de 25.65 cm y 8.77 m de altura, la segunda altitud (1 500 msnm) registró un diámetro de 24.99 cm y 9.17 m de altura en promedio, estas variables presentan una similitud en ambas altitudes (Cuadro 4).

Garza et al. (2020) realizaron un estudio sobre asocian de árboles con el cultivo café, a una altitud de 1 170 m, donde reportan que la especie *Inga vera* a 12 años tienen una altura de 8.3 m y el diámetro de 21.6 cm, estos valores son cercanos

a los árboles en las dos altitudes de la presente investigación, así mismo se encontraron otras especies de sombra (*Erythrina poeppigiana*, *G. robusta* y *Erythrina poeppigiana*) con diámetros inferiores a 5 cm y alturas de 2 metros.

En una zona cafetalera de Veracruz, se han encontrado diferentes clases verticales (altura) en las especies arbóreas que proyectan sombra, donde árboles de vainillo obtienen 24 m de altura, los encinos presentan 14 m de altura y los cedros alcanzan alturas de 17 m, estas diferentes alturas permiten aplicar diferentes intensidades de poda a los árboles y no permiten que los rayos del sol entren directamente (Valdés et al., 2022).

En los sitios evaluados del presente trabajo, se obtuvieron diámetros que oscilan de 16.45 a 32.54 cm, con alturas de 6.27 a 12.6 m en 1 200 msnm, en cambio en una altitud de 1 500 m, los árboles tienen diámetros de 18.78 a 39.94 cm, con alturas de 7.50 a 15.00 m. Los valores de las variables de diámetro y altura entre las altitudes no difieren, es decir tienen una similitud en sus variables evaluadas. Pero el diámetro mayor se registró en la altitud de 1 500 m, pero no así en altura. De igual manera en un cafetal en Oaxaca, entre altitudes de 1 200 y 1 600 m, la especie *Inga edulis* Mart. reporta categorías de diámetro de 5 a 45 cm y alturas de 5 a 20 m (Terán et al., 2018). En Nicaragua un SAF café reporta árboles de *Inga vera* con diámetros entre 10 y 35 cm, en *J. olanchanum* de 9.5 a 23.8 cm, en un intervalo de 1 000 a 1 250 msnm, los valores reportados concuerdan con las dos altitudes de este estudio (Medina et al., 2009). Así mismo se han encontrado diámetros entre 5 y 80 cm, y alturas entre 3 y 17 m, el máximo valor de estas variables es superior al presente estudio, con una densidad inferior a 164 árboles ha<sup>-1</sup> (Hernández et al., 2012).

#### **4.2.3 Plátano**

En Siltepec el plátano registra un diámetro promedio de 15.04 cm y una altura promedio de 3.63 m, esta especie no se presentó en todos los sitios, sin embargo, registro una biomasa promedio de 9.86 kg por planta, en carbono y bióxido de carbono reportan 3.65 kg y 13.40 kg por planta respectivamente. Cabe mencionar que Ríos (2018) estima la biomasa del plátano con solamente el diámetro normal,

el cual con un diámetro de 25 cm reporta 35.25 kg por planta. Este cultivo representa una biomasa dentro de los SAF café y proporciona a los propietarios una producción de alimento e ingreso económico, cuando hay un excedente. En Tabasco la biomasa en plantas de plátano cultivadas en huertos familiares, oscilan de 0.52 a 13.32 kg por planta, teniendo un promedio de 5.85 kg, siendo este valor menor a la presente investigación (Alcudia et al., 2019). En Indonesia una planta de banano estima una biomasa promedio de 15.02 kg y 6.92 kg de carbono, la biomasa es variable debido a que los plátanos se cultivan ampliamente en patios traseros, huertos familiares, se intercalan en cultivos a corto plazo y en sistemas agroforestales, así también influyen las variabilidades intraespecíficas (Danarto & Hapsari, 2016).

**Cuadro 4.** Variables obtenidas y estimadas en café

Localidad	$\overline{DAP}$	$\overline{H}$	$\overline{Bt}$	$\overline{C}$	$\overline{CO_2}$
café					
Siltepec	2.88	2.91	226.66	107.28	393.71
Motozintla	1.74	2.24	100.70	47.37	173.85
Árboles					
Siltepec	25.65	8.77	1634.79	817.39	2999.83
Motozintla	24.99	9.17	1472.10	736.05	2701.31

$\overline{DAP}$  = diámetro a la altura de pecho promedio (cm);  $\overline{H}$  = altura promedio (m);  $\overline{Bt}$  = biomasa total promedio (kg/sitio);  $\overline{C}$  = Carbono promedio (kg/sitio);  $\overline{CO_2}$  = bióxido de carbono promedio (kg/sitio).

### 4.3 Especies registradas en el SAF

El café es una especie que requiere sombra, por ello siempre estará asociado con estratos más altos, en los cafetales se pueden registrar una diversidad de especies como: maderables, frutales e incluso especies que sean fijadoras de nitrógeno a través de su hojarasca.

En el presente estudio a una altitud de 1 200 m se reportaron cuatro especies; tres especies arbóreas y una planta herbácea (plátano). En la altitud de 1 500 se registraron 8 especies, todas son arbóreas. La especie Chalum es la única

especie que aparece en ambas altitudes. En el Cuadro 5 se mencionan los nombres científicos de cada una de las especies reportadas (Quesada & Fernández, 2005; Soto et al., 2008). Manchabajoy et al. (2022) mencionan que las especies arbóreas utilizadas como sombrío de café en Colombia son; aguacate (*Persea americana* Mill.), limón (*Citrus limón* L.), guamo (*Inga sp.*) y carbonero (*Albizia carbonaria* Britton). En los cafetales de Veracruz, se registraron 15 especies arbóreas, con el objetivo de proyectar sombra al cultivo, aunque se incluyen especies para combustible, así como maderables y frutales, estos árboles son importantes para la conservación de la biodiversidad (Villavicencio, 2013). En el norte de Chiapas el café se asocia principalmente con árboles de *Heliocarpus aff popayensis*, *Nectandra salicifolia*, *Cupania dentata*, *Liquidambar styraciflua*, *Croton draco*, *Cornus disciflora*, *oecopetalum mexicanum*, *inga spp*, entre otros (Soto & Aguirre, 2015).

**Cuadro 5.** Especies registradas en el SAF café

Altitud (m)	Nombre común	Nombre científico
1 200	Chalum	<i>Inga micheliana</i>
	Lima	<i>Citrus limetta</i> Risso
	Ishcanal	<i>Acacia sp.</i>
	Plátano	<i>Musa paradisiaca</i>
1 500	Caspirol	<i>Inga oerstediana</i>
	Chalum	<i>Inga micheliana</i>

---

Sangre de drago o tabaquillo	<i>Croton draco</i>
Capulín	<i>Trema micrantha</i>
Guachipelín	<i>Diphysa americana</i>
Palo cerillo	<i>Hedyosmum mexicanum</i>
Aguacate	<i>Persea americana</i>
Jiote	<i>Bursera simaruba</i>

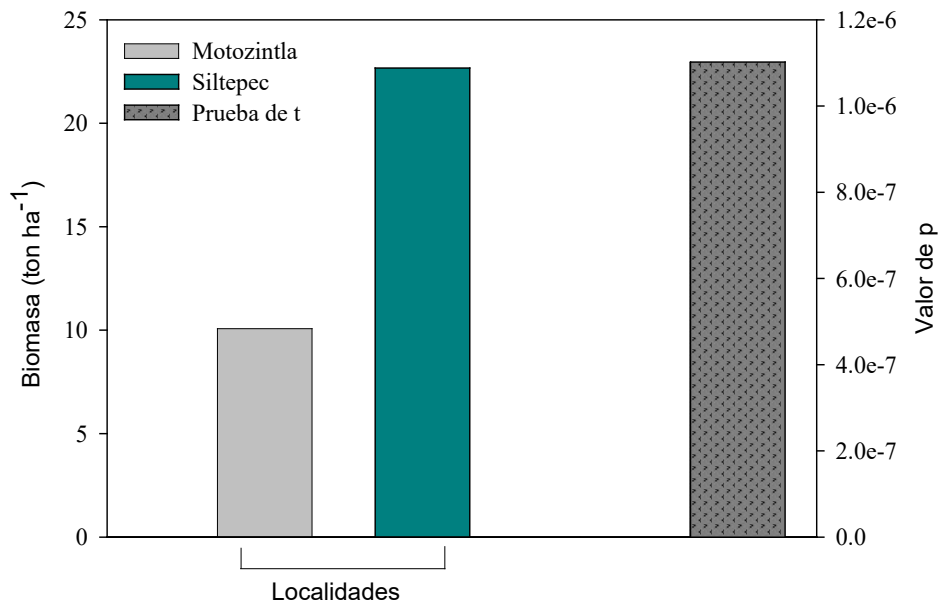
---

#### 4.4 Estimación de biomasa en café

El análisis estadístico aplicado mediante la prueba de T de Student, indican que existen diferencias significativas ( $P < 0.001$ ) en la biomasa por altitud. En la altitud de 1 500 m el promedio de biomasa fue de  $10.07 \text{ ton ha}^{-1}$ , para la altitud de 1 200 m se obtiene una biomasa media de  $22.66 \text{ ton ha}^{-1}$  (Figura 5), ambos resultados son mayores a los que reportan otros investigadores en café, donde registran una biomasa de  $1.10$  y  $6.64 \text{ ton ha}^{-1}$  en altitudes superiores a 1 500 m (Andrade et al., 2014; Jurado et al., 2019). Así mismo Hernández et al. (2020) realizaron una investigación de café en Colombia a una altitud de 1 200 m obteniendo una biomasa de  $7.2 \text{ ton ha}^{-1}$ . Corral et al. (2006) reportan una biomasa en café de  $9.6 \text{ ton ha}^{-1}$  siendo este valor similar a la localidad de Motozintla (1 500 msnm), y de menor biomasa para Siltepec. Sin embargo, Zavala et al. (2018) realizaron un estudio en Perú donde reportan una biomasa de  $51.39 \text{ ton ha}^{-1}$  en café, este valor es superior a las altitudes del presente estudio.

En el presente estudio la menor altitud es la que almacenó la mayor biomasa en plantas de café, estos resultados coinciden con otros investigadores donde encontraron la mayor biomasa almacenada en altitudes  $\leq$  a 1 200 m (Mena et al., 2011; Hernández et al., 2012). Las plantas de café juegan un papel importante en la acumulación de biomasa, ya que esta especie almacena entre 30 a 40 %

de biomasa respecto a un sistema agroforestal (Andrade et al., 2014; Terán et al., 2018). La acumulación de biomasa puede atribuirse al manejo de cultivo; como la aplicación de podas en el café y la fertilización, teniendo un mejor crecimiento y desarrollo de la planta (Medina et al., 2009).



