

**Universidad Zamorano**

**Departamento de Ambiente y Desarrollo**

**Ingeniería en Ambiente y Desarrollo**



**Universidad  
Zamorano®**

Proyecto Especial de Graduación

**Análisis comparativo de los resultados de dos metodologías de  
estimación de huellas de carbono en sistemas de ganado de leche,  
Olancho, Honduras**

Estudiante

Diana Lisuanny Guerrero Rodríguez

Asesores

Victoria Cortés Matamoros, Dra.

Josué Aníbal León Carvajal, Mtr.

Honduras, agosto 2025

**Autoridades**

**KEITH ANDREWS**

Rector i.a.

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**VICTORIA CORTÉS MATAMOROS**

Directora del Departamento de Ambiente y Desarrollo

**JULIO NAVARRO**

Secretario General

## Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras .....	6
Índice de Anexos .....	7
Resumen .....	8
Abstract .....	9
Introducción .....	10
Metodología.....	15
Ubicación del Estudio.....	15
Descripción de la Base de Datos del Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer .....	16
Categorización de Sistemas Ganaderos a Partir de la Huella de Carbono .....	16
Revisión de Literatura Sobre Estrategias de Mitigación de Huella de Carbono en Sistemas Ganaderos .....	18
Comparación de Emisiones GEI Estimadas Mediante Normativa IPCC y Base de Datos .....	19
Selección de la Región Estudio.....	20
Selección de las Fincas .....	20
Aplicación de Instrumentos de Toma de Datos.....	21
Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Unidad Productiva.....	21
Almacenamiento de Carbono en las Pasturas .....	25
Almacenamiento de Carbono en Árboles .....	27
Balance de Gases de Efecto Invernadero (GEI) .....	30
Análisis de Datos .....	30
Resultados y Discusión.....	32
Categorización de Fincas.....	32

Análisis de Literatura Sobre el Potencial de Reducción de Huella de Carbono en Sistemas Ganaderos .....	35
Comparación de Emisiones de GEI Estimadas Mediante Normativa IPCC y Base de Datos .....	37
Descripción de las Unidades Productivas.....	37
Balance de GEI .....	41
Comparación de los resultados obtenidos con los resultados del proyecto Ganadería Sostenible	
USAID/TMS-Heifer.....	44
Conclusiones .....	47
Recomendaciones .....	48
Referencias .....	49
Anexos .....	54

### Índice de Cuadros

Cuadro 1 Categorización de las Fincas Según su Huella de Carbono .....	17
Cuadro 2 Metodología Aplicada en los Análisis de Laboratorio de las Muestras de Pasto Obtenidas en las Fincas .....	26
Cuadro 3 Estrategias de Reducción de Huella de Carbono Aplicadas en Sistemas Ganaderos .....	36
Cuadro 4 Balance de los Gases de Efecto Invernadero por Unidad productiva.....	43
Cuadro 5 Comparación de Resultados Obtenidos Aplicando la Metodología IPCC Contra los Resultados Reportados por la Base de Datos del Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer	45

## Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de Distribución de las Fincas Ganaderas Incluidas en el Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer.....	15
Figura 2 Proceso de Búsqueda y Filtrado de la Literatura Científica.....	19
Figura 3 Vista del Botanal Utilizado como Herramienta de Muestreo en el Aforo.....	26
Figura 4 Secuencia de Ecuaciones Para Estimación de Captura de Carbono en Árboles.....	29
Figura 5 Categorización de Huella de Carbono de las Fincas Evaluadas por Departamento en el 2023 .....	33
Figura 6 Categorización de Huella de Carbono de las Fincas Evaluadas por Departamento en el 2024 .....	34
Figura 7 Mapa de Unidad Productiva San Manuel.....	38
Figura 8 Mapa de Unidad Productiva La Aurora.....	39
Figura 9 Mapa de Unidad Productiva El Tarral.....	41
Figura 10 Comparación de los Inventarios de Emisiones y Captura de CO <sub>2</sub> Para Cada Uno de las Unidades Productivas.....	42

## Índice de Anexos

Anexo A Entrevista .....	54
Anexo B Formato de inventario forestal .....	56
Anexo C Resultados de biomasa seca de los pastos muestreados en los sistemas productivos .....	57
Anexo D Detalle de Inventario Forestal y Aplicación de Ecuaciones Alométricas en el Sistema Productivo La Aurora .....	58
Anexo E Detalle de Inventario Forestal y Aplicación de Ecuaciones Alométricas en el Sistema Productivo San Manuel .....	60
Anexo F Detalle de Inventario Forestal y Aplicación de Ecuaciones Alométricas en el Sistema Productivo El Tarral.....	63

## Resumen

La ganadería lechera es un sector clave para la economía de Honduras, pero también representa una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente por fermentación entérica y manejo de estiércol. Esta investigación evaluó el balance de carbono en sistemas ganaderos lecheros aplicando la metodología del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y comparando las estimaciones de emisiones generadas con registros del proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer. Se utilizó una base de datos de 150 fincas distribuidas en seis departamentos del país, complementando con mediciones directas en tres fincas ubicadas en Olancho. Se aplicaron ecuaciones del IPCC para estimar emisiones de metano, óxido nitroso, consumo energético y captura de carbono en pasturas y árboles. Los resultados revelaron diferencias entre las emisiones estimadas durante el proyecto y la metodología IPCC para las tres fincas visitadas, siendo los resultados registrados con la metodología IPCC los más bajos, lo que sugiere un enfoque más conservador. Además, se evidenció que 68 de las 150 fincas de la base de datos, lograron reducciones mayores a 1 kg CO<sub>2</sub>/L leche tras la intervención del proyecto. Las prácticas como el pastoreo rotacional, sistemas silvopastoriles y uso de biodigestores mostraron mayor potencial de mitigación. Se concluye que la implementación de prácticas sostenibles, respaldadas por metodologías robustas de evaluación, son esenciales para transitar hacia sistemas ganaderos bajos en carbono.

*Palabras clave:* Emisiones, gases de efecto invernadero, producción sostenible, secuestro de carbono

### **Abstract**

Dairy farming is a key sector of the Honduran economy, but it is also a significant source of greenhouse gas (GHG) emissions, primarily due to enteric fermentation and manure management. This research evaluated the carbon balance of dairy cattle systems using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) methodology, comparing estimated emissions with data from the USAID/TMS-Heifer Sustainable Livestock Project. This study used a database of 150 farms distributed across six regions of Honduras, supplemented with direct measurements taken at three farms in Olancho. IPCC equations were used to calculate methane, nitrous oxide, energy consumption emissions, as well as carbon sequestration in pastures and trees. The results revealed differences between the emissions estimated and reported by the project and those estimated using the IPCC methodology for the three visited farms, with the latter being the lowest, suggesting a more conservative approach. Additionally, it was found that 68 of the 150 farms in the database achieved reductions of over 1 kg CO<sub>2</sub>/L of milk following the project intervention. Practices such as rotational grazing, silvopastoral systems, and the use of biodigesters showed greater mitigation potential. It can be concluded that implementing sustainable practices, supported by robust assessment methodologies, is essential for transitioning to low-carbon livestock systems.

