



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE
CARBONO AÉREO EN AGROBOSQUES
DE PIÑA DEL OCCIDENTE DE MÉXICO

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

KAREN MONSERRAT PANTOJA PINEDA

DIRECTOR(A) DE TESINA: DR. JESÚS JUAN ROSALES ADAME
CO- ASESOR: DR. MIGUEL A. SALINAS MELGOZA

MORELIA, MICHOACÁN

Agosto, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE
CARBONO AÉREO EN AGROBOSQUES
DE PIÑA DEL OCCIDENTE DE MÉXICO

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

KAREN MONSERRAT PANTOJA PINEDA

DIRECTOR(A) DE TESINA: DR. JESÚS JUAN ROSALES ADAME
CO-ASESOR: DR. MIGUEL A. SALINAS MELGOZA

MORELIA, MICHOACÁN

Agosto, 2023



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
1961-2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 04 del Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **29 de mayo de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Karen Monserrat Pantoja Pineda** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **418126596**, con el trabajo titulado: **"ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO AÉREO EN AGROBOSQUES DE PIÑA DEL OCCIDENTE DE MÉXICO"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Jesús Juan Rosales Adame** y como co.tutor el **Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Carlos Alberto García Bustamante
Vocal:	Mtra. Alexis Daniela Rivero Romero
Secretario:	Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza
Suplente:	M. C. René David Martínez Bravo
Suplente:	M. C. Alejandra Patricia Lamazábal De la Vía

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 11 de agosto de 2023.

DRA. YUNUENITARA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (50)5623.7300. Extensión Red UNAM: 80614
www.enes.unam.mx

Reconocimientos Institucionales

Gracias al apoyo y los conocimientos que me brido la carrera de Ciencias Ambientales en la Escuela Nacional de estudios Superiores, Unidad Morelia de la Universidad Nacional de México, y el apoyo económico de parte de esta misma con una beca de Titulación para alumnos de alto rendimiento.

Esta investigación no hubiera sido posible sin el apoyo, guía y consejos de mi asesor Jesús Juan Rosales Adame y mi co-asesor Miguel Ángel Salinas Melgoza así como las observaciones del jurado revisor de esta investigación:

Dr. Carlos Alberto García Bustamante.

Mtra. Alexis Daniela Rivero Romero.

Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza.

M.C. René David Martínez Bravo.

M.C. Alejandra Patricia Larrazábal De la Via.

Índice

Resumen	3
Introducción	7
Pregunta de Investigación	9
Objetivos	9
Antecedentes	10
Metodología	18
Resultados y discusión	25
Conclusiones	35
Bibliografía	37

Resumen

Una de las múltiples causas de la deforestación es el reemplazo de áreas boscosas por sistemas de agricultura convencional, este cambio afecta significativamente los almacenes de carbono en los sistemas forestales originales. Los agrobosques son un tipo de sistema agroforestal (SAF) bajo sombra que además de proveer alimentos, medicinas, medios de vida y materias primas a los propietarios, reducen en diferentes medidas las emisiones de efecto invernadero mediante la captura de carbono. Este trabajo tiene como objetivo estimar la cantidad de carbono almacenado en el componente arbóreo aéreo de los agrobosques de piña en los estados de Nayarit y Jalisco en México. A partir de mediciones dasométricas de un grupo de especies, tomadas del trabajo de investigación de Jesús Juan Rosales Adame (2014), se seleccionaron las 21 especies con mayor índice de valor de importancia ecológica del área de estudio y se realizaron estimaciones de biomasa área mediante ecuaciones alométricas. Las estimaciones del carbono aéreo contenido en el componente arbóreo se obtuvieron considerando el 50% de la biomasa. Como resultado, la estimación promedio de carbono almacenado para el estado de Nayarit fue de 61.50 Mg C/ha⁻¹, mientras que en Jalisco a pesar de tener un solo sitio de muestreo se estimó en 201.85 Mg C/ha⁻¹. Entre las especies que más contribuyeron a la biomasa área son: *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., *Inga laurina* (Sw.) Willd y *Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn, con un promedio de 2967.84 kg C/ha⁻¹, 336.97 kg C/ha⁻¹, 353.8 kg C/ha⁻¹ y 366.02 kg C/ha⁻¹ respectivamente. Los sistemas agroforestales de piña no sólo funcionan como grandes reservorios de C, siendo comparado con lo reportado en diferentes SAF de la región, con los que comparten similitud

estructural, además, los agrobosques de piña presentan un valor elevado para los pobladores locales debido a diferentes aspectos culturales y de manejo.

Palabras clave: sistemas agroforestales, ecuaciones alométricas, almacenes de carbono, deforestación.

Abstract

One of many causes of deforestation is the replacement of wooded areas with conventional agriculture systems; this change significantly affects the carbon stocks in the original forest systems. Agroforests are a type of shade-grown agroforestry system (SAF) that in addition to providing food, medicine, livelihoods, and raw materials to its owners, reduce greenhouse gas emissions to different extents through carbon capture.

The present work aims to estimate the amount of carbon stored in the aerial tree component of pineapple agroforests in the states of Nayarit and Jalisco in Mexico.

From dasometric measurements of a group of species, taken from the research work of Jesús Juan Rosales Adame (2014), the 21 species with the highest value index of ecological importance in the study area were selected and area biomass estimates were made using allometric equations. Aerial carbon estimates contained in arboreal components were obtained considering 50% of the biomass. As a result, the average estimate of carbon stored for the state of Nayarit was 61.50 Mg C/ha⁻¹, while in Jalisco, despite having only one sampling site, it was estimated at 201.85 Mg C/ha⁻¹. Among the species that contributed the most to the biomass area are: *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., *Inga laurina* (Sw.) Willd and *Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn, with an average of 2967.84 kg C/ha⁻¹, 336.97

kg C/ha⁻¹, 353.8 kg C/ha⁻¹ and 366.02 kg C/ha⁻¹ respectively. Pineapple agroforestry systems not only function as large carbon pools, but also, being compared to what has been reported in different SAFs in the region, with which they share structural similarity, in addition, pineapple agroforests have a high value for local residents due to different cultural and management aspects.

Keywords: agroforestry systems, allometric equations, carbon pools, deforestation.

INTRODUCCIÓN

Con la creciente preocupación por los problemas asociados al cambio climático y el aumento de las emisiones de los Gases Efecto de Invernadero (GEI), en particular el dióxido de carbono atmosférico procedente de diferentes actividades humanas como la agricultura, la captura de carbono en los ecosistemas es uno de los beneficios ambientales más importantes (Hernández- Guzmán, 2019).

El Carbono (C), se puede encontrar de forma natural en la atmósfera combinado con otros elementos en forma de gases tales como el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO) y el metano (CH_4) los cuales son el resultado de la descomposición y quema de la materia orgánica, las erupciones volcánicas o la emisión de los organismos vivos a través de la digestión o fermentación entérica (Benaouda *et al.*, 2017). En el caso del CO_2 , este es reincorporado a los sistemas naturales a través del océano siendo asimilado a través del plancton, los corales y los peces. En tierra, el CO_2 es asimilado mediante la respiración (fotosíntesis) de las plantas, manteniéndose almacenado el C, en los depósitos naturales, como la biomasa de las plantas o en sedimentos, y liberando el oxígeno nuevamente a la atmósfera (Espinoza *et al.*, 2011).

Sin embargo, algunas actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso del suelo con fines agrícolas (deforestación) y la mala distribución del sistema alimentario ha llevado a que la cantidad emitida de CO_2 atmosférico sea mucho mayor a la capturada (FAO, 2009). El incremento de los GEI en la atmósfera produce que el balance energético del sistema sol-tierra se pierda, llevando a un aumento en la temperatura media global, y afectando fuertemente, entre varias cosas, a los patrones de precipitación actuales, fenómenos atribuidos al cambio climático (Sotelo *et al.*, 2008).

Debido a que las plantas almacenan C en su biomasa, cuanto mayor sea el tamaño de la planta mayor será la cantidad de C capturado (Bojórquez, 2014). La estimación adecuada de la materia orgánica en la biomasa forestal permite determinar la cantidad de carbono y otros elementos existentes en las hojas, ramas, fuste y raíces de la vegetación leñosa (Sotelo *et al.*, 2008).

Los sistemas agroforestales (SAF) al ser sistemas agrícolas basados en plantas leñosas tienen un mayor potencial de captura de carbono en comparación a los sistemas agrícolas convencionales (sobre todo de monocultivo), los cuales carecen en su mayoría de individuos leñosos. Dentro del marco de las ciencias ambientales, los sistemas agroforestales además de contribuir a la mitigación del cambio climático tienen una gran importancia cultural y social. Dentro de los SAF existen interrelaciones entre la cultura, el ambiente y el aprovechamiento de la naturaleza, en especial aquellos sistemas que manejan elementos silvícolas, agrícolas y/o animales en donde se generan y mantienen interacciones ecológicas, económicas y sociales en beneficio del productor y del propio sistema agroecológico, manteniendo un equilibrio entre el aprovechamiento y la conservación del sistema (Nair, 1997; Rosales-Adame *et al.*, 2014).

