

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE



Título de pasantía de investigación

Establecimiento de parámetros técnicos para inventarios de carbono: Estimación de biomasa en árboles en potreros y cercas vivas en ganaderías de El Salvador

POR

JOHANA GRACIELA MOLINA VASQUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE



Título de pasantía de investigación

Establecimiento de parámetros técnicos para inventarios de carbono: Estimación de biomasa en árboles en potreros y cercas vivas en ganaderías de El Salvador

POR

JOHANA GRACIELA MOLINA VASQUEZ

REQUISITO PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERA AGRONOMO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

Ing. Agr. M. Sc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla

SECRETARIO GENERAL

Lic. Pedro Rosalio Escobar

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

DECANO

Ing. MAECE. Nelson Bernabé Granados Alvarado

SECRETARIO

Ing. Agr. MSc. Edgar Geovany Reyes Melara

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

Lic. Daniel de Jesús Palacios Hernández

ASESOR INTERNO

Ing. Agr. Juan Ricardo Vargas Estrada

ASESOR EXTERNO

PhD. Joaquín Castro Montoya

**COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACION DEL DEPARTAMENTO DE
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**

Ing. Agr. Juan Gerardo Marroquín Reina

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACION

Ing. Ms. Ever Alexis Martínez Aguilar

RESUMEN

En el marco del proyecto “Establecimiento de parámetros técnicos para inventarios de carbono: Estimación de biomasa en árboles en potreros y cercas vivas en ganaderías de El Salvador” ejecutado por El Instituto de Investigación en Ciencias Agroalimentarias y Ambientales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador se llevó a cabo esta Pasantía de investigación científica. Su objetivo principal fue determinar la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra capturado en árboles y cercas vivas presentes en sistemas de producción bovina. Las ganaderías visitadas pertenecen a los Distritos de Tecoluca, San Luis Talpa, San Pedro Masahuat, San Pablo Tacachico y Ciudad Arce. Los valores obtenidos a través de estas ecuaciones corresponden a un inventario estático o *stock* acumulado de carbono orgánico en los tejidos del árbol hasta el momento del muestreo.

Para el análisis de la información se utilizaron métodos estadísticos descriptivos y exploratorios, con el fin de procesar e interpretar los datos obtenidos. Asimismo, se elaboraron gráficas y figuras mediante el software R versión 4.5.2, utilizando el paquete ggplot2. Los resultados mostraron que el sitio con menor captura de carbono (28.22 t/ha) correspondía a aquel que implementaba únicamente uno de los sistemas silvopastoriles evaluados. En contraste, el sitio con mayor captura de carbono (342.74 t/ha) fue aquel que integraba ambos sistemas en el potrero, evidenciando un mayor potencial de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles más diversificados.

Además, se evaluó la existencia de una posible relación entre las variables estudiadas y la captura de CO_2 . Los resultados indicaron una correlación positiva con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.96$), lo que sugiere que el diámetro del árbol está estrechamente relacionado con la biomasa y, por ende, con una mayor capacidad de captura de CO_2 . Este comportamiento refleja una relación alométrica típica en especies arbóreas.

Sin embargo, es importante señalar que dicha relación puede variar en función de factores como la edad del árbol, su estado de desarrollo, la composición de especies y las condiciones ambientales del sitio de crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a Dios por haberme permitido este largo recorrido para poder aprender y conocer acerca del ámbito agronómico, por darme la fuerza de seguir a pesar del cansancio y muchas veces el desánimo. Pero mas que todo agradecida por darme la fuerza y perseverancia para continuar y dar lo mejor de mi siempre. Agradezco todas las oportunidades, conocimientos y habilidades que me permitió vivir y aprender a medida que pasaron los años, la fuerza tanto mental como física para poder lograrlo.

Quiero expresar mis agradecimientos especialmente a mi madre y mi abuela, que a pesar de ser la únicas que me ayudaron a salir adelante en mis estudios académicos jamás se rindieron y jamás se negaron a apoyarme en todas las responsabilidades que conlleva estudiar un grado universitario, este logro es conjunto, porque, aunque el trabajo fue de diferente manera, todo conlleva el mismo propósito para todas. Realmente espero me alcance la vida para poder recompensar todo esfuerzo que han invertido en mí. Mamá, gracias por ser la persona que me ayudo a querer superarme siempre y no rendirme a pesar de que hay días oscuros y tristes, hacerme ver que la vida es difícil pero todo esfuerzo tiene su recompensa.

Quiero agradecer a mis compañeros de Universidad, que ahora puedo llamar amigos y colegas. Gracias por hacerme reír en momentos tristes y llenos de ansiedad, y por hacerme sentir incluida, por crear una red de apoyo entre nosotros y ayudarnos mutuamente para avanzar de forma académica y en la vida. Les estoy eternamente agradecida y espero poder siempre estar en contacto con las personas que estimo y considero amistad. Les deseo éxito y la mejor de las suertes en la vida.

Y, por último, pero no menos importante, a mis asesores y maestros que se encargaron de hacer posible esta investigación, les agradezco su paciencia, dedicación y ayuda para poder impulsarme a hacer un trabajo adecuado que refleje todos los conocimientos aprendidos en la carrera. Les deseo éxitos y muchas más bendiciones en sus vidas.

INDICE

1.	INTRODUCCION	1
2.	OBJETIVOS	2
2.1.	Objetivo general	2
2.2.	Objetivos específicos	2
3.	MARCO TEORICO	3
3.1.	Cambio climático y ganadería.....	3
3.1.1.	Ciclo de carbono	3
3.1.2.	Gases de efecto invernadero (GEI)	4
3.1.3.	Emisiones e impacto de GEI provenientes del sector agropecuario en El Salvador 4	
3.1.4.	Mitigaciones del cambio climático El Salvador.....	6
3.1.5.	Servicios ecosistémicos de árboles en fincas ganaderas.....	7
3.2.	Sistemas silvopastoriles como medida para reducir o mitigar CO ₂	7
3.2.1.	Cercas vivas vistas desde su rol ecológico	7
3.2.2.	Árboles dispersos en los potreros. Biomasa individual significativa por diámetros grandes y bienestar animal por árboles dispersos en potreros	8
3.2.3.	Relación del diámetro a la altura del pecho con la biomasa de los árboles ..	9
3.3.	Fundamentos de la estimación de biomasa	10
3.3.1.	Variables dendrométricas.....	10
3.3.2.	Diámetro.....	10
3.3.3.	Altura	10
3.3.4.	Método indirecto.....	10
3.4.	Ecuaciones alométricas	11
3.5.	Densidad de la madera	11
3.6.	Biomasa	11
3.6.1.	Componentes de la biomasa	12
3.7.	Cálculo de variables	12

3.7.1.	Cálculo de la biomasa aérea en el bosque latifoliado	12
3.7.2.	Cálculo de biomasa subterránea	13
3.7.3.	Cálculo de los componentes de carbono	14
3.7.4.	CO ₂ de los árboles (DAP igual o mayor a 10 cm y DAP inferior a 10 cm y superior a 2 cm).....	14
3.8.	Marco legal internacional: Contribuciones nacionales determinadas (NDC).....	15
3.8.1.	Medidas de respuesta en Sector AFOLU (Agricultura, silvicultura y uso del suelo) 16	
3.8.2.	Normativa e institucionalización en Sector AFOLU (Agricultura, silvicultura y uso del suelo).....	17
4.	METODOLOGIA	18
4.1.	Localización.....	18
4.2.	Metodología de campo.....	18
4.3.	Registro y cuantificación de biomasa por área específica	20
4.4.	Metodología estadística	26
4.4.1.	Tabulación datos recopilados y análisis por visita de campo en diferentes sectores ganaderos de El Salvador	26
5.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	27
5.1.	Creación de registros dasométricos de árboles dispersos y cercas vivas.....	27
5.1.1.	Especies arbóreas encontradas	27
5.1.2.	Familias de las especies arbóreas encontradas.....	29
5.2.	CO ₂ absorbido por cercas vivas y árboles dispersos.....	29
5.3.	Indicadores de captura de carbono potencial para los sistemas evaluados	32
6.	CONCLUSIONES.....	43
7.	RECOMENDACIONES.....	44
8.	BIBLIOGRAFICA	45
9.	ANEXOS.....	49

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Principales gases de efecto invernadero de la atmosfera terrestre	4
------------------	---	---

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de DAP con biomasa de los árboles (Melgar & Marroquin, 2017).....	9
Tabla 2. Resultados de mitigación para las categorías de Uso del Suelo actuales y las propuestas de transición, según capacidad de mitigación y áreas correspondientes (MARN,2021).	16
Tabla 3. Coordenadas de los lugares de muestreo en la investigación.	19
Tabla 4. Especies arbóreas encontradas y promedios de diámetro a la altura del pecho ...	27
Tabla 5. Familias de las especies arbóreas encontradas en el estudio.	29

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de CO ₂ de El Salvador por año y sector en unidades de toneladas (Worldometer, s.f).....	5
Figura 2. Ubicación de Instituto de Investigación en Ciencias Agroalimentarias y Ambientales (Google Earth, 2015).	18
Figura 3. Mapa de ubicaciones de sitios de muestreo en el Mapa de El Salvador.	19
Figura 4. Toma de datos en campo.....	20
Figura 5. Esquema de medición en cercas vivas y árboles dispersos.	21
Figura 6. Conteo de árboles y medida del área de muestreo en cercas vivas.	21
Figura 7. Cinta diamétrica para medición de DAP.	22
Figura 8. Demostración de toma de datos de DAP en árboles.....	22
Figura 9. Registro de diámetro a la altura de pecho en árboles.	23
Figura 10. Registro e instrumentos dasométricos utilizados para medición indirecta de altura.....	24
Figura 11. Medición de distancia horizontal para altura de un árbol.	24
Figura 12. Medición correcta de la altura de un árbol haciendo uso del clinómetro	25
Figura 13. Observación general de terreno.....	25
Figura 14. Carbono almacenado y CO ₂ (kg) fijado por potrero en cercas vivas y árboles dispersos	30
Figura 15. Contribución de dióxido de carbono fijado de acuerdo con las cercas vivas y árboles dispersos por potrero.	31

Figura 16. Especies con mayor carbono fijado promedio	32
Figura 17. Relación diámetro a la altura del pecho entre biomasa por árbol, R^2 =Coeficiente de correlación; x =DAP; y=Biomasa	33
Figura 18. Relación entre DAP y altura en árboles de cercas vivas.	34
Figura 19. Relación de DAP, altura, biomasa y carbono fijado en cercas vivas y árboles dispersos. B= biomasa en toneladas; C= carbono en toneladas.	35
Figura 20. Fijación de carbono de acuerdo con el DAP de ambos sistemas silvopastoriles.	36
Figura 21. Kilogramos de carbono por árbol en cercas vivas y árboles dispersos	37
Figura 22. Datos generales de indicadores de captura de carbono por finca.	38
Figura 23. Datos globales de cercas vivas y árboles dispersos para CO ₂ total fijado por finca (ton/ha).....	39
Figura 24. Número de árboles por cada 100 metros lineales.	41
Figura 25. Total de carbono fijado y CO ₂ en 100 metros lineales de cercas vivas.	41

INDICE DE FORMULAS

Formula 1. Cálculo de biomasa aérea	12
Formula 2. Cálculo de biomasa subterránea.....	13
Formula 3. Cálculo de carbono almacenado.....	14
Formula 4. Cálculo de carbono aéreo	14
Formula 5. Cálculo de medición indirecta para altura de árboles	23

LISTA DE ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

<i>Acrónimo</i>	<i>Significado</i>
AGB	Biomasa aérea
AGC	Carbono aéreo almacenado
BGB	Biomasa subterránea
BT	Biomasa total
C/ C _A	Carbono almacenado
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono capturado o fijado
DAP	Diámetro a la altura del pecho
GEI	Gases por efecto de invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
Kg	Kilogramos
Kt	Kilotoneladas
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
NAMA	Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el desarrollo
T	Toneladas
R ²	Coeficiente de relación

1. INTRODUCCION

Actualmente, el CO₂ contribuye significativamente al calentamiento global, generando múltiples consecuencias ambientales, climáticas, económicas y sociales a nivel mundial. En el ámbito agronómico, influye directamente en el desempeño de los cultivos y en los animales destinados a la producción agropecuaria y agroindustrial. Entre las principales problemáticas asociadas se encuentran las sequías, el estrés por altas temperaturas, las lluvias irregulares e incluso las inundaciones, las cuales provocan disminución en la calidad nutricional de los cultivos lo cual afecta la calidad de la producción obtenida en determinados periodos. Asimismo, en la producción pecuaria se reduce la disponibilidad de alimento para los hatos ganaderos, disminuye la productividad y aumenta la proliferación de enfermedades.

En El Salvador, el país contribuye aproximadamente con el 0.03 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero; sin embargo, el sector de agricultura, silvicultura y cambio de uso del suelo aporta el 57.8 % de las emisiones totales nacionales, equivalentes a 11,793.6 Kt de CO₂eq netas registradas en el año 2021. Esta situación evidencia la relevancia de desarrollar herramientas ambientales orientadas a la mitigación de estos gases, mediante la creación de registros y análisis que permitan determinar la cantidad de CO₂ capturado por los árboles presentes en sistemas silvopastoriles, tales como cercas vivas y árboles dispersos en potreros.

Se reconoce que el empleo de cercas vivas y árboles dispersos en los potreros aporta múltiples beneficios a los sistemas productivos de los ganaderos. No obstante, la implementación de estos sistemas también puede generar un impacto positivo en la mitigación de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, contribuir a mejorar las condiciones ambientales afectadas por el calentamiento global.

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la cantidad de dióxido de carbono capturada en sistemas silvopastoriles de cercas vivas y árboles dispersos en potreros destinados a la producción bovina en El Salvador, con el fin de conocer la influencia que tiene la aplicación de estas técnicas en la mitigación del CO₂ presente en el ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Determinar la cantidad de dióxido de carbono que se encuentra capturado en árboles y cercas vivas presentes en sistemas de producción bovina en El Salvador.

2.2. Objetivos específicos

- Crear un registro de datos dasométricos de árboles dispersos y cercas vivas.
- Calcular la cantidad de dióxido de carbono fijado y carbono almacenado en cercas vivas y árboles dispersos respecto a cada sector ganadero visitado.
- Establecer indicadores de captura de carbono potencial para los sistemas evaluados.

3. MARCO TEORICO

3.1. Cambio climático y ganadería

3.1.1. Ciclo de carbono. La abundancia relativa de carbono en la atmósfera y la corteza terrestre es sorprendentemente baja: menos del 0.5% en ambos casos. Sin embargo, los compuestos de carbono son esenciales para la vida, ya que forman los tejidos de todos los seres vivos. Todo el carbono orgánico, y casi todo el almacenado en los océanos y el suelo bajo nuestros pies, se fijó primero desde la atmósfera mediante la fotosíntesis. Los átomos individuales pasan a formar parte de diferentes moléculas, almacenadas en distintos depósitos (sumideros), y pueden tardar de segundos a eones en volver a la atmósfera (ESA, 2021).

El intercambio de carbono entre el reservorio terrestre y el atmosférico es el resultado de procesos naturales de la fotosíntesis y respiración, y de la emisión de gases causada por la acción humana. La captura de carbono por medio de la fotosíntesis ocurre cuando las plantas absorben energía solar y CO_2 de la atmósfera, produciendo oxígeno e hidratos de carbono (azúcares como la glucosa), que sirven de base para su crecimiento. Por medio de este proceso las plantas fijan el carbono en la biomasa de la vegetación, y consecuentemente constituyen, junto con sus residuos (madera muerta y hojarasca), un stock natural de carbono. El proceso inverso ocurre con la emisión de carbono por medio de la respiración de las plantas, animales y por la descomposición orgánica (forma de respiración de las bacterias y hongos). A ésta se suman las emisiones de GEI debido a la deforestación, incendios, gases industriales y quema de combustibles: acciones antropogénicas que contribuyen con el desequilibrio del ciclo de carbono (Tito *et al.*, 2009).