**Figura 5.** Estimación de biomasa de café por altitud

#### 4.5 Estimación de biomasa en árboles

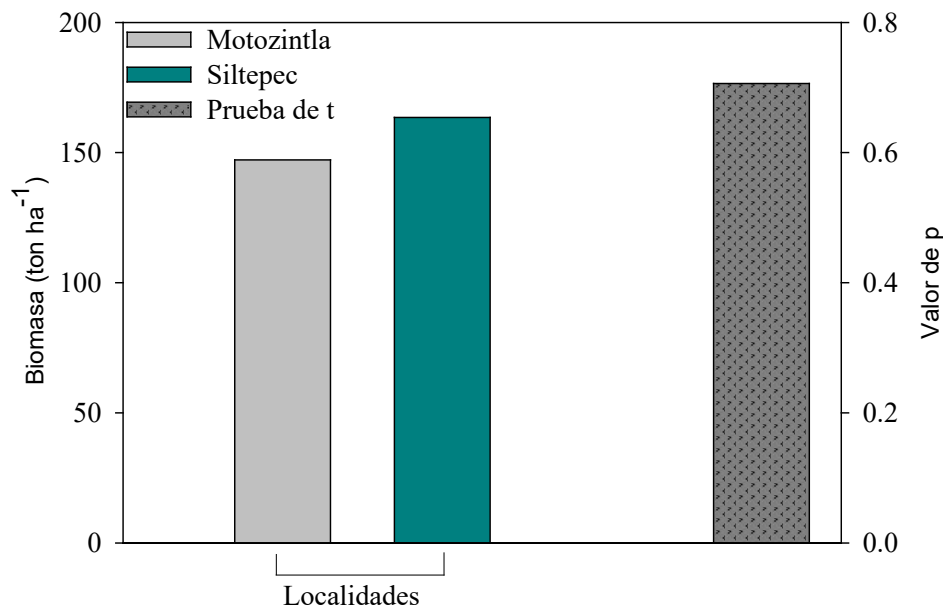
Se aplicó la prueba de T de Student en la estimación de biomasa en árboles, donde indican que no existen diferencias significativas ( $P = 0.706$ ) en la biomasa por altitud. En la altitud de 1 500 m la biomasa promedio fue de 147.21 ton ha<sup>-1</sup>, para la altitud de 1 200 m se obtiene una biomasa media de 163.48 ton ha<sup>-1</sup> (Figura 6). Los valores de biomasa del presente estudio son similares a la biomasa de un SAF café en Ixtlán, Oaxaca, donde Hernández et al. (2012) registran una biomasa en árboles de 157.59 ton ha<sup>-1</sup> en altitudes de 900 y 1500 m. De la misma manera Dossa et al. (2008) realizaron un estudio en un SAF café en el suroeste del país de Togo perteneciente al continente africano, donde reportan 140 ton ha<sup>-1</sup> de biomasa aérea con árboles de sombra de *Albizia adianthifolia*, en altitudes de 300 a 500 m. Callo et al. (2004) reportan una

biomasa que oscila de 83.6 a 152 ton ha<sup>-1</sup> en árboles de cítricos, estos árboles proporcionan sombra al café a una elevación media de 1 200 m. Los árboles en un cultivo de café son de gran relevancia, dado que su principal objetivo es proporcionar sombra. Garza et al. (2020) mencionan que los árboles proyectan más del 60 % de sombra al cultivo café, hay que considerar que la sombra del café depende de la altitud, debido a que menor altitud mayor radiación solar habrá en el cultivo y por ende la sombra de los árboles debe ser mayor, caso contrario para altitudes mayores.

Medina et al. (2008) reportan 25.9 ton ha<sup>-1</sup> de biomasa en árboles en un SAF café, con 6 años en Nicaragua. En México, específicamente en la sierra de Oaxaca, entre 1 200 y 1 600 msnm, Terán et al. (2018) obtuvieron una biomasa de 78.4 ton ha<sup>-1</sup> en árboles asociados al café. En el norte de Chiapas a una altitud de 860 a 1 530 m, obtuvieron 77.6 ton ha<sup>-1</sup> de biomasa en árboles en un SAF café orgánico (Soto & Aguirre, 2015). En el estado de Veracruz a una altitud de 1 100 y 2 200 msnm, Ruiz et al. (2022) reportan 67.27 ton ha<sup>-1</sup> de biomasa en árboles en un SAF café en laderas (15 y 60 % pendiente). En Nicaragua en un SAF café con altitudes de 1 000 a 1 250 m, Medina et al. (2009) determinaron que los árboles almacenan 30.46 ton ha<sup>-1</sup>, con 176 árboles por hectárea, estos individuos tienen de 8 a 9 años y son principalmente de la especie *Inga vera*. Las estimaciones de biomasa por los diferentes autores son menores al presente estudio. Medina et al. (2009) y Ajit et al. (2016) mencionan que la biomasa también es influenciada por la edad, densidad y especies de árboles de sombra y café.

En los cafetales de Ecuador a una altitud de 260 msnm, Corral et al. (2006) reportaron una biomasa de 247.3 ton ha<sup>-1</sup> en árboles de pachaco, sin embargo, con árboles de laurel reportan 36.5 ton ha<sup>-1</sup>, por lo tanto, la especie forestal pachaco, tiene mayor capacidad de almacenamiento de biomasa. Estos valores, están por encima de la biomasa acumulada en árboles del presente estudio, a excepción de la biomasa de los árboles de laurel. Los árboles de sombra son una fuente de almacenamiento de biomasa y proporcionan la mayor acumulación de biomasa en un SAF café (Terán et al., 2018).





**Figura 6.** Estimación de biomasa de árboles por altitud

#### 4.6 Estimación de biomasa en el SAF

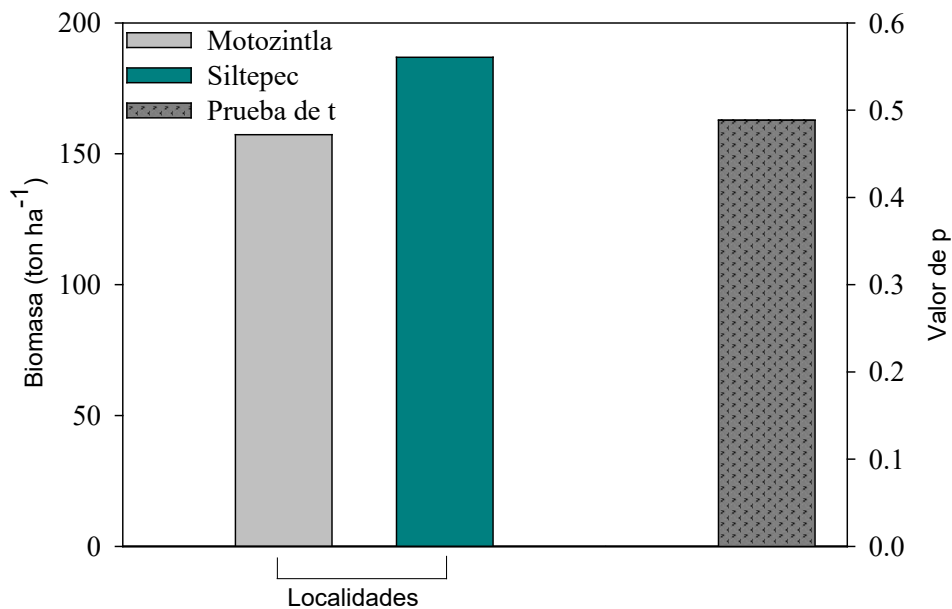
Con el fin de determinar estadísticamente si la biomasa (B) en un SAF café es diferente por altitud, se aplicó una prueba estadística (T de Student), esta prueba indica que no existen diferencias significativas ( $P = 0.488$ ) en un SAF por altitud. En la elevación de 1 500 m la biomasa promedio fue de  $157.28 \text{ ton ha}^{-1}$ , para la altitud de 1 200 m se obtiene una biomasa media de  $186.89 \text{ ton ha}^{-1}$  (Figura 7). En lo que respecta en un SAF café + cítricos y plátanos, los datos de Callo et al. (2004), oscilan de 83.6 a  $152.8 \text{ ton B ha}^{-1}$ , y 78.4 a  $145.8 \text{ ton B ha}^{-1}$  en un SAF café + árboles de cítricos. Häger (2012), en Costa Rica, registran  $186 \text{ ton B ha}^{-1}$  en un SAF café en altitudes de 800 a 1 200 msnm. Consecuentemente, los datos almacenados de biomasa en un SAF café de la presente investigación, son similares a los registrados por Callo et al. (2004) en la altitud de 1 500 m y Häger (2012) con una altitud de 1 200 m.

El contenido de biomasa en los cafetales es mayor cuando hay una combinación con especies arbóreas, en Indonesia un SAF café almacena  $164 \text{ ton B ha}^{-1}$  en altitudes de 780 a 1 700 m (Van et al., 2002). Un SAF café puede acumular en

promedio 190 ton B ha<sup>-1</sup> (Albrecht & Kandji, 2003), este valor es similar al presente estudio. A través de los estudios mencionados, se afirma que los SAF café son una alternativa sustentable que aporta a la producción de biomasa, así mismo los productores obtienen un beneficio económico por la cosecha de su producto (café), y leña como fuente de combustible.

Zavala et al. (2018) realizaron un estudio de SAF de café en Perú, donde registraron 219.43 ton B ha<sup>-1</sup> con una altitud de 1 500 m. Espinoza et al. (2012) obtuvieron datos de 228 ton B ha<sup>-1</sup> en cafetales con árboles de cedro en Veracruz; y, Corral et al. (2006) realizaron un estudio de SAF de café en Ecuador con 120 y 260 msnm, donde registraron 250.4 ton B ha<sup>-1</sup>, siendo estos valores mayores en comparación de las altitudes del presente estudio. Ruiz et al. (2022) en un SAF de café y en un SAF café + plátano en Veracruz obtuvieron una biomasa promedio de 64.76 y 52.34 ton ha<sup>-1</sup> con intervalos de 1 100 y 2 2000 msnm. Mientras que Ajit et al. (2016) reportan de 4.96 a 58.96 ton B ha<sup>-1</sup>, con árboles de 1 a 204 por hectárea en la India, siendo estos valores inferiores al presente estudio.

Los árboles dentro del café usualmente son reemplazados por árboles de interés de los productores, modificando así su densidad. Los SAF café conservan la biodiversidad, protegen el suelo, aportan nutrientes a través de la hojarasca, entre otros (Villavicencio, 2013). Actualmente México contribuye con el almacenamiento de biomasa en sistemas agroforestales, debido a que se tiene el programa sembrando vida, donde impulsan la implementación de parcelas con sistemas productivos agroforestales, donde los productores reciben una compensación económica, para poder producir, establecer y manejar estos sistemas, disminuyendo la degradación ambiental.