*Keywords:* Carbon sequestration, emissions, greenhouse gases, sustainable production

## Introducción

La ganadería constituye un rubro relevante para América Latina y el Caribe, aportando a la seguridad alimentaria y la economía rural de la región. Latinoamérica produce poco más del 23% de la carne bovina y el 11.2% de la leche a nivel mundial (Food and Agriculture Organization of United Nations [FAO], 2024). En Honduras, el sector ganadero es un pilar económico fundamental, aportando el 13% al Producto Interno Bruto (PIB) agrícola y generando más de 400,000 empleos anuales, lo que representa un 36% de la población económicamente activa (Salazar Leiva, 2023). Sin embargo, el sector ganadero contribuye considerablemente a las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente aquellas derivadas de la fermentación entérica, manejo de estiércol y producción de alimentos para el ganado. Un metaanálisis realizado por Grossi et al. (2019), reveló que la producción ganadera contribuye aproximadamente con el 14.5% de dichas emisiones, siendo el ganado bovino responsable de alrededor del 65% dentro del sector agrícola.

Para evaluar el rendimiento de una actividad se han establecido indicadores claves de desempeño (KPIs, por sus siglas en inglés). Estas herramientas cuantitativas permiten monitorear el cumplimiento de los objetivos de un negocio, reflejando su relación entre el desempeño ambiental y el rendimiento económico (Organización Internacional de Estandarización [ISO], 2021). Entre los KPIs ambientales más utilizados se encuentra la huella de carbono, que cuantifica las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por una organización o a lo largo del ciclo de vida de productos o servicios y se expresa generalmente en kilogramos o toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) por unidad funcional. Hablando particularmente de los sistemas productivos ganaderos, comúnmente se aplica como unidad funcional los litros o los kilogramos de leche producida por el hato (Gerber et al., 2013).

Lo anterior se refleja en el estudio realizado por López Guerrero y Meneses Quelal (2023), quienes analizaron el sistema de una hacienda en Ecuador dedicada a la producción lechera

implementando prácticas ambientales como manejo de la dieta, silvopastoreo y manejo de excretas, donde estimaron una huella de carbono de 1.75 kg CO<sub>2</sub>e/kg leche. Por otra parte, el estudio realizado por Zehetmeier et al. (2012), comparó tres escenarios de producción lechera donde el primer escenario reportaba emisiones de 1.06 kg CO<sub>2</sub>e/kg leche que, a causa de un incremento en la producción lechera del hato, se redujo a 0.89 kg CO<sub>2</sub>e/kg leche en el tercer escenario. En cambio, el estudio realizado por Kiggundu et al. (2019) en sistemas ganaderos con pasturas naturales y muy baja producción lechera, reportó valores muy por encima de los anteriores, superando los promedios globales con emisiones de 74.9 kg CO<sub>2</sub>e/kg leche.

Para mitigar las emisiones de gases efecto invernadero que genera la producción ganadera se pueden implementar diversas prácticas que favorecen la captura de carbono, como el manejo racional de las pasturas destinadas al pastoreo y de los forrajes cultivados para corte. Los pastizales cubren aproximadamente el 26% de la superficie terrestre global y poseen un importante potencial de mitigación ante el cambio climático, ya que, mediante estrategias de pastoreo adecuadas, pueden capturar hasta 148 Tg CO<sub>2</sub>/ha-año (Lorenz y Lal, 2018b; Henderson et al., 2015).

En regiones tropicales, el uso de especies mejoradas, como *Brachiaria*, ha mostrado mejoras significativas en el almacenamiento de carbono y la reducción de emisiones por fermentación entérica (FAO, 2017). En combinación con los pastos mejorados se recomienda implementar prácticas de pastoreo rotacional, ya que implica mover el ganado entre diferentes parcelas para permitir la recuperación del pasto y mejorar la salud del suelo (Abagandura et al., 2024). Un estudio en Sudáfrica demostró que esta práctica redujo las emisiones netas de CO<sub>2</sub> en un 17% y aumentó las reservas de carbono del suelo (SOC) en un 50% en comparación con el pastoreo libre (Abdalla et al., 2022).

Por otra parte, la integración de árboles en sistemas silvopastoriles y la agroforestería, también han mostrado un alto potencial de captura de carbono y ofrecen protección ante condiciones climáticas extremas. Esta práctica mejora la productividad, proporciona sombra y forraje adicional, y

actúan como sumidero. Las reservas de SOC en zonas agroforestales contribuyen relativamente más al secuestro de carbono para la mitigación del cambio climático que las reservas de carbono de la biomasa, ya que parte del carbono de la agroforestería tiende a ser secuestrado durante milenios (Lorenz y Lal, 2018a).

Sin embargo, en la búsqueda por reducir la huella de carbono en la ganadería, algunas estrategias adoptadas podrían enmascarar el impacto generado en lugar de disminuir las emisiones absolutas de la producción. En su estudio, O'Brien et al. (2014) compararon sistemas de producción lechera de alto rendimiento en países de Europa y Norteamérica. Los resultados mostraron valores iniciales de 1.45 kg CO<sub>2</sub>e/kg leche que se redujeron a una huella de carbono de 1.22 kg CO<sub>2</sub>e/kg leche. Sin embargo, las emisiones totales por animal aumentaron hasta un 28% y la reducción en la huella se atribuye al incremento en la productividad. Esto evidencia que la reducción de la huella por unidad de producto no implica necesariamente una disminución en las emisiones totales del sistema productivo. Si no se abordan otros factores puede generarse una percepción errónea entorno a la disminución de los impactos por emisiones GEI.

Para el cálculo de huella de carbono existen diversas metodologías. Oficialmente se utiliza, a nivel internacional, la desarrollada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). A partir de esta base, se han establecido guías internacionales como la ISO 14064-1:2018 sobre la cuantificación e informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero, la ISO 14067:2018 que describe los requisitos y directrices de cuantificación para huella de carbono de los productos y la ISO 14069:2013 orientada a la cuantificación y reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero en organizaciones (Herrero et al., 2011).