3.1.2. Gases de efecto invernadero (GEI). La atmósfera terrestre está compuesta casi en su totalidad por nitrógeno (78 %) y oxígeno (21 %), pero varios gases presentes en cantidades trazan (concentraciones inferiores a una fracción de un porcentaje) tienen un impacto descomunal en el clima terrestre. Estos son gases de efecto invernadero: gases que permiten que la radiación solar atraviese la atmósfera y caliente la Tierra, pero que absorben el calor que la Tierra irradia de vuelta al espacio, atrapándolo como un edredón atrapa el calor corporal para mantenernos calientes en una noche fría. Pequeños cambios en la concentración atmosférica de estos gases (por ejemplo, pasar del 0.02 % al 0.2 % de la atmósfera) pueden provocar grandes cambios en la temperatura y el clima terrestres, marcando la diferencia entre las edades de hielo, cuando los mastodontes vagaban por la Tierra, y el calor sofocante en el que vivieron los dinosaurios (C2ES, s.f.).

Cuadro 1. Principales gases de efecto invernadero de la atmosfera terrestre (CEPSA, 2015).

De origen natural y antropogénico	De origen antropogénico
Vapor de agua (H ₂ O)	Hexafluoruro de azufre (SF ₆)
Dióxido de carbono (CO ₂)	Hidrofluorocarbonos (HFC's)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Perfluorocarbonos (PFC's)
Metano (CH ₄)	
Ozono (O ₃)	

3.1.3. Emisiones e impacto de GEI provenientes del sector agropecuario en El Salvador. El Salvador representa aproximadamente un 0.03% de las emisiones de gases de efecto invernadero globales. Las emisiones de GEI en El Salvador del sector de agricultura, silvicultura y cambio de uso de suelo fueron aproximadamente 57.8% de las emisiones totales del país, equivalentes a 11,793.6 Kt CO₂eq netas (Braude *et al.*, 2025).

Las emisiones de CO₂ per cápita en El Salvador equivalen a 1.27 toneladas por persona (con base en una población de 6.280.319 en 2022), un aumento de 0.06 respecto a la cifra de 1.21 toneladas de CO₂ por persona registrada en 2021; lo que representa un cambio del 5.2% en las emisiones de CO₂ per cápita entre el año 2022 al 2021 (Worldmeter, s.f.).

Las emisiones de CO₂ de origen fósil aumentaron un 5,62% con respecto al año anterior, lo que representa un aumento de 424.400 toneladas en comparación con 2021, cuando las emisiones de CO₂ fueron de 7.548.030 toneladas, por lo que, las emisiones en total en el año 2022 fueron de 7.972.430 toneladas (Figura 1). (Worldmeter, s.f).

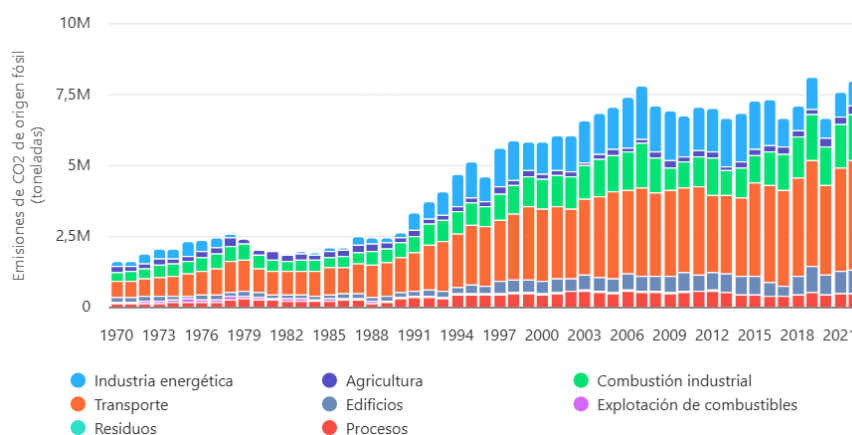


Figura 1. Emisiones de CO₂ de El Salvador por año y sector en unidades de toneladas (Worldometer, s.f).

El sector agricultura presenta alta sensibilidad debido a la dependencia de la agricultura de secano, la degradación de suelos y la concentración de la producción en zonas expuestas como la zona centro, centro-este, norte-oeste, corredor seco oriental y áreas costeras. Se proyectan pérdidas en los subsectores granos básicos, caña de azúcar, ganadería y café por estrés hídrico, plagas, enfermedades y daños por lluvias extremas; junto con disminuciones en la productividad pesquera y acuícola asociadas al aumento de la temperatura del agua, especies invasoras y blanqueamiento de corales (MARN, 2025).

3.1.4. Mitigaciones del cambio climático El Salvador. A partir de la modificación de la Ley de Medio Ambiente en 2012, se elaboró el Plan Nacional de Cambio Climático lanzado en 2015. Dicho plan se constituyó con el objetivo de articular acciones para lograr una mayor resiliencia ante el cambio climático y la reducción de los riesgos e impactos económicos, sociales y ambientales, y potenciar así el desarrollo sostenible e incluyente del país. A nivel institucional se destacan la Política de Cambio Climático para el Sector Agropecuario, Forestal, Pesquero y Acuícola, iniciativa del MAG; y, por parte del MARN, el Plan Nacional de Cambio Climático y Gestión de Riesgos Agroclimáticos orientado al mismo sector (Braude *et al.*, 2025).

Además, El Salvador lidera la Iniciativa AFOLU 2040 (Agriculture, Forestry and Other Land Use), para Centroamérica y República Dominicana, que tiene el objetivo de reducir las emisiones de carbono en los sectores de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra en la región. Se apunta a trazar una estrategia sinérgica entre mitigación y adaptación, con efectos positivos en la conservación de la biodiversidad y la seguridad alimentaria. Elaborada y liderada por el MARN, se plantea como metas la restauración y conservación de 10 millones de hectáreas de tierras y ecosistemas degradados para el año 2030, y la neutralidad de carbono en el sector AFOLU para el año 2040. (Braude *et al.*, 2025).

A su vez, el Gobierno lanzó en 2023 la Acción Construcción de la NAMA (Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación o en Ingles Nationally Appropriate Mitigation Actions) en Ganadería Bovina de El Salvador. La NAMA tiene como finalidad impulsar una ganadería sustentable y baja en emisiones de GEI, además de aumentar la capacidad de resiliencia ante los efectos del cambio climático, la eficiencia de los sistemas de producción ganadera en relación con el carbono y el agua, y el desarrollo de las cadenas de valor alimentarias (Braude *et al.*, 2025).

3.1.5. Servicios ecosistémicos de árboles en fincas ganaderas. Los sistemas silvopastoriles son la combinación de la ganadería con diferentes especies vegetales, tales como gramíneas, leguminosas (herbáceas y arbustivas), leñosas perennes y árboles (forestales y frutales, etc.), que brindan beneficios tanto ambientales como productivos. Los beneficios generados por estos sistemas incluyen la reducción en la aplicación de insumos externos, la fijación de nitrógeno a nivel del suelo, confort animal por reducción del estrés calórico, reducción en los ciclos productivos y mejoramiento en la calidad de la dieta, ya que el ganado puede consumir el forraje, producido en los sistemas silvopastoriles, directamente en el sitio o se puede cortar y acarrear para ofrecerlo en comederos. El término “silvopastoril” abarca una gran variedad de arreglos, entre ellos, cercas vivas, surcos dentro de la pradera, árboles dispersos, plantaciones de árboles (maderables y frutales) y bancos forrajeros. Los SSP son, por tanto, una práctica agroforestal que combina árboles o arbustos con praderas y ganado, con el objetivo de obtener productos forestales madereros (madera, postes, leña, carbón) y (frutos, miel, hongos y otros), productos derivados del ganado (carne, lana, leche y otros) y forraje de la pradera. Permiten además mejorar las relaciones de los sistemas arbóreos, hídricos y, sobre todo, la protección del recurso suelo. También favorecen la relación armoniosa con el medio ambiente y la protección de especies animales endémicas, al servir como refugios y formar franjas de árboles que se conectan a los parches de bosques que existen en las fincas ganaderas (Sotelo *et al.*, 2017).

3.2. Sistemas silvopastoriles como medida para reducir o mitigar CO₂

3.2.1. Cercas vivas vistas desde su rol ecológico. Las cercas vivas son utilizadas para dividir potreros, parcelas de cultivos y linderos de la finca. Estas cercas están conformadas por una sola línea de árboles. La siembra de árboles en las cercas sustituye gradualmente las cercas muertas. Los estacones o prendedizos son sembrados poco a poco, hasta reemplazar todos los postes (PROGRESA *et al.*, 2015).

Ofrecen varios beneficios, tales como la producción de alimento para el ganado, que puede estar disponible en la época seca, ofrecen sombra al ganado en las horas de mucho sol y

refugio cuando hay lluvias fuertes. Además, en comparación con las cercas de postes, las cercas vivas duran más tiempo y los costos de instalación y mantenimiento son considerablemente menores. Sirven para producir postes para cercar la misma finca. (PROGRESA *et al.*, 2015).

En ese sentido, el IPCC, (2007) resalta la importancia de los árboles en la mitigación del cambio climático al regular el ciclo global del C, siendo las plantaciones del trópico las de mayor velocidad de crecimiento, que aumenta su capacidad en el secuestro de Carbono y la entrega de otros servicios ecosistémicos beneficiosos para la población y el planeta, actúan como eficientes sumideros naturales fijando carbono en su biomasa (troncos, ramas, raíces) y en el suelo. Estas estructuras mitigan el cambio climático, mejoran la biodiversidad al funcionar como corredores biológicos, conservan el agua y el suelo, y generan oxígeno, mejorando el microclima (Herrera *et al.*, 2022).

3.2.2. Árboles dispersos en los potreros. Biomasa individual significativa por diámetros grandes y bienestar animal por árboles dispersos en potreros. El manejo de los árboles es estratégico para garantizar el equilibrio en los sistemas silvopastoriles. Además de mantener la productividad de los pastos y mejorar la calidad de la madera remanente, el forraje en este sistema presenta un alto contenido de proteína cruda en comparación con un modelo ganadero tradicional sin árboles, lo que indica una mayor calidad alimentaria para los animales (Morillo *et al.*, 2023).

Este avance es significativo porque mantener la producción de forraje en sistemas integrados con árboles es un desafío para los agricultores, ya que el desarrollo de los pastos depende de la incidencia de la luz. La disminución de la radiación afecta el crecimiento de estas plantas, lo que podría resultar en una menor productividad ganadera (Morillo *et al.*, 2023).

Los sistemas silvopastoriles son opciones sostenibles para que los ganaderos intensifiquen sus pastos. Al integrar árboles en la ganadería, los productores brindan bienestar animal y contribuyen a la eliminación de carbono atmosférico y a la mitigación de las emisiones de

gases de efecto invernadero. Además, el componente arbóreo es una buena opción para asegurar créditos de carbono en el futuro, ofreciendo una nueva alternativa de ingresos (Morillo *et al.*, 2023).

En América Central, los productores introducen árboles en los potreros para proveer sombra a los animales y obtener beneficios adicionales como leña y madera. En la zona de cañas, el 90 % de las fincas tiene árboles en potreros, siendo Caulote (*Guazuma ulmifolia*), conacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), carreto (*Samanea saman*) y laurel (*Cordia alliodora*) las especies principales (Morillo *et al.*, 2023).

3.2.3. Relación del diámetro a la altura del pecho con la biomasa de los árboles.

La reserva de carbono en un árbol individual depende de su tamaño. Los árboles con troncos de 10-19 cm de diámetro pueden tener una biomasa de aproximadamente 135 kg/árbol. Con aproximadamente 900 árboles por ha, la biomasa asociada correspondiente es de 121.50 t/ha (60.75 Mg de C ha⁻¹). Aun así, la mayor cantidad de biomasa se encuentra en los escasos árboles realmente grandes. Con un diámetro a la altura del pecho menor o igual a 70 cm, la biomasa por árbol podría ser de aproximadamente 20,000 kg (20 t). Con 10 árboles/ha, la correspondiente biomasa sería de aproximadamente 200 t/ha (100 Mg ha⁻¹). La tabla que figura a continuación resume este ejemplo. Por lo tanto, las implicancias de los grandes árboles en la biomasa (y en el carbono) por hectárea son muy significativas (Melgar y Marroquin, 2017).

Tabla 1. Relación de DAP con biomasa de los árboles (Melgar & Marroquin, 2017).

DAP (cm)	Kg/árbol	N° de árboles/ha	Masa (t/ha)	C en Mg ha ⁻¹
10-19	135	900	121.15	60.58
20-29	2,250	70	157.50	78.75
30-49	8,500	20	170	85.00
50-70	20,000	10	200	100.00

3.3. Fundamentos de la estimación de biomasa

3.3.1. Variables dendrométricas. Generalmente, la medición de variables de un árbol se realiza con el objetivo final de estimar el volumen y el crecimiento de la masa forestal (por agregación de los volúmenes y crecimientos de los árboles individuales), para la asignación de calidades de estación, para la realización de modelos de simulación del estado de la masa, etc. (Felix, 2014).

3.3.2. Diámetro. El diámetro “d”, es la variable más habitualmente medida e los inventarios forestales y se suele expresar en centímetros o milímetros. A lo largo del fuste de un árbol, y considerando que las secciones fuesen circulares, se podría medir un diámetro en cada uno de sus puntos. De todos ellos, el denominado diámetro normal o diámetro a la altura del pecho (medido a la llamada altura normal, que se fija a 1.30 m sobre el nivel del suelo), es probablemente, la medición más común en árboles en pie (Felix, 2014).

3.3.3. Altura. Definimos como altura del árbol en pie (h) a la distancia entre su cima y la zona de la base del árbol en contacto con el suelo. Se entiende por cima o ápice del árbol a la parte más alta de la copa y del mismo que sea la prolongación del eje del tronco. Todos los instrumentos de medición indirecta de la altura de un árbol en pie están basados en el lanzamiento de visuales al ápice y a la base del árbol desde una determinada distancia; por lo tanto, es necesario tener estos puntos claramente localizados (Felix, 2014).

3.3.4. Método indirecto. La medición se efectúa a distancia, a través de instrumentos llamados hipsómetros, que pueden ser contruidos por semejanza de triángulos (principios geométricos) o relaciones angulares de triángulos rectángulos (principios trigonométricos). Los instrumentos contruidos por principios geométricos producen errores de estimación de hasta el 5% del valor real (Felix, 2014).

3.4. Ecuaciones alométricas

Los modelos matemáticos, conocidos como ecuaciones alométricas, establecen relaciones cuantitativas entre atributos arbóreos fácilmente medibles, como el diámetro a la altura del pecho o la altura del tronco, y parámetros más difíciles de medir, como la biomasa o las reservas de carbono (SD, 2024).

La principal aplicación de estas ecuaciones en la sostenibilidad se centra en el secuestro de carbono. Gobiernos, grupos conservacionistas y científicos del clima utilizan estos modelos para evaluar con precisión las reservas de carbono en los bosques, vitales para alcanzar los objetivos climáticos globales (SD, 2024).

3.5. Densidad de la madera

El concepto de densidad en forestal se relaciona con el grado en que un sitio está utilizado por los árboles. Existen en literatura dos términos generales para expresar densidad. Por un lado, está la expresión absoluta de densidad, que señala la cantidad de madera o grado de amontonamiento de árboles en un área, así se utilizan indicadores como área basal (m^2/ha), número de árboles (n/ha) y cobertura de copas por unidad de superficie, entre otros (Felix, 2014).

3.6. Biomasa

La biomasa forestal, es la cantidad total de materia viva existente en un ecosistema forestal. Incluye todos los componentes que forman el ecosistema, como árboles, arbustos y otros vegetales. Normalmente es expresada en toneladas de materia seca/hectárea, razón por la cual se suele usar el concepto de densidad de biomasa para referirse a esta variable (Felix, 2014).