**Figura 7.** Estimación de biomasa en el SAF por altitud

#### 4.7 Estimación de biomasa por estratos verticales

En un SAF café, se integra una diversidad de especies con diferentes escalas verticales, debido a que el cultivo de café se considera una especie umbrófila, donde el café requiere sombra y los árboles son principalmente utilizados para la sombra al cultivo. Con el análisis de varianza se determinó que existen diferencias significativas entre los estratos verticales de ambas altitudes ( $P < 0.001$ ). En la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) resultó que los estratos se dividen en dos grupos, siendo estadísticamente diferentes y con valores superiores entre los mismos. Los estratos de: SAF y árboles en ambas altitudes, mostraron diferencias significativas con los estratos de café y plátano (Cuadro 6). Dentro de un SAF café, el estrato árboles es que almacena el mayor contenido de biomasa en comparación con el resto de los estratos. En un SAF café con una altitud de 1 200 m, el 87.4 % pertenece a la biomasa en árboles, sin embargo, para la altitud de 1 500 m la biomasa de árboles es del 93.5 %.

El porcentaje de biomasa acumulada en árboles con altitud de 1 200 m es similar a lo que indica Ruiz et al. (2022) con el 85 % de biomasa en árboles de sombra

en un SAF café, así mismo en un SAF café + laurel, los árboles de sombra almacenan el 89 % del SAF (Corral et al., 2006). Otros investigadores reportan que los árboles fijan el 82 % de biomasa en un SAF café (Soto & Aguirre, 2015). En cambio, Andrade et al. (2014) mencionan que los árboles almacenan más del 66 % de biomasa en un SAF café.

En una altitud de 1 500 m la biomasa fijada fue por encima del 90 % en los cafetales, esto es similarmente a lo que reportan otros investigadores; Terán et al. (2018) reportan que la mayor proporción de biomasa en un SAF café se encuentra en los árboles de sombra con el 95.3 %. Medina et al. (2008) en un estudio en Nicaragua registran que la biomasa en árboles de un SAF café representa el 92 %. En un SAF café + guaba, los árboles de sombra contienen el 91 % de biomasa acumulada (Corral et al., 2006), así mismo Masuhara et al. (2015) reportan el 93 % de biomasa fijada en los árboles de sombra.

En términos porcentuales los árboles de sombra almacenan más biomasa que en el café, esto se debe a que el cultivo tiene un menor vigor en comparación de los árboles. Cabe mencionar que solamente en la elevación de 1 200 msnm se registraron algunas plantas de plátano, siendo este estrato el de menor porcentaje de biomasa dentro del SAF café, de igual manera Ruiz et al. (2022) registraron que los plátanos son los que fijan la menor biomasa porcentual (3.9 %) en un SAF café. La poca fijación de biomasa se debe a que no hay una buena representatividad de la especie, así también que no son especies con tallos leñosos.

**Cuadro 6.** Biomasa por estratos en ambas altitudes

Altitud	Estructura vertical	Biomasa ton ha <sup>-1</sup>	Tukey	p
1 200	SAF	186.89	a	4.32e-10
	Árboles	163.48	a	
1 500	SAF	157.28	a	
	Árboles	147.21	a	

1 200	Café	22.66	b
1 500	Café	10.07	b
1 200	Plátano	0.75	b

---

## 5. CONCLUSIONES

En una altitud de 1 200 m los sistemas agroforestales con base en café estiman 186.89 ton B ha<sup>-1</sup>, pero en una altitud de 1 500 m el SAF café reporta 157.28 ton B ha<sup>-1</sup>, en ambas altitudes los árboles son los que fijan más biomasa, almacenando más del 87.4 % en un SAF café. La altitud no influye en la estimación de la biomasa de árboles y del SAF café. Respecto a la biomasa en café, se presentaron diferencias significativas, siendo la altitud de 1 200 msnm, la que obtuvo la mayor biomasa, duplicando su estimación respecto a la otra altitud.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Ajit, Dhyani, S. K., Handa, A. K., Ram, N., Chavan, S. B., Badre, ... Gunasekaran, S. (2016). Estimating carbon sequestration potential of existing agroforestry systems in India. *Agroforestry Systems*, 91, 1101-1118. doi: 10.1007/s10457-016-9986-z
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99, 15–27. doi:10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- Alcudia, A. A., Martínez, Z. P., Hans, V. Der W., Castillo, U. M. M., & Suárez, S. J. (2019). Allometric estimation of the biomass of *Musa* spp. in homegardens of Tabasco, Mexico. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 22, 143-152. doi: 10.56369/tsaes.2557
- Ancira, S. L. & Treviño, G. E. J. (2015). Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques*, 21(1), 77-91. doi: 10.21829/myb.2015.211434
- Andrade, H.J., Marín, L.M., & Pachón, D. P. (2014) Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro*, 26(2), 127-132. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85731100008>
- Arévalo, A. L., Alegre, J. C. & Palm, C. A. (2003). Manual de las Reservas Totales de Carbono en los Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú. 24 p.
- Bautista, C. E. A., Gutiérrez, C. E. V., Ordaz, C. V. M., Gutiérrez, C. M. del C., & Cajuste, B. L. (2018). Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Terra Latinoamericana*, 36, 261-273. doi: 10.28940/terra.v36i3.350

- Callo, C. D., Rajagopal, I., & Krishnamurthy, L. (2004). Secuestro de carbono por sistemas agroforestales en Veracruz. *Ciencia UANL*, 7(2): 60-65. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/261401001>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). Establecimiento de Sistemas Agroforestales. Consultado el 21-11-2022 en [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL\\_SISTEMAS\\_AGROFORESTALES.PDF](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL_SISTEMAS_AGROFORESTALES.PDF)
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). Sistemas Agroforestales Maderables en México. Coordinación General de Producción y productividad Gerencia de Plantaciones Forestales Comerciales. Consultado 27-04-2022 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/557057/Sistemas\\_Agroforestales\\_Maderables\\_en\\_Mexico\\_\\_\\_1\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/557057/Sistemas_Agroforestales_Maderables_en_Mexico___1_.pdf)
- Corral, C. R., Duicela, L. A., & Maza, C. H. (2006). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. 1-15.
- Cruz, A. R., Uribe, G. M., Leos, R. J. A., Rendón, M. R., & Cruz, L. A. (2015). Tipología de unidades de producción familiar del sistema agroforestal tradicional al café-plátano-cítricos en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18, 323-334. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93944043015>
- Danarto, S. A., & Hapsari, L. (2016). Biomass and Carbon Stock Estimation Inventory of Indonesian Bananas (*Musa* spp.) and Its Potential Role for Land Rehabilitation. *Biotropia - The Southeast Asian Journal of Tropical Biology*, 22(2), 102-108. doi:10.11598/btb.2015.22.2.376
- Darío, A. J. 2011. Desarrollo de modelos de biomasa aérea en sombríos de cafeto (*coffea arabica* L.) mediante datos simulados. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(1): 49-56. doi: 10.31910/rudca.v14.n1.2011.756.



- Dossa, E. L., Fernandes, E. C. M., Reid, W. S., & Ezui, K. (2008). Above-and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agroforest Syst*, 72, 103-115. doi: 10.1007/s10457-007-9075-4
- Espinoza, D. W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A. A., & Torres, R. A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57–70. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- Figuroa, N. C. M., Ángeles P. G., Velázquez, M. A., & De los Santos P. H. M. (2010). Estimación de la Biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105-112.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie Libros, Núm. 6. Instituto de Geografía -Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F. México. 97 p. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Garza, L. R., Maldonado, T. R., Álvarez, S. M. E., & Torres R. J. A. (2020). Caracterización de especies arbóreas asociadas al cultivo de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 25–32. doi: 10.29312/remexca.v11i1.2210
- Hairiah, K., Sitompul, S. M., Van-Noordwijk, M. & Palm, C. (2001). Methods for sampling carbon stocks above and below ground. World Agroforestry Centre – ICRAF, SEA Regional Office, Bogor, Indonesia, 31 p.
- Häger, A. (2012). The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforest Syst*, 86, 159-174. doi: 10.1007/s10457-012-9545-1
- Hernández, N. H. E., Andrade, J. H., Suárez, S. J. C., Sánchez, A. J. R., Gutiérrez, S. D. R., Gutiérrez, G. G. A.,...Casanoves, F. (2020). Almacenamiento de

- carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368. doi:10.15517/rbt.v69i1.42959
- Hernández, V. D., Pompa, G. M., Yerena, Y. J. I., & Alanís, R. E. (2017). Within-tree carbon concentration variation in three Mexican pine species. *Bosque*, 38(2), 381-386. doi: 10.4067/S0717-92002017000200015
- Hernández, V. E., Campos, A. G. V., Enríquez, del V. J. R., Rodríguez, O. G., & Velasco, V. V. A. (2012). Captura de carbono por *Inga jinicuil* schltld. en un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11–21. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n9/v3n9a2.pdf>
- Jurado, R. M. A., Ordoñez, J. H. R., Ballesteros, P. W., & Delgado, V. I. A. (2019). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.) Consacá, Nariño – Colombia. Artículo de Discusión. Facultad de Ciencias Agrícolas, Pasto, Nariño. 16 p. Obtenido de <https://sired.udenar.edu.co/5909/>
- Jurado, R. M. A., Ordoñez, J. H. R., & Lagos, B. T. C. (2020). Evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consaca, Nariño, Colombia. *Luna Azul*, 51, 166–181. doi: 10.17151/luaz.2020.51.9
- Manchabajoy, C. J. P., Andrade, D. D., & Castillo, M. A. J. (2022). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño. *Ciencia y Agricultura*. 19(1), 1-12. doi:10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E.,...Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66–93. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5271975>

- Medina, B. C., Calero, G. C., Hurtado, H. & Vivas, S. E. (2009). Cuantificación de carbono en la biomasa aérea de café (*Coffea arabica* L.) con sombra, en la comarca palo de sombrero, Jinotega, Nicaragua. *La Calera*, 9(12), 28–34. doi: 10.5377/calera.v9i12.4
- Medina, B. C., Connolly, W. R., Corea, S. C. A. (2008). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas productivos promovidos por el programa socioambiental forestal. *La Calera*. 8(9), 42-47. Obtenido de <https://lacalera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/89>
- Mena, E. V., Andrade. H. J., & Navarro. M. C. (2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinal en Costa Rica. *Agroforesteria Neotropical*, 1(1), 2-20. Obtenido de <http://revistas.ut.edu.co/index.php/agroforesteria/article/view/11/11>
- Montagnini F., Somarriba, E. J., Murgueitio E., Fasola H., & Eibl, B. (2015). Sistemas agroforestales funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402. CATIE, Costa Rica. Edit CIPAV, Colombia. 454 p. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/324416322>
- Palencia, C. G. E., Gómez, S. R., & Martín, S. J. E. (2006). Manejo sostenible del cultivo del plátano. Consultado el 05-04-2023 en [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12888/44209\\_56458.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12888/44209_56458.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Quesada, M. R., & Fernández, V. J. (2005). Actualización de listado de especies arbóreas de uso forestal y otros usos en Costa Rica. *Kurú: Revista Forestal*, 2(4), 1-45. Obtenido de [https://www.sirefor.go.cr/pdfs/tematicas/Especies/2005\\_Quesada\\_especies\\_forestales\\_2005.pdf](https://www.sirefor.go.cr/pdfs/tematicas/Especies/2005_Quesada_especies_forestales_2005.pdf)
- Ríos, G. J. M. (2018). Cuantificación del potencial de carbono en la biomasa aérea del plátano (*Musa paradisiaca*) en el distrito de Aguaytía,

departamento de Ucayali. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa, Perú.