Como lo menciona Atangana *et al.* (2004), las tasas de captura de C son muy variables entre los sistemas agroforestales en los trópicos, en áreas húmedas, los sistemas agroforestales pueden capturar hasta 50 Mg C ha⁻¹/año, y la agrosilvicultura de pequeños agricultores en los trópicos puede capturar entre 1.5 y 3.5 Mg C ha⁻¹ anualmente. Los sistemas agroforestales almacenan en biomasa aérea y raíces aproximadamente 9 Mg C ha⁻¹ en regiones semiáridas, 21 Mg C ha⁻¹ en regiones subhúmedas, 50 Mg C ha⁻¹ en regiones húmedas y 63 Mg C ha en regiones templadas (Schroeder, 1994).

A pesar de la importancia de los estudios de estimación de captura y los almacenes de C, en México estos son escasos, especialmente en espacios de manejo agroforestal (Espinoza *et al.*, 2011). Así mismo, existen pocos estudios de captura y almacenes de C en torno a sistemas agroforestales del occidente del país (Jalisco, Nayarit, Colima) en comparación con la región Sureste y los sistemas agroforestales de cacao, café y caucho (Rosales-Adame *et al.* 2016).

De acuerdo con Rosales-Adame *et al.* (2008), en las regiones de Sierra de Amula y Costa Sur del estado de Jalisco se han registrado más de 30 diferentes tipos de sistemas agroforestales. El cultivo de piña bajo sombra o agrobosque de piña, es un sistema agroforestal que se encuentra principalmente en el sur del estado de Jalisco y norte del estado de Nayarit, y se ha realizado desde hace varios siglos (Rosales-Adame, 2015). Igualmente, los estudios existentes sobre la piña bajo sombra son escasos (Rosales-Adame *et al.*, 2014). El presente estudio busca proveer información básica sobre los almacenes de carbono de los agrobosques de piña. El objetivo de este trabajo es estimar el almacén de carbono aéreo en el componente leñoso de especies con alto índice de valor de importancia ecológica en agrobosques de piña de los estados de Jalisco y Nayarit, mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuánto es el almacén de carbono aéreo del componente leñoso de los agrobosques de piña en los estados de Nayarit y Jalisco en México?

OBJETIVO

Estimar la cantidad de carbono aéreo almacenado en los agrobosques de piña en Jalisco y Nayarit, México.

ANTECEDENTES

Cambio climático y deforestación

El cambio climático se expresa el cambio en los patrones de temperatura y precipitación de la tierra (Castro *et al.*, 2019). El calentamiento global es la manifestación más evidente del cambio climático, el cual se refiere al incremento de las temperaturas marinas y terrestres promedio a nivel global, principalmente atribuido al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, que son derivados principalmente de actividades humanas (Oelbermann *et al.*, 2004). Estos gases son el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), ozono (O₃) y vapor de agua, entre otros.

Los GEI son generados desde hace miles de millones de años por procesos naturales del planeta, permitiendo las temperaturas ideales para el desarrollo de la vida (Schneider, 1989). El incremento desmesurado de estos gases en la atmósfera produce que el balance energético del sistema tierra se pierda, llevando a un aumento en la temperatura media global y afectando fuertemente los patrones de precipitación y temperatura actuales (Sotelo *et al.*, 2008).

Actividades biológicas como la respiración de las plantas y animales, y la descomposición microbiana de la materia orgánica contribuyen a la producción natural de los GEI (IPCC, 2001). Sin embargo, la mayor producción de GEI en la actualidad se origina de actividades humanas; por ejemplo, el uso de los combustibles fósiles como el petróleo, gas natural o carbón, el cambio de uso de suelo forestal y un manejo inadecuado de los residuos generados por la población humana como descargas en mares, nula separación, tratamiento y aprovechamiento de los mismos (Castro *et al.*, 2019).

Por otro lado, la función de los bosques en la captura de carbono es cada vez más importante. Gracias a los bosques, el CO₂ es asimilado por medio de la respiración (fotosíntesis) de las plantas, almacenando el C en los depósitos naturales como la biomasa de las plantas, el suelo y mantillo y liberando el oxígeno nuevamente a la atmósfera (Espinoza *et al.*, 2011). Además, los bosques son uno de los sistemas bióticos que albergan una alta biodiversidad terrestre del planeta. Por consiguiente, la conservación de la biodiversidad del mundo depende en gran medida de la forma en que interactuamos y manejamos los bosques del mundo (Atangana *et al.*, 2004).

La principal causa mundial de deforestación y fragmentación de sistemas forestales es la expansión agrícola (FAO, 2016). El cambio de uso del suelo por esta causa representa alrededor de una tercera parte de las emisiones de GEI a nivel mundial. Específicamente, se estima que del cambio de uso del suelo se derivan el 25% de las emisiones de carbono, el 50% de las emisiones de metano (CH₄) y más del 70% de las emisiones de óxido nitroso (N₂O) mundiales (FAO, 2009).

Según el informe de “El estado de los bosques del mundo” menciona:

Las prácticas agropecuarias a gran escala (principalmente la cría de ganado vacuno y los cultivos de soya y palma para aceite en México) fueron las causantes del 40% de la deforestación de bosques tropicales entre los años 2000 y 2010; mientras que la agricultura local de subsistencia (consumo propio, sin comercialización a gran escala) fue de otro 33%. (FAO, 2016, p.10)

En México, la CONAFOR (2020) menciona que, tan solo en el año 2016, uno de los procesos de cambio con mayor proporción de deforestación bruta nacional fue aquel que sucedió de tierras forestales a tierras agrícolas, con una magnitud de hasta 108,188 hectáreas.

Almacenes de carbono y modelos alométricos

Durante el proceso de la fotosíntesis las plantas capturan CO₂ del ambiente y liberan oxígeno (O₂). Los árboles a diferencia de las especies anuales utilizan este proceso para almacenar los componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que a los sistemas forestales o sistemas basados en especies leñosas (*como los sistemas agroforestales*) se les consideran sumideros de carbono (Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

Los sistemas ecológicos terrestres desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono (C) debido a que retienen este elemento en diferentes almacenes; en el suelo, en la madera viva de los árboles y otras leñosas, en las raíces y en la materia orgánica muerta en el suelo del bosque (Castro *et al.*, 2019). El carbono es intercambiado de manera natural entre estos sistemas y la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión (Sotelo *et al.*, 2008). Por lo tanto, varios almacenes de carbono pueden ser identificados dentro de un mismo sistema forestal.

La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa varía en funciones como la composición florística, la edad, la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal, entre otros (Bojórquez, 2014). La biomasa forestal se define como el peso o estimación equivalente de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo (Ramos-Hernández y Martínez-Sánchez, 2020). La biomasa de los componentes del árbol ubicados por encima del suelo se denomina biomasa aérea y los asociados a la rizosfera del árbol se denominan biomasa subterránea (Segura y Andrade, 2008). La biomasa aérea es un indicador de la productividad, que permite conocer su estado de desarrollo y el potencial de rendimiento en volumen de madera (Tovar- Blanco *et al.*, 2020).

Contar con estimaciones precisas de la biomasa aérea en sistemas forestales permite conocer la magnitud de almacenes de C y evaluar el papel de los sistemas en la captura de carbono atmosférico (Bojórquez *et al.*, 2020). Para cuantificar la biomasa aérea de la vegetación se han desarrollado distintos métodos de estimación. Como menciona Bojórquez (2014), “El método más preciso es el método de cosecha directa, que consiste en determinar la biomasa seca por árbol de todos los árboles del sitio. Sin embargo, es un método poco práctico, costoso, lento y destructivo” (p 23). Varios estudios aplican distintos métodos indirectos, muchos de ellos con pequeñas variaciones. Estos métodos permiten cuantificar la biomasa aérea de manera indirecta, de una forma más práctica, rápida, con menor costo económico y sin destruir a los individuos arbóreos (Chave *et al.* 2014). En los métodos indirectos se selecciona cierto número de individuos arbóreos de las especies de interés en un área determinada en el sitio y se miden distintas variables dasométricas como son el diámetro de tallos y altura total, principalmente. Posteriormente, los individuos arbóreos se cortan, se secan y se pesan en seco (Tovar- Blanco *et al.*, 2020). A partir de estas variables se generan modelos alométricos o ecuaciones matemáticas que permiten a partir de una muestra de individuos estimar la biomasa total de un sitio (Bojórquez, 2014). Las ecuaciones alométricas son aplicaciones matemáticas que permiten realizar el análisis de las relaciones entre diferentes dimensiones de la planta, son útiles en los estudios de crecimiento y estimación de biomasa (Segura & Andrade, 2008)

Para la determinación de la biomasa de una especie forestal de la cual no se conoce información previa, se requiere de muestreos básicos a nivel de individuos arbóreos, rodal (parcelas) y cosecha de la materia orgánica para los componentes funcionales del árbol (Segura y Andrade, 2008). Para la estimación de biomasa aérea en este proyecto, se tomaron medidas dasométricas de la investigación de Rosales-Adame (2015), y ecuaciones alométricas de

diferentes estudios y bases de datos del país: Rojas García *et al.* (2015). CONAFOR (2022) y Réjou-Méchain, M. *et al.* (2017).