Por otro lado, la literatura muestra que las estimaciones de captura de carbono pueden variar ampliamente según la metodología utilizada. En su investigación, Wu et al. (2025) determinaron que al comparar diferentes modelos de estimación se obtenían varias predicciones de secuestro de

carbono significativamente diferentes en función de la metodología empleada. Sin embargo, para cumplir con estándares internacionales, facilitar el acceso a incentivos o mercados y seleccionar prácticas efectivas de mitigación, es necesario contar con herramientas de estimación precisas para desarrollar balances de carbono confiables. El estudio realizado por Hristov et al. (2018) presenta una revisión de esas herramientas disponibles para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos, destacando la importancia de los programas de registro y las herramientas digitales en este proceso. Entre las herramientas más utilizadas a nivel internacional se encuentra el IPCC “Inventory Software”, que consiste en un conjunto de hojas de cálculo integradas y diseñadas para facilitar la estimación nacional de emisiones y remociones en el sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) (IPCC, 2019). Asimismo, la “Ex-Ante Carbon-balance Tool” (EX-ACT), desarrollada por la FAO, permite calcular ex ante el impacto neto de carbono de proyectos agrícolas y ganaderos, apoyándose en las directrices del IPCC (FAO, 2015).

Con los avances tecnológicos en la agricultura, la estimación de carbono mediante imágenes aéreas capturadas por drones se ha convertido en una herramienta funcional para cuantificar rápidamente las reservas de carbono en los sistemas agrícolas. Investigaciones recientes han explorado la combinación de datos obtenidos por drones con modelos de aprendizaje automático para estimar y modelar la captura y almacenamiento de carbono en bosques (Sharma et al., 2022). Una de ellas es la investigación realizada por Vega-Puga et al. (2022) en México, donde utilizaron drones con cámaras de sensor de imagen visible (RGB) de alta resolución para estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono en comunidades semiáridas, tanto en áreas de matorral como praderas.

En este contexto y reconociendo la importancia de las emisiones de GEI, en el sector ganadero, se plantea como objetivo general de este estudio evaluar el balance de carbono en fincas ganaderas de Olancho mediante el análisis de una base de datos y su comparación con estimaciones basadas en la metodología del IPCC. Para ello se propusieron los siguientes objetivos específicos: a) categorizar los

sistemas ganaderos según la huella de carbono reportada en la base de datos de productores beneficiarios del proyecto ganadería sostenible USAID/TMS-Heifer; b) realizar una revisión de literatura sobre el potencial de reducción de huella de carbono en sistemas ganaderos a partir de la implementación de prácticas sostenibles; y c) comparar los balances de emisiones de gases de efecto invernadero en unidades productivas seleccionadas utilizando la metodología del IPCC y la base de datos del del proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer.

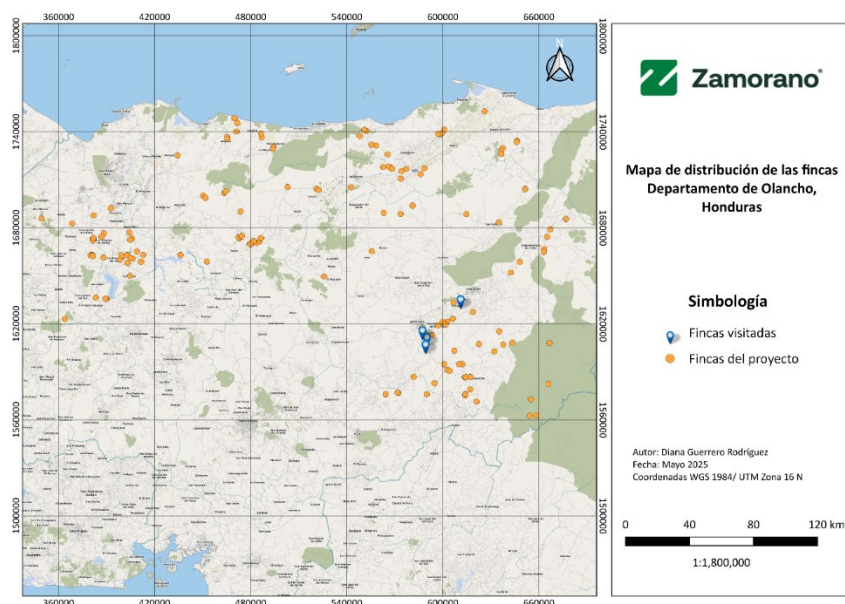
## Metodología

### Ubicación del Estudio

La recolección de datos se llevó a cabo en dos unidades productivas relacionadas al proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer y una unidad adicional incluida como referencia de manejo sostenible en la zona, todas ubicadas en Juticalpa, departamento de Olancho, Honduras (Figura 1). Olancho es reconocido como la región con más aptitudes para la producción de ganado en la zona Nor-Oriental de Honduras, con una densidad poblacional ganadera de aproximadamente 453,294 cabezas de ganado bovino distribuidas en 18,684 explotaciones ganaderas (Mejia-Castillo, 2016). Históricamente, Olancho fue durante mucho tiempo la región más acaudalada de Honduras debido a su producción ganadera y agrícola, lo que le proporcionaba una gran influencia comercial y política. Se ubican a una altitud media de 410 msnm con temperaturas medias anuales entre 26 y 28 °C. Además, se reportan precipitaciones medias anuales de 1,500 a 2,800 mm, dependiendo de la zona.

**Figura 1**

*Mapa de Distribución de las Fincas Ganaderas Incluidas en el Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer*



### **Descripción de la Base de Datos del Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer**

La base de datos cuenta con información de 150 fincas distribuidas en los principales departamentos ganaderos de Honduras: Olancho (57), Colón (13), Atlántida (23), Yoro (25), Cortés (24) y Santa Bárbara (8). En ella se registraron los resultados de la reducción de huella de carbono través de la aplicación de sistemas agroforestales, técnicas de gestión de residuos y prácticas agroecológicas.

A lo largo del proyecto se realizaron dos tomas de datos, la primera, como línea base, durante el primer trimestre del año 2023; la segunda, como resultado de la intervención, en el primer trimestre del 2024. Durante ambas mediciones se tomaron en cuenta, únicamente, las emisiones directas generadas por el ganado, tales como la fermentación entérica y la gestión del estiércol. La estimación de la huella de carbono fue realizada por el proyecto a través del “software” Taurus Web® versión 4.0; para ello se recolectaron imágenes aéreas con un equipo de drones controlado por la aplicación DJI-FLY, que luego fueron cargadas al programa con el fin de hacer un análisis bromatológico para obtener el porcentaje de proteína de la muestra. Por último, la herramienta calculó la huella de carbono basada en un algoritmo de imagen y utilizando las variables de área de pasturas, días de recuperación, días de pastoreo, área forestal, proteína cruda, producción, porcentaje de vacas en producción y suplementación.

### **Categorización de Sistemas Ganaderos a Partir de la Huella de Carbono**

La categorización de fincas ganaderas se desarrolló mediante un enfoque metodológico estructurado en dos etapas secuenciales. En la primera etapa, se realizó un análisis exploratorio de las huellas de carbono de las 150 fincas registradas en la base de datos del proyecto Ganadería Sostenible, utilizando los valores generados por la herramienta Taurus Web® como línea base para la caracterización inicial del desempeño ambiental. Posteriormente, se ordenaron de forma ascendente los datos de huella de carbono expresados en kg CO<sub>2</sub>e/L leche y fueron debidamente categorizados,

lo que permitió realizar comparaciones entre cada grupo y así facilitar la interpretación de las variables asociadas a los cambios de categoría.