- Ruiz, G. P., Monterroso, R. A. I., Valdés, V. E., Escamilla, P. E., & Gómez, D. J. D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3), 1–23. doi: 10.15517/am.v33i3.48671
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos: Muestreos de biomasa forestal. Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile.
- Solórzano, N., & Querales, D. (2010). Crecimiento y desarrollo del café (*Coffea arabica*) bajo la sombra de cinco especies arbóreas. *Revista forestal latinoamericana*, 25, 61-80. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/266316856>
- Soto P. L., Jiménez F. G., & Lerner M. T. (2008). Diseño de sistemas agroforestales para la producción y la conservación. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/284304882>
- Soto, P. L., & Aguirre, D. C. M. (2015). Carbon Stocks in Organic Coffee Systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7(1), 117–128. doi: 10.5539/jas.v7n1p117
- Soto, P. L., & Jiménez, F. G. (2018). Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosque*, 24(especial), 1-15. doi:10.21829/myb.2018.2401887
- Terán, R. M. A., Rodríguez, O. G., Enríquez, del D. V J. R., & Velasco, V. V. A. (2018). Biomasa aérea y ecuaciones alométricas en un cafetal en la Sierra Norte de Oaxaca. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 217–226. doi: 10.19136/era.a5n14.1444

- Timoteo, K., Remuzgo, J., Valdivia, L., Sales, F., García, S. D., & Abanto, R. C. (2016). Estimación del carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco. *Folia Amazónica*, 25(1), 45-54. doi: 10.24841/fa.v25i1.382
- Valdés, V. E., Vázquez, D. L. P., Tinoco, R. J. A., Sánchez, H. R., Salcedo, P. E., & Lagunes, F. E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 28, 287–297. doi: 10.29312/remexca.v13i28.3283
- Van, N. M., Rahayu, S., Hairiah, K., Wulan, Y. C., Farida., & Verbist, B. (2002). Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Journal of Science in China*, 45, 1-12. Obtained from <https://www.researchgate.net/publication/241781492>
- Villavicencio, E. L. (2013). Caracterización agroforestal en sistemas de café tradicional y rustico, en San Miguel, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 67-80. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.051
- Zavala, S. J. W., Zavala, G. S. L., & Mansilla, M. L. G. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la universidad nacional agraria de la selva. *Investigación y Amazonia Tingo María, Perú*, 8(5), 1-8. Obtenido de <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200/183>

## **CAPITULO III. ESTIMACIÓN DE CARBONO Y BIOXIDO DE CARBONO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CAFÉ, EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS**

### **ESTIMATION OF CARBON AND CARBON DIOXIDE IN A CAFÉ AGROFORESTRY SYSTEM IN THE SIERRA MADRE OF CHIAPAS**

#### **1. RESUMEN**

El SAF café (SAFC) es de gran relevancia para los productores de la Sierra Madre de Chiapas, debido a que estos sistemas generan economía para solventar las necesidades de su familia, así mismo obtienen beneficios como; madera, leña, frutos, entre otros. El SAFC brinda servicios como la captura de carbono, aunque los productores desconocen cuanto almacenan en sus cafetales, por ello, el objetivo fue estimar el carbono y bióxido de carbono en un sistema agroforestal café en dos gradientes altitudinales, así mismo determinar la concentración de carbono (CC) y nitrógeno, siendo la CC un elemento confiable para obtener el carbono almacenado en café. El estudio se realizó en dos altitudes: la primera a 1 200 msnm y la segunda a una altitud de 1 500 m. Para estimar el carbono, primeramente, se estimó la biomasa, siendo esta de manera indirecta, posteriormente la CC en café se determinó con un equipo denominado Flash 2000 NC Soils Analyzer, en cambio para las especies asociadas al SAFC se investigó su CC correspondiente. Una vez obtenido la biomasa y la CC, se multiplicaron, obteniendo así el carbono almacenado, para el bióxido de carbono se multiplicó el carbono almacenado por la constante 3.67. En una altitud de 1 200 msnm el SAFC almacena 92.74 ton C ha<sup>-1</sup> y 340.37 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, pero en una elevación de 1 500 msnm reporta 78.34 ton C ha<sup>-1</sup> y 287.52 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Los resultados indican que no hay diferencias estadísticamente

significativas en la estimación de carbono y bióxido de carbono en ambas altitudes. Los SAF café en Chiapas son potencialmente sumideros de carbono, de esta manera los productores pudieran ser beneficiados económicamente por conservar estos sistemas.

**Palabras claves:** altitud, bióxido de carbono, carbono, concentración de carbono, café.

## **ABSTRACT**

The SAF coffee (SAFC) is of great relevance for the producers of the Sierra Madre de Chiapas, because these systems generate economy to solve the needs of their family, likewise they obtain benefits such as; wood, firewood, fruits, among others. The SAFC provides services such as carbon capture, although the producers do not know how much they store in their coffee plantations, therefore, the objective was to estimate the carbon and carbon dioxide in a coffee agroforestry system in two altitudinal gradients, as well as determine the carbon concentration (CC) and nitrogen, being CC a reliable element to obtain the carbon stored in coffee. The study was carried out at two altitudes: the first at 1,200 masl and the second at an altitude of 1,500 m. To estimate carbon, firstly, the biomass was estimated, this being indirect, then the CC in coffee was determined with equipment called Flash 2000 NC Soils Analyzer, while for the species associated with the SAFC their corresponding CC was investigated. Once the biomass and CC were obtained, they were multiplied, thus obtaining the stored carbon, for carbon dioxide the stored carbon was multiplied by the constant 3.67. At an altitude of 1,200 masl, the SAFC stores 92.74 tons C ha<sup>-1</sup> and 340.37 tons CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, but at an elevation of 1,500 masl it reports 78.34 tons C ha<sup>-1</sup> and 287.52 tons CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. The results indicate that there are no statistically significant differences in the estimation of carbon and carbon dioxide at both altitudes. The coffee AFS in Chiapas are potentially carbon sinks, so producers could benefit economically from conserving these systems.

**Keywords:** altitude, carbon bioxide, carbon, carbon concentration, coffee.



## 2. INTRODUCCIÓN

El café es producto que se comercializa a nivel internacional, México ocupa el noveno lugar como productor de café en verde, aportando a la producción mundial con más de un millón de toneladas, donde participan más de 500 mil productores ubicados en 12 estados de la república del país, pero los estados de Chiapas y Veracruz son los que producen el 70 % de café en el país (SADER, 2015).

En Chiapas, el café se desarrolla principalmente en la zona Sierra Madre de Chiapas, donde los productores a través de los años han cultivado, ya que obtienen ingresos económicos para sostener a su familia. El café se asocia con especies forestales, este SAF café aparte de brindar bienes, brinda servicios ambientales como conservación y retención de suelos, mejora la calidad del agua, belleza escénica, conservación de la biodiversidad y la captura de carbono (Nair, 2011).

Para determinar el almacenamiento de carbono de estos sistemas, es necesario tener la biomasa y la concentración de carbono (C), el contenido de C en la biomasa acumulada de un SAFC se estima entre el 40 y 50 % (IPCC, 2007).

Investigadores a nivel mundial han registrado que SAFC almacenan más del 17.4 ton C ha<sup>-1</sup> y 63.85 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, donde han reportado una alta diversidad de especies asociadas en el SAF café (Tumwebaze & Byakagaba, 2016; Zaro et al., 2019; Solis et al., 2020). En México se han reportado que los SAFC capturan más del 25.21 ton C ha<sup>-1</sup> y 92.52 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Ruiz et al., 2022).

Los SAFC son amigablemente con el ambiente, favoreciendo su protección y conservación, además juegan un papel importante en la fijación de carbono. Estos sistemas deberían ser incluido en los pagos por servicios ambientales a través del desarrollo de políticas adecuadas (Casanova et al., 2011). Los pagos de carbono en los SAFC serian de gran ayuda para mejorar las condiciones de vida a los productores que dedican a esta gran labor.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Área de estudio

La Sierra Madre de Chiapas es también conocida como Cordillera Central, esta cordillera es la más grande de América central y una de las áreas más importantes de producción de café en México, siendo de gran relevancia económica para el país, también se distingue por ser una fuente de recursos hídricos para la población aledaña (Arellano & López, 2009). El estudio se realizó en dos (altitudes) municipios pertenecientes de la Sierra Madre de Chiapas (Figura 8). El primer municipio denominado Siltepec, y el segundo Motozintla. Siltepec geográficamente se ubica en 15° 33' 00" latitud norte y 92° 20' 00" longitud oeste, con 1 200 msnm, para Motozintla sus coordenadas son 15° 21' 45" N y 92° 14' 53" O con una altitud de 1 500 m.

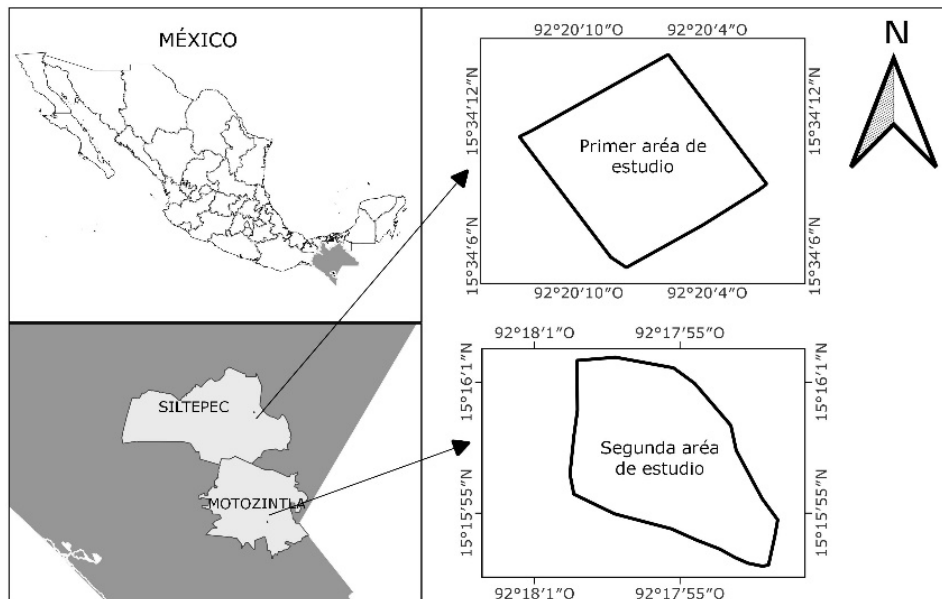


Figura 8. Microlocalización del área de estudio

#### 3.2 Diseño de muestreo

Primero se realizó un pre-muestreo para determinar el número de sitios a evaluar en cada altitud. Para la altitud de 1 200 m (Siltepec) se levantaron 7 sitios y en la

altitud de 1 500 m (Motozintla) 18 sitios. Los sitios fueron rectangulares de 4 x 25 m.