Sistemas agroforestales como almacenes de carbono y cultivos de piña

La agrosilvicultura es el manejo de un sistema en los que componentes leñosos (entre ellos el arbóreo) y componentes agrícolas son manejados deliberadamente de manera simultánea (Moreno Calles *et al.*, 2016). Estos sistemas son una alternativa viable a la gestión convencional de la naturaleza en prácticamente cualquier ecosistema forestal (Atangana *et al.*, 2004). Los sistemas agrosilvícolas tienen como objetivo mejorar los medios de vida de la gente y los ecosistemas (FAO, 2020). Estos sistemas productivos han sido fácilmente adoptados por los propietarios, y se caracterizan no sólo por su simplicidad y robustez, sino que además su sostenibilidad permite a los productores incrementar su productividad agrícola (Atangana *et al.*, 2004). También se ha documentado que estos sistemas conservan altos niveles de agrobiodiversidad, incluyendo diversidad nativa. En algunos casos por lo menos 8-9 de cada 10 especies de leñosas de estos sistemas agroforestales son especies nativas de los bosques aledaños a estos sistemas manejados por las y los campesinos (Rosales-Adame *et al.*, 2014).

La FAO (2020) menciona que la capacidad de resistencia y adaptabilidad al cambio del sistema alimentario depende estrictamente de la biodiversidad:

Especialmente de las especies arbustivas y arbóreas adaptadas a las tierras secas que ayudan a combatir la desertificación; las especies de insectos, murciélagos y aves que habitan en los bosques y polinizan los cultivos; los árboles con sistemas radiculares extensos que se encuentran en ecosistemas montañosos y que evitan la erosión del suelo y

las especies de manglares que favorecen la resiliencia ante la inundación en zonas costeras. (p.17)

Dentro de estos sistemas, los agrobosques son un sistema donde el bosque original ha sido modificado para satisfacer las necesidades y demandas locales, mezclando diferentes especies leñosas (arbóreas) de diversos grados de domesticación, que permiten no sólo preservar características estructurales y procesos ecológicos semejantes a la vegetación original, sino que además presentan un alto potencial para la conservación de la biodiversidad (Moreno Calles *et al.*, 2016; Fisher *et al.*, 2020). A partir de su manejo diversificado, los agrobosques proveen diversos servicios ecosistémicos (provisión, regulación y culturales) como: provisión de recursos alimenticios, medicinales, materias primas para la elaboración de artesanías, materiales de construcción, combustibles, proporcionan un lugar para vivir (Moreno Calles *et al.*, 2016). Además, estos sistemas reducen la erosión del suelo, aumentar la captura y almacenamiento del agua, y capturar y almacenar el carbono atmosférico (Fisher *et al.*, 2020). Ejemplo de esto son los agrobosques de piña, de café, cacao, de aceite de palma, etc.

Los almacenes de carbono en sistemas agroforestales son muy variados. De acuerdo con Schroeder (1994), Los sistemas agroforestales almacenan en biomasa aérea y raíces aproximadamente 9 Mg C ha⁻¹ en regiones semiáridas, 21 Mg C ha⁻¹ en regiones subhúmedas, 50 Mg C ha⁻¹ en regiones húmedas y 63 Mg C ha⁻¹ en regiones templadas, y el carbono en todos los almacenes se estima entre 12 y 228 Mg C ha⁻¹. Una de las investigaciones en México sobre almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales proviene de la región de Huatusco, zona de mayor producción de café (*Coffea arabica* L.) en el estado de Veracruz, México. En este estudio, a partir de los sistemas evaluados se concluyó que, en promedio, estos SAF almacenan 102 Mg C ha⁻¹ (Espinoza Domínguez *et al.*, 2011). Otro estudio realizado por Davalos Sotelo *et*

al. (2008) estimaron el carbono aéreo almacenado en la vegetación leñosa en varias fincas de café en el centro del estado de Veracruz y obtuvieron que en promedio de carbono aéreo en bosques hay 28 Mg C ha⁻¹, en sistemas rústicos 42 Mg C ha⁻¹, en policultivos 16 Mg C ha⁻¹ y en monocultivos 4.5 Mg C ha⁻¹. En este estudio, el sistema rústico y policultivo es lo más cercano a un manejo tipo SAF. Adicionalmente, en la costa de Jalisco, Sáenz-Reyes *et al.* (2020), en un estudio no orientado a SAF, encontraron que las plantaciones forestales con las especies *Tectona grandis*, *Gmelina arborea* y *Enterolobium cyclocarpum* mostraron el contenido de biomasa más alto (161 kg ha⁻¹, 134 kg ha⁻¹ y 130 kg ha⁻¹), con almacenes de carbono que podrían llegar a 144.6 Mg C ha⁻¹, 120.8 Mg C ha⁻¹ y 117.5 Mg C ha⁻¹, en comparación con otras 15 especies de árboles de la región. Esto sugiere que aquellas plantaciones forestales o sistemas agroforestales que tengan estas especies pueden capturar importantes cantidades de carbono y contribuir a la mitigación de los efectos negativos del calentamiento global a largo plazo.

El cultivo de piña [*Ananas comosus* (L.) Merr.] es realizado comúnmente en sistemas convencionales “bajo sol”, donde la productividad de frutos de piña es elevada (más de 20 toneladas por ha) (Huchin-Chan *et al.*, 2016). Este sistema se caracteriza no sólo por la ausencia de individuos arbóreos dentro de las parcelas, lo que conlleva a niveles nulos de carbono aéreo de individuos leñosos; sino que también las plantas productoras de piña son reemplazadas cada uno o dos años debido a la disminución de la productividad forzando la incorporación de grandes cantidades de insumos agrícolas (Rosales-Adame, 2015). Por otro lado, el cultivo de piña bajo sombra (agrobosque) es uno de los 30 sistemas agroforestales en el estado de Jalisco, encontrándose principalmente en el sur del estado de Jalisco y norte del estado de Nayarit. Estos agrobosques cuentan con una gran tradición de uso y manejo deliberado de componentes vegetales nativos e introducidos (principalmente frutales). En estos sistemas, la producción de

piña se desarrolla en el sotobosque bajo un modelo extensivo de producción, una baja utilización de insumos y empleo de tecnología y conocimiento local.

La producción de piña en este sistema es menor que en el sistema bajo sol. La producción de piña por hectárea en este sistema se ha estimado que oscila entre 5 y 6 toneladas. Las plantas productoras de piña del agrobosque tienen una vida prolongada debido a la cobertura del dosel que las protege del sol directo (Rosales-Adame, 2015). Además, a medida que se desarrolla el cultivo, las plantas despliegan su reproducción clonal (establecimiento de hijuelos), con lo cual se pierde el diseño inicial, pero esta forma de reproducción permite que los cultivos se prolonguen indefinidamente, sin la necesidad de realizar plantaciones continuas (anuales o bianuales), como sucede con el sistema convencional (Rosales-Adame, 2015). Oficialmente el cultivo de piña en México se estableció en la segunda década del siglo XX en la cuenca del Papaloapan, bajo un aprovechamiento industrializado. Sin embargo, bajo un manejo agroforestal se desarrolla y conserva casi en el anonimato desde hace más de dos siglos por los campesinos de regiones marginadas en los estados de Jalisco y Nayarit (Rosales-Adame *et al.*, 2016). Los sistemas agroforestales de piña proporcionan condiciones de heterogeneidad ambiental y diversidad estructural que permite tener cultivos en el sotobosque y mantener las interacciones ecológicas del sistema forestal, siendo compatible y complementario con el mantenimiento de diversos recursos ecológicos (Rosales-Adame *et al.*, 2014). Las Parcelas de agrobosque de piña en Jalisco y Nayarit presentan individuos leñosos de clases diamétricas grandes, resultado del uso y manejo que se ha realizado del bosque originario (Rosales-Adame *et al.*, 2016).

Jalisco ocupa el quinto lugar con mayor biodiversidad en el país (SEMADES 2002). Sin embargo, los estudios existentes sobre la piña bajo sombra son escasos (Rosales-Adame *et al.*, 2014). Los esfuerzos por conocer el almacenamiento de carbono de los agrobosques en México

se encuentran principalmente en el sur del país. En el caso del agroecosistema de piña bajo sombra esta información es desconocida, contrario a lo que ha ocurrido con sistemas agroecológicos de café bajo sombra, con el cual presenta similitud estructural.

Es importante la realización de este esfuerzo por estimar los almacenes de carbono aéreo en los agrobosques de piña de dichos Estados; debido al escaso conocimiento de estos sistemas agroforestales y de la nula existencia de investigaciones de almacenes de carbono en agrobosques en la zona occidente del país (Rosales-Adame *et al.*, 2016).