La categorización de los sistemas productivos se fundamentó en la revisión de estudios previos que han establecido rangos de referencia para la huella de carbono en sistemas ganaderos latinoamericanos. Herrera Rivera et al. (2015) evaluaron sistemas silvopastoriles intensivos y convencionales en Colombia, reportando valores que oscilaron entre 0.98 y 2.0 kg CO<sub>2</sub>e/L leche para sistemas optimizados, mientras que sistemas tradicionales presentaron valores superiores a 5.0 kg CO<sub>2</sub>e/L leche. Complementariamente, Pardo Rozo y Andrade Adaime (2023) documentaron rangos similares en sistemas ganaderos del piedemonte amazónico colombiano, considerando emisiones por fermentación entérica, consumo de combustibles fósiles, energía eléctrica y transporte de insumos.

En el estudio la huella de carbono fue utilizada como principal indicador de desempeño ambiental. Con base en la revisión de literatura, se clasificaron las unidades productivas en tres categorías diferenciadas por su huella de carbono como se detalla en el Cuadro 1.

### **Cuadro 1**

#### *Categorización de las Fincas Según su Huella de Carbono*

Categorías	Rango (kg CO <sub>2</sub> e/L leche)	Descripción
Baja	0 – 2	Sistemas con prácticas de manejo optimizadas, alta eficiencia productiva y/o implementación de estrategias de mitigación de emisiones.
Media	2 – 5	Sistemas en transición con adopción parcial de tecnologías sostenibles o eficiencia productiva intermedia.
Alta	>5	Sistemas tradicionales extensivos con baja eficiencia productiva y limitada adopción de prácticas de mitigación.

*Nota.* Adaptado de Herrera Rivera et al. (2015); Pardo Rozo y Andrade Adaime (2023).

El análisis de la base de datos se desarrolló mediante un proceso sistematizado en “Microsoft Excel®”, donde se aplicaron filtros y funciones de ordenamiento para asignar cada unidad productiva

a su categoría correspondiente. Se realizaron análisis de frecuencia por departamento y comparaciones temporales entre las mediciones de 2023 (línea base) y 2024 (post-intervención) para evaluar cambios en la distribución de categorías como indicador del impacto de las actividades del proyecto. La consistencia de la categorización se verificó mediante el análisis de la distribución de frecuencias y la identificación de valores atípicos que pudieran indicar inconsistencias en los datos o factores no considerados en la clasificación inicial. Este enfoque permitió identificar patrones espaciales y temporales en la huella de carbono de las fincas participantes.

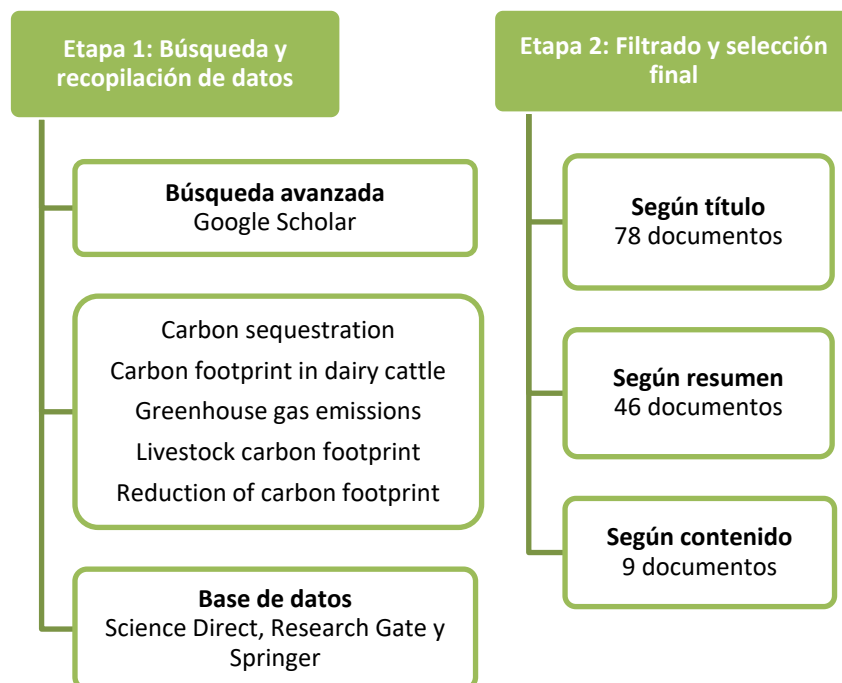
### **Revisión de Literatura Sobre Estrategias de Mitigación de Huella de Carbono en Sistemas Ganaderos**

Con el propósito de respaldar con información científica las principales prácticas que resultaron en una disminución de la huella de carbono en las fincas visitadas, se realizó una revisión de literatura guiada por un protocolo de búsqueda, selección de palabras clave y evaluación de fuentes de información. El proceso inició aplicando el motor académico de búsqueda "Google Scholar", priorizando el acceso a los artículos disponibles en las bases de datos "Science Direct", "Research Gate" y "Springer". La selección consideró la disponibilidad y libre acceso, actualidad de publicaciones y pertinencia temática.

Las palabras clave utilizadas fueron: "carbon sequestration," "carbon footprint in dairy cattle," "greenhouse gas emissions," "livestock carbon footprint," "mitigation of livestock emissions," y "reduction of carbon footprint". Al proceso de búsqueda le siguieron una serie de filtros que permitieron identificar los documentos más destacados según el objetivo de la investigación, como se muestra en la Figura 2. Para ello se consideraron los siguientes criterios de exclusión: documentos de tipo artículo científico, publicados en un período de tiempo de 2015 a 2025, revistas "open Access" y en idiomas inglés o español. Para organizar los artículos seleccionados, se utilizó la aplicación Citavi6 para cargar la bibliografía, facilitar la búsqueda según categorías (autores, revista y año de publicación) y clasificar los artículos por apartados temáticos.

**Figura 2**

*Proceso de Búsqueda y Filtrado de la Literatura Científica*



Los artículos seleccionados proporcionaron información importante acerca de los beneficios de aplicar ciertas prácticas sostenibles de manejo de ganado o de pasturas y sus impactos en las emisiones generadas de los sistemas productivos. Los hallazgos más relevantes se resumieron en una tabla que explica la relevancia de cada estrategia aplicada en el sector ganadero para reducir la huella de carbono. Además, se discuten las estrategias comúnmente aplicadas en el rubro resaltando los resultados obtenidos para diferentes escenarios productivos.