### **3.3 Concentración de carbono**

Una vez estimada la biomasa se procedió a investigar la concentración de carbono en árboles y en plátano ya que fue de manera indirecta, sin embargo, para el café fue directa. Para el caso de los árboles se multiplicó por el factor 0.50 y se transformó a contenido de carbono, para el plátano el factor de carbono es 0.37 (Arias et al., 2014), este factor corresponde a la fracción de carbono porcentual en la biomasa seca de la madera.

Para obtener la concentración de carbono y nitrógeno en café, se tomaron 6 individuos al azar para las dos áreas (altitudes), por cada individuo se obtuvo una muestra por cada componente (corteza, hojas y fuste) colocándose en bolsas de papel (Aquino et al., 2018). Las muestras se secaron en una estufa de secado Blue M hasta alcanzar un peso constante, posteriormente se pulverizaron las 18 muestras en un molino marca Marathon Electric serie C20J020016, se colocaron en bolsas de polietileno etiquetadas con un código, con un peso promedio de 90 gramos cada una. Después se pesaron 30 miligramos de cada muestra en una balanza, para que fueran analizadas por el equipo denominado analizador elemental Thermo Scientific Flash 2000 NC Soils Analyzer. La concentración de carbono y nitrógeno se determinó con el equipo antes mencionado, éste determina las concentraciones en muestras sólidas mediante combustión completa, a una temperatura de 950 °C, los gases producto de la combustión son medidos a través de un detector de infrarrojo no dispersivo que contabiliza las moléculas de carbono contenidas en estos gases (Yerena et al., 2012a).

### **3.4 Estimación de carbono**

El carbono almacenado en árboles, plátano y el café se estimó mediante la multiplicación de la biomasa aérea por la concentración de carbono correspondiente.

### **3.5 Obtención de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El bióxido de carbono equivalente se estimó mediante la proporción del peso de la molécula de CO<sub>2</sub> (44) y el peso del átomo de carbono (12), obteniendo la relación 44/12 y como resultado la constante de 3.67. Una vez obtenida la constante se multiplicó por los valores de carbono, dando como resultado los valores de CO<sub>2</sub> acumulado (Pacheco et al., 2007; Zavala et al., 2018).

### **3.6 Análisis estadístico**

Los datos de concentración de carbono y nitrógeno fueron sometidos a un análisis de varianza (Anova) y si presentan significancia, se realizó la prueba de medias a través de Tukey ( $P < 0.05$ ), y verificar la diferencia entre los componentes de café (Sáenz et al., 2021).

El almacenamiento de carbono y el bióxido de carbono por estratos del SAF café se comparó como poblaciones independientes a través de una prueba de t Student para verificar la diferencia significativa entre altitudes. Así mismo se realizó una Anova entre los diferentes estratos de ambas altitudes y si presentan diferencia significativa, se procedió a realizar una prueba de Tukey (Hernández et al., 2017). Los análisis fueron realizados en el programa estadístico R Studio, versión 4.1.2 (Marroquín et al., 2018; R Core Team, 2022).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Concentración de carbono por componente por localidad**

Entre los componentes de cada localidad se presentaron diferencias significativas ( $P < 0.001$ ). La prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) indica que la concentración de carbono en el componente fuste es estadísticamente diferente con valores superiores al resto de componentes por localidad, mientras el componente hoja y corteza de Siltepec son estadísticamente similares, caso contrario para los componentes (hoja y corteza) de Motozintla, se presenta un grupo con valores intermedios que va desde 46.18 hasta 47.42 % (Cuadro 7). Al igual que este estudio Yerena et al. (2012a) presentaron valores superiores en el fuste en sitios del matorral espinoso tamaulipeco, y en los sitios de corteza los

valores fueron inferiores al resto de sus componentes. El contenido de carbono promedio de Siltepec fue de 47.33 %, en cambio para Motozintla fue de 47.04 %. Sin embargo, no presentan ninguna diferencia significativa entre las altitudes.

**Cuadro 7.** Contenido de carbono (%) por componente por localidad

Localidad	Componente	Media $\pm$ EE	Agrupación Tukey <sup>1</sup>
Siltepec	Fuste	49.25 $\pm$ 0.72	a
Motozintla		48.97 $\pm$ 2.49	a
Motozintla	Hoja	47.42 $\pm$ 0.90	ab
Siltepec		46.53 $\pm$ 0.76	bc
Siltepec	Corteza	46.18 $\pm$ 0.93	bc
Motozintla		44.72 $\pm$ 1.41	c

<sup>1</sup>Letras iguales son estadísticamente similares ( $P \leq 0,05$ ). EE = Error estándar

#### 4.2 Concentración de nitrógeno por componente por localidad

Los valores promedio de nitrógeno (N) en cada uno de los componentes por altitud, presentaron diferencias significativas ( $P < 0.001$ ). La prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) indica cuatro grupos, el componente hojas presentó diferencia significativa entre altitudes, pero en corteza y fuste no presentaron diferencias entre sí. Sin embargo, entre componentes, no hay una similitud. El valor más alto de N se sitúa en el componente hojas para ambas altitudes, esto concuerda con Pérez et al. (2014) donde hacen mención que el componente hojas tiene el mayor rendimiento de N (3.10 %). Es importante conocer el nitrógeno en las plantas de café, porque sirven como indicadores del estado nutricional de la planta.

**Cuadro 8.** Contenido de Nitrógeno total (%) por componente por localidad

Localidad	Componente	Media $\pm$ EE	Agrupación Tukey <sup>1</sup>
Motozintla	Hoja	3.37 $\pm$ 0.08	a
Siltepec		2.67 $\pm$ 0.49	b
Motozintla	Corteza	1.77 $\pm$ 0.35	c
Siltepec		1.57 $\pm$ 0.22	c
Motozintla	Fuste	0.45 $\pm$ 0.13	d

---

Siltepec	$0.41 \pm 0.08$	d
----------	-----------------	---

---

### 4.3 Concentración de carbono total de la especie

Mediante el análisis de varianza se determinó que si hay diferencias significativas entre los componentes de café ( $P < 0.001$ ), por lo que se procedió a realizar la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) donde la concentración de carbono se dividió en 3 grupos. El contenido de carbono expresado en porcentaje vario de 45.45 a 49.11 %, donde la corteza obtuvo la menor concentración de carbono, posteriormente la hoja y por último el fuste (Cuadro 9).

La concentración de carbono en fuste, hoja y corteza en café fue inferior a lo que reporta Figueroa et al. (2005) con valores de 41.9 % (fuste) y 42.3 % (hojas) en la misma especie estudiada. El promedio del contenido de carbono total de café fue 47.18 %, este valor es similar al estudio que realizaron en Oaxaca donde obtuvieron el 46.20 % para especies que se han plantado en el trópico (Aquino et al., 2018); al igual que lo reportado en latifoliadas (48.84 %) y *Pinus* sp. (47.34 %) por Jiménez et al. (2013) y Yerena et al. (2012b). Por su parte, la concentración de carbono obtenido en árboles que se utilizan como sombra para el café (40.28 %) resultaron más bajos al de esta investigación (Hernández et al., 2012). Respecto a lo anterior, las especies tienen diferentes contenidos de carbono (41.9 - 49.95 %), sin embargo, la mayoría de ellas es cercano a 0.5.

### 4.4 Concentración de nitrógeno total de la especie

El café no solo contiene carbono, sino también nitrógeno; principalmente en el componente hoja (3.03 %), seguida la corteza (1.68 %) y por último el fuste (0.43 %), teniendo una media de 1.71 % en nitrógeno total (Cuadro 9). El contenido de N en sus componentes de este estudio es similar a lo reportado por Pérez et al. (2014) donde los valores oscilan entre 2.8 a 3.10 % N en café. Sin embargo, para especies tropicales en Chiapas el nitrógeno es de 1.86 % en un estudio realizado por Moreno et al. (2021), siendo similar al promedio del presente estudio; pero menor para árboles tropicales en Oaxaca, con 0.48 % N (Hernández et al., 2012). Un buen contenido foliar de nitrógeno en café permite obtener un buen

rendimiento, un valor por debajo de 2.80 % N (foliar) indica insuficiencia de nutrientes (Pérez et al., 2014).

**Cuadro 9.** Carbono y nitrógeno total por componente en café

Componente	Media $\pm$ EE	Agrupación Tukey <sup>1</sup>
Carbono		
Fuste	49.11 $\pm$ 0.81	a
Hoja	46.98 $\pm$ 0.54	b
Corteza	45.45 $\pm$ 0.84	c
Nitrógeno		
Hoja	3.03 $\pm$ 0.35	a
Corteza	1.68 $\pm$ 0.15	b
Fuste	0.43 $\pm$ 0.05	c

<sup>1</sup>Letras iguales son estadísticamente similares ( $P \leq 0,05$ ). EE = Error estándar

#### 4.5 Estimación de carbono y bióxido de carbono en café

Al estimar el carbono (C) y el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en café por altitudes, se determinó que existen diferencias significativas ( $P < 0.001$ ). En el presente estudio las plantas de café registraron 10.72 ton C ha<sup>-1</sup> y 39.34 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en una altitud de 1 200 (Siltepec), para la altitud de 1 500 m (Motozintla) se obtuvo 4.74 ton C ha<sup>-1</sup> y 17.37 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Figura 9). El mayor almacenamiento de carbono y bióxido de carbono se presentó en una elevación de 1 200 m, esta afirmación coincide con otros autores donde han encontrado el mayor potencial de carbono de café en altitudes menores a 1 300 m (Hernández et al., 2012; Paz et al., 2018).