3.6.1. Componentes de la biomasa. La biomasa forestal está conformada por componentes de variada complejidad y accesibilidad. Por ello, su estimación requiere la identificación inicial de estos componentes y el diseño de la estrategia adecuada de medición o estimación. Desde el punto de vista de una comunidad forestal, y dependiendo de los objetivos específicos del estudio, la biomasa puede dividirse espacialmente en biomasa aérea, la que incluye toda la biomasa viva sobre el suelo (biomasa del dosel principal, biomasa del sotobosque) y desechos leñosos (biomasa de residuos en pie, colgantes y sobre la superficie del suelo), y biomasa subterránea, incluyendo los componentes leñosos vivos y muertos de los sistemas radiculares. En el caso específico de árboles, los componentes habituales para la separación de biomasa son raíces, ramas, follaje, madera de fuste y corteza (Felix, 2014).

3.7. Cálculo de variables

El cálculo de la biomasa total aérea varía con los diferentes estratos, o de forma más precisa, con las diferentes especies encontradas en las parcelas. Las metodologías del cálculo que se presentan se dividen en (MARN, 2018):

- Metodologías del cálculo de la biomasa para bosque latifoliado.
- Metodologías del cálculo de biomasa para bosque de coníferas.
- Metodologías de cálculo de biomasa para el cafetal bajo sombra.
- Metodologías de cálculo de biomasa para el bosque salado.

3.7.1. Cálculo de la biomasa aérea en el bosque latifoliado. De acuerdo con MARN (2018), la biomasa aérea de un árbol se calcula como:

Formula 1. *Cálculo de biomasa aérea*

$$AGB = 0.0509 \times \rho \times DAP^2 \times H$$

Donde

ρ = Gravedad específica (g/cm³).

DAP= Diámetro a la altura del pecho (cm).

H= Altura (m).

Esta ecuación está generada con datos de DAP hasta 156 cm, por lo que, a partir de esos diámetros, los resultados son aproximados. Por otra parte, esta ecuación es de aplicación para bosques húmedos, bosques donde la evapotranspiración excede la precipitación entre más de un mes al año y menos de cinco meses, con una precipitación entre 1500 – 3500 mm/año, condiciones que se dan en la mayoría del territorio salvadoreño (MARN, 2018).

Para las gravedades específicas se han consultado referencias bibliográficas, añadiendo los datos reales de las especies de las que se dispone de información, y valores promedio para el resto. La fuente de datos principal han sido los datos del IPCC, que a su vez provienen de diferentes fuentes (Anexo A-11). En caso de que una misma especie tuviese diferentes gravedades específicas, según diferentes fuentes bibliográficas, se ha empleado un promedio, a excepción del caso de la existencia del dato para el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, IPCC, por su sigla en inglés, que ha sido el empleado (sin promediar) siempre que se ha dispuesto del mismo (MARN, 2018).

3.7.2. Cálculo de biomasa subterránea. Para calcular la biomasa subterránea (raíz) a partir de la biomasa aérea (parte aérea de la planta), se usan relaciones alométricas o coeficientes de raíz a tallo. Es un procedimiento muy común en estudios forestales y silvopastoriles (MARN, 2018).

De acuerdo con MARN (2021), la biomasa subterránea de un árbol se calcula como:

Formula 2. *Cálculo de biomasa subterránea*

$$BGB= B_a \times 0.42$$

Donde:

B_a= Biomasa aérea.

3.7.3. Cálculo de los componentes de carbono. Los componentes de carbono calculados para el INB (Inventario Nacional de Bosque) de El Salvador son los recogidos en usos AFOLU (Agriculture, Forestry and Other land Use en IPCC, 2006) (MARN, 2018).

3.7.4. CO₂ de los árboles (DAP igual o mayor a 10 cm y DAP inferior a 10 cm y superior a 2 cm). Para el cálculo del CO₂ fijado por los árboles se debe calcular primero el carbono asociado al componente árbol. El carbono aéreo (en toneladas) es calculado usando la fracción de carbono de la literatura para especies o bosques tropicales. El contenido de carbono de la biomasa se estima en un 47 % según el IPCC (MARN, 2018).

De acuerdo con MARN (2021), el carbono aéreo de un árbol se calcula como:

Formula 3. *Cálculo de carbono almacenado*

$$C_A = B \times 0.47$$

Donde

B= Biomasa total

El dióxido de carbono fijado es calculado usando el carbono de la biomasa total, multiplicado por la constante 44/12, ratio de pesos moleculares, según indicado en IPCC (MARN, 2018).

De acuerdo con MARN (2018), el carbono aéreo de un árbol se calcula como:

Formula 4. *Cálculo de carbono aéreo*

$$CO_{2fijado} = C \times (44/12)$$

Donde

C= Carbono de biomasa total

3.8. Marco legal internacional: Contribuciones nacionales determinadas (NDC)

Las NDC son instrumentos clave mediante los cuales los países establecen sus compromisos nacionales para enfrentar los efectos del cambio climático, reducir la emisión de gases de efecto invernadero, así como para evidenciar la política climática, el compromiso y la articulación sectorial. El Salvador presentó su primera NDC en 2015, realizó una actualización en 2022 y ahora inicia oficialmente el proceso para configurar las NDC 3.0 (PNUD, 2025).

El país trabaja en ocho sectores priorizados en las áreas de energía, generación hidroeléctrica, transporte, agricultura y uso de la tierra (AFOLU); biodiversidad y ecosistemas; ciudades e infraestructura; recursos hídricos, saneamiento y gestión de residuos sólidos y salud. Para la implementación efectiva de la gestión climática, se han formulado 11 planes sectoriales, 139 acciones estratégicas (PNUD, 2025).

El Salvador, a través del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ente rector de la política ambiental del país, y con el respaldo del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), realizó el lanzamiento de la actualización de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas, en el marco del Acuerdo de París (PNUD, 2025).

3.8.1. Medidas de respuesta en Sector AFOLU (Agricultura, silvicultura y uso del suelo). Para el sector AFOLU, con base en un enfoque «de abajo hacia arriba», El Salvador estará acumulando una reducción de emisiones de 50,857.5 Kton CO₂ Eq, mediante actividades de reducción de emisiones y actividades de aumento de sumideros y reservorios de carbono, en el paisaje agropecuario del país. Estas emisiones son adicionales y serán contadas, registradas y reportadas por el Estado salvadoreño en las categorías, actividades y fuentes de emisión del sector AFOLU, incluyendo cuando se refiera a otros compromisos de monitoreo, reporte y verificación ante la CMNUCC, además de la NDC, por ejemplo: en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de los Informes Bienales y las Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático (MARN, 2021).

Meta: Reducción de emisiones de GEI e incremento de sumideros y reservorios de carbono por acciones de restauración y rehabilitación de tierras degradadas en el paisaje agropecuario, y una transición hacia una agricultura y ganadería baja en carbono, que incluye sistemas agroforestales, prácticas bajas en emisiones de GEI y restauración de suelos degradados en seis categorías de uso del suelo actuales: cultivos de maíz y frijol, pastizales, mosaicos de cultivos y pastizales, mosaicos de cultivos, pastizales y vegetación (MARN, 2021).

Tabla 2. Resultados de mitigación para las categorías de Uso del Suelo actuales y las propuestas de transición, según capacidad de mitigación y áreas correspondientes (MARN,2021).

Categoría. Uso actual del suelo	Propuesta. Transición de uso del suelo	Area potencial (ha)	Capacidad de mitigación. (ton CO ₂ Eq/ha).	Mitigación por categoría. (ton CO ₂ Eq)
Cultivos de maíz y frijol	Sistemas agroforestales	359,208	84	30,173,472
Pastizales	Sistemas silvopastoriles	195,590	10	1,955,900
Mosaico de cultivos y pastizales	Sistemas agrosilvopastoriles	84,536	37	3,127,832

Mosaico de cultivos, pastizales y vegetación <900 msnm	Sistemas agroforestales (incluyendo cacao)	82,716	94	7,735,304
Caña de azúcar con prácticas de quema	Cosecha mecanizada (zafra verde)	77,441	70	5,420,870
Mosaico de cultivos y pastizales, maíz y frijol, vegetación y caña de azúcar	Rehabilitación de bosques de ribera	18,930	127	2,404,110
TOTAL				50,857,488

3.8.2. Normativa e institucionalización en Sector AFOLU (Agricultura, silvicultura y uso del suelo)

- En el marco normativo para el cumplimiento de la NDC actualizada en el sector AFOLU/ Agricultura, se propone lo siguiente (MARN, 2021):
- Actualización del marco de Política, Plan y Estrategia sobre cambio climático para el Sector Agropecuario, Forestal, Pesquero y Acuícola de El Salvador. Incluye la elaboración e implementación del Plan Maestro de Rescate Agropecuario; elaboración de la Política Nacional Agropecuaria; actualización de la Ley Forestal y su reglamento; revisión, ajuste y aprobación del anteproyecto Ley de Incentivos Forestales.
- Ejecución del Plan de Lucha contra la deforestación, erosión y desertificación, alineado a la convención de Naciones Unidas contra la lucha de la diversificación.
- Ejecución del Plan Nacional de Reforestación, elaborado entre MARN y MAG.
- Revisión de normativas sobre uso de agroquímicos, revisión para la coherencia del Código Penal y legislación apegada al uso del fuego y las quemas agrícolas; uso adecuado del recurso hídrico y los instrumentos vinculantes.
- Elaboración del plan de acción para la implementación de proyectos comunitarios de biodigestores para la producción de fertilizantes orgánicos, a partir del manejo sustentable de residuos pecuarios.
- Elaboración de guías para el adecuado manejo y aprovechamiento de residuos pecuarios proyectos de biodigestores (MARN, 2021).

4. METODOLOGIA

4.1. Localización

La institución encargada para llevar a cabo los objetivos de la investigación ha sido El Instituto de Investigación en Ciencias Agroalimentarias y Ambientales que se encuentra ubicado en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, Autopista Norte y final 25 Avenida Norte, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador. Sus coordenadas geográficas son 13°43'08.13"N 89°12'02.49"O (Figura 2).



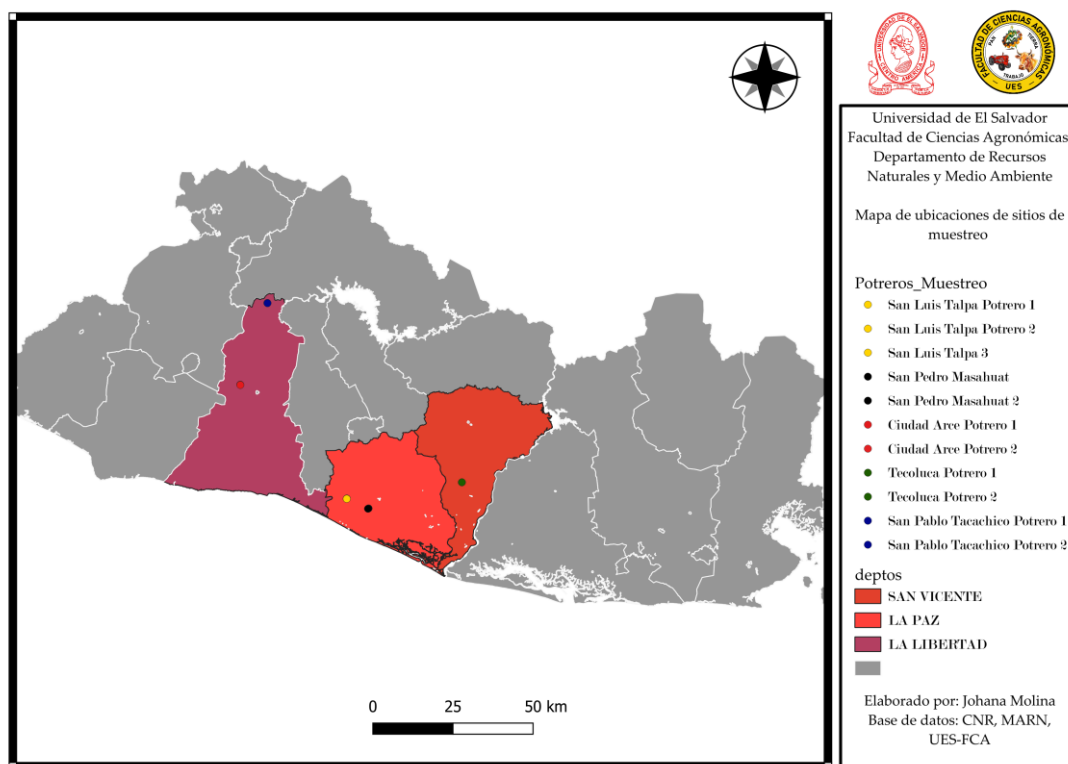
Figura 2. Ubicación de Instituto de Investigación en Ciencias Agroalimentarias y Ambientales (Google Earth, 2015).

4.2. Metodología de campo

La metodología de campo se desarrolló con visitas en ganaderías de lugares pertenecientes a El Salvador que ofrecieron su disponibilidad para el muestreo de los diferentes datos alométricos, para el traslado hacia estas ganaderías se contó con el apoyo del Instituto de Investigación en Ciencias Agroalimentarias y ambientales, las ganaderías que fueron visitadas poseen las siguientes ubicaciones (Tabla 3):

Tabla 3. Coordenadas de los lugares de muestreo en la investigación.

Lugar de muestreo	N° Potrero	Coordenada	Area (m ²)	Perímetro (m)
Distrito San Luis Talpa	1	13°28'17.9"N 89°05'47.2"W	6,034.64	384.53
	2	13°28'15.5"N 89°05'48.4"W	6,319.59	395.15
	3	13°28'14.19"N 89°05'48.72"W	6,928.55	404.38
Distrito Ciudad Arce	1	13°48'03"N 89°24'15"W	12,837.62	465.3
	2	13°47'59"N 89°24'14"W	9,167.97	412.69
Distrito San Pedro Masahuat	1	13°26'35"N 89°02'01"W	25,967.1	700.68
	2	13°26'32"N 89°02'07"W	7,326.47	354.27
Distrito San Pablo Tacachico	1	14°02'12.5"N 89°19'28.7"W	6,526.77	312.69
	2	14°02'10.3"N 89°19'31.6"W	6,430.5	392.85
Distrito Tecoluca	1	13°31'06.4"N 88°45'51.5"W	2,128.17	194.59
	2	88°45'50.6"W 13°31'07.6"N	4,818.95	291.89

Fuente: Elaboración propia**Figura 3.** Mapa de ubicaciones de sitios de muestreo en el Mapa de El Salvador.

Cada visita se desarrolló de la siguiente manera:

4.3. Registro y cuantificación de biomasa por área específica

En cada ganadería se realizaron mediciones del área de los potreros, cercas vivas y árboles dispersos que lo conforman, para posteriormente registrar y cuantificar la cantidad de biomasa existente.

Las mediciones que se ejecutaron en el desarrollo de la pasantía:

- **Registro de extensión de la cerca viva y área total:** Para desarrollar esta actividad se hizo uso de la herramienta tecnológica denominada “Sistemas de información geográfica”, al ubicarse en el terreno se tomó el dato de las coordenadas geográficas para posteriormente buscarlas en la aplicación Google earth y estimar los metros lineales específicos a partir de la creación de polígonos.

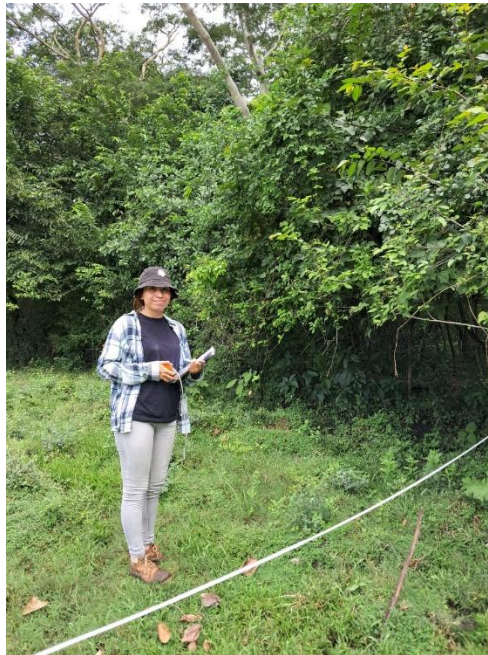


Figura 4. Toma de datos en campo.