### **Comparación de Emisiones GEI Estimadas Mediante Normativa IPCC y Base de Datos**

La última etapa consistió en la implementación de un estudio de campo comparativo aplicando la metodología estandarizada del IPCC, para verificar las estimaciones de la huella de carbono reportada en la base de datos del proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer. La toma de datos de campo se realizó en tres sistemas productivos seleccionados en el municipio de Juticalpa, departamento de Olancho, Honduras.

### ***Selección de la Región Estudio***

La selección del departamento de Olancho como área de estudio se fundamentó en un análisis multicriterio que consideró tanto aspectos técnicos como logísticos. En primer lugar, Olancho presentó el mayor potencial de análisis al registrar las emisiones absolutas más elevadas al inicio del proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer con un valor de 42.14 t CO<sub>2</sub> totales en 2023, y a su vez, la reducción más significativa posterior a la intervención, disminuyendo a 29.13 t CO<sub>2</sub> en 2024, lo que equivale a un 30.9% de reducción de emisiones totales en el departamento. Esta característica lo convierte en un caso de estudio representativo para evaluar los sistemas con alto impacto ambiental presentes. Además, en el departamento se concentra el 38% (57 de 150) de las fincas incluidas en el proyecto, proporcionando una mayor base de datos disponible para análisis comparativos y garantizando representatividad estadística en las conclusiones. Desde una perspectiva logística, se tomó en cuenta la proximidad geográfica con la Universidad Zamorano (aproximadamente 170 km), para optimizar la viabilidad operativa del trabajo de campo, reduciendo costos de desplazamiento y facilitando las visitas realizadas.

### ***Selección de las Fincas***

De las 57 fincas disponibles en Olancho, se seleccionaron aquellas que cumplían criterios de colaboración y accesibilidad, como la disposición del productor a participar en el estudio, existencia de registros productivos básicos (producción lechera, tamaño del hato) y el acceso vehicular a las instalaciones durante el período de muestreo. En cuanto a los criterios productivos, cada finca debía pertenecer a alguna de las diferentes categorías de huella de carbono (alta, media, baja), deben contar con predominancia de razas lecheras especializadas (Holstein, Jersey) con al menos 70% del ganado en producción (según los reportes de línea base en 2023), y también, implementar prácticas de pastoreo rotacional o manejo mejorado de pasturas. Para criterios de caracterización del manejo, se

evaluó la presencia de componentes agroforestales (cercas vivas, árboles dispersos, o sistemas silvopastoriles).

La aplicación de estos criterios resultó en la selección de tres unidades productivas que representan un gradiente de manejo e intensificación productiva, permitiendo una evaluación robusta de la metodología aplicada durante el Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer y el IPCC bajo diferentes condiciones de manejo ganadero.

### ***Aplicación de Instrumentos de Toma de Datos***

Para la caracterización de los sistemas productivos se realizó una visita a cada finca durante la última semana del mes de abril 2025. En estas visitas se empleó el instrumento de registro de información que se muestra en el Anexo A, con la finalidad de verificar la consistencia de la base de datos. A través de las entrevistas se obtuvo información acerca de las siguientes variables: extensión de la finca, sistema de pastoreo aplicado, razas y tamaño del hato, producción diaria, aplicación de sistemas agroforestales, manejo de pasturas, uso de electricidad y combustibles fósiles y las prácticas sostenibles aplicadas. Para facilitar el registro y tabulación de los datos se utilizó la plataforma de creación de formularios Jotform®. Una vez aplicadas las entrevistas, se descargaron los resultados en formato “Microsoft Excel®” para luego utilizarlos en la metodología de estimación de emisiones de GEI.

### ***Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Unidad Productiva***

Se aplicaron las directrices del IPCC de 2006 para la estimación de GEI en el sector AFOLU. Se emplearon las ecuaciones y factores de emisión correspondientes al Tier 1, nivel que utiliza valores por defecto ajustados a las condiciones locales cuando es posible. El análisis se centró en las emisiones de los alcances 1 y 2, que incluyen emisiones directas provenientes de fermentación entérica y manejo de estiércol, así como emisiones indirectas asociadas al consumo de energía en los sistemas ganaderos.

### Emisiones por Fermentación Entérica.

En cuanto a fermentación entérica, las emisiones varían según la categoría de ganado dentro de la producción. Para estimar las emisiones totales se seleccionaron los factores de emisión correspondientes y se multiplicaron por la población animal existente (Ecuación 1).

$$E = EF_{(T)} \times N_{(T)} \times 28 \quad [1]$$

Donde:

E = Emisiones de metano por fermentación entérica, kg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>

EF<sub>(T)</sub> = Factor de emisión para la población de ganado definida, kg CH<sub>4</sub> cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

N<sub>(T)</sub> = Cantidad de cabezas de ganado

T = Categoría de ganado

28 = Poder calorífico del metano (GWP-100)

### Estimaciones por Gestión de Estiércol.

**Estimaciones de Metano (CH<sub>4</sub>).** Debido a la poca información registrada en las fincas en términos productivos, las emisiones del estiércol se calcularon en base al Alcance 1 establecido por el IPCC (2006). La Ecuación 2 muestra cómo calcular dichas emisiones.

$$CH_4 \text{ Estiércol} = EF_{e(T)} \times N_{(T)} \times 28 \quad [2]$$

Donde:

$CH_4_{\text{Estiércol}}$  = emisiones de  $CH_4$  por la gestión del estiércol, para una población definida,  $kg CH_4$  año<sup>-1</sup>

$EFe_{(T)}$  = factor de emisión para la población de ganado definida,  $kg CH_4$  cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

$N_{(T)}$  = la cantidad de cabezas de la especie/categoría de ganado T del país

T = especie/categoría de ganado

28 = poder calorífico del metano (GWP-100)

**Emisiones de Óxido Nitroso ( $N_2O$ ) Directa.** Las emisiones de  $N_2O$  están asociadas con el volumen de heces y orina excretado por los animales. En esta investigación, se consideró que no se tiene ningún manejo de estiércol, de modo que todos los desechos fueron depositados en los pastizales. Por lo tanto, se estimó el factor de emisión de  $N_2O$  de la unidad considerando la tasa anual de excreción de cada animal en el año de estudio (IPCC, 2006) (Ecuación 3 y Ecuación 4). Las emisiones de  $CO_2$  se calcularon tomando en cuenta el poder calorífico del gas contaminante, que luego fue estimando en kilogramos.

$$GR_{N_2O} = \left( \left[ \sum_S \left[ \sum_T \left( N_{(T)} \times Nex_{(T)} \times MS_{(T)} \right) \right] \times EF_{(S)} \right] \times \frac{44}{28} \right) \times 265 \quad [3]$$

Donde:

$GR_{N_2O}$  = Emisiones directas de  $CO_2$  equivalente por manejo del estiércol,  $kg CO_2e$  año<sup>-1</sup>

$N_T$  = Número de animales

$Nex_{(T)}$  = Valor promedio de excreción de N por animal,  $kg N$  animal<sup>-1</sup>

$MS_{(T)}$  = Fracción de la excreción total de nitrógeno de los animales

$FE_{(s)}$  = Factor de emisión para emisiones directas de  $N_2O$  del sistema de manejo del estiércol (kg  $N_2O-N$ / kg N). Sin tratamiento, solo pasturas (0.02).