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Área de estudio

Para realizar este trabajo se tomaron en cuenta las áreas de muestreo, los datos recolectados y el índice de valor de importancia de especies del agrobosque de piña obtenido por Rosales-Adame *et al.* (2014) en el estudio “Estructura y Diversidad Arbórea en el Sistema Agroforestal de Piña Bajo Sombra en el Occidente de México”. El trabajo de Rosales-Adame *et al.* (2014) se desarrolló en los estados de Jalisco y Nayarit. La topografía del área de estudio es muy variada, en los sitios de Nayarit es irregular y con pendientes pronunciadas, mientras que en Jalisco son más suaves y menos irregulares (Rosales-Adame *et al.*, 2014). La altitud de los sitios oscila entre los 67 y 610 msnm; el periodo de lluvias ocurre entre junio y octubre, y es del orden de 1500 a 1970 mm anuales; la temperatura promedio anual varía de 24 a 27 °C (González-Acuña *et al.*, 2002). La vegetación predominante es bosque tropical subcaducifolio y algunas pequeñas áreas de Bosque de *Quercus* caducifolio (Rosales-Adame *et al.*, 2014).

Los sitios de estudio de Jalisco se encuentran en el municipio de Villa Purificación, en el sitio de La Rinconada. En Nayarit los sitios están en la zona norte, en los municipios de Ruiz y

Santiago Ixcuintla, en los ejidos y comunidades indígenas de El Venado, Puerta de Platanares, Cordón del Jilguero, El Zopilote y Acatán de las Piñas-El Cantón (Figura 1).

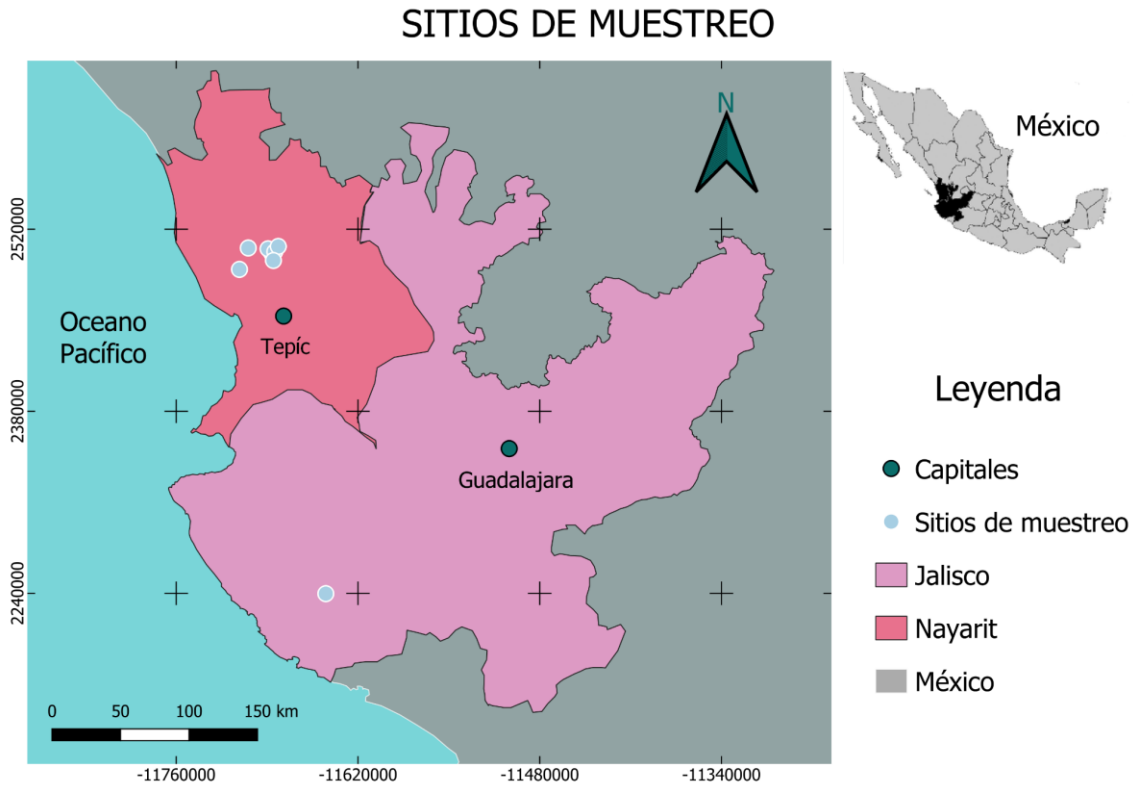


Figura 1. Mapa del área de estudio de los agrobosques de piña en el occidente de México (sistema coordenadas UTM). *Elaboración propia.*

Métodos

Rosales-Adame *et al.* (2014) establecieron un total 30 parcelas rectangulares temporales de 50×20 m (1,000 m²) ubicadas a favor de la pendiente en los sitios de La Rinconada, El Venado, Puerta de Platanares, Cordón del Jilguero, El Zopilote y Acatán de las Piñas-El Cantón. En el estado de Jalisco se muestrearon 5 parcelas, mientras que en el estado de Nayarit 25 parcelas, cubriendo una superficie total de tres hectáreas, 0.5 ha por sitio. Cada parcela se subdividió en 10 subparcelas de 10×10 m (100 m²), en las cuales se registraron todos los

individuos leñoso con diámetro a 1.3 m de altura ≥ 10 cm. El diámetro de los individuos registrado a 1.3 m de altura, su identidad específica, así como su altura total fueron registrados.

A partir de las 69 especies de plantas vasculares leñosas que se muestrearon en Rosales-Adame *et al.* (2014), se priorizaron las especies a trabajar de acuerdo a los valores en negritas, representando los valores más altos (arriba de 14) del índice de valor de importancia ecológica (IVI), el cual se estimó a partir de la densidad, dominancia y frecuencia relativas, cómo se menciona en Rosales-Adame *et al.* (2014), además las especies debían estar presentes en cuatro o más sitios del mismo estudio. Las 21 especies seleccionadas se muestran en el cuadro 1. Posteriormente se identificó una ecuación alométrica para cada una de ellas. El criterio de priorización de especies parte de obtener una estandarización aproximada de las especies presentes comúnmente en los agrobosques de piña en la región, además de facilitar la búsqueda de las ecuaciones alométricas para cada especie.

Cuadro 1. Representación de los valores máximos, mínimos y promedios en los diámetros y alturas de los individuos de las Especies seleccionadas del Agrobosque de Piña en el occidente de México. No. I; número de individuos, Vmax D; valor máximo en diámetro, Vmin D; valor mínimo en diámetro, Prom D; promedio de diámetro, Vmax A; valor máximo en altura, Vmin A; valor mínimo en altura, Prom A; promedio de alturas.

Especie	No. I	Vmax D (cm)	Vmin D (cm)	Prom D (cm)	Vmax A (m)	Vmin A (m)	Prom A (m)
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	22	30.70	3.20	8.52	18.0	3.3	6.3
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	17	66.9	5.8	28.42	18.5	4.5	11.9
<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	13	41	2.7	13.68	12.0	3.0	8.2
<i>Cedrela odorata</i> L.	25	47	4	15	20.0	3.8	9.2
<i>Cinnamomum</i> sp	17	274.8	5	45.13	16.0	4.0	10.2
<i>Coffea arabica</i> L	80	20.2	3.3	6.7	3.5	1.7	3.0
<i>Cupania dentata</i> Sw	90	39.3	4.3	17.61	15.0	4.5	8.4
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	24	213	4.7	83.09	30.0	4.0	20.6
<i>Eugenia</i> sp	36	59.8	7	16.28	15.5	6.0	9.4
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	338	158.3	4	36.51	22.0	1.6	11.6
<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	34	131.3	8.2	38.2	20.0	1.9	10.4
<i>Inga vera</i> subsp. <i>eriocarpa</i> (Benth.) J. León	15	98.2	4	17.89	15.0	4.5	8.5
<i>Licania retifolia</i> Blake	14	68	6	27.19	11.0	5.0	8.8
<i>Lonchocarpus salvadorensis</i> Pittier	51	73.8	4	21.31	18.0	3.4	10.7
<i>Mangifera indica</i> L.	10	68.4	6.3	22.26	18.0	4.5	10.0
<i>Platymiscium trifoliolatum</i> Benth	24	130.4	5.8	30.87	18.0	1.3	10.8
<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E. Moore & Stearn	10	45.7	505	23.37	28.0	4.5	15.1
<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg) Nied	20	97.3	5.8	27.98	20.0	4.5	9.3
<i>Quercus aristata</i> Hook. & Arn	16	88.6	12	32.16	10.0	5.0	7.4
<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	42	52.7	5.4	20.64	27.0	3.5	14.4
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC	25	47.5	3	17.98	22.0	3.1	8.8

Para obtener la biomasa aérea, que proporcione los valores más reales; lo ideal es tener para cada especie una ecuación alométrica desarrollada en el sitio de estudio, o desarrollada en un ambiente (o ecosistema) similar al del área de estudio (Chave *et al.* 2014). Debido a que no se

cuentan con ecuaciones desarrolladas en el sitio de estudio, se hizo una búsqueda simple en google académico y se revisó el estudio de Rojas García *et al.* (2015) y el listado de ecuaciones de CONAFOR (2022). La selección de las ecuaciones alométricas se realizó de la siguiente forma, en caso de haber más de una ecuación para una misma especie, se dio prioridad aquellas ecuaciones que hayan sido desarrolladas en tipos de vegetación similares y/o sitios cercanos a los del área de estudio.