- **Conteo de árboles en la cerca viva:** Al inicio de la cerca se tomó como punto de partida la medición de 5 metros de los cuales, luego se midieron 20 metros lineales,

a partir de ello se comenzó el conteo de las especies que estaban delimitadas dentro de esta medida en las cercas vivas para tomar los datos específicos (Figura 5).

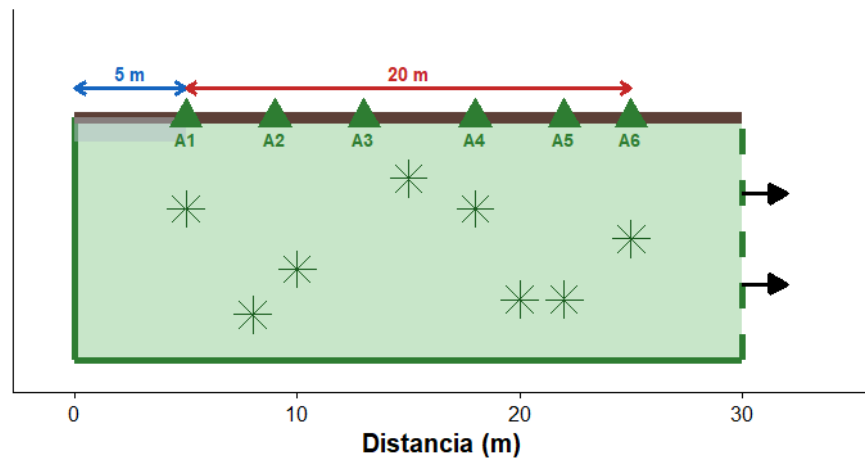


Figura 5. Esquema de medición en cercas vivas y árboles dispersos.



Figura 6. Conteo de árboles y medida del área de muestreo en cercas vivas.

- **Diámetro a la altura del pecho:** Se obtuvo de acuerdo con el tronco de los árboles pertenecientes a la muestra, primero se estimó 1.30 metros sobre el nivel del suelo al tronco del árbol, y luego se midió la circunferencia del tronco, al realizar esta acción se utilizó una cinta diamétrica para la medición de árbol a la altura del pecho, y se registró el dato obtenido.



Figura 7. Cinta diamétrica para medición de DAP.



Figura 8. Demostración de toma de datos de DAP en árboles.



Figura 9. Registro de diámetro a la altura de pecho en árboles.

- **Altura del árbol con clinómetro:** Se midió la distancia horizontal al árbol y el ángulo de elevación hacia la copa del árbol (Figura 11), utilizando el instrumento clinómetro (Figura 10) para posteriormente ejecutar una fórmula trigonométrica para estimar el valor de altura.

De acuerdo con Félix (2014), la altura de un árbol se puede medir a partir de la siguiente formula trigonométrica:

Formula 5. Cálculo de medición indirecta para altura de árboles

$$\text{Tan}\theta = \frac{b \text{ (Opuesto)}}{a \text{ (Adyacente)}}$$

$$b = \text{Tan}\theta * a$$

Donde:

θ = ángulo tomado con clinómetro.

b= Altura a encontrar

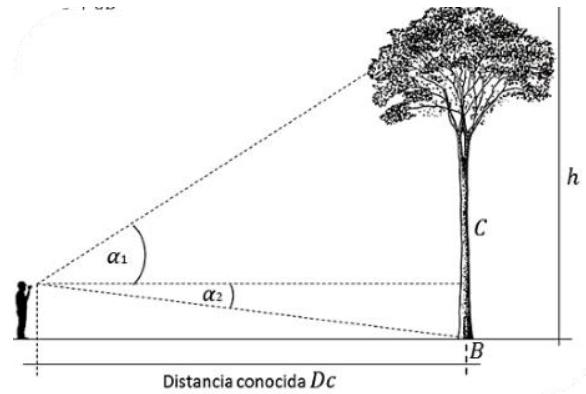


Figura 12. Medición correcta de la altura de un árbol haciendo uso del clinómetro.

Nota. Adaptado de Medición correcta de la altura de un árbol haciendo uso del clinómetro (Félix, 2014).

- **Conteo de árboles dispersos:** para esta actividad se observó en el terreno la cantidad de árboles dispersos que disponía y de acuerdo con ello se tomaron los datos de diámetro a la altura de pecho y altura del árbol para luego registrarlos.



Figura 13. Observación general de terreno.

- **Medición de biomasa:** Para obtener la cantidad de biomasa que posee cada potrero, se utilizaron los datos registrados en las visitas de campo, y se calcularon mediante

fórmulas pertenecientes al Inventario Nacional de Bosque de El Salvador (MARN, 2021).

4.4. Metodología estadística

4.4.1. Tabulación datos recopilados y análisis por visita de campo en diferentes sectores ganaderos de El Salvador. Luego de haber realizado la recolección de información en campo, se creó una base de datos en el procesador Microsoft Excel para la estructuración de forma adecuada de los datos, a partir de la cual se calculó la biomasa, carbono fijado, y total de dióxido de carbono para cada sitio y potrero muestreado. Las fórmulas de los componentes de carbono fueron tomadas de las propuestas en el Inventario Nacional de Bosques de El Salvador (MARN, 2018).

El análisis estadístico descriptivo y la elaboración de figuras (gráficos) se realizaron utilizando el software R versión 4.5.2 con el paquete ggplot2, siguiendo las directrices de visualización de datos propuestas por Wickham et al. (2023). Los gráficos de dispersión para analizar la relación entre el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la biomasa fueron complementados en Microsoft Excel, donde se ajustó una línea de tendencia potencial siguiendo la ecuación alométrica $B = a \cdot (DAP)^b$. Este análisis permitió visualizar el comportamiento general de ambas variables dasométricas y evaluar la tendencia de crecimiento de los árboles en los sitios muestreados.

Se usó también un método descriptivo que es una herramienta que se utiliza para resumir y describir las características principales de un conjunto de datos. En este caso se utilizó para el análisis y descripción de biomasa y dióxido de carbono que se libera en cada potrero dependiendo de la cantidad de árboles dispersos y cercas vivas que posea para la mitigación de gases por efecto de invernadero, en la cual describimos la cantidad de gases que se emiten y mitigan en el área de forma individual y de forma conjunta con los demás sectores que conformaran la investigación.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Creación de registros dasométricos de árboles dispersos y cercas vivas

La primera tabla fue creada desde Microsoft Excel donde se tabularon los datos individuales de cada árbol obtenidos en los diferentes sitios de muestreo. Posteriormente, en las columnas siguientes, se aplicaron cálculos trigonométricos y alométricos para cada árbol muestreado, correspondientes a las distintas variables estudiadas.

Para la agrupación individual de los datos se elaboró una tabla para cercas vivas y otra para árboles dispersos, en las cuales la información se clasificó de acuerdo con el sitio y el potrero muestreado. Con esto se logró generar una tabla resumen que recopiló todos los datos obtenidos a partir de los cálculos correspondientes para cada sistema.

Por último, se elaboró una tabla de datos globales en la que, de acuerdo con cada sitio, se agruparon las cercas vivas y los árboles dispersos, con el fin de obtener datos totales que permitieran una mejor visualización e interpretación de los resultados de ambos sistemas combinados en un mismo entorno (Anexo A-12 al A-14).

5.1.1. Especies arbóreas encontradas. En el muestreo se encontró un total de 134 árboles, de 23 especies diferentes y 16 familias. Los datos se obtuvieron mediante la agrupación del número de individuos de acuerdo con su clasificación y cuantificación en la toma de datos. Se detalla en el siguiente cuadro:

Tabla 4. Especies arbóreas encontradas y promedios de diámetro a la altura del pecho

Nombre científico	Nombre común	Familia	T	DAP (Prom. cm)	Carbono almacenado (kg)
<i>Achatocarpus nigricans</i>	Cuenta de agua	Achatocarpaceae	3	13.20	22.05
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	Carreto	Apocynaceae	2	39.55	580.89
<i>Azadirachta indica</i>	Neem	Meliaceae	12	24.42	176.31
<i>Bursera simaruba</i>	Jiote	Burseraceae	1	17.30	19.23
<i>Byrsonima crassifolia</i>	Verde nance	Malpighiaceae	1	26.50	125.79
<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba	Malvaceae.	1	196	9,719.77
<i>Calophyllum brasiliense</i>	Epate	Calophyllaceae	4	8.99	17.14

<i>Celtis ehrenbergiana</i>	Canfurillo	Cannabaceae	3	10.30	10.55
<i>Citrus aurantium</i>	Naranja amarga	Rutaceae	1	10.75	17.90
<i>Cordia dentata</i>	Tiguilote	Boraginaceae	17	35.04	416.30
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Conacaste	Fabaceae	2	78.65	4,212.06
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Eucalipto	Myrtaceae	3	30.51	858.35
<i>Ficus insípida</i>	Amate	Moraceae	6	44.72	665.97
<i>Ficus obtusifolia</i>	Chilamate	Moraceae	6	43.25	657.00
<i>Gliricidia sepium</i>	Madrecacao	Fabaceae	3	8.02	8.24
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Caulote	Malvaceae	3	32.33	280.83
<i>Jatropha curcas</i>	Tempate	Malvaceae	31	20.08	109.41
<i>Leucaena leucocephala</i>	Leucaena	Fabaceae	1	10.50	21.95
<i>Leucaena salvadorensis</i>	Leucaena	Fabaceae	4	17.39	156.26
<i>Mangifera Indica</i>	Mango	Anacardiaceae	1	10.15	16.06
<i>Pithecellobium oblongum</i>	Mangollano	Fabaceae	9	38.25	490.19
<i>Benth</i>					
<i>Tabebuia rosea</i>	Maquilishuat	Bignoniaceae	16	38.53	503.62
<i>Tabernaemontana</i>	Cojon	Apocynaceae	1	10.20	10.77
<i>Tectona Grandis</i>	Teca	Lamiaceae	3	16.10	49.53
Totales			134		

Las especies de mayor importancia respecto a la captura de carbono son *Ceiba pentandra*, *Enterolobium cyclocarpum* y *Ficus insípida* con 9,719, 4,212 y 665 kg de carbono almacenado. A pesar de que *Jatropha curcas* (*tempate*) posee una mayor cantidad de individuos, no es la especie con mayor cantidad de carbono almacenado, debido a que influye directamente el diámetro a la altura del pecho y su altura.

Esto concuerda con lo reportado de Mildrexler *et al.* (2020) que menciona que un árbol promedio de 25 cm (~10") de diámetro almacena 90–121 kg de AGC, dependiendo de la especie, mientras que un árbol de 50 cm (~20") de diámetro almacena 541–683 kg de AGC. Por lo tanto, duplicar el diámetro del árbol en este rango llevó a un aumento de 5.3–6.2 veces en el AGC. De manera similar, triplicar el diámetro del árbol de 25 cm a 75 cm llevó a un aumento de 13.8–18.2 veces en el AGC, una vez que los árboles alcanzan una gran altura, cada incremento adicional de DAP resulta en una adición significativa a las reservas totales de carbono del árbol, mientras que los árboles de diámetro pequeño deben efectivamente

crecer gradualmente hasta alcanzar un tamaño antes de que la relación entre DAP y AGC resulte en ganancias significativas de carbono.

5.1.2. Familias de las especies arbóreas encontradas. Las 134 especies encontradas se agruparon en 16 familias, de las cuales se tienen las 6 principales en cuanto al número de individuos (Tabla 5).

Tabla 5. Familias de las especies arbóreas encontradas en el estudio.

Familia	Total	Proporción en porcentaje (%)
Bignoniaceae	16	11.94
Boraginaceae	17	12.69
Fabaceae	19	14.18
Malvaceae.	35	26.12
Meliaceae	12	8.96
Moraceae	12	8.96
Otras especies (10)	23	17.19
Total	134	100%

Las familias Malvaceae y Fabaceae son las que agrupan mayor cantidad de especies ambas constituyen un 40.3% de total. Esto permite evidenciar en el estudio que en estudio existen 6 familias que son de mayor presencia en la zona comparado con las otras 10 familias de la categoría otras.

5.2. CO₂ absorbido por cercas vivas y árboles dispersos

La capacidad de absorción de CO₂ puede variar significativamente según la disposición de los árboles en un potrero, como en cercas vivas o en sistemas de árboles dispersos. Estas diferencias responden a variaciones en la densidad, estructura y composición de la vegetación, lo que influye directamente en la cantidad de carbono que puede ser capturado y almacenado.

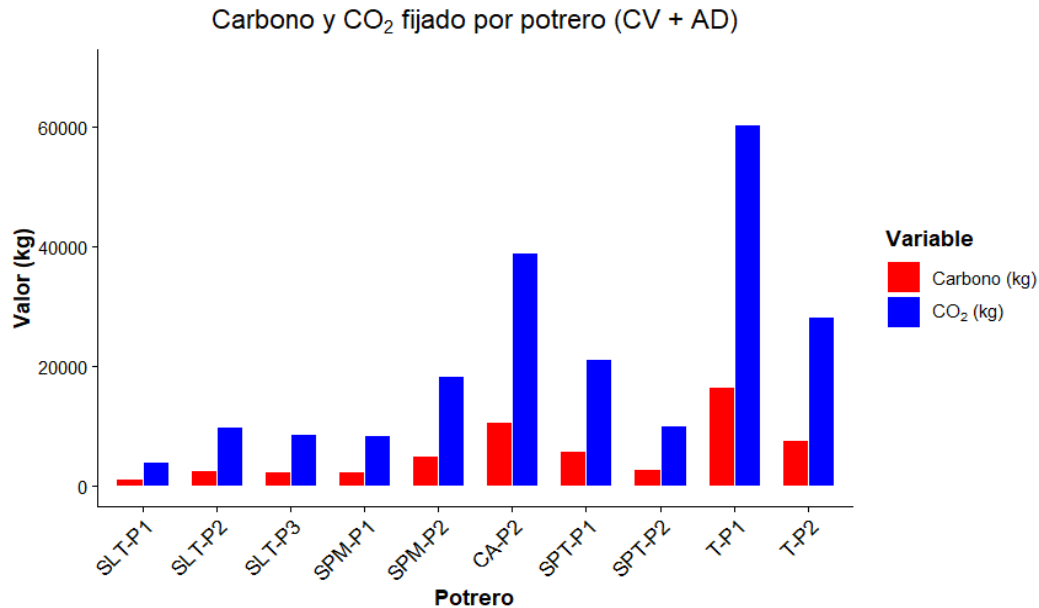


Figura 14. Carbono almacenado y CO₂ (kg) fijado por potrero en cercas vivas y árboles dispersos

Nota. CV =cercas vivas; AD=árboles dispersos; CO₂=dióxido de carbono almacenado total (kg); C= carbono almacenado total (kg). SLT= San Luis Talpa; SPM= San Pedro Masahuat; CA= Ciudad Arce; SPT= San Pablo Tacachico; T= Tecoluca; P1= Potrero 1; P2= Potrero 2; P3= Potrero 3.

Al analizar los datos se determina que se genera mayor absorción de dióxido de carbono y fijación de carbono en los sistemas que poseen cercas vivas y árboles dispersos a comparación de los sistemas que solo poseen cercas vivas.

Esto refleja la importancia de la incorporación de árboles dispersos en las parcelas de los productores, ya que se traduce a mayores concentraciones de carbono fijado y absorción de dióxido de carbono.