S = sistema de gestión del estiércol

T = especie/categoría de ganado

44/28 = es la conversión de emisiones de  $N_2O-N$  (me) a emisiones de  $N_2O$  (me) (GWP-100)

265 = Poder calorífico del óxido nitroso (GWP-100)

$$N_{ex(T)} = N_{\text{índice}(T)} \times TAM_{(T)} \times 365 \quad [4]$$

Donde:

$N_{ex(T)}$  = excreción anual de N para la categoría de ganado T, kg N animal<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

$N_{\text{índice}(T)}$  = tasa de excreción de N por defecto, kg N (1000 kg masa animal)<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>

$TAM_{(T)}$  = masa animal típica para la categoría de ganado T, kg animal<sup>-1</sup>

### **Emisiones por Consumo de Combustibles Fósiles.**

En la estimación de las emisiones por consumo de combustibles fósiles se tomó en cuenta el uso de maquinaria en la finca. A partir de los galones anuales consumidos para el uso de los vehículos registrados, se aplicó la Ecuación 5 haciendo uso del factor de emisión del IPCC (2006), equivalente a 2.18 kg  $CO_2$  L<sup>-1</sup> de gasolina.

$$EC = \sum \text{combustible} \times FE \quad [5]$$

Donde:

EC = emisiones por combustible, kg de  $CO_2e$  año<sup>-1</sup>

Combustible = consumo de combustibles, litros año<sup>-1</sup>

FE = Factor de emisión, 2.18 kg CO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>

### **Emisiones por Consumo Energético.**

Para estimar las emisiones por consumo energético se tomó en cuenta el uso de la red eléctrica de Honduras. Se calculó aplicando la Ecuación 6 en la cuantificación del consumo de aparatos eléctricos dentro de la finca y se reunió la información técnica de los mismos.

$$ECE = \sum \text{consumo energético} \times FE \quad [6]$$

Donde:

ECE = emisiones por consumo energético, kg de CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>

Consumo energético = kWh año<sup>-1</sup>

FE = Factor de emisión, 0.63 ton CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup>

### ***Almacenamiento de Carbono en las Pasturas***

Para la recolección de la biomasa de los pastos en las fincas seleccionadas se implementó un aforo de botanal utilizando un diseño de muestreo en zig-zag sobre un área de 1 ha (Figura 3). La metodología consistió en la recolección de tres muestras de 1 m<sup>2</sup>, a una altura 5 cm sobre el suelo, siguiendo un patrón aleatorio dentro del área de medición.

**Figura 3**

*Vista del Botanal Utilizado como Herramienta de Muestreo en el Aforo*



Se obtuvieron tres muestras en cada finca. Las muestras frescas fueron rotuladas y pesadas en campo. Luego, fueron transportadas a la unidad forestal de Zamorano, donde se trituraron con ayuda de una chipeadora. En el Laboratorio de Bioenergía del departamento de Ambiente y Desarrollo se homogeneizaron las muestras para tomar tres submuestras de cada una y se analizó el contenido de biomasa seca utilizando un método estándar (Cuadro 2).

**Cuadro 2**

*Metodología Aplicada en los Análisis de Laboratorio de las Muestras de Pasto Obtenidas en las Fincas*

Análisis	Método	Referencia
Humedad Residual	Método de prueba estándar para la humedad en la muestra de análisis de carbón y coque	American Society for Testing and Materials International (1996)

Cada submuestra permaneció en proceso de secado durante 24 horas a una temperatura de 100 - 105 °C. Después del secado, se registró el peso seco de cada submuestra. Para calcular el carbono de la biomasa sobre el suelo en términos de materia seca es necesario conocer el peso seco del pasto

expresado en  $\text{kg m}^{-2}$ . Para ello, se aplicó la Ecuación 7. Posteriormente, se utilizó la Ecuación 8 para calcular el contenido de carbono de la biomasa seca.

$$PS_t = \frac{Pf_t \times Ps_s}{A_m \times Pf_s} \quad [7]$$

Donde:

$PS_t$  = Peso seco total,  $\text{kg m}^{-2}$

$Ps_s$  = Peso seco de la submuestra, g

$Pf_t$  = Peso fresco total, kg

$Pf_s$  = Peso fresco de la submuestra, g

$A_m$  = Área de muestra,  $\text{m}^2$

$$C_{AGB} = PS_t \times 0.47 \quad [8]$$

Donde:

$C_{AGB}$  = Carbono de la biomasa aérea seca,  $\text{t CO}_2 \text{ha}^{-1}$

$PS_t$  = Peso seco total,  $\text{kg m}^{-2}$

### ***Almacenamiento de Carbono en Árboles***

#### **Inventario forestal.**

Se realizó un inventario forestal para estimar el contenido de biomasa aérea en los sistemas productivos visitados, con el objetivo de estimar la captura anual de  $\text{CO}_2$  en cada una de las unidades productivas y luego, realizar el balance de GEI. Para el inventario forestal se tomaron en cuenta los tres tipos de arreglos forestales presentes en las fincas: cercas vivas, árboles dispersos y rodales puros. Se

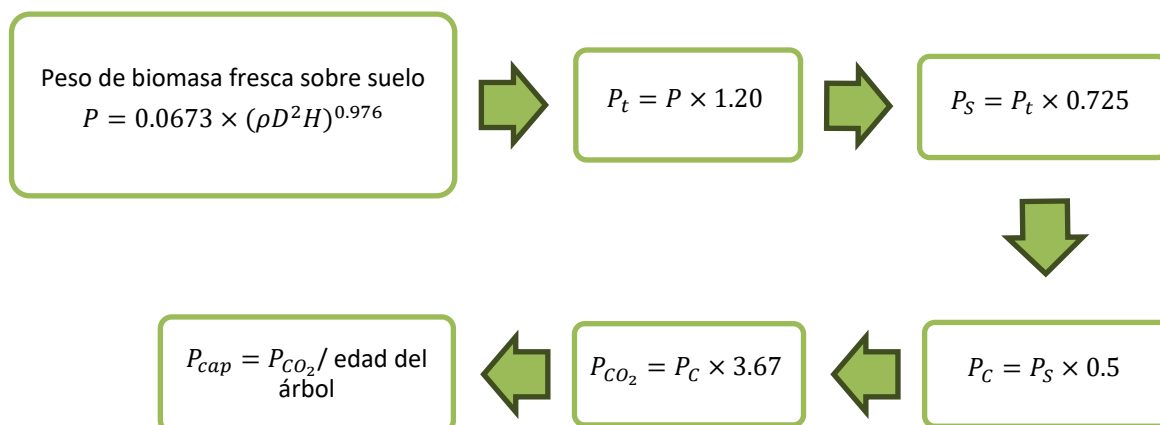
establecieron parcelas lineales con extensión de 20 – 25 m para cada transecto, de acuerdo con la homogeneidad de la cerca, es decir, en secciones homogéneas se hicieron parcelas de 20 m y en secciones más heterogéneas fueron de 25 m. En el caso de las parcelas circulares, se aplicó el método centroide en el bloque y se realizó el muestreo de la parcela con un radio fijo de 12.6 m y un área de 500 m<sup>2</sup>. Además, se realizó un conteo al 100% de los árboles dispersos en las fincas y se registraron los diámetros y alturas representativos de cada especie.