Debido a la necesidad de tener ecuaciones alométricas provenientes de estudios desarrollados en el país, la recopilación de ecuaciones de Rojas *et al.* (2015) y la base de ecuaciones de CONAFOR (2022) fueron el primer recurso para obtener las ecuaciones por especie (Cuadro 2). Sin embargo, considerando que los resultados del cálculo de biomasa usando las ecuaciones del listado de CONAFOR (2022) y varias de Rojas *et al.* (2015) subestimaban la estimación de biomasa, no fue posible utilizarlas. Esto, debido a que la descripción de las ecuaciones de CONAFOR (2022) no fue clara respecto a las unidades usadas en cada uno de sus parámetros y en consecuencia hubo una incorrecta aplicación. De igual forma, varias mediciones dasométricas obtenidas en el estudio del agrobosque de piña, no coinciden con el rango en el cual las ecuaciones alométricas fueron originalmente construidas, tales como la altura a la cual se realizó la medición del diámetro, o el rango mínimo y máximo de altura y diámetro de los individuos registrados, por lo que hubo una incompatibilidad entre la ecuación y los datos. Debido a estas complicaciones y que para algunas especies no se encontró ninguna ecuación alométrica, para obtener la biomasa de 17 especies se tomó la decisión de optar por una ecuación usada ampliamente a nivel mundial; para los cálculos se empleó el software *R* a través de la función `computeAGB` del paquete *BIOMASS* (Rejou-Mechain *et al.*, 2017) para determinar biomasa en bosques tropicales, con lo que obtuvimos las ecuaciones finales. La función

computeAGB usa la ecuación 4 de Chave *et al.* (2014) para estimar la biomasa aérea de árboles tropicales a partir de modelos pantropicales (Cuadro 3). La ecuación 4 de Chave *et al.* (2014) establece para cada individuo una relación que indica que hay un incremento en un kilogramo de biomasa seca por cada unidad que resulte de multiplicar 0.0673 por la combinación multiplicativa entre la altura, la densidad específica de la madera y el diámetro medido a 1.3 metro de altura, elevado al cuadrado, y después es levado a la 0.976 potencia. Esta función del paquete BIOMASS de R permite realizar de forma rápida y precisa los cálculos de esta ecuación, consultando la densidad de la madera específica para cada individuo registrado.

Cuadro 2. Primera versión de ecuaciones alométricas encontradas para la estimación de Biomasa de las especies del Agrobosque de Piña en el occidente de México. R2; coeficiente de determinación, Rango D; rango de diámetro, Rango A; rango de altura, VT; volumen total, DN; diámetro, AT; altura total, H; altura total, D; diámetro, DBH; diámetro a altura de pecho, WD; densidad de la madera.

Especie	Ecuación	R2	Rango D (cm)	Rango A (m)	Densidad	Unidad	Lugar	Fuente
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.65	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	$\text{biomass} = [\text{exp}(4.9375)] * [(\text{DBH}^2)^{1.0583}] * (1.14) / 1000000$	0.99	>10		-	Mg	Veracruz	Hughes, F., B. Ka
<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	$\text{biomass} = (\text{exp}(-3.78 + 0.95 \text{Ln}(\text{D}2) + 1.00 \text{Ln}(\text{H})) / 103$	0.88	>10		-	Biomasa (kg)	Veracruz	Hughes, F., B. Ka
<i>Cedrela odorata</i> L.	$\text{biomass (kg)} = 0.00341 * \text{potencial (DN, 3.38248)}$	0.978			-	Biomasa (kg)		Benavides <i>et al.</i>
<i>Cinnamomum</i> sp	$\text{Biomasa(kg)} = 0.0673 * (\text{WD} * \text{Altura} * \text{DN}^2)^{0.976}$				-	Biomasa (kg)		Chave <i>et al.</i> 2014
<i>Coffea arabica</i> L	$[\text{exp}(-0.66) * (\text{DBH}^{1.37})]$	0.55			-	Biomasa (kg)	Oaxaca	Acosta, M. 2003.
<i>Cupania dentata</i> Sw	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	no hay	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	no hay	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Eugenia</i> sp	$\text{biomass} = \text{exp}\{-1.996 + 2.32 \text{Ln}(\text{D})\}$	0.99	1 - 10		-	Biomasa (kg)	Quintana R	Rojas
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.79	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	$[\text{exp}(-1.76) * (\text{DBH}^{2.26})]$	12				Biomasa (kg)		Acosta, M. 2003.
<i>Inga vera</i> subsp. <i>eriocarpa</i> (Benth.) J. León	$[\text{exp}(-1.76) * (\text{DBH}^{2.26})]$	12				Biomasa (kg)		Acosta, M. 2003.
<i>Licania retifolia</i> Blake	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.62	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Lonchocarpus salvadorensis</i> Pittier	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.69	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Mangifera indica</i> L. a Anacardi	$\text{Biomasa(kg)} = 0.0673 * (\text{WD} * \text{Altura} * \text{DN}^2)^{0.976}$					Biomasa (kg)		Chave <i>et al.</i> 2014
<i>Platymiscium trifoliolatum</i> Benth	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.61	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E. Moore & Stearn	$\text{Biomasa(kg)} = 0.0673 * (\text{WD} * \text{Altura} * \text{DN}^2)^{0.976}$					Biomasa (kg)		Chave <i>et al.</i> 2014
<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg) Nied	$\text{Biomasa(kg)} = 0.0673 * (\text{WD} * \text{Altura} * \text{DN}^2)^{0.976}$					Biomasa (kg)		Chave <i>et al.</i> 2014
<i>Quercus aristata</i> Hook. & Arn	$\text{Vol} = -0.06016 + 0.60757 * \text{DN} + 0.00031 * \text{AT} + 0.33129 * \text{AT} * \text{DN} - 0.03087 * \text{AT} * \text{DN}^3$		12.5 - 132.5	7.5 - 22.5	0.78	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.82	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC	$\text{Ln}(\text{VT}) = -0.777850 + 1.872175 * \text{Ln}(\text{DN}) + 0.815238 * \text{Ln}(\text{AT})$		7.5 - 132.5	5 - 47.5	0.82	Volumen (m3)	Jalisco	CONAFOR

Cuadro 3. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de Biomasa de las especies del Agrobosque de Piña en el occidente de México. R2; coeficiente de determinación, Rango D; rango de diámetro, DN; diámetro, H; altura, WD; densidad de la madera, DBH: diámetro a altura del pecho.

Especie	Ecuación	R2	Rango D	Unidad	Lugar	Fuente 1	Fuente
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	biomass (kg)= exp(-3.78+0.95*ln(D2)+1.00*ln(H))	0.88	>10	Kg biomasa	Veracruz	Rojas-Garcia	Uhl, C., et al. 1988.
<i>Cedrela odorata</i> L.	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Cinnamomum sp</i>	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Coffea arabica</i> L.	[exp(-0.66)*(DBH^1.37)]	0.55		Kg biomasa	Oaxaca	Rojas-Garcia	Acosta, M. 2003. Dise o
<i>Cupania dentata</i> Sw	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.)	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Eugenia sp</i>	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	[exp(-1.76)*(DBH^2.26)]	12		Kg biomasa	Bosque cultivado	Rojas-Garcia	Acosta et al 2002
<i>Inga vera</i> subsp. <i>eriocarpa</i> (Benth.) J.	[exp(-1.76)*(DBH^2.26)]	12		Kg biomasa		Rojas-Garcia	Acosta et al 2002
<i>Licania retifolia</i> Blake	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Lonchocarpus salvadorensis</i> Pittier	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Mangifera indica</i> L.	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Platymiscium trifoliolatum</i> Benth	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E. Moore &	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg) Nied	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Quercus aristata</i> Hook. & Arn	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC	Biomasa(kg)= 0.0673*(WD*Altura*DN^2)^0.976			Kg biomasa	Pantropical	Rejou-Mech	Chave et al. 2014

Las ecuaciones y la paquetería de R fueron usadas para obtener la cantidad de biomasa área (fuste de árbol) en los individuos leñosos de las especies que cumplieron las condicionantes mencionadas anteriormente. Rosales-Adame *et al.* (2014) proporcionaron los datos dasométricos de los 923 individuos registrados en total. Esta base de datos incluía para cada individuo su identidad específica, su altura y diámetro a 1.3 m de altura sobre el suelo. Una vez teniendo la biomasa aérea en Kg de cada uno de los individuos. El IPCC (2003) señala que el rango más citado para el contenido de C en la biomasa es 43 a 58%, por lo que se consideró el 50% para estimar el C aéreo. Posteriormente, se hizo la estimación del C por estado, sitio y especie.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenamiento de carbono

Es importante destacar que la estimación no representa el total de C almacenado en las parcelas, ya que no se estimó el almacenamiento de carbono de todas las especies presentes, sino sólo de aquellas con mayor índice de importancia ecológica, dejando más de 40 especies fuera de la estimación. Además, tampoco se incluyeron los reservorios de carbono existentes en el suelo, la biomasa subterránea, materia muerta y mantillo.