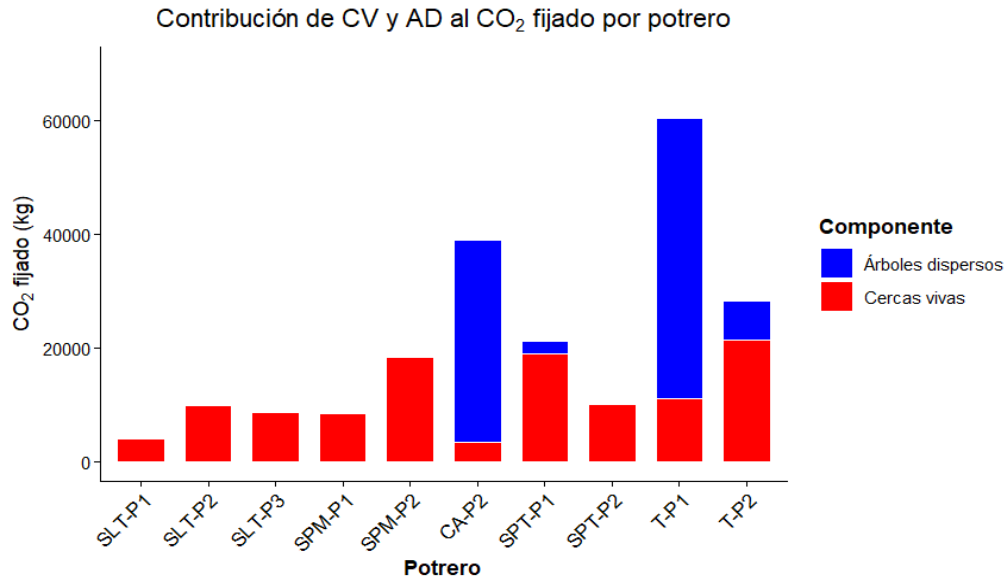


Figura 15. Contribución de dióxido de carbono fijado de acuerdo con las cercas vivas y árboles dispersos por potrero.

De acuerdo con los datos mostrados podemos observar que el sistema que posee mayor contribución de CO₂ en las parcelas son los árboles dispersos, puesto que estos mostraron mayor cantidad de grosor en sus tallos reflejado en el DAP, a comparación del sistema de cercas vivas el cual posee mayor cantidad de árboles, pero una disminución en el diámetro a la altura del pecho.

Fatimah *et al.* (2024), menciona que se documentaron investigaciones con tasas de secuestro de carbono más altas en los ecosistemas forestales del norte de Pakistán, donde las densidades de carbono eran más altas. Estas áreas, típicamente caracterizadas por bosques maduros y una urbanización mínima, albergan árboles más grandes y bien establecidos, lo que permite un mayor almacenamiento de carbono. Por el contrario, los bosques urbanos exhiben densidades de carbono mucho más bajas.

Esto demuestra la influencia que poseen los árboles con mayor altura y grosor en sus tallos a comparación con árboles con menor DAP y menor altura para la absorción y fijación de CO₂.

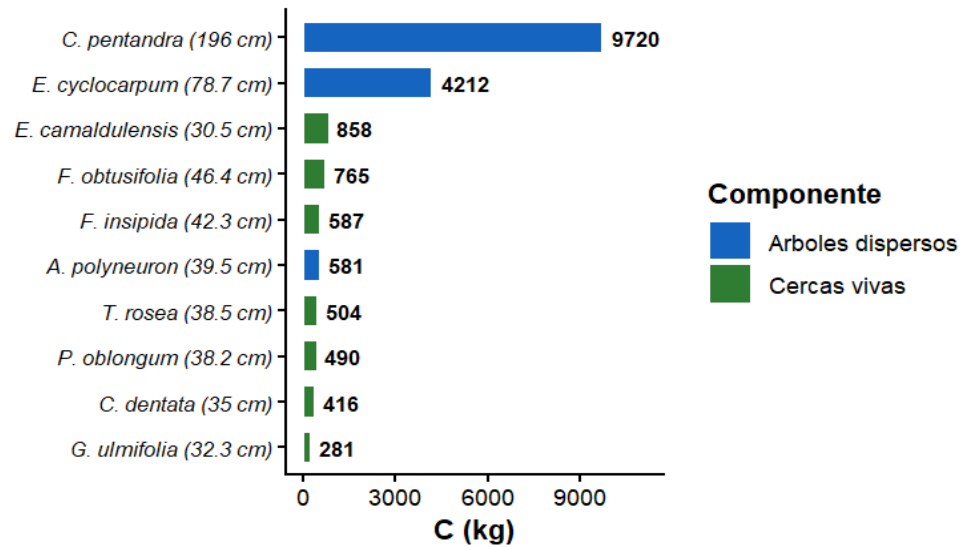


Figura 16. Especies con mayor carbono fijado promedio

Nota. CV= cercas vivas; AD= árboles dispersos; C=carbono almacenado.

Se puede observar que las especies con mayor carbono fijado fueron pertenecientes al sistema de árboles dispersos los cuales fueron *C. pentandra* (ceiba) y *E. cyclocarpum* (conacaste). Los cuales en el muestreo realizado fueron de los árboles con mayor cantidad de biomasa, DAP y altura.

5.3. Indicadores de captura de carbono potencial para los sistemas evaluados

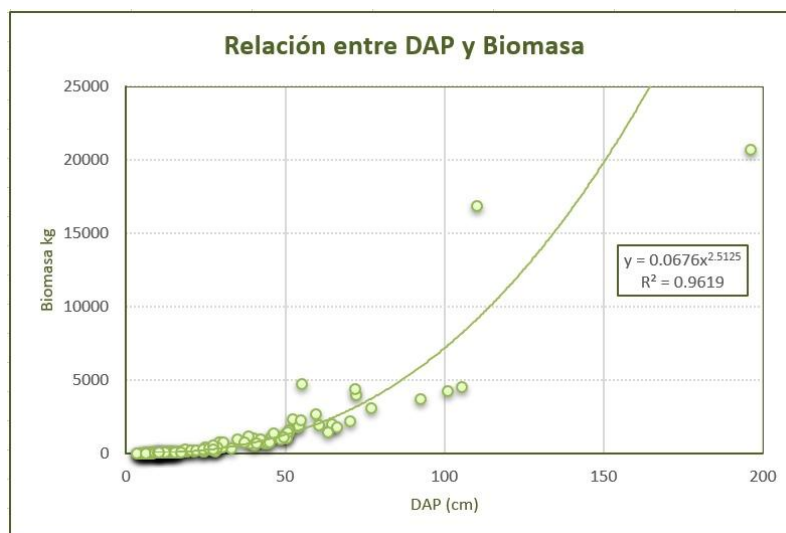


Figura 17. Relación diámetro a la altura del pecho entre biomasa por árbol, R^2

=Coeficiente de correlación; x =DAP; y =Biomasa

El gráfico de dispersión muestra una relación positiva y no lineal entre el diámetro a la altura del pecho y la biomasa por árbol. De acuerdo con $R^2 = 0.9619$ nos indica que a medida que el DAP aumenta, la biomasa se incrementa de forma acelerada, lo que evidencia una relación alométrica típica de especies arbóreas. Aunque existe cierta dispersión en los datos, la tendencia general es clara, indicando que el DAP es un buen predictor de la biomasa. Además, se observan ligeras diferencias entre los componentes evaluados, así como algunos valores atípicos que podrían estar asociados a variaciones en especies o condiciones de crecimiento.

De acuerdo con Gómez *et al.* (2011) en su investigación se generaron datos sobre la relación entre la biomasa y el DAP en especies arbóreas. A partir de una ecuación de regresión desarrollada para la especie Encino o *Quercus magnoliaefolia*, se logró predecir satisfactoriamente la biomasa en función del DAP, obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.98$ ($P < 0.001$).

Con base en ello, se puede contrastar la información obtenida en el presente estudio, en el cual se evidencia una relación positiva entre la biomasa y el DAP, confirmando que a mayor DAP, mayor es la biomasa, y viceversa.

Relación entre DAP y altura en árboles de cercas vivas

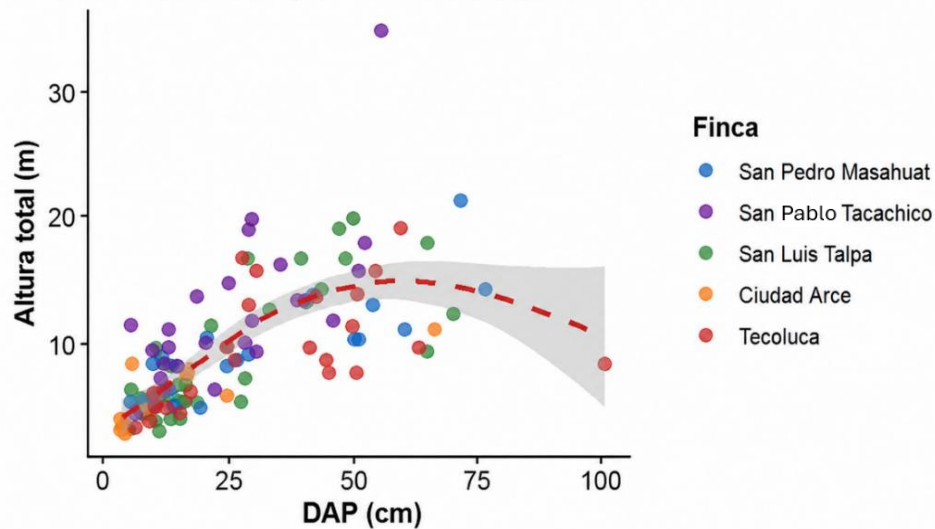


Figura 18. Relación entre DAP y altura en árboles de cercas vivas.

Se tiene un gráfico de dispersión el cual posee una línea de tendencia no lineal y una relación positiva entre sus variables, se observa que, al principio, los árboles más gruesos tienden a ser más altos; sin embargo, a medida que el diámetro aumenta, la altura deja de crecer tanto e incluso puede disminuir ligeramente. Esto ocurre porque el crecimiento de los árboles no es constante; en etapas tempranas la altura y el diámetro aumentan de forma similar, pero en etapas posteriores el crecimiento se concentra en el diámetro, generando una relación no lineal entre ambas variables.

De acuerdo con Delgado *et al.* (2005), el DAP explica mucha de las variaciones en altura y como resultado, la relación alométrica DAP-altura ha sido utilizada como uno de los factores en el estudio de la dinámica de crecimiento del bosque. Esta relación ha sido también empleada para demostrar que el diámetro se incrementa a una tasa más rápida que la altura durante el crecimiento, como lo predicho por los modelos biomecánicos.

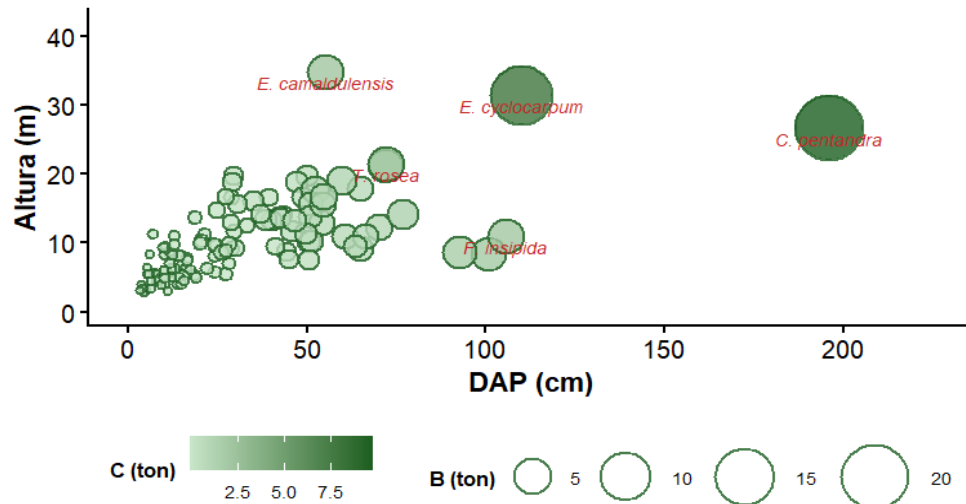


Figura 19. Relación de DAP, altura, biomasa y carbono fijado en cercas vivas y árboles dispersos. B= biomasa en toneladas; C= carbono en toneladas.

Se muestra un gráfico de dispersión donde la relación entre DAP, altura y biomasa total indica que, a mayores concentraciones de biomasa y fijación de carbono, el DAP ejerce un efecto más determinante que la altura total de los árboles. Esto se explica por las diferencias en las etapas de desarrollo: en árboles jóvenes, la altura contribuye de manera significativa a la captura de carbono mediante el incremento del volumen aéreo, mientras que en individuos adultos el crecimiento en diámetro se convierte en el principal factor que determina la acumulación de biomasa aérea y carbono fijado. Estos patrones reflejan la dinámica alométrica de los árboles, donde la distribución de recursos entre altura y diámetro cambia con la edad y el tamaño del individuo.

De acuerdo con Flores (2024), menciona que la altura total del árbol y el DAP son dos medidas significativas que ofrecen datos reveladores sobre los árboles. En la investigación forestal, el DAP y la altura total del árbol son dos parámetros cruciales utilizadas para evaluar el crecimiento, la salud y la estructura de los árboles. También son mediciones significativas porque están correlacionadas con el crecimiento, la madurez, la estabilidad, la biomasa, el volumen de madera y el crecimiento de los árboles. En la presente investigación de este autor, el coeficiente de correlación entre el DAP y las reservas de carbono fue de $r=0.79$,

mientras que el coeficiente de correlación entre la altura total y las reservas de carbono fue de $r=0.33$. Estos valores se clasifican como excelente para el primero y regular para el segundo.

Con lo anterior mencionado confirma las relaciones que poseen estas variables entre si las cuales intervienen en menor a mayor grado, pero siempre están relacionadas entre sí para la absorción de CO_2 , biomasa y carbono fijado en los árboles.

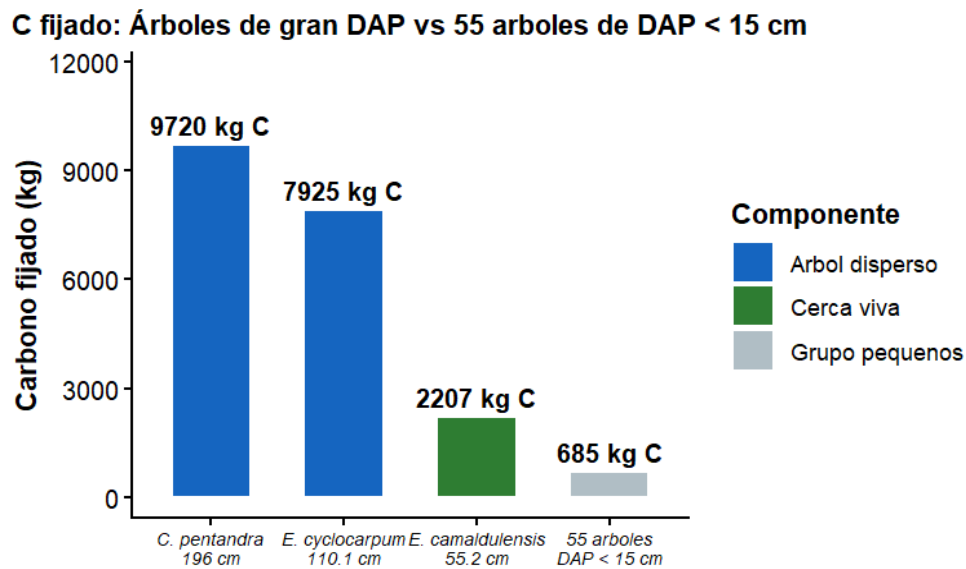


Figura 20. Fijación de carbono de acuerdo con el DAP de ambos sistemas silvopastoriles.

Se observa que los árboles con mayores valores de DAP tienden a fijar mayores cantidades de carbono (kg), mientras que aquellos con menores diámetros presentan una capacidad de almacenamiento de carbono significativamente inferior.