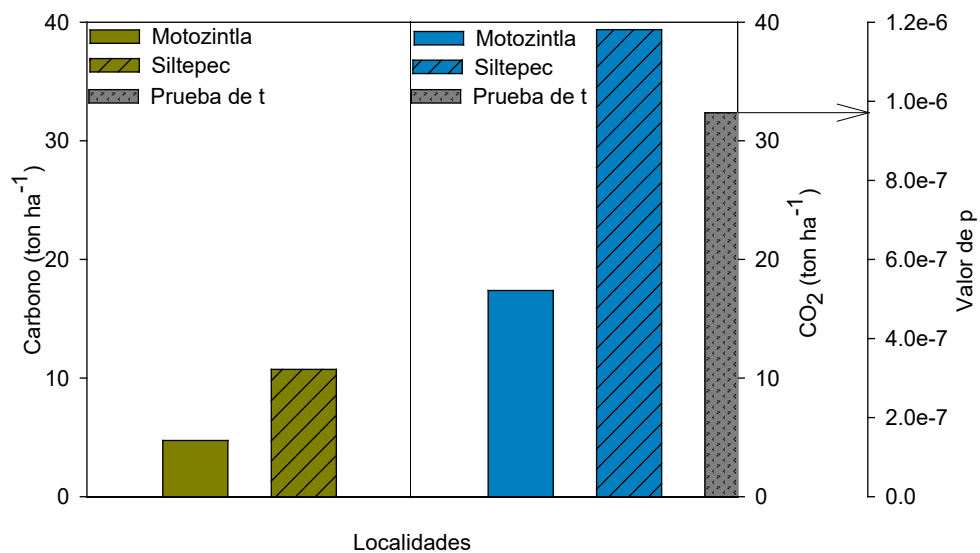
Terán et al. (2018) realizaron un estudio de café en Oaxaca con altitudes de 1 200 a 1 600 m, donde encontraron valores de 2.38 ton C ha<sup>-1</sup> y 8.71 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, estos valores son inferiores a la altitud de 1 200 m y similar a la altitud de 1 500 m de esta investigación.

En un estudio realizado de café en Veracruz con altitudes por encima de 2 200 m Valdés et al. (2022) encontraron valores de 8.88 ton C ha<sup>-1</sup>. Así mismo Zavala

et al. (2018) reportaron una estimación de 8.42 ton C ha<sup>-1</sup> y 30.90 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en café con altitudes menores a 1 500 m en el país de Perú. siendo este valor similar en la altitud de 1 200 m del presente estudio.

Los resultados de las variables estimadas de Motozintla son similares a los resultados de Hernández et al. (2020), Jurado et al. (2019) y Van et al. (2002) donde encontraron valores promedios de 3.5 ton C ha<sup>-1</sup> y 12.84 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en café. De la misma manera en la República de Nicaragua Medina et al. (2009) registraron 4.6 ton C ha<sup>-1</sup> y 16.88 ton CO<sub>2</sub> en café variedad catimor.

El almacenamiento de carbono en las plantas de café depende principalmente de la altitud, pendiente del sitio, condiciones climáticas, prácticas de manejo y las podas (Darío, 2011; Hernández et al., 2012; Zavala et al., 2018).



**Figura 9.** Estimación de carbono y bióxido de carbono en café

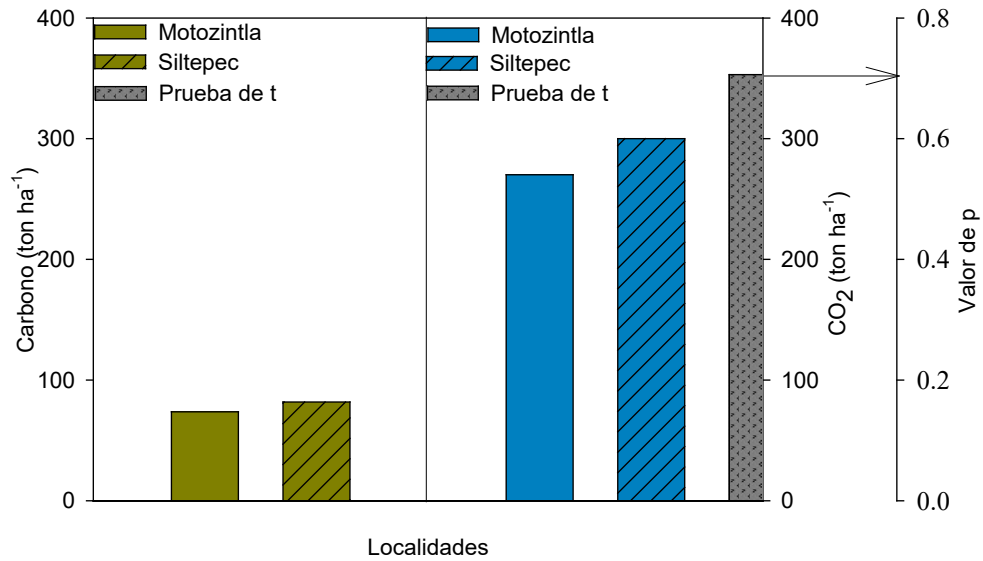
#### 4.6 Estimación de carbono y bióxido de carbono en árboles

Se aplicó la prueba de T de Student en la estimación de carbono (C) y el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en árboles por altitud, donde no mostraron diferencias estadísticamente significativas (P = 0.706). En una altitud de 1 200 msnm los árboles almacenan 81.74 ton C ha<sup>-1</sup> y 299.98 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, pero en una elevación



de 1 500 msnm reportan 73.61 ton C ha<sup>-1</sup> y 270.14 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Figura 10). Valdés et al. (2022) estimaron al igual que esta investigación para la altitud de 1 200 msnm, la captura de carbono en árboles, con un valor de 95.56 ton C ha<sup>-1</sup> y 350.70 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en el estado de Veracruz, las especies reportadas son: tesguate, vainillo, listoncillo, encino y ixpepe, éstos dos últimos con alturas de hasta 14 m de altura. Mientras que Hernández et al. (2012) en Oaxaca, los árboles de *Inga jinicuil* en un SAF café, registran 64.3 ton C ha<sup>-1</sup> y 235.98 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> siendo similar a la altitud de 1 500 m del presente estudio. Los árboles son una opción para secuestrar carbono en tierras agrícolas (Schoeneberger, 2009). Así mismo los árboles en el SAF café, fungen como fijadores de nitrógeno al café, sin embargo, no todos los árboles proporcionan el mismo nitrógeno (Dossa et al., 2008).

Los resultados obtenidos en esta investigación son diferentes a lo obtenido por Masuhara et al. (2015), quienes registran 20.9 ton C ha<sup>-1</sup> y 76.70 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en árboles de *Persea schiedeana* (Chinene), *Inga* spp. y *Grevillea robusta* de un SAF café en una altitud de 1 334 en Veracruz. De igual manera con árboles de *Inga* spp. reportan 30.3 ton C ha<sup>-1</sup> y 111.20 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en la región de Pasco del Perú en una elevación de 1 550 msnm (Ehrenbergerova' et al., 2016). Lo anterior indica que los árboles de sombra en los cafetales juegan un papel importante para facilitar el secuestro de carbono y la conservación del suelo (Schmitt et al., 2012). Es importante resaltar que la captura de carbono es mayor durante la fase de crecimiento del árbol (Kim et al., 2016). Así mismo protegen a los cafetales por su cobertura, como fue el caso en Paraná, Brasil, donde en 1994 se presentó una helada, donde la mayoría de las plantas de café se salvaron porque estaban bajo el dosel de los árboles, en densidades de 71 y 119 árboles por hectárea. (Baggio et al., 1997).



**Figura 10.** Estimación de carbono y bióxido de carbono en árboles

#### 4.7 Estimación de carbono y bióxido de carbono en SAF

En la estimación de carbono y el bióxido de carbono del SAF café por altitudes, se determinó que no hay diferencias estadísticamente significativas ( $P = 0.500$ ). En la presente investigación el SAF café almacena  $92.74 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $340.35 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  en una altitud de  $1\ 200 \text{ msnm}$ , pero en una elevación de  $1\ 500 \text{ msnm}$  reportan  $78.34 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $287.50 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ . La información anteriormente coincide con Jurado et al. (2020) donde estiman el carbono ( $42.39 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $46.94 \text{ ton C ha}^{-1}$ ) en dos altitudes ( $< 1\ 600 \text{ msnm}$  y  $1\ 600$  a  $1\ 800 \text{ msnm}$ ), y no presentaron diferencia significativa ( $P = 0.95$ ).

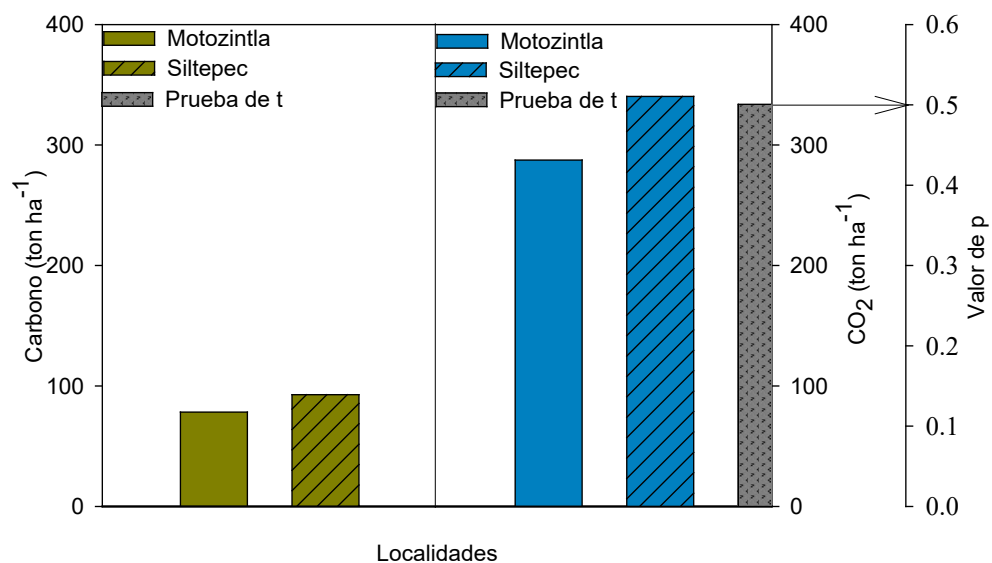
Las cantidades de carbono del presente estudio están dentro del intervalo ( $12$  y  $228 \text{ ton C ha}^{-1}$ ) del potencial de secuestro de carbono de los sistemas agroforestales, con un valor medio de  $95 \text{ ton C ha}^{-1}$ , corroborando el alto potencial que presentan las altitudes en la presente investigación (Albrecht & Kandji, 2003). Los valores de estimación de la altitud  $1\ 200 \text{ m}$  fueron semejantes a lo reportado por Valdés et al. (2022) donde almacenan  $100.46 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $368.68 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  en un SAF café con una pendiente de  $0$  a  $22 \%$  en la región de Huatusco, Veracruz. De igual manera, Hidalgo (2011) reporta que, en un SAF de cacao en

Perú, el sistema almacena  $94.38 \text{ ton C ha}^{-1}$ . En la India los SAF mitigan 109.34 millones de ton de  $\text{CO}_2$  al año, este valor contribuye a la disminución emisiones de los gases de efecto invernadero del sector agrícola (Ajit et al., 2016). Así mismo Pandey (2002) afirma que los SAF son una mejor opción para mitigar el cambio climático que las opciones oceánicas y terrestres debido a los diversos beneficios ambientales, así mismo logran la seguridad alimentaria y la conservación del suelo.