La estimación promedio de carbono almacenado en los agrobosques de piña del estado de Nayarit fue de $61.50 \text{ Mg C ha}^{-1}$, mientras que, en Jalisco, a pesar de sólo tener un sitio de muestreo fue de $201.85 \text{ Mg C ha}^{-1}$. El sitio con mayor carbono almacenado fue La Rinconada (Jalisco) con $201.85 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Al comparar los resultados de cada uno de los sitios, es notable el contraste de La Rinconada con los demás sitios, superándolos con más del doble de C almacenado. Los diámetros y alturas de este sitio son muy grandes como se muestra en la figura 1 esto debido a las edades de los individuos, ya que como se menciona en Rosales-Adame *et al.* (2015) el sitio de La Rinconada pertenece a la zona donde se encontraron vestigios de cultivos de piña de aproximadamente dos siglos.



Figura 1: Imagen ilustrativa del diámetro de los individuos del sitio La Rinconada, Jal. en comparación con una persona de + 1.75m. Foto: *Jesús Juan Rosales Adame*.

Estudios previos realizados en SAF de café en México mostraron que el carbono aéreo almacenado puede oscilar en un rango que va entre 42 y 102 Mg C ha⁻¹. Por ejemplo, en la región Huatusco en Veracruz, se estimó que los sistemas rústicos de fincas de café bajo sombra almacenan un promedio de 102 Mg C ha⁻¹ (Espinoza Domínguez *et al.*, 2011), mientras que Davalos Sotelo *et al.* (2008) estimaron que, en el centro de Veracruz en sistemas rústicos con un bajo manejo de fincas de café, el carbono aéreo almacenado presenta concentraciones, en promedio de 42 Mg C ha⁻¹. De acuerdo con Schroeder (1994), los sistemas agroforestales almacenan en biomasa aérea y raíces aproximadamente 21 Mg C ha⁻¹ en regiones subhúmedas, 50 Mg C ha⁻¹ en regiones húmedas.

Los SAF de café se sitúan en ambientes húmedos y los SAF de piña en ambientes subhúmedo. Por lo que de acuerdo con la investigación de Schroeder (1994) se esperaría que los almacenes de carbono de los agrobosques de café fueran más altos que los de piña, sin embargo, de acuerdo con los resultados de este estudio, los sistemas de piña bajo sombra almacenan aproximado entre 49 y 201 Mg C ha⁻¹, mucho mayor a lo reportado en agrobosques de café en Veracruz. Esto puede deberse a la edad de los sitios, ya que a pesar de la similitud estructural entre SAF donde las especies arbóreas permanecen casi intactas (Figura 2), los individuos arbóreos de los sistemas agroforestales de piña en la zona de Jalisco han permanecido en las parcelas por alrededor de dos siglos (Rosales-Adame *et al.* 2015).



Figura 2: Imagen del agrobosque de piña desde el sotobosque en La Rinconada, Jal. Foto: *Jesús J. Rosales Adame*.

La comparación de este trabajo con las investigaciones de Espinoza Domínguez et al., 2011 y Davalos Sotelo et al. (2008), a pesar de no contar con los mismos criterios de estimación, se consideraron debido a la similitud estructural entre agrobosques de piña y de café existentes en el país. No existe alguna investigación sobre la captura o almacenamiento de carbono de agrobosques

de piña que permitiera hacer una mejor comparación. Comparar la presente estimación con dichos estudios, es solo un recurso para comparar los resultados de mi investigación. Considero que mis estimaciones de carbono no son absolutos debido a la falta de información y a los márgenes de error que se comentan a lo largo de este trabajo. Sin embargo, dicha comparación a pesar de no ser la más idónea brinda un punto de partida para discutir el potencial de los agrobosques de piña como almacenes de carbono.

Cuadro 4. Almacenamiento de carbono por sitio, No I= número de individuos SP I= especies con valor de importancia elevado, Dmax=diámetro máximo, Amax=altura máxima.

Localidad/sitio	Estado	C (kg)/sitio	m ²	No I.	SP I	Dmax (cm)	Amax (m)	Total C Mg ha ⁻¹
Acatan de las Piñas -El canton	Nayarit	34,226	5,000	138	10	81.2	22	68.45
Cordon del Jilguero	Nayarit	27,017	5,000	168	15	53.5	17	54.03
El Venado	Nayarit	25,796	5,000	161	15	59.8	18.5	51.59
El Zopilote	Nayarit	24,511	5,000	216	18	57.4	18	49.02
Pta. Platanares	Nayarit	42,208	5,000	117	11	80	21	84.42
La Rinconada	Jalisco	100,926	5,000	123	12	213	32	201,851

Nota: celdas de color naranja= resultado más alto.

Para que se tengan datos altos de C almacenado en un sistema, se deben tener datos altos de biomasa, es decir, una buena cantidad de individuos en el sistema o individuos muy grandes. El sitio de El Zopilote, es el que presenta mayor número de individuos, sin embargo, con 216 individuos, éste no es el sitio con mayor carbono almacenado. Este sitio en comparación con La Rinconada y Pta. de Platanares, a pesar de ser los sitios con menos individuos, son los sitios con mayor C almacenado, por lo tanto, a pesar de que es importante el número de individuos para datos altos de biomasa, no es un dato determinante.

Los sitios de Pta. de Platanares en Nayarit y La Rinconada en Jalisco mostraron individuos con diámetros grandes y/o individuos muy altos (Cuadro 4). Esto nos puede indicar indirectamente la edad del sitio, siendo estos muy viejos. Al ser estos los sitios con mayor C

almacenado, podría sugerir que la edad de los individuos del sitio es un factor importante para tener datos altos de C en el sistema.

La región donde se encuentra La Rinconada está ubicada en el municipio de Villa Purificación, donde, a pesar de no contar con registros oficiales, es el primer sitio bajo producción comercial de piña en el país, lo cual es contrario a la consideración de que la cuenca del Papaloapan en Veracruz lleva dicha distinción (Rosales-Adame, 2015). Esta antigüedad de los sistemas agroforestales en la región permitió que se tengan individuos arbóreos de ciertas especies muy grandes, propiciando que se tengan grandes cantidades de carbono almacenado por individuo, como se puede ver en los valores máximos del sitio de La Rinconada (Cuadro 5). La permanencia a lo largo del tiempo de estos sitios se debe a múltiples motivos, estos sistemas requieren un bajo mantenimiento en comparación de un cultivo tradicional bajo sol. Los agrobosques de piña están conformados por varios subsistemas (familiar, agrícola y silvícola) y mantiene en algunos casos relaciones con otros subsistemas (agrícolas, pecuarios) lo cual facilita su permanencia y complementan con ingresos e insumos su manejo (Rosales-Adame *et al.*, 2016). Otro punto importante para la persistencia de estos sistemas es la apropiación territorial, el reconocimiento y amor que los propietarios tienen a estos ecosistemas modificados. Los SAF de piña bajo sombra generan beneficios no económicos directos, entre los que destacan la provisión de agua, la belleza del paisaje, la conservación de especies (plantas y animales) y la disponibilidad de sitios para la recreación y el descanso (Rosales-Adame, 2015), dicho reconocimiento permite que los sistemas persistan a través del tiempo.

Carbono almacenado por especie

Además de calcular el C almacenado por sitio de muestreo y para conocer cuáles son las especies que tienen mayor C almacenado en los sitios de estudio, se presenta el C promedio por especie (Cuadro 5). Cuando agrupamos los resultados por sitio y por especies, se puede observar cuáles especies tienen una mayor contribución en cada sitio, respecto al número de individuos, su carbono promedio, y como el carbono varía respecto a su promedio. (Desviación estándar).

Las especies que en general tienen un promedio de carbono almacenado más alto son en orden descendente: *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn, *Inga laurina* (Sw.) Willd, *Hymenaea courbaril* L., *Psidium sartorianum* (O. Berg) Nied, *Tabebuia donnell-smithii* Rose y *Cinnamomum* sp. (Cuadro 5).