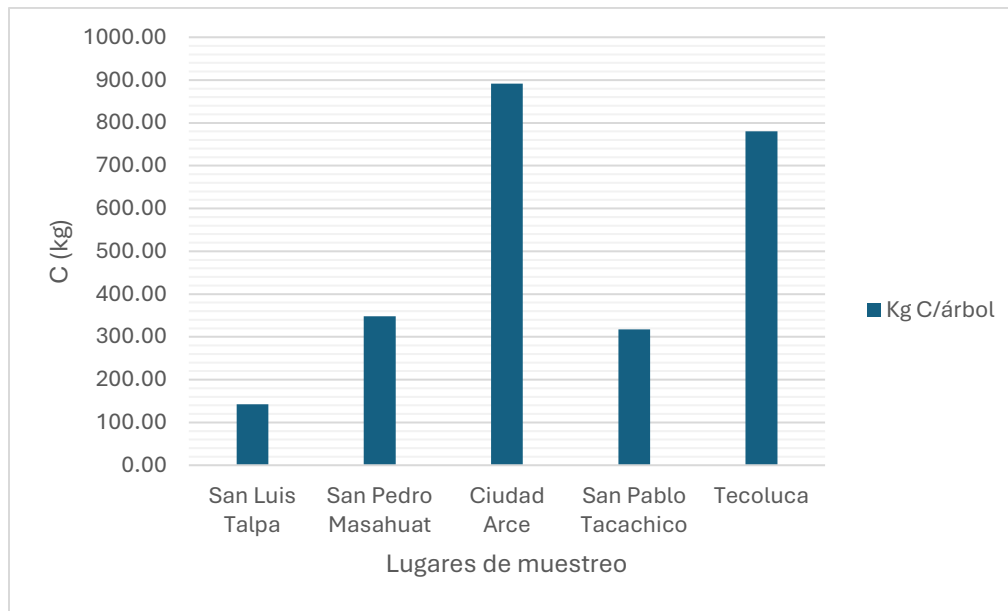


Figura 21. Kilogramos de carbono por árbol en cercas vivas y árboles dispersos

En la gráfica se presenta la cantidad promedio de carbono, expresada en kilogramos, que aporta cada árbol según el sitio de muestreo. Se observa que existen diferencias significativas entre los sitios, destacando Tecoluca y Ciudad Arce, donde los árboles presentan un mayor aporte al almacenamiento de carbono en comparación con otros lugares.

De acuerdo con Herrera et al. (2022) en su investigación se reportaron valores de carbono almacenado por árbol que oscilan entre 3.89 ± 0.72 , 1.83 ± 0.08 , 3.35 ± 0.41 y 3.33 ± 0.48 kg/árbol en los sistemas Las Mercedes, El Guabal, El Rosal y La Planada, respectivamente. Estos sistemas corresponden a cercas vivas lineales de 118, 98, 245 y 182.5 metros, con un total de 60, 50, 100 y 75 árboles.

Estos resultados evidencian que la especie y las características de los árboles influyen significativamente en el almacenamiento de carbono. Se observa que no siempre una mayor cantidad de árboles implica un mayor almacenamiento total, ya que existen sitios con menor densidad arbórea que logran un alto aporte de carbono. Tal es el caso de San Luis Talpa y Ciudad Arce, donde, a pesar de existir diferencias en el número de individuos,

se registra un mayor almacenamiento en uno de los sitios. Esto puede explicarse por la presencia de sistemas mixtos que combinan cercas vivas con árboles dispersos, integrando especies de diferentes tamaños y características, lo cual influye directamente en la absorción de CO₂ y en la cantidad de carbono fijado en el entorno.

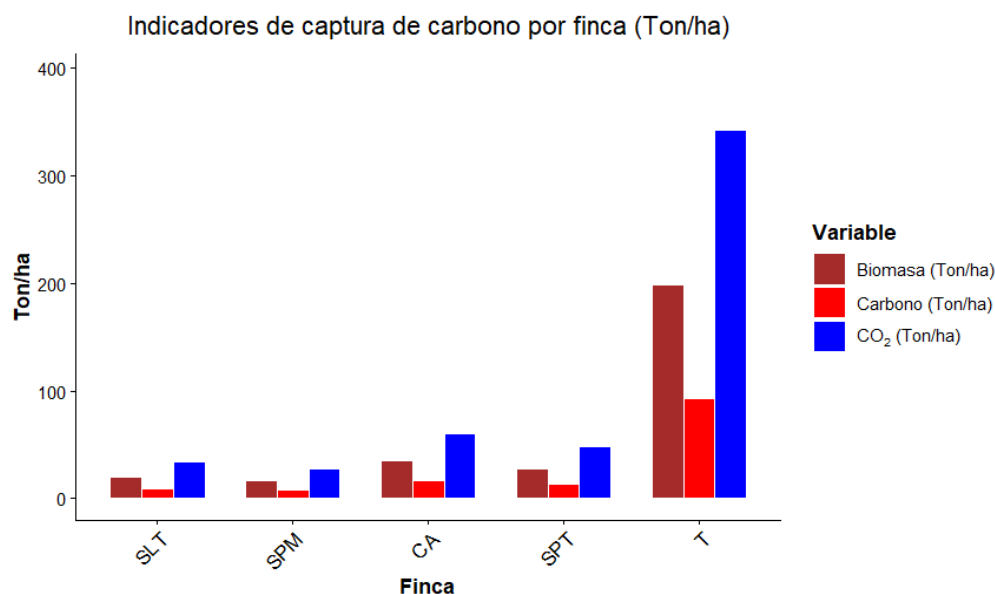


Figura 22. Datos generales de indicadores de captura de carbono por finca.

Nota. CV =cercas vivas; AD=árboles dispersos; B= biomasa; CO₂=dióxido de carbono almacenado total (kg); C= carbono almacenado total (kg). SLT= San Luis Talpa; SPM= San Pedro Masahuat; CA= Ciudad Arce; SPT= San Pablo Tacachico.

Se observa que Tecoluca presenta los valores más altos en las tres variables, alcanzando 198.8 Ton/ha de biomasa, 93.5 Ton/ha de carbono y 342.7 Ton/ha de CO₂, lo que indica una mayor capacidad de captura y almacenamiento de carbono en comparación con las demás fincas.

Por otro lado, fincas como San Pedro Masahuat y San Luis Talpa presentan valores considerablemente más bajos, lo que sugiere una menor acumulación de biomasa y, por ende, una menor fijación de carbono, puesto que estos sitios mantienen un solo sistema donde no se incluyen el uso de árboles dispersos solamente el empleo de cercas vivas.

Asimismo, las fincas Ciudad Arce y San Pablo Tacachico muestran valores intermedios, evidenciando una capacidad moderada de captura de carbono.

En todos los casos, se mantiene una relación proporcional entre las variables, donde el CO₂ presenta los valores más altos, seguido del carbono y finalmente la biomasa, lo cual es consistente con las conversiones utilizadas entre estas variables.

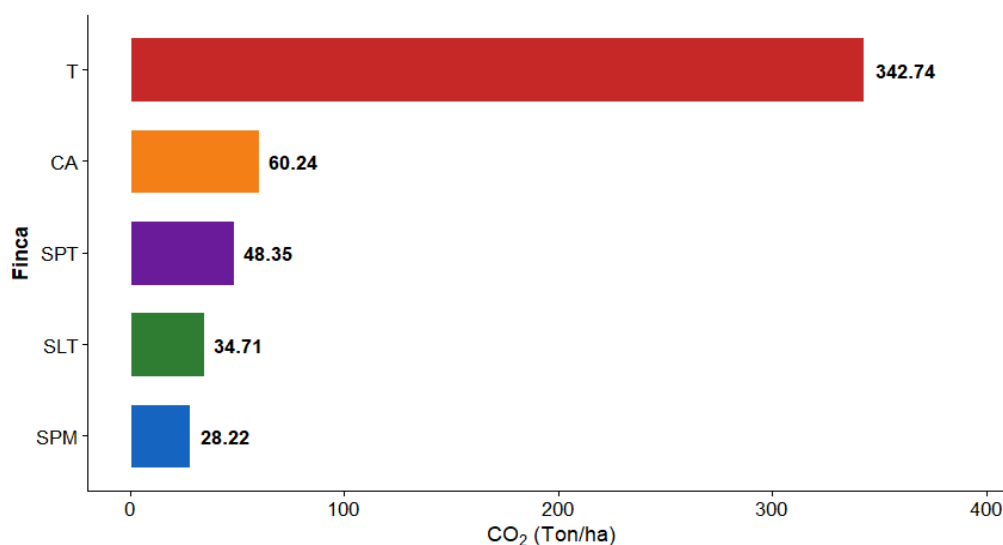


Figura 23. Datos globales de cercas vivas y árboles dispersos para CO₂ total fijado por finca (ton/ha).

Nota. CO₂=dióxido de carbono almacenado total (ton/ha). SLT= San Luis Talpa; SPM= San Pedro Masahuat; CA= Ciudad Arce; SPT= San Pablo Tacachico; T= Tecoluca; P1= Potrero 1; P2= Potrero 2; P3= Potrero 3.

La finca que presentó la mayor cantidad de CO₂ fijado fue en Tecoluca, con 342.74 toneladas por hectárea. Este elevado valor se debe a la implementación combinada de cercas vivas y árboles dispersos, lo que optimiza la captura de carbono en el sistema agroforestal. En segundo lugar, la finca de Ciudad Arce mostró una fijación significativa de CO₂ (60.24 toneladas por hectárea), resultado de compensar la menor absorción en cercas vivas mediante la incorporación de árboles dispersos en los potreros.

En la investigación se observó que los árboles que aportaron la mayor cantidad de carbono fueron especies de árboles dispersos como el Maquilishuat y la Ceiba, a pesar de no ser las

más abundantes. Esto contrasta con especies más numerosas como el Tempate o el Tigüilote, las cuales, aunque se encuentran en mayor cantidad, presentan menor tamaño y grosor, lo que influye en su menor aporte individual de carbono.

Un Maquilishuat adulto puede capturar aproximadamente entre 20 y 40 kg de CO₂ por año, lo que equivale a unos 5 a 11 kg de carbono anuales. En comparación, el Tempate captura entre 2 y 10 kg de CO₂ por año, es decir, aproximadamente entre 0.5 y 2.7 kg de carbono. Sin embargo, estos valores no son fijos, ya que dependen de diversos factores ambientales y biológicos como la altura, el diámetro del tronco, la edad y las condiciones del suelo y clima.

De acuerdo con Kohl et al. (2017) no existe una relación simple entre la edad del árbol y la captura de carbono, ya que los árboles jóvenes tienden a crecer más rápido y capturan carbono a mayor velocidad, mientras que los árboles maduros o viejos presentan un crecimiento más lento, pero almacenan mayores cantidades de carbono en su biomasa. Por ello, tanto los árboles jóvenes como los viejos cumplen funciones esenciales: los primeros por su alta tasa de absorción y los segundos por su capacidad de almacenamiento. Por otro lado, Stephenson *et al.* (2014) menciona que la acumulación de carbono aumenta continuamente con el tamaño del árbol, lo que indica que los árboles grandes poseen una mayor capacidad de captación y almacenamiento de carbono que los árboles pequeños, sin evidencias de una disminución de esta eficiencia con la edad.

En este sentido, se puede decir que, aun cuando las especies se encuentren en condiciones óptimas de desarrollo, los árboles de mayor tamaño tienden a almacenar más carbono que los árboles pequeños. Asimismo, la edad no limita necesariamente la absorción de carbono, ya que, como señalan los estudios mencionados, no existe una relación simple ni directa entre la edad del árbol y su capacidad de captura de carbono.

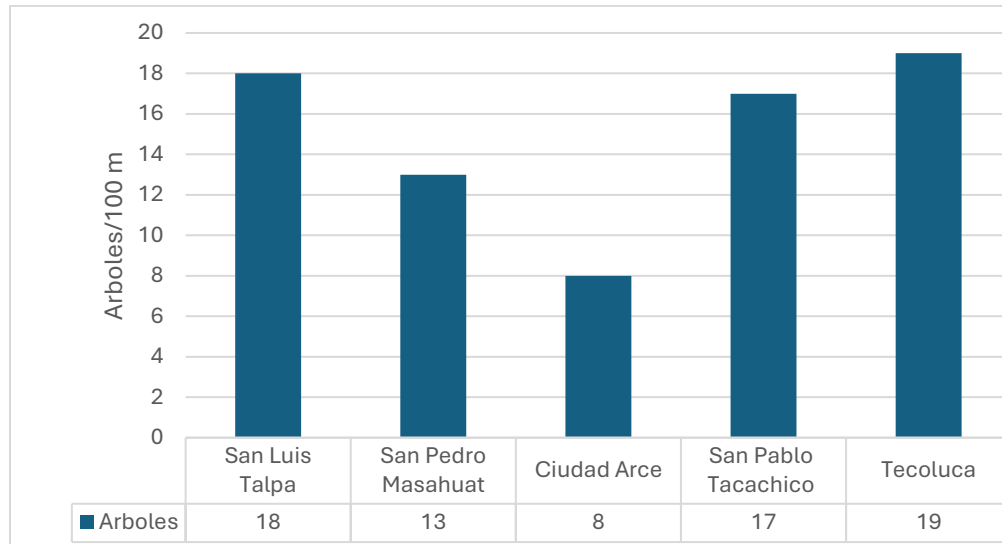


Figura 24. Número de árboles por cada 100 metros lineales.

El número de árboles sobre 100 metros lineales varía de acuerdo con la zona de estudio mostrando que los lugares donde se posee mayor predominancia son San Luis Talpa y Tecoluca dando como resultado mayor cantidad de árboles sobre metro lineal.

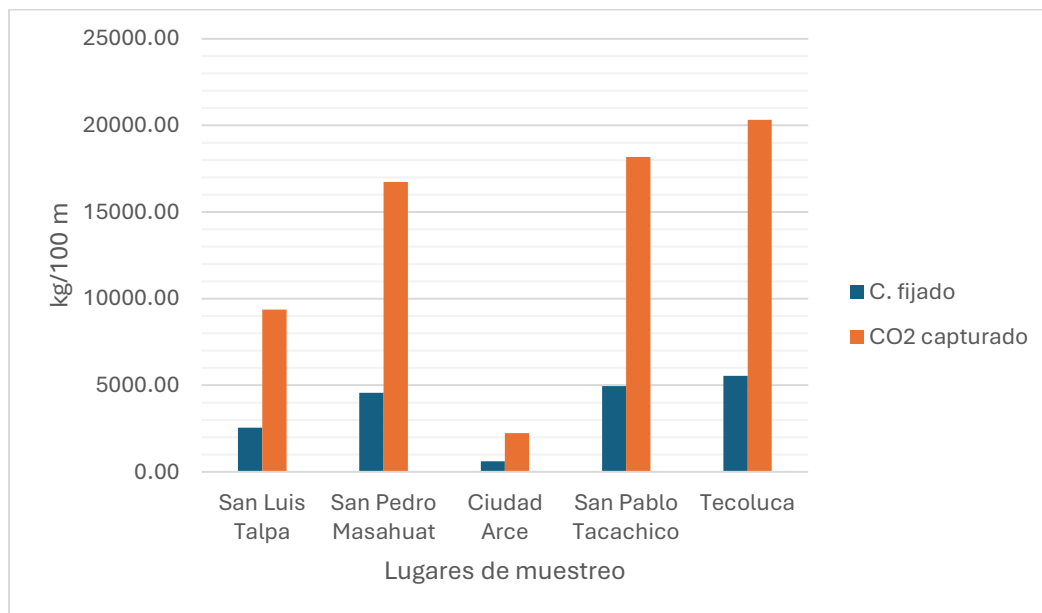


Figura 25. Total de carbono fijado y CO₂ en 100 metros lineales de cercas vivas.

Se observa una relación directamente proporcional entre el carbono almacenado y el CO₂ fijado en los diferentes potreros analizados. En todos los casos, el CO₂ presenta valores

superiores, lo cual es coherente con la relación estequiométrica entre ambas variables. Asimismo, se evidencia una marcada variabilidad entre los potreros, destacando Tecoluca como el de mayor capacidad de almacenamiento y fijación de carbono, lo que sugiere diferencias en la estructura y composición de las cercas vivas.