Un SAF café en el altiplano occidental de Guatemala, almacena  $74.00 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $271.58 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  (Schmitt et al., 2012). En el sur de Brasil los SAF café con árboles de caucho fijan  $72.00 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $264.24 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  a una altitud de 610 m (Zaro et al., 2019). En la República de Uganda un SAF café variedad *Canephora* (robusta) almacena  $71.16 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $261.15 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  (Tumwebaze & Byakagaba, 2016). En el país de Togo un SAF café variedad robusta reporta  $81 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $297.27 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ . Los valores reportados por los diferentes autores son similares al presente estudio en la altitud de 1 500 m, a pesar de que los SAF presentan topográficamente diferentes elevaciones de 300 a 3 524 msnm. Un SAF café en cualquier zona geográfica secuestra más carbono en comparación que un monocultivo de café (Zaro et al., 2019). Con los estudios mencionados anteriormente se deduce que las tierras agrícolas con la presencia de árboles son importantes sumideros de carbono por la cantidad de carbono que almacenan en sus tejidos (Albrecht & Kandji, 2003), Además los SAF reducen las emisiones por deforestación y degradación de los ecosistemas (Soto et al., 2010).

Otros autores reportan almacenes de carbono en los SAF café de  $59.69 \text{ ton C ha}^{-1}$  en Brasil (Goncalves et al., 2021),  $48.5 \text{ ton C ha}^{-1}$  en un sistema de café con árboles frutales y maderables en el noreste de la Amazonia peruana a una altitud de 1 016 msnm y  $17.4 \text{ ton C ha}^{-1}$  en un sistema de café con la asociación de especies leguminosas (*Inga edulis* e *Inga ruiziana*) en una elevación de 983 msnm (Solis et al., 2020),  $63.1 \text{ ton C ha}^{-1}$  en un SAF café en el suroeste de Etiopía (Betemariyam et al., 2020), en promedio los SAF café en Etiopía capturan  $156.6 \text{ ton C ha}^{-1}$  en asociación de árboles tropicales en un rango de elevación de 1 300

a 2 552 m (Niguse et al., 2022), en un SAF café + árboles + plátano fijan 25.21 ton C ha<sup>-1</sup> en Veracruz a una altitud entre 1 100 y 2 200 msnm (Ruiz et al., 2022), estos valores son diferentes en ambas altitudes del presente estudio. Estas diferencias en el almacenamiento de carbono se deben según Solis et al. (2020) por la diversidad y densidad de árboles presentes en el sistema. El carbono capturado por los SAF café también dependen de las condiciones topográficas, climáticas, la densidad de la plantación, la especie que conforma el sistema, entre otros (De Carvalho et al., 2016). Otra causa que podría afectar son las prácticas de manejo, la edad, y las características del sitio, así mismo cabe mencionar que a veces las ecuaciones alométricas que se utilizan en su estimación no son de la misma zona o en su caso algunas son muy generales. Los SAF café son un papel importante en la captura de carbono, pero no solo en ello, si no también contribuyen con la conservación de la vegetación y el suelo, además se tienen otras fuentes de ingresos, como frutas, leña y madera, dando como resultado beneficios económicos, sociales y ambientales (Schmitt et al., 2012). Los SAF café contribuyen a la mitigación del cambio climático a través de la captura de carbono, siendo estos sistemas una oportunidad para implementar políticas que promuevan el pago de bonos de carbono, debido a que los ecosistemas con presencia de café están mejor protegidos que en ecosistemas sin café.



**Figura 11.** Estimación de carbono y bióxido de carbono en los SAF

#### 4.8 Carbono y bióxido de carbono por estratos verticales

En la presente investigación a una altitud de 1 200 m el SAF café reportó la asociación de café con árboles y plátano, en cambio para la altitud de 1 500 m solo se registró el cultivo café y árboles. Al hacer el análisis de varianza en ambas altitudes se determinó que existen diferencias entre los estratos verticales ( $P < 0.001$ ). La prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) indica que los estratos se clasifican en dos grupos; el primer grupo comprende el SAF y los árboles, el segundo grupo engloba el café y el plátano (Cuadro 10). Los resultados indican que los árboles tienen una similitud con el SAF café en su estimación de carbono, siendo el estrato arbóreo el de mayor acumulación de carbono en comparación con el cultivo café y el plátano. El estrato arbóreo también reduce el estrés del café a través del amortiguamiento de las temperaturas, además pueden llegar a producir hasta 14 toneladas por año de hojarasca, además de los residuos de las podas, que contienen hasta 340 kg de N por hectárea por año (Beer et al., 1997). La sombra de los árboles en un cafetal reduce la temperatura del aire en  $0.4 \pm 0,04$  °C, la temperatura del suelo en  $1,7 \pm 0,3$  °C, y aumenta la humedad del suelo en  $3,9 \pm 0,4$  % con respecto al área sin sombra (Ehrenbergerová et al., 2017). Así mismo se ha comprobado que las plantas de café bajo la cobertura de árboles han producido frutos de mayor calidad que las cultivadas bajo la luz directa del sol (Bote & Struik, 2011). Corral et al. (2006) estudiaron el contenido de carbono en los cafetales en Ecuador, donde afirman que el contenido es mayor cuando están bajo la cobertura de los árboles.

En el presente estudio el plátano fue el estrato que presentó la menor cantidad de almacenamiento de carbón obteniendo un promedio de  $0.28 \text{ ton C ha}^{-1}$  y  $1.02 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ . Al igual que en este estudio Callo et al. (2004) estudiaron la fijación de carbono en un SAF café en Veracruz, señala que, en promedio, los plátanos fijan  $2.6$  a  $3.5 \text{ ton C ha}^{-1}$ , en Indonesia los bananos aportan en promedio entre  $2,26 \text{ kg C}$  a  $0,98 \text{ ton C ha}^{-1}$  (Danarto & Hapsari, 2016). Los plátanos no influyen mucho en la estimación de un SAF, debido a la capacidad de retención en cada uno de sus tejidos, a pesar de ello, los SAF de banano y café almacenan más del 26 % de carbono que un monocultivo (Zake et al., 2015). Los bananos también

son utilizados para proporcionar sombra al café, ya que se establecen rápidamente y son fáciles de manejar (Staver et al., 2013), por otra parte, el plátano es un producto básico en la alimentación para los habitantes de las regiones tropicales y subtropicales (Chaves et al., 2009).

Los SAF café son una alternativa actualmente para el cambio climático, por lo tanto, estos sistemas deben considerarse un incentivo a través de programas sociales, que promueva el pago de carbono en los cafetales, así mismo se estaría conservando el ecosistema, el suelo, la fauna, entre otros, teniendo un beneficio social, económico y ambiental.

**Cuadro 10.** Carbono y bióxido de carbono por estratos en ambas altitudes

Altitud	Estructura vertical	Carbono ton ha <sup>-1</sup>	Co2 ton ha <sup>-1</sup>	Tukey
1 200	SAF	92.74	340.35	a
	Árboles	81.74	299.98	a
1 500	SAF	78.34	287.50	a
	Árboles	73.61	270.14	a
1 200	Café	10.72	39.34	b
1 500	Café	4.74	17.39	b
1 200	Plátano	0.28	1.02	b

## 5. CONCLUSIONES

La concentración de carbono total en la biomasa aérea de café varió de 45.45 a 49.11 % en sus componentes, obteniendo un contenido de carbono promedio de 47.18 %. El contenido de nitrógeno en promedio fue de 1.71 %, en ambas altitudes el porcentaje de nitrógeno foliar presentó un buen rendimiento en el café. El almacenamiento de carbono en café en los dos gradientes altitudinales presentó diferencias significativas, donde el mayor carbono almacenado fue en la altitud de 1 200 m con un promedio de 10.72 ton C ha<sup>-1</sup>, en base ello se enfatiza que la altitud del sitio es una variable influenciada para la captura de carbono en café, además del manejo del cultivo. Para el estrato arbóreo y el SAF café no hubo diferencias significativas en el almacenamiento de carbono y bióxido de carbono respecto a la altitud.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Ajit, Dhyani, S. K., Handa, A. K., Ram, N., Chavan, S. B., Badre, ... Gunasekaran, S. (2016). Estimating carbon sequestration potential of existing agroforestry systems in India. *Agroforestry Systems*, 91, 1101-1118. doi: 10.1007/s10457-016-9986-z
- Albrecht, A., & Kandji, T. S. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99, 15–27. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- Aquino, R. M., Velázquez, M. A., Etchevers, B. J. D., & Castellanos, B. J. F. (2018). Concentración de carbono en tres especies de árboles tropicales de la Sierra sur de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 52, 455-465. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n3/2521-9766-agro-52-03-455.pdf>
- Arellano, M. J. L., & López, M. J. (2009). Resiliencia y vulnerabilidad en las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Revista de agroecología*, 24(4), 22-24. Obtenido de <https://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol24n4.pdf>
- Arias, H. J. J., Riaño, H. N. M., & Aristizábal, L. M. (2014). Dinámica de la acumulación de materia seca en dos especies de sombrío usadas en cafetales de Colombia. *Cenicafé*, 65(1), 7-17. Obtenido de <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/544/1/arc065%2802%297-17.pdf>
- Baggio, A.J., Caramori, P. H., Androcioli, F. A., & Montoya, L. (1997). Productivity of southern Brazilian coffee plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. *Agroforestry Systems*, 37, 111–120. doi.org/10.1023/A:1005814907546
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38, 139–164. doi:10.1023/A:1005956528316



- Betemariyam, M., Negash, M., & Worku, A. (2020). Comparative Analysis of Carbon Stocks in Home Garden and Adjacent Coffee Based Agroforestry Systems in Ethiopia. *Small-scale Forestry*, 19, 319–334. doi.org/10.1007/s11842-020-09439-4.
- Bote, A. D., & Struik, P. C. (2011). Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia. *Journal of Horticulture and Forestry*, 3(11), 336-341. Obtained from <http://www.academicjournals.org/JHF>
- Callo, C. D., Rajagopal, I., & Krishnamurthy, L. (2004). Secuestro de carbono por sistemas agroforestales en Veracruz. *Ciencia UANL*, 7(2): 60-65. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/261401001>
- Casanova, L. F., Petit, A. J., & Solorio, S. J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 133–143. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.047
- Chaves, C. B., Cayón, S. G., & Jones, W. J. (2009). Modelo de rendimiento potencial del cultivo de plátano (*Musa* AAB Simmonds). *Agronomía Colombiana*, 27(3), 359-366. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13279/14168>
- Corral, C. R., Duicela, L. A., & Maza, C. H. (2006). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. 1-15.
- Danarto, S. A., & Hapsari, L. (2016). Biomass and Carbon Stock Estimation Inventory of Indonesian Bananas (*Musa* spp.) and Its Potential Role for Land Rehabilitation. *Biotropia - The Southeast Asian Journal of Tropical Biology*, 22(2), 102–108. doi:10.11598/btb.2015.22.2.376
- Darío, A. J. (2011). Desarrollo de modelos de biomasa aérea en sombríos de cafeto (*coffea arabica* L.) mediante datos simulados. *Revista U.D.C.A*

*Actualidad & Divulgación Científica*, 14(1): 49-56. doi: 10.31910/rudca.v14.n1.2011.756.