Cuadro 5. Carbono promedio por especie en sitio. Sp= especie, No. I = Número de individuos, S= Desviación estándar del carbono, V max= Valor máximo de carbono, V min= valor mínimo de carbono.

sp	No. I	C (Kg ha ⁻¹)									
		S	V max	V min	Acatan P. -El canton	Cordon del Jilguero	El Venado	El Zopilote	La Rinconada	Pta. Platanares	Total promedio
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	22	66.40	296.78	0.81			3.78	4.23	81.44	6.27	25.13
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	17	149.54	506.34	1.42		20.26	84.92	170.97	328.99	54.45	118.16
<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	13	11.01	46.63	0.88		10.75	28.04	8.26	0.88		12.46
<i>Cedrela odorata</i> L.	25	73.02	235.32	1.00			151.69	50.01	58.27	11.31	51.29
<i>Cinnamomum</i> sp	17	359.43	1404.72	1.43	233.85	345.32		7.83			252.98
<i>Coffea arabica</i> L	80	0.25	1.38	0.01		0.23	0.57	0.24	0.59		0.27
<i>Cupania dentata</i> Sw	90	53.24	301.66	1.36	19.78	46.5	60.52	45		91.64	59.25
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	24	3509.65	13017.62	1.19					2967.84		2967.84
<i>Eugenia</i> sp	36	92.44	544.14	1.49	20.84	544.14	39.2	83.23		88.38	64.99
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	338	438.17	3196.74	1.74	322.97	255.62	389.21	195.97		555.91	336.97
<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	34	380.53	1374.68	0.00		56.17		301.76	491.69	74.68	353.8
<i>Inga vera</i> subsp. <i>eriocarpa</i> (Benth.) J. León	15	144.19	577.25	1.97	11.26	132.27	87.37	36.56			66.79
<i>Licania retifolia</i> Blake	14	144.74	569.48	4.01	12.07	92.76	94.29	259.88		204.61	125.78
<i>Lonchocarpus salvadorensis</i> Pittier	51	107.95	395.99	1.36	17.13	223.41	105.39	107.27		196.4	112.65
<i>Mangifera indica</i> L.	10	372.57	1209.70	3.44	105.43	164.93	90.28	4.7	1209.7		185.53
<i>Platymiscium trifoliolatum</i> Benth	24	232.11	1025.02	2.89	21.39	4.46	319.62	134.36		180.38	190.82
<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E. Moore & Stearn	10	487.14	1297.68	3.49					366.02		366.02
<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg)	20	826.38	3781.56	3.59			138.38	107.41	3781.56		294.22
<i>Quercus aristata</i> Hook. & Arn	16	130.35	409.24	14.62			83.13		188.4		142.35
<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	42	401.45	1588.01	2.91					270.47		270.47
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC	25	256.20	1061.64	0.71	84.14	66.69	46.7	41.42	634.56	468.99	136.2
Total Resultado	923	791.69	13017.62	0.00	248.02	160.82	160.22	113.48	820.53	360.75	275.93

Nota: celdas naranjas= resultado superior a 1000, celdas amarillas= resultado superior a 200, celdas verdes= promedios más altos superior a 200

La mayor variación de carbono almacenado respecto a su promedio la tuvo *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb con una desviación estándar de 3,509.65 kg C ha⁻¹, en la Rinconada. Esto nos indica que los individuos de esta especie en este sitio tuvieron una amplia variación en carbono almacenado, registrando individuos con cantidades muy bajas y otros muy altas de carbono. Lo cual indica que son más de 3 toneladas de carbono que se dispersan alrededor del promedio, lo cual puede deberse a que hay un rango muy amplio de distribución de individuos de diferentes edades. Las especies que también mostraron una amplia variación de carbono almacenado fueron *Cinnamomum* sp., entre 200 y 450 kg C ha⁻¹, *Hymenaea courbaril* L. entre 300 y 570 kg C ha⁻¹, *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. entre 500 y 650 kg C ha⁻¹ e *Inga laurina* (Sw.) Willd entre 300 y 400 kg C ha⁻¹ (Cuadro 5).

Para cada una de las especies, se encontró el individuo que proporcionó el valor máximo de contenido de carbono. Los valores más altos del valor máximo se encontraron principalmente en las especies situadas en La Rinconada, el individuo con el valor máximo más alto de las especies, era de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. con 13,017.62 kg C ha⁻¹, seguido por *Mangifera indica*, *Pouteria sapota*, *Psidium sartorianum*, *Tabebuia donnell-smithii* y *Tabebuia rosea* con 1,209.70 kg C ha⁻¹, 1,297.68 kg C ha⁻¹, 3781.56kg C ha⁻¹, 1,588.01kg C ha⁻¹ y 1,061.64 kg C ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 5).

La especie *Hymenaea courbaril* L. no se encuentra en el sitio de Jalisco La Rinconada, sin embargo, contrastando los cuatro sitios de Nayarit, es la especie que tiene los individuos con el valor promedio de carbono almacenado más alto en los sitios de Acatan de las Piñas - El Cantón, Pta. de platanares y El Venado en Nayarit, con un individuo de hasta 3,196.74 kg C ha⁻¹.

Se ha observado que el conocimiento local que se tiene del manejo de las especies *Hymenaea courbaril* L. y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb conserva gran importancia cultural, debido a que la caducidad y renovación del follaje de estas especies arbóreas coincide con las etapas de floración, formación y maduración de los frutos de piña, la sombra que brinda la abundancia de follaje durante la maduración del fruto parece disminuir el quemado del fruto de piña por el sol (Rosales-Adame *et al.* 2014). Dentro de las especies que aportan un porcentaje importante a la cobertura al dosel se destacan *Enterolobium cyclocarpum*, *Hymenaea courbaril*, *Tabebuia rosea* y *T. donnell-smithii* (Rosales-Adame *et al.* 2014).

Los agrobosques de piña además de proveer de alimento (frutos) para uso humano y animal (forraje), aportan cantidades importantes de materia orgánica al suelo (Rosales-Adame *et al.* 2014). De acuerdo con Rosales-Adame *et al.* (2014), los agricultores de piña prefieren mantener la flora nativa (e introducir algunas especies frutales), sobre todo aquellas especies que cumplen alguna función como el enriquecimiento de los suelos mediante la caída del follaje, como es el caso de *Lonchocarpus salvadorensis*, *Hymenaea courbaril* L. y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.). Los agricultores de piña además de introducir especies frutales en sus parcelas también prefieren aquellas especies que les proporcionan madera y postes para la construcción y elaboración de herramientas como *Hymenaea courbaril*, *Platymiscium trifoliolatum*, y *Tabebuia rosea* (Rosales-Adame *et al.*, 2014).

El agrobosque de piña es un sistema manejado extensivamente, con un uso de fertilización química nula, bajo un gradiente respecto a la utilización de especies leñosas que va desde un esquema rústico, pasando por poliespecíficos enriquecidos, hasta un sistema productivo de huerto o jardín mixto tradicional. En cada uno de estos esquemas, hay un uso mínimo de

insumos y maquinaria, pero una fuerte aplicación de conocimientos y tecnología local (Rosales-Adame, 2015). Debido a la importancia del conocimiento local para el manejo de los agrobosques de piña, siempre será importante considerar las especies de importancia cultural que contiene. Por lo que el manejo y selección de especies presentes en los agrobosques que la familia agricultora decida mantener, propicia una variación amplia de cantidades de carbono en el sistema.

En esta tesina se estimó el carbono de la biomasa aérea de agrobosques de piña en el Occidente de México considerando las especies ecológicamente más importantes. Los agrobosques de piña son sistemas de manejo agrícola que tienen al menos dos siglos de haberse establecido en el Occidente de México (Rosales-Adame, 2015). Su importancia cultural en la región, los servicios ecosistémicos que ellos proveen, y su contribución a los medios de vida de los propietarios de las parcelas es ampliamente reconocida (Moreno Calles *et al.*, 2016; Rosales-Adame, 2015). A pesar de que la producción de fruta de piña es muy diferente al cultivo bajo sol, el carbono almacenado en los elementos leñosos de los agrobosque de piña destaca el papel de este agrosistema para almacenar carbono. Las estimaciones del carbono aéreo contenido en el agrobosque de piña de Nayarit y Jalisco del presente estudio contribuyen no sólo al conocimiento de los almacenes de carbono de este sistema en el área de estudio, sino que, además, nos permite compararlo con otros agrosistema de amplia distribución en México.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo brinda conocimientos acerca del potencial en almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales de piña en el Occidente de México, un sistema que maneja al mismo tiempo elementos agrícolas y forestales bajo un conocimiento local que se ha desarrollado desde hace décadas. Este es el primer esfuerzo para realizar estimaciones de carbono almacenado en la biomasa aérea en los agrobosques de piña del Occidente de nuestro país.

El factor principal para la obtención de estimaciones altas en carbono almacenado está relacionado con la antigüedad y capacidad de crecimiento de los individuos que se encuentran en las parcelas, como los individuos de las especies de *Hymenaea courbaril* L., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn, *Inga laurina* (Sw.) Willd, *Psidium sartorianum* (O. Berg) Nied, *Tabebuia donnell-smithii* Rose y *Cinnamomum* sp. Promover estas especies en las parcelas de agrobosques piña pueden contribuir con servicios ecosistémicos de almacenamiento de carbono y brindar estructura al sistema como lugares de sombra, además de contribuir al ingreso económico de la o el campesino productor (a) son un auxiliar medicinal en el caso de *Hymenaea courbaril* L., alimenticio en el caso de *Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn y maderable en el caso de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.