De acuerdo con Herrera, Delgado y Restrepo (2022), los resultados en su investigación evidencian contenidos de carbono almacenado que oscilan entre 0.026 y 0.100 tC, así como contenidos de carbono fijado (CO_2) entre 0.094 y 0.369 tCO_2 en trayectos de 98 a 245 metros lineales de cercas vivas. Estos valores fueron posteriormente proyectados a 400 metros lineales, simulando el cerramiento total de una hectárea de pastura. Los autores concluyen que los sistemas ganaderos estudiados presentan una alta capacidad de almacenar y fijar carbono en la biomasa forestal presente en cada predio, capacidad que puede incrementarse mediante el aumento de la densidad de siembra y la concientización de los productores sobre el valioso servicio ecosistémico que brindan los árboles (Anexo A-17, Anexo A-18.).

En este sentido, con base en lo mencionado anteriormente y en los resultados de la presente investigación, se evidencia que el aumento de la densidad arbórea en función de los metros lineales de cercas vivas en sistemas ganaderos incrementa significativamente la absorción de CO_2 y el almacenamiento de carbono.

6. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que los productores que implementan ambos sistemas de cercas vivas y árboles dispersos en potreros presentan una mayor capacidad de captura de CO₂ y carbono fijado en sus parcelas. En la investigación sobre el establecimiento de parámetros técnicos para inventarios de carbono y la estimación de biomasa en árboles dispersos y cercas vivas en ganaderías de El Salvador, se evaluaron dos sistemas silvopastoriles. Un ejemplo destacado fue la finca perteneciente a Tecoluca la cual presentó la mayor capacidad de fijación de carbono 342.74 ton/ha entre las fincas evaluadas.

El manejo que los productores dan a sus parcelas influye significativamente en el almacenamiento de carbono, principalmente en la biomasa aérea, ya que las parcelas con mayor densidad de árboles presentan más biomasa. Además, las características individuales de los árboles son determinantes: tanto la altura, especie, y diámetro a la altura del pecho influyen en la absorción de carbono, pero la edad del árbol juega un papel central. Los árboles jóvenes muestran un aumento lineal en la absorción de carbono, mientras que, en árboles adultos, el DAP se convierte en la variable más importante, dado que la altura se estabiliza y el incremento del grosor del tronco mantiene la capacidad de fijación de CO₂ y carbono.

Estos resultados destacan la importancia de implementar ambos sistemas silvopastoriles en las parcelas de los agricultores salvadoreños como estrategia de mitigación de gases de efecto invernadero. La falta de atención a esta problemática puede generar impactos negativos en diversos subsectores, incluyendo granos básicos, caña de azúcar, ganadería y café, debido al estrés hídrico, plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos, así como en la productividad pesquera y acuícola, asociada al aumento de la temperatura del agua, la presencia de especies invasoras y el blanqueamiento de corales.

7. RECOMENDACIONES

Se propone impulsar la creación de registros alométricos a mayor escala en el territorio nacional, ya que estos permiten obtener información más actualizada sobre los niveles de emisiones presentes en el país y, asimismo, verificar los resultados de los compromisos nacionales orientados a enfrentar los efectos del cambio climático.

Se sugiere promover la inclusión de árboles con beneficios adicionales para los productores, como Maquilishuat (*Tabebuia rosea*), Conacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), Ceiba (*Ceiba pentandra*), Teca (*Tectona grandis*). Estas especies ofrecen ventajas productivas y ambientales, proporcionando sombra y forraje para el ganado, madera y mejorando la recuperación del suelo.

Asimismo, la implementación de cercas vivas con especies como Tempate (*Jatropha curcas*), Tigüilote (*Cordia dentata*), Neem (*Azadirachta indica*) contribuye indirectamente a la fijación de carbono cuando se dispone en mayor densidad en la parcela. Además, estas especies proporcionan beneficios adicionales, tales como barreras físicas contra el viento, delimitación de terrenos, protección de cultivos y mejora de la biodiversidad. Son especialmente útiles en climas cálidos y suelos áridos, pues actúan como insecticidas naturales, reducen los costos en agroquímicos, protegen cultivos frente a plagas y controlan parásitos en el ganado, contribuyendo también a la prevención de la erosión del suelo.

Se recomienda fomentar la creación de programas de asistencia y capacitación para impulsar la implementación de estos sistemas silvopastoriles. Dichos programas permitirían a los productores aprender sobre las especies más adecuadas según las características de sus parcelas, así como las técnicas de propagación, manejo y mantenimiento de los árboles, asegurando que los sistemas generen efectos positivos sostenibles tanto en la producción como en la conservación ambiental.

8. BIBLIOGRAFICA

- Acosta, M., Vargas, J., Velázquez, A., & Etchevers, J. (2002). *Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. Agrociencia, 36(6), 725–736.* Vista de ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA MEDIANTE EL USO DE RELACIONES ALOMÉTRICAS EN SEIS ESPECIES ARBÓREAS EN OAXACA, MÉXICO
- Agencia Espacial Europea. (2021). Paquete de recursos educativos de la iniciativa sobre el cambio climático: El ciclo del carbono. https://climate.esa.int/media/documents/ESA_CCI_paquete_de_recursos_educativos_El_Ciclo_Del_Carbonio_11_14.pdf
- Braude, H., Waldman, J., Rondinone, G., De Salvo, C. P., & Muñoz, G. (2025). *Políticas agropecuarias y pesqueras en El Salvador: análisis y cuantificación de los apoyos en 2018-2022 y su vinculación con las emisiones de gases de efecto invernadero.* <https://publications.iadb.org/es/politicas-agropecuarias-y-pesqueras-en-el-salvador-analisis-y-cuantificacion-de-los-apoyos-en-2018>
- Center for Climate and Energy Solutions (C2ES). (s. f.). Main greenhouse gases. <https://www.c2es.org/content/main-greenhouse-gases/>
- CEPSA (Compañía Española de Petróleos, S.A.). (2015). *El cambio climático y los gases de efecto invernadero (GEI).* https://www.moeveglobal.com/stfls/CepsaCom/Coorp_Comp/Medio%20Ambiente_Seguridad_Calidad/Art%C3%ADculos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf
- Delgado, L., Acevedo, M, Hernan., C, Ramírez., H & Serrano, J. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Revistas científicas de America Latina, Vol 30.* <https://www.redalyc.org/pdf/339/33910406.pdf>
- Fatimah, H., Farooq, S., Anwar, T., Qureshi, H., Hashmi, F., Ahmad, T., Ullah, N., Munazir, M., Naseem, M. T., & Soufan, W. (2024). *Assessment of growth, biomass, and carbon sequestration potential of urban tree species in greenbelts.* *BMC Plant Biology, 24(1), 1199.* <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05935-3>

- Félix, Y. (2014). DASOMETRÍA: Apuntes de clase y guía de actividades prácticas [https://peim-arbolado.semagroo.gob.mx/wp-content/uploads/2023/01/DASOMETRIA_Apuntes de Clase y Guia de Ac.pdf](https://peim-arbolado.semagroo.gob.mx/wp-content/uploads/2023/01/DASOMETRIA_Apuntes_de_Clase_y_Guia_de_Ac.pdf)
- Flores, E. (2024). Relación dasométrica del DAP y altura total con carbono almacenado en un bosque de colina baja del Distrito de Mazan, Rio Napo, Loreto. <https://api-repositorio.unapiquitos.edu.pe/server/api/core/bitstreams/33444e6c-b6b1-4714-ba5a-eceb658f4c9a/content>
- Gómez, J., Barra, J., Monterrosos, A., Campo, J., Tinoco, (2011). ALLOMETRIC EQUATIONS FOR ESTIMATING THE ABOVE-GROUND BIOMASS AND CARBON IN *Quercus magnoliaefolia* Née. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261–272. <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6094/r.rchscfa.2010.11.117.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Herrera, D. A., Delgado, J. R., Restrepo, G. L. (2023). *Economía del carbono: contabilidad de CO₂ en cercas vivas de sistemas productivos lecheros alto-andinos de Colombia*. *Revista Agroforestería Neotropical*, 1(12). <https://revistas.ut.edu.co/index.php/agroforesteria/article/view/3011>
- Herrera, D., Mora, J., Martinez, L. 2022. Carbon economy: CO₂ accounting in live fences of high-Andean dairy production systems in Colombia <https://revistas.ut.edu.co/index.php/agroforesteria/article/download/3011/2446/9776>
- Kohl, M., Neupane, P. R., Lotfiomran, N. (2017). *The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data*. *Carbon Balance and Management*, 12(1). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5558952/>
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2018). *Memoria de cálculo. Inventario Nacional de Bosque de El Salvador 2017-2018* <https://cidoc.ambiente.gob.sv/documento/memoria-de-calculo-inventario-nacional-de-bosque-de-el-salvador-2017-2018/>
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2021). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC)*

<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/El%20Salvador%20NDC-%20Updated%20Dic.2021.pdf>

MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales). (2025). *Contribución Determinada a Nivel Nacional de El Salvador (NDC 3.0)*. <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-12/NDC%20EL%20SALVADOR%202025-%20VF.pdf>

Melgar, K., Marroquín, M. (2017). *Almacenamiento de carbono en sistemas con diferentes usos de suelo en el municipio de Comalapa, Chalatenango, El Salvador* (Tesis de grado). Universidad de El Salvador. <https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/53685a1b-8388-48ea-b285-1b50b7dc6011/content>

Mildrexler, D. J., Berner, L. T., Law, B. E., Birdsey, R. A., & Moomaw, W. R. (2020). *Large trees dominate carbon storage in forests east of the Cascade Crest in the United States Pacific Northwest*. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, Article 594274. <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2020.594274/full>

Morillo, A., Cajarville, C., Sol, C., Oviedo, E. O., Jones, G., Rostagno, M., et al. (2023). *Silvopastoral systems: The presence of trees improves pasture quality*. *nutriNews*. <https://nutrinews.com/en/silvopastoral-systemsthe-presence-of-trees-improves-pasture-quality/>

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2025). *El Salvador inicia el proceso de actualización de las NDC 3.0*. <https://www.undp.org/es/el-salvador/noticias/el-salvador-inicia-el-proceso-de-actualizacion-de-las-ndc-30>

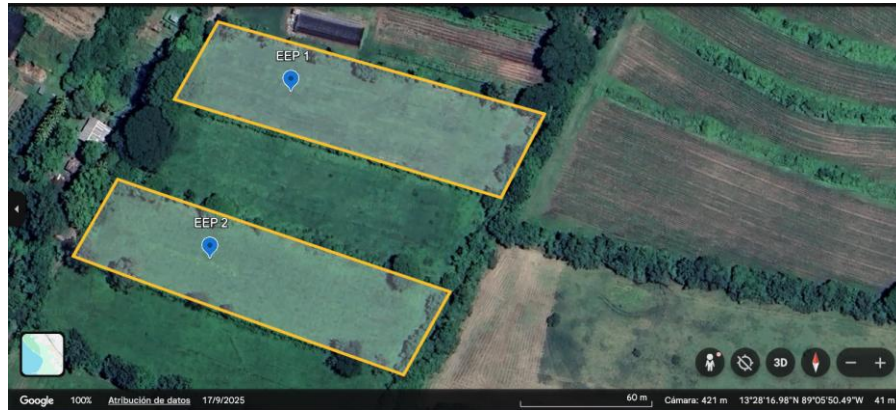
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2024). *El Salvador inició la fase técnica preparatoria para la actualización de las NDC*. PNUD El Salvador. https://www.undp.org/es/el-salvador/noticias/el-salvador-inicio-la-fase-tecnica-preparatoria-para-la-actualizacion-de-las-ndc?utm_source=chatgpt.com

PROGRESA (Programa de Gestión Rural Empresarial, Sanidad y Ambiente). Catholic Relief Services (CRS), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) & United States Department of Agriculture (USDA). (2015). *Manual de sistemas silvopastoriles*. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/Manual_Sistemas_Silvopastporil_CRS_USDA_CIAT_2015.pdf

- SD (Sustainability Directory). (2024). *Allometric equations*. <https://lifestyle.sustainability-directory.com/term/allometric-equations/>
- Sotelo Cabrera, M. E., Suárez Salazar, J. C., Álvarez Carrillo, F., Castro Núñez, A., Calderón Soto, V. H., & Arango, J. (2017). *Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico: Sistemas silvopastoriles, ¿una opción viable?* Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). <https://cgspace.cgiar.org/items/e7111c11-3ef6-4d1c-bbf1-5c4d32460529>
- Stephenson, N. L., Das, A. J., Condit, R., Russo, S. E., Baker, P. J., Beckman, N. G., Coomes, D. A., Lines, E. R., Morris, W. K., Rüger, N., Álvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S. J., Duque, Á., Ewango, C. N., Flores, O., Franklin, J. F., ... Zavala, M. A. (2014). *Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size*. *Nature*, 507, 90–93. <https://www.nature.com/articles/nature12914>
- Tito, M., Chacón, L., Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales* <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/B16293.pdf>
- Wickham, H., Çetinkaya-Rundel, M., & Grolemund, G. (2023). *R for data science: Import, tidy, transform, visualize, and model data* (2nd ed.). O'Reilly Media. <https://r4ds.hadley.nz>
- Worldometer. (s. f.). *Emisiones de CO₂ de El Salvador*. <https://www.worldometers.info/es/emisiones-co2/emisiones-co2-el-salvador/>

9. ANEXOS

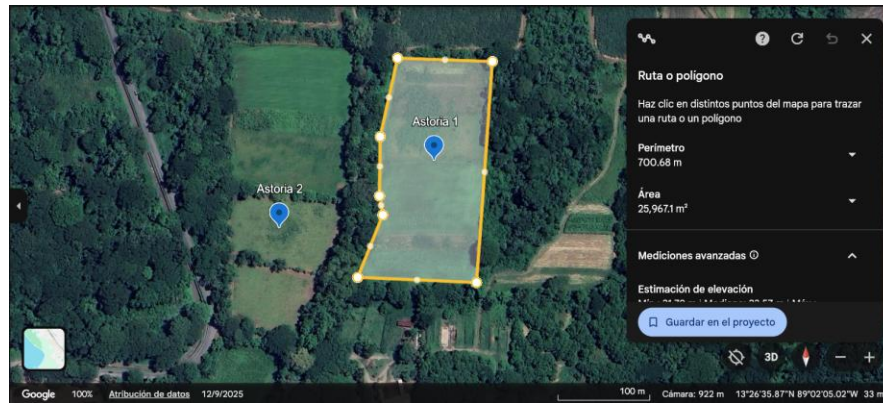
A- 1. Polígono de potreros 1 y 2 de Estacion Experimental y de prácticas, Facultad de Ciencias Agronómicas. Distrito San Luis Talpa



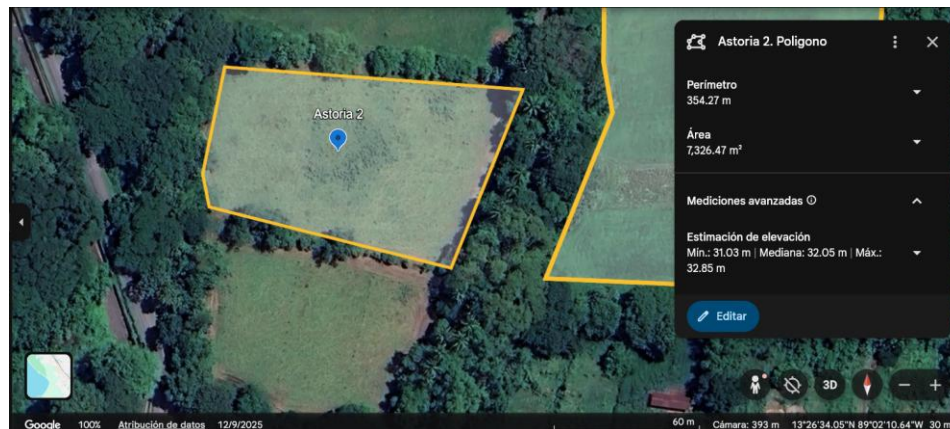
A- 2. Polígono de potreros 3 de Estacion Experimental y de prácticas, Facultad de Ciencias Agronómicas. Distrito San Luis Talpa