De Carvalho, G. L., Cardoso, I. M., De Sá M. E., Fernandes, R. B. A., López, V. S. & Oliveira, T. S. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO<sub>2</sub> efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, 30-39. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.05.001

Dossa, E. L., Fernandes, E. C. M., Reid, W. S., & Ezui, K. (2008). Above- and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agroforest Syst*, 72, 103–115. doi: 10.1007/s10457-007-9075-4

Ehrenbergerová, L., Šenfeldr, M., & Habrová, H. (2017). Impact of tree shading on the microclimate of a coffee plantation a case study from the Peruvian Amazon. *Boiset forests des tropiques*, 334(4), 13-22. doi: 10.19182/bft2017.334.a31488

Ehrenbergerova', L., Cienciala, E., Kucera, A., Guy, L., & Habrova', H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforest Syst*, 90, 433-445. doi: 10.1007/s10457-015-9865-z

Figuroa, N. C., Etchevers, B. J. D., Velázquez, M. A., & Acosta, M. M. (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 57-64. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57323108>

Goncalves, N., Andrade, D., Batista, A., Cullen Jr. L., Souza, A., Gomes, H., & Uezu, A. (2021). Potential economic impact of carbon sequestration in coffee agroforestry systems. *Agroforest Sys*, 95, 419-430. doi: 10.1007/s10457-020-00569-4

Hernández, N. H. E., Andrade, J. H., Suárez, S. J. C., Sánchez, A. J. R., Gutiérrez, S. D. R., Gutiérrez, G. G. A., Trujillo, T. E., & Casanoves, F. (2020). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos

- Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69 (1), 352-368. doi: 10.15517/rbt.v69i1.42959
- Hernández, V. D., Pompa, G. M., Yerena, Y. J. I., & Alanís, R. E. (2017). Within-tree carbon concentration variation in three Mexican pine species. *Bosque*, 38(2), 381-386. doi: 10.4067/S0717-92002017000200015
- Hernández, V. E., Campos, A. G. V., Enríquez, del V. J. R., Rodríguez, O. G., & Velasco, V. V. A. (2012). Captura de carbono por *Inga jinicuil* schltld. en un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11-21. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n9/v3n9a2.pdf>
- Hidalgo, C. P. (2011). Determinación de las reservas totales de carbono en un sistema agroforestal de la Selva Alta de Tingo María. *Revista Aporte Santiaguino*, 4(1), 87–92. doi: 10.32911/as.2011.v4.n1.532
- IPCC (2007) Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds). Cambridge University Press. United Kingdom and New York. 996 p.
- Jiménez, P. J., Treviño, G. E. J., & Yerena, Y. J. I. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 51-61. doi: 10.29298/rmcf.v4i17.420.
- Jurado, R. M. A., Ordoñez, J. H. R., & Lagos, B. T. C. (2020). Evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consaca, Nariño, Colombia. *Luna Azul*, 51, 166–181. doi: 10.17151/luaz.2020.51.9
- Jurado, R. M. A., Ordoñez, J. H. R., Ballesteros, P. W., & Delgado, V. I. A. (2019). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.) Consacá, Nariño – Colombia. Artículo de Discusión. Facultad

de Ciencias Agrícolas, Pasto, Nariño. 16 p. Obtenido de <https://sired.udenar.edu.co/5909/>

Kim, D. G., Thomas, A. D., Pelster, D., Rosenstock, T. S. & Sanz, C. A. (2016). Greenhouse gas emissions from natural ecosystems and agricultural lands in sub-Saharan Africa: synthesis of available data and suggestions for further research. *Biogeosciences*, 13, 4789-4809. doi: 10.5194/bg-13-4789-2016

Marroquín, M. P., Méndez, G. J., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., & Yerena, Y. J. I. (2018). Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 094-110. doi: 10.29298/rmcf.v9i47.172

Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E.,...Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66–93. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5271975>

Medina, B. C., Calero, G. C., Hurtado, H. & Vivas, S. E. (2009). Cuantificación de carbono en la biomasa aérea de café (*Coffea arabica* L.) con sombra, en la comarca palo de sombrero, Jinotega, Nicaragua. *La Calera*, 9(12), 28-34. doi: 10.5377/calera.v9i12.4

Moreno, C. A. I., Montañez, P., Moctezuma, S., & Sosa, V. (2021). Los sistemas agroforestales de México-avances, experiencias, acciones y temas emergentes. In Salgado, M. M. G., Ruiz, B. C., Moreno, M. J. L., & González, Á. J. (Eds.), *Servicios ambientales en sistemas de café bajo sombra. El caso del carbono en biomasa aérea en la Sierra Madre de Chiapas*. (1a. ed., pp. 485-499). Ciudad de México

Nair, P. K. (2011). Agroforestry systems and environmental quality: introduction. *Journal of Environmental Quality*, 40(3), 784-790. doi: 10.2134/jeq2011.0076

- Niguse, G., Iticha, B., Kebede, G., & Chimdi, A. (2022). Contribution of coffee plants to carbon sequestration in agroforestry systems of Southwestern Ethiopia. *The Journal of Agricultural Science*, 160, 440–447. doi:10.1017/S0021859622000624
- Pacheco, E. F. C., Aldrete, A., Gómez, G. A., Fierros, G. A. M., Cetina, A. V. M., & Vaquera, H. H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus gregii* engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 251-254
- Pandey, D. N. (2002). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*, 2, 367-377.
- Paz, P. F., Velázquez, R. A., & Rojo, M. M. (2018). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. In Salas, M. V., Paz, P. F., Rojas, G. F., & Bolaños, G. M. A. (Eds.), *Almacenes de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros de la Sierra Madre de Chiapas*. (pp, 671-677). Estado de México, México.
- Pérez, D. A., Castañeda, H. E., Lozano, T. S., Bustamante, G. C. A., Rivera, E. R. A., Rodríguez, O. G.,...Fernández, T. A. (2014). Foliar Analysis as an Estimate on the Nutritional State of Conilon Coffee Plantations on Cambisoils. *Journal of Life Sciences*, 8(2), 181-187. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/270883682\\_Foliar\\_Analysis\\_as\\_an\\_Estimate\\_on\\_the\\_Nutritional\\_State\\_of\\_Conilon\\_Coffee\\_Plantations\\_on\\_Cambisoils/references](https://www.researchgate.net/publication/270883682_Foliar_Analysis_as_an_Estimate_on_the_Nutritional_State_of_Conilon_Coffee_Plantations_on_Cambisoils/references)
- R Core Team. (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ruiz, G. P., Monterroso, R. A. I., Valdés, V. E., Escamilla, P. E., & Gómez, D. J. D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3), 1–23. doi: 10.15517/am.v33i3.48671

- Sáenz, R. J. T., Rueda, S. A., Benavides, S. J. de D., Muñoz, F. H. J., Castillo, Q. D., & Sáenz, C. J. E. (2021). Ecuaciones alométricas, biomasa y carbono en plantaciones forestales tropicales en la costa de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65), 26-44. doi: 10.29298/rmcf.v12i65.856
- Schmitt, H. M., Evans, T.P., Castellanos, E., & Randolph, J.C. (2012) Carbon stocks in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. *Agroforstyst*, 86,141–157. doi: 10.1007/s10457-012-9549-x
- Schoeneberger, M. M. (2009). Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforest Syst*, 75, 27-37 (2009). doi: 10.1007/s10457-008-9123-8
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2015). Comercio del exterior del café mexicano. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/comercio-exterior-del-cafe-mexicano>
- Solis, R, Vallejos, T. G., Arévalo. L., Marín, D. J., Ñique, A. M., Engedal, T., & Bruun, T. B. (2020). Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science*, 158, 450-460. doi: 10.1017/S002185962000074X
- Soto, P. L., Anzueto, M., Mendoza, J., Jiménez, F. G., & Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest Syst*, 78(1), 39-51. doi:10.1007/s10457-009-9247-5
- Staver, C., Bustamante, O., Siles, P., Aguilar, C., Quinde, K., Castellón, J.,...Matute, N., (2013). Intercropping bananas with coffee and trees: prototyping agroecological intensification by farmers and scientists. *Acta Horticulturae*. 986, 79-85. doi: 10.17660/ActaHortic.2013.986.6
- Terán, R. M. A., Rodríguez, O. G., Enríquez, del D. V J. R., & Velasco, V. V. A. (2018). Biomasa aérea y ecuaciones alométricas en un cafetal en la Sierra

- Norte de Oaxaca. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 217-226. doi: 10.19136/era.a5n14.1444
- Tumwebaze, S. B. & Byakagaba, P. (2016). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216, 188-193. doi: 10.1016/j.agee.2015.09.037
- Valdés, V. E., Vázquez, D. L. P., Tinoco, R. J. A., Sánchez, H. R., Salcedo, P. E., & Lagunes, F. E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 28, 287-297. doi: 10.29312/remexca.v13i28.3283
- Van, N. M., Rahayu, S., Hairiah, K., Wulan, Y. C., Farida., & Verbist, B. (2002). Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Journal of Science in China*, 45, 1-12. Obtained from <https://www.researchgate.net/publication/241781492>
- Yerena, Y. J. I., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., & Treviño, G. E. J. (2012a). Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 145-152. doi: 10.4067/S0717-92002012000200004
- Yerena, Y. J. I.; Jiménez, P. J.; Aguirre, C. O. A.; Treviño, G. E. J. y Alanís, R. E. (2012b). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 50-56. doi: 10.29298/rmcf.v3i13.488
- Zake, J., Pietsch, S. A., Friedel, J. K., & Zechmeister, B. S. (2015). Can agroforestry improve soil fertility and carbon storage in smallholder banana farming systems?. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178, 237-249. doi: 10.1002/jpln.201400281

Zaro, G. C., Caramori, P. H., Yada, J. G. M., Sanquetta, C. R., Androcioli, F. A. Nunes, A. L. P.,...Voroney P. (2019). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforest Syst*, 94, 799-809. doi: 10.1007/s10457-019-00450-z

Zavala, S. J. W., Zavala, G. S. L., & Mansilla, M. L. G. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Investigación y Amazonia Tingo María, Perú*, 8(5), 1-8. Obtenido de <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200/183>