La presente investigación muestra que los agrobosques pueden ser una opción como estrategias de mitigación a los GEI en áreas de Nayarit y Jalisco. Las opciones para enfrentar la pérdida de cobertura forestal y degradación de los bosques desde el sector relacionado con la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) incluye iniciativas internacionales como la reducción de las emisiones por deforestación y la degradación de bosques (REDD+, por

sus siglas en inglés). A pesar de que la producción de fruto de piña de los agrobosques de piña es menor en comparación de un sistema de producción de piña bajo sol, las cantidades de carbono del agrobosque son mucho mayores, debido a que el sistema bajo sol no tiene elementos arbóreos. Los agrobosques de piña de Nayarit y Jalisco tienen una riqueza cultural y un manejo muy destacado en comparación con los sistemas de producción de piña bajo sol, que en algunos casos se ha mantenido en la región desde hace más de 200 años (Rosales-Adame, 2015). Si el establecimiento de parcelas de agrobosques de piña fuera considerada una opción de mitigación de GEI, la contribución de estos elementos culturales y tradicionales ayudaría a visualizar a los agrobosques de piña no sólo como proyectos para conservar carbono en sistemas forestales, sino que además destacaría los beneficios tanto ambientales como sociales no relacionados con el carbono proporcionados por comunidades locales en este agrosistema.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles M., Vargas-Hernández J., Velázquez-Martínez A. & Etchevers-Barra J. (2002). Aboveground biomass estimation by means of allometric relationships In six hardwood species in Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36 (6), 725-736.
- Atangana, A., Khasa, D., Chang & S., Degrande, A. (2014). Carbon Sequestration in Agroforestry Systems, En *Tropical agroforestry*. London, Springer Science. 217-224.
- Benaouda, M., González-Ronquillo, M., Molina, L., & Castelán Ortega, O. (2017). Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8 (4), 965-974.
- Bojórquez, J.A. (2014) Generación de modelos alométricos para cuantificar la biomasa en pie de bosques tropicales secundarios en la región de Chamela, Jalisco, México [Trabajo fin de Maestría, facultad de ciencias, UNAM.] Biblioteca central UNAM virtual.
- Bojórquez, A., Martínez-Yrizar, A., Búrquez, A., Jaramillo, V. J., Mora, F., Balvanera, P., & Álvarez-Yépez, J. C. (2020). Improving the accuracy of aboveground biomass estimations in secondary tropical dry forests. *Forest Ecology and Management*. 474 (118384), 1-11.
- Castro, P., Marisa-Azul, A., Leal-Filho W., & M. Azeiteiro, U. (2019). *Climate Change-Resilient Agriculture and Agroforestry Ecosystem Services and Sustainability*. Switzerland, Springer Nature.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, Alvaro Duque, A., Eid, T., Fearnside, P., Goodman, R., Henry, M., Martínez- Yrizar, A.,

- Mugasha, W., Muller-Landau, H., Mencuccini, M., Nelson, B., Ngomanda, A., Nogueira, E., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C., Saldarriaga, J., Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190.
- CONAFOR. (2020). Estimación de la tasa de deforestación bruta en México para el periodo 2001-2018 mediante el Método de muestreo. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estimacion-de-la-tasa-de-deforestacion-bruta-en-mexico-para-el-periodo-2001-2018-mediante-el-metodo-de-muestreo>. Accesado el 7 de mayo de 2022.
- CONAFOR. (2022). Ecuaciones con los parámetros para la estimación de volumen rollo total árbol con corteza (VRTAcc) en metros cúbicos. <https://idefor.cnf.gob.mx/documents/1245>. Accesado el 11 noviembre de 2022.
- Dávalos-Sotelo, R., Rodríguez-Morato, M., & Martínez-Cueto. (2008). Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz (5.ª ed.). Instituto De Ecología. Cap 16, 223-231.
- Espinoza-Domínguez W., Krishnamurthy L., Vázquez-Alarcón A. & Torres-Rivera A. (2011). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café, *Ciencias Forestales y Ambiente*. 18 (1), 57-70.
- FAO (2009). Perfil para el cambio climático. <https://www.fao.org/3/i1323s/i1323s00.htm>. Accesado el 25 de Mayo del 2022.
- FAO (2016). El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma. <https://www.fao.org/3/i5588s/i5588s.pdf>. Accesado el 24 de Mayo del 2022

- FAO (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>. Accesado el 26 de Mayo del 2022.
- Fisher-Ortiz R., Moreno-Calles A., Rosales-Adame J., Rivero-Romero A., & Alvarado-Ramos L. (2020). Agrobosques mexicanos. Los Sistemas Agroforestales de México: Avances, experiencias, acciones y temas emergentes. 337-386. UNAM.
- González-Acuña, I., Ruiz-Corral, J.A., Martínez-Parra, R.A., Byerly, K.F., Mena H., L., & Osuna, J.A. (2002). Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el municipio de Ruiz, Nayarit. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigaciones del Pacifico Centro. Campo Experimental Santiago Ixcuintla. Folleto de Investigación Num. 12.
- Hernández-Guzmán R., Ruiz Luna A. & González C. (2019). Assessing and modeling the impact of land use and changes in land cover related to carbon storage in a western basin in Mexico. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 13 , 318-327.
- Huchin Chan J., Jimenez Pat N., & Moo Xix J. (2016). Diagnóstico De La Producción De Piña Del Municipio De Bacalar, Quintana Roo. 21° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. AMECIDER – ITM.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 39-48.
- IPCC (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Editores: Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti, Buendía R, Miwa K,

- Ngara T, Tanabe K, Wagner F. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japón. www.ipcc-nggip.iges.or.jp. Accesado el 20 de Diciembre del 2022
- Oelbermann, M., Voroney, P. R., & Gordon, M. A. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104, 359 - 377.
- Moreno Calles, I., Casas, A., Toledo, V. & Vallejo Ramos, M. (2016). *Etnoagroforestería en México*. Escuela Nacional Autónoma de México.
- Nair, P.K.R., (1997). *Agroforestería*. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Primera Edición en Español. Chapingo, México.
- Ramos-Hernández, E. & Martínez-Sánchez, J. (2020). Almacenes de biomasa y carbono aéreo y radicular en pastizales de *Urochloa decumbens* y *Paspalum notatum* (Poaceae) en el sureste de México. *Revista de Biología tropical*. 68(2), 440-451.
- Réjou-Méchain, M., Tanguy, A., Piponiot, C., Chave, J., & Hérault, B. (2017). BIOMASS: an R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 8(9), 1163-1167.
- Rosales-Adame, J.J. (2015). *Ecología, manejo y diversidad de la piña cultivada bajo sombra en el Occidente de México*. [Tesis Doctoral]. Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.
- Rosales-Adame, J.J., Cevallos, J., Vázquez, J. M., & Hernández, F. (2008). La diversidad de los sistemas agroforestales en el Sur y Costa Sur de Jalisco. IV Reunión Nacional de Sistemas Agro y Silvopastoriles: Estrategias ambientales amigables. Experiencias productivas y académicas. Llevada a cabo del 12 al 16 de mayo de 2008 en Colima, México.

- Rosales Adame, J.J., Cuevas Guzmán, R., Gliessman, S. R., & Benz, B. F. (2014). Estructura y diversidad arbórea en el sistema agroforestal de piña bajo sombra en el occidente de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17, 1-18.
- Rosales-Adame J.J., Cuevas Guzmán R., Gliessman S.R., Benz B.F. & Cevallos Espinosa J. (2016). El agrobosque de piña en el occidente de México: ecología, manejo tradicional y conservación biológica. En C. López (Ed.), *Etnoagroforestería en México*. 43-68. UNAM-Escuela Nacional de Estudios Superiores.
- Rojas García, F., H. J. De Jong, B., Martínez Zurimendí, P., & Paz Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *INRA and Springer-Verlag*. 72, 835–864.
- Saéñz-Reyes J., Rueda Sánchez A., Benavides Solorio J., Muñoz Flores J., Castillo Quiroz D. & Sáenz Ceja J. (2020). Allometric equations, biomass and carbon in tropical forest plantations in the coast of Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 12 (65), 26-44.
- Schneider SH. (1989). The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*. 243 (4892), 771-781.
- Schroeder, P. (1994). Carbon storage benefits of agro-Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. 27, 89–97.
- Segura, M. & Andrade H.J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería en las Américas*. 46, 89-96.
- SEMADES (2002). Biodiversidad. Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable, Jalisco.

Sotelo Raymundo, Rodrigues Morato María I, & Martínez Pinillos Enrique. (2008).

Almacenamiento de carbono. 223–225.

Tovar-Blanco, A.L. Lizarazo-Salcedo, I.A. & Rodríguez-Eraso, N. (2020). Estimación de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* y *Pinus* spp usando imágenes Sentinel 1A y Sentinel 2A en Colombia. *Colombia forestal*. 23(1), 117-141.