En cada uno de los muestreos se realizó la medición dasométrica de las diferentes especies de árboles presentes. Se utilizó un formato de inventario forestal (Anexo B) para el registro de los siguientes datos: número de árboles, especie, diámetro a la altura del pecho (DAP) a 1.30 m, edad aproximada y altura total estimada con hipsómetro a 15 m lineales del árbol.

Se realizó la limpieza y tabulación de los datos recolectados. El ordenamiento y procesamiento de los datos se efectuó en el programa “Microsoft Excel®”. Posteriormente, se estimó el contenido de carbono de las unidades productivas muestreadas utilizando el método empleado por Broward (2018), que consiste en una serie de ecuaciones orientadas a la estimación del CO<sub>2</sub> capturado por árbol, donde se determinó el incremento adicional de captura para el período de estudio (2025). Estas ecuaciones se resumen en la Figura 4. Finalizado el proceso de estimación, se expresaron estos datos en función de la unidad productiva (kg CO<sub>2</sub>/L leche).

Figura 4

Secuencia de Ecuaciones Para Estimación de Captura de Carbono en Árboles



Nota. Adaptado de Broward (2018); Chave et al. (2014) y Rajapakshe et al. (2024).

Donde:

P = peso de biomasa fresca sobre el suelo, kg/árbol

$\rho$  = densidad de la madera, g cm<sup>-3</sup>

D = diámetro a la altura del pecho, cm

H = altura del árbol, m

$P_t$  = peso fresco con raíces, kg/árbol

$P_s$  = peso seco del árbol, kg/árbol

$P_c$  = peso de carbono en el árbol, kg/árbol

$P_{CO_2}$  = peso de carbono en el árbol, kg/árbol

$P_{cap}$  = peso de CO<sub>2</sub> por árbol, kg/año

### ***Balance de Gases de Efecto Invernadero (GEI)***

Al finalizar las estimaciones de GEI de las diversas fuentes y el secuestro de carbono en el área de producción, se representó el balance de GEI como la diferencia entre las emisiones totales de CO<sub>2</sub>e y la cantidad de Carbono fijado en las pasturas (Ecuación 9).

$$GEI = (FE_{CH_4} + GR_{CH_4} + GR_{N_2O} + C_f + C_e) - S_c \quad [9]$$

Donde:

GEI = balance de gases efecto invernadero, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

FE<sub>CH<sub>4</sub></sub> = fermentación entérica, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

GR<sub>CH<sub>4</sub></sub> = metano de la gestión de residuos, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

GR<sub>N<sub>2</sub>O</sub> = óxido nitroso de la gestión de residuos, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

C<sub>f</sub> = consumo de combustibles fósiles, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

C<sub>e</sub> = consumo energético, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>

S<sub>c</sub> = secuestro de carbono en la biomasa aérea de árboles y pasturas, t CO<sub>2</sub>e cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

### ***Análisis de Datos***

Para comparar la variación en las huellas de carbono reportadas en 2023 y 2024 por el proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer, se realizó un análisis exploratorio de la base de datos compartida. Este análisis consistió en la observación de las variables productivas registradas en la base de datos para cada unidad productiva. Se comparó la información organizada en tablas y, a partir de esta exploración, se identificaron patrones y tendencias que sugieren relaciones entre determinadas prácticas de manejo y la reducción de la huella de carbono.

Se tabularon los datos obtenidos en campo, utilizando el programa "Microsoft Excel®". Se desarrollaron los cálculos correspondientes para obtener los valores de emisiones de GEI y de captura de CO<sub>2</sub> para estimar el balance de GEI. Los valores obtenidos se presentaron de acuerdo con la unidad funcional de la huella de carbono (kg CO<sub>2</sub>/L leche), de modo que permitiera una comparación directa entre los sistemas productivos estudiados. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre la base de datos y los resultados calculados con la metodología IPCC, representados en gráficos para facilitar su comprensión.

## Resultados y Discusión

### Categorización de Fincas

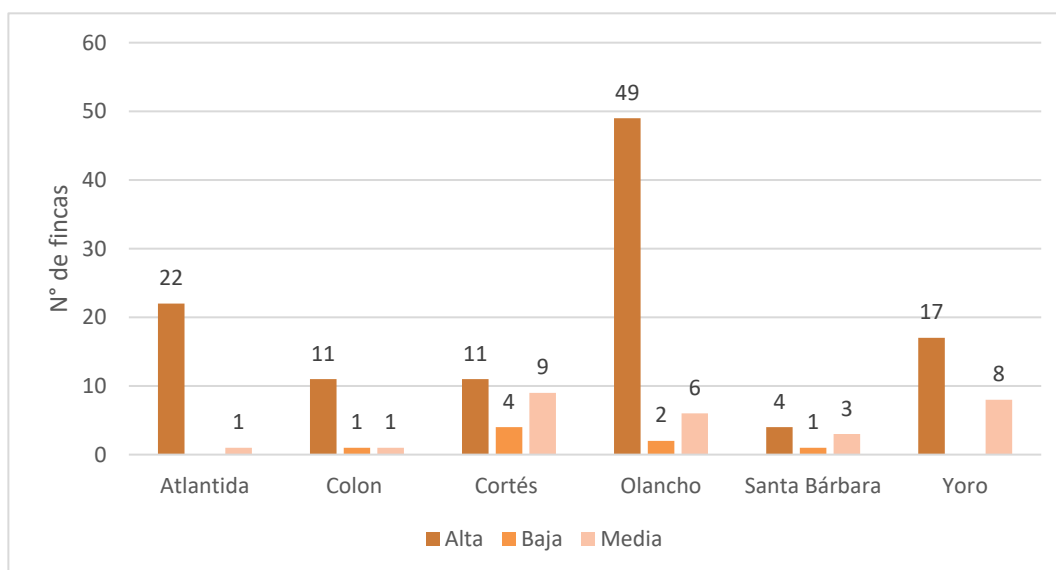
Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> por litro de leche suelen estar asociadas a sistemas con menor eficiencia en la conversión de insumos, alimentación deficiente del ganado, baja productividad y gestión inadecuada de los recursos naturales como el suelo y el agua (Sorley et al., 2024). Los datos de línea base tomados en 2023 (Figura 5) muestran predominancia de sistemas de producción con alta huella de carbono, que representa el 77.07% de las fincas pertenecientes al proyecto. Según la base de datos, la huella de estas unidades productivas oscila entre los 5.0 y 31.9 kg CO<sub>2</sub>/L leche, siendo el valor promedio de 8.2 kg CO<sub>2</sub>/L leche, la mayoría de ellas ubicadas en los departamentos de Olancho (49), Atlántida (22) y Yoro (17).