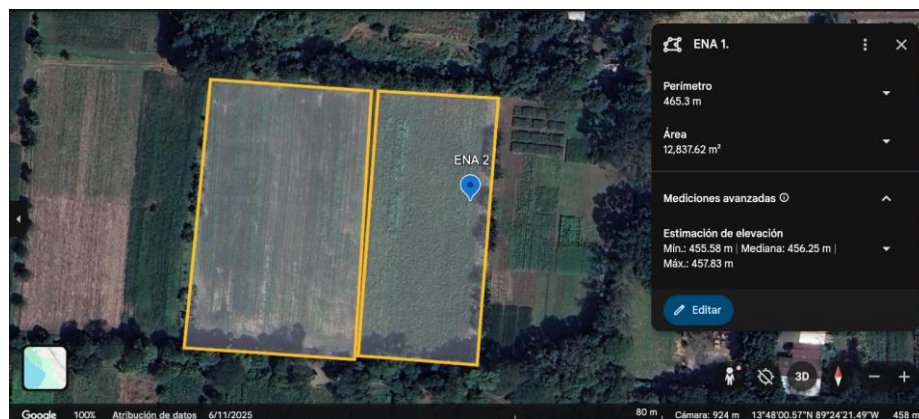
A- 3. Polígono de potrero 1. Cooperativa de Producción Agropecuaria Astoria de R.L. Distrito San Pedro Masahuat



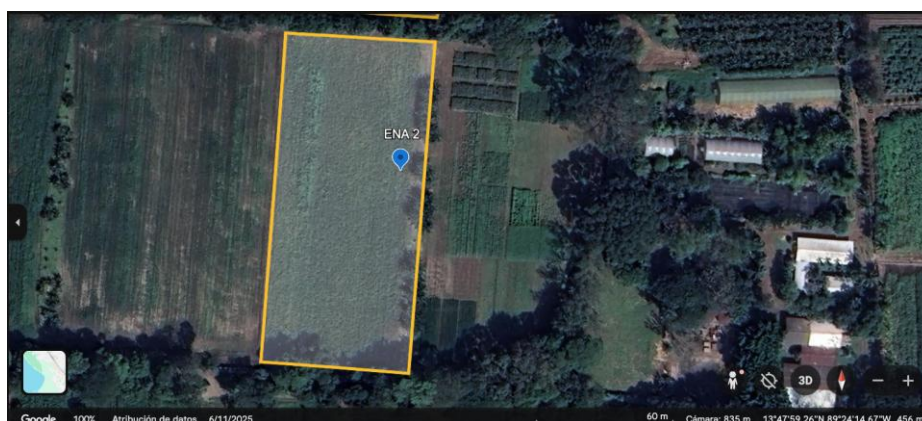
A- 4. Polígono de potrero 2 Cooperativa de Producción Agropecuaria Astoria de R.L. Distrito San Pedro Masahuat



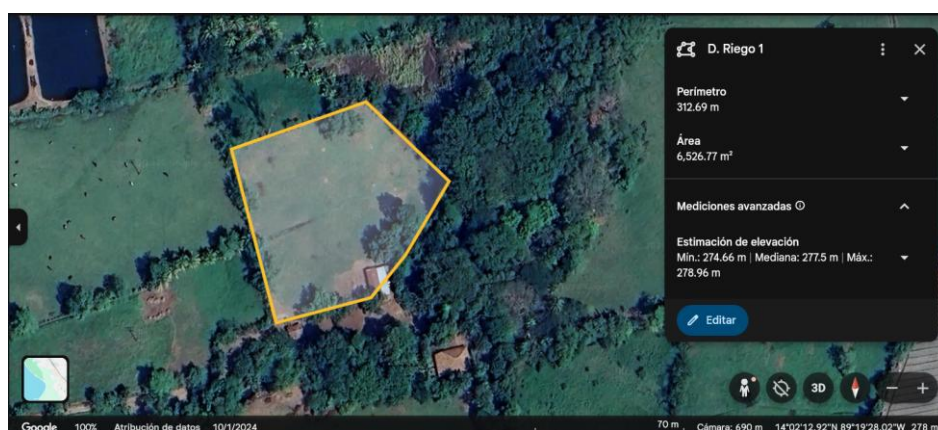
A-5. Polígono de potrero 1 Cooperativa de Escuela Nacional de Agricultura "Roberto Quiñónez". Distrito Ciudad Arce



A-6. Polígono de potrero 2 Cooperativa de Escuela Nacional de Agricultura “Roberto Quiñónez”. Distrito Ciudad Arce



A-7. Polígono de potrero 1 Distrito de Riego Sur Atiocoyo. Distrito de San Pablo Tacachico



A-8. Polígono de potrero 2 Distrito de Riego Sur Atiocoyo. Distrito de San Pablo Tacachico



A-9. Polígono de potrero 1 Finca Don Nery Abrego. Distrito Tecoluca



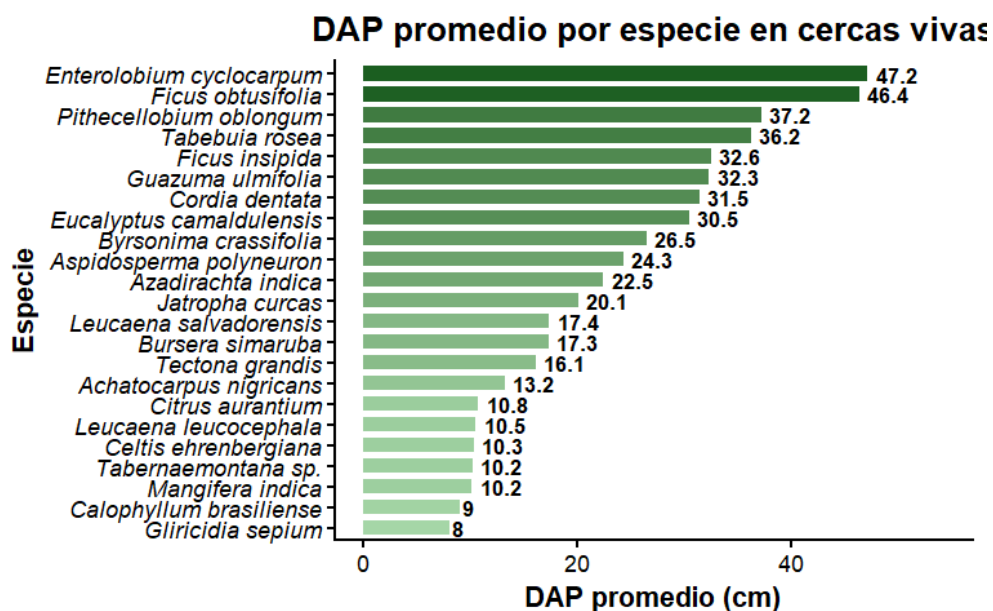
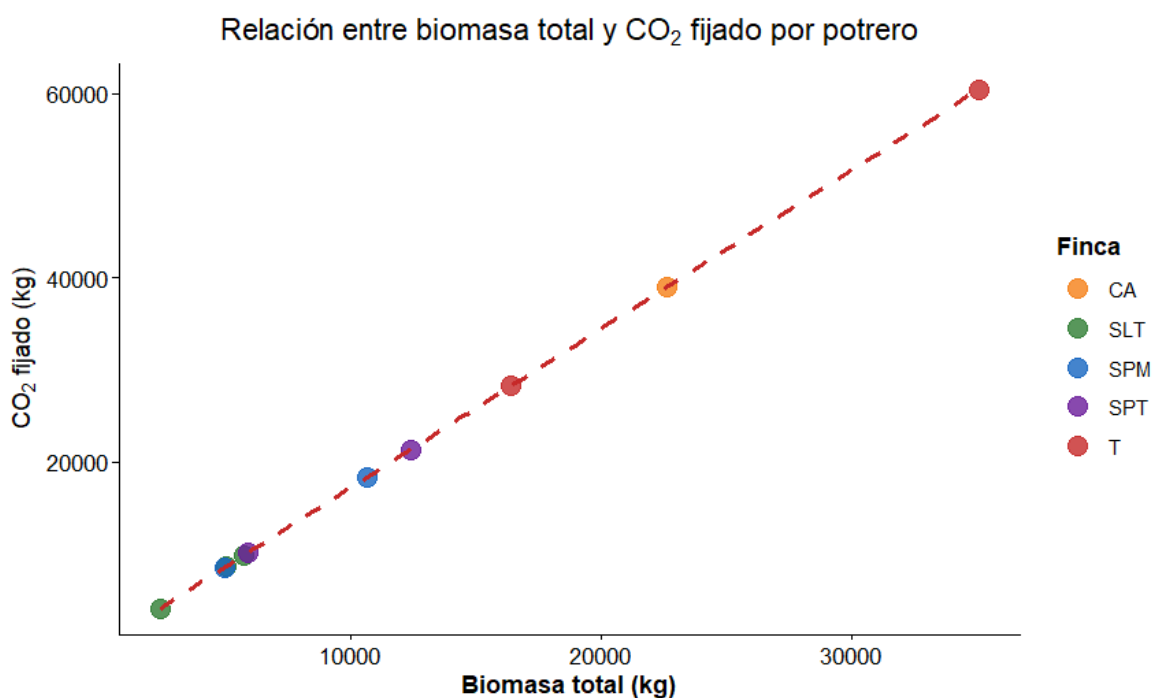
A-10. Polígono de potrero 2 Finca Don Nery Abrego. Distrito Tecoluca



A-11. Valores de gravedad específica para el cálculo de biomasa en bosque latifoliado (MARN 2018).

Núm.	Código	Familia	Género	Epíteto	Gravedad específica (g/cm ³)
1	A1000sapota	Sapotaceae	<i>Pouteria</i>	<i>sapota</i>	0.6
2	A1002subsp. tempisque	Sapotaceae	<i>Sideroxylon</i>	<i>capini</i>	1.01
3	A1010amorphoides	Simaroubaceae	<i>Alvaradoa</i>	<i>amorphoides</i>	0.58
4	A1014glauca	Simaroubaceae	<i>Simarouba</i>	<i>glauca</i>	0.39
5	A1050ulmifolia	Sterculiaceae	<i>Guazuma</i>	<i>ulmifolia</i>	0.51
6	A1052apetala	Sterculiaceae	<i>Sterculia</i>	<i>apetala</i>	0.33
7	A1084candida	Tiliaceae	<i>Luehea</i>	<i>candida</i>	0.5
8	A1085speciosa	Tiliaceae	<i>Luehea</i>	<i>speciosa</i>	0.5
9	A1099mexicana	Ulmaceae	<i>Ulmus</i>	<i>mexicana</i>	0.55
10	A1113bicolor	Verbenaceae	<i>Avicennia</i>	<i>bicolor</i>	0.85
11	A1114germinans	Verbenaceae	<i>Avicennia</i>	<i>germinans</i>	0.9
12	A1131guatemalense	Zygophyllaceae	<i>Guaiacum</i>	<i>guatemalense</i>	1.21
13	A113var grande	Asteraceae	<i>Perymenium</i>	<i>grande</i>	0.95
14	A134subsp. arguta	Betulaceae	<i>Alnus</i>	<i>acuminata</i>	0.45
15	A141cujete	Bignoniaceae	<i>Crescentia</i>	<i>cujete</i>	0.63
16	A142aesculifolia	Bignoniaceae	<i>Godmania</i>	<i>aesculifolia</i>	0.52
17	A143mimosifolia	Bignoniaceae	<i>Jacaranda</i>	<i>mimosifolia</i>	0.55
18	A148subsp. chrysantha	Bignoniaceae	<i>Tabebuia</i>	<i>chrysantha</i>	1.1
19	A149donnell-smithii	Bignoniaceae	<i>Tabebuia</i>	<i>donnell-smithii</i>	0.44
20	A152rosea	Bignoniaceae	<i>Tabebuia</i>	<i>rosea</i>	0.54
21	A153stans	Bignoniaceae	<i>Tecoma</i>	<i>stans</i>	0.47
22	A154orellana	Bixaceae	<i>Bixa</i>	<i>orellana</i>	0.38
23	A156pentandra	Bombacaceae	<i>Ceiba</i>	<i>pentandra</i>	0.28
24	A157pyramidale	Bombacaceae	<i>Ochroma</i>	<i>pyramidale</i>	0.16
25	A158aquatica	Bombacaceae	<i>Pachira</i>	<i>aquatica</i>	0.43
26	A159quinata	Bombacaceae	<i>Pachira</i>	<i>quinata</i>	0.39
27	A164alliodora	Boraginaceae	<i>Cordia</i>	<i>alliodora</i>	0.48
28	A165collococca	Boraginaceae	<i>Cordia</i>	<i>collococca</i>	0.48
29	A166dentata	Boraginaceae	<i>Cordia</i>	<i>dentata</i>	0.69
30	A170gerascanthus	Boraginaceae	<i>Cordia</i>	<i>gerascanthus</i>	0.74
31	A186simaruba	Burseraceae	<i>Bursera</i>	<i>simaruba</i>	0.31
32	A216obtusifolia	Cecropiaceae	<i>Cecropia</i>	<i>obtusifolia</i>	0.36
33	A217peltata	Cecropiaceae	<i>Cecropia</i>	<i>peltata</i>	0.36
34	A21occidentale	Anacardiaceae	<i>Anacardium</i>	<i>occidentale</i>	0.48
35	A22graveolens	Anacardiaceae	<i>Astronium</i>	<i>graveolens</i>	0.75
37	A23indica	Anacardiaceae	<i>Mangifera</i>	<i>indica</i>	0.55
38	A241var. rekoii	Clusiaceae	<i>Calophyllum</i>	<i>brasiliense</i>	0.56

A-15. Figura de DAP promedio por especie en cercas vivas

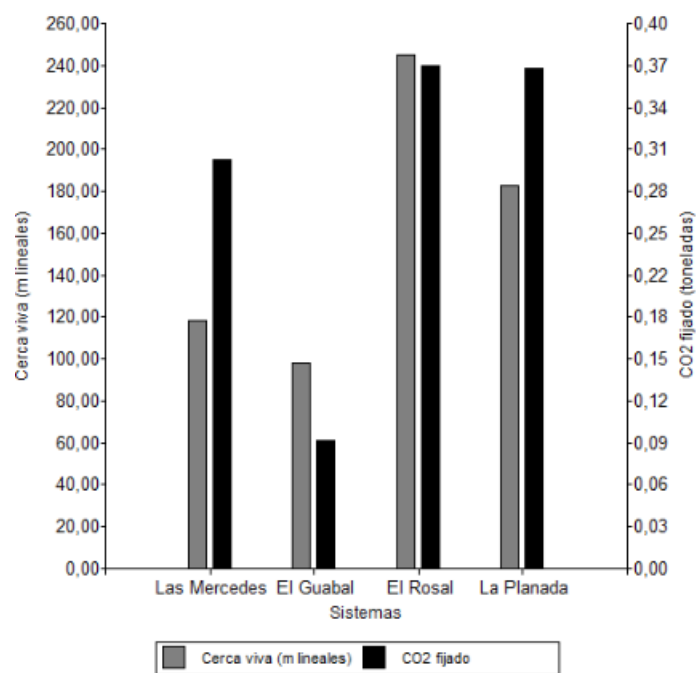
A-16. Relación entre biomasa total y CO₂ fijado por potrero

A-17. Árboles/metros lineales en investigación: Carbon economy: CO₂ accounting in live fences of high-Andean dairy production systems in Colombia.

Tabla 2. Predios, especie, área total y cantidad total de árboles en metros lineales de los sistemas seleccionados.

Nombre del predio	Vereda	Especie arbórea	Área total (ha)	Árboles/ metros lineales	Distancia entre árboles (m)	Árboles muestreados
Las Mercedes	Guándita	<i>Alnus acuminata</i>	1,5	60/118	2	21
El Guabal	La Concepción	<i>Alnus acuminata</i>	4	50/98	2	15
El Rosal	Carbonera Baja	<i>Alnus acuminata</i>	1	100/245	2,5	30
La Planada	Guándita	<i>Alnus acuminata</i>	0,36	75/182	2,5	30

A-18. Estimación de carbono fijado en la biomasa forestal sobre el total de cercas vivas en metros lineales de los cuatro sistemas productivos objeto de estudio.



A-19. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México.