Las fincas con alta huella de carbono reportaron las menores producciones promedio diarias por vaca, el 50% de estas fincas manejaba menos de 30 días de recuperación para sus pasturas y 56 contaban con menos de 10 vacas en producción. Estas características coinciden con los resultados de Galloway et al. (2024), quienes encontraron que las fincas con alta huella en Sudáfrica tuvieron una productividad promedio de 17 L/vaca·día frente a 20 L/vaca·día en fincas de baja huella. De manera similar, Mavisoy et al. (2025) reportaron que sistemas lecheros tropicales con baja producción por vaca y períodos cortos de recuperación generan huellas notablemente superiores, respaldando la relación inversa entre eficiencia productiva y huella de carbono.

En cambio, solo el 5.09% de las fincas en el proyecto mantenían niveles bajos de huella de carbono, con valores de 1.1 a 2.12 kg CO<sub>2</sub>/L leche, cuyo promedio es de 1.6 kg CO<sub>2</sub>/L leche. De las ocho fincas categorizadas con baja huella de carbono, cuatro se encuentran en el departamento de Cortés. Estas unidades productivas se caracterizan por mantener periodos de recuperación de pasturas mayores a 40 días, estableciendo un tiempo de pastoreo entre 1 a 4 días y seis de estas fincas cuentan con más del 50% de su ganado en estado productivo.

**Figura 5**

*Categorización de Huella de Carbono de las Fincas Evaluadas por Departamento en el 2023*



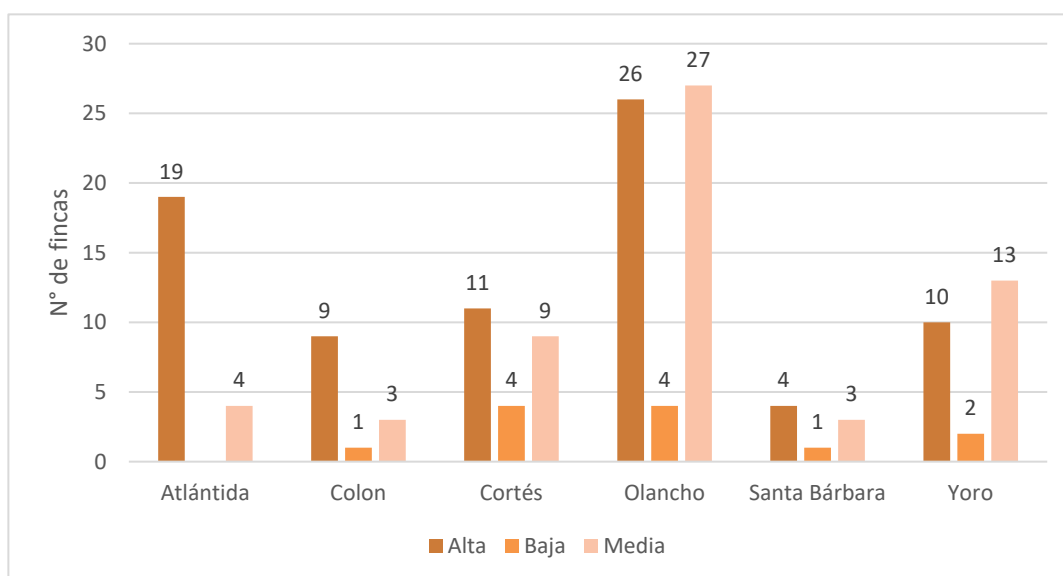
Tras la intervención del proyecto, de los 121 fincas reportadas con alta huella de carbono en 2023, 37 lograron reducir su huella de carbono a valores inferiores a los 5 kg CO<sub>2</sub>/L leche. Este cambio se observa en la Figura 6, donde se reduce el número de fincas de categoría alta y aumentan principalmente las fincas de categoría media. De estas fincas, 25 están ubicadas en el departamento de Olancho, mientras el resto se distribuye en los departamentos de Atlántida, Yoro y Colón.

Para lograr esta reducción en la huella de carbono, se realizaron cambios en el manejo productivo y reproductivo de las unidades. De acuerdo con los registros de la base de datos, 18 de las fincas aumentaron los días de recuperación de sus pasturas hasta 25 días o más, a su vez redujeron los días de pastoreo, se implementaron más de 5 km de cercas vivas en todas las fincas y, aunque la producción promedio diaria por vaca se mantiene baja, 26 de las fincas aumentaron a más del 60% su ganado en ordeño. Estos patrones coinciden con el estudio de Brook et al. (2022) en Costa Rica, donde se demostró que mantener al menos 500 m/ha de cerca viva, complementado con un buen manejo del pastoreo, permite mejorar la dinámica de secuestro de carbono. Además, en su estudio Mosier et al. (2021), demostraron que el corto tiempo de permanencia del ganado en cada potrero da lugar a un

incremento de 13% - 20% en el carbono orgánico del suelo y reduce la huella de carbono de la leche en los sistemas productivos.

**Figura 6**

*Categorización de Huella de Carbono de las Fincas Evaluadas por Departamento en el 2024*



Así mismo, se registraron 24 fincas que permanecieron en categoría de alta huella de carbono a pesar de reportar reducciones entre 1 y 10.5 kg CO<sub>2</sub>/L leche. Este resultado se relaciona directamente con un incremento en la producción diaria, ya que todas estas unidades productivas alcanzaron el doble de su volumen de producción, o incluso más, en comparación con el año 2023. Aunque una mayor productividad puede mejorar la eficiencia por unidad de producto, Darré et al. (2021) argumentaron que los sistemas lecheros con mayores rendimientos individuales tienden a tener una huella de carbono más baja por leche producida, pero a su vez esto no implica menores emisiones totales si no se introducen mejoras en el manejo de pasturas o del estiércol.

Sin embargo, no todas las fincas evidenciaron un cambio positivo tras la intervención del proyecto. De acuerdo con la información registrada, 12 fincas distribuidas equitativamente en los departamentos de Yoro, Atlántida y Olancho aumentaron entre un 6 y 32% su huella de carbono

durante el año 2024 sin que se documentaran cambios a nivel productivo. Con relación a esto, se reveló que en América Latina las regiones tropicales tienden a presentar menores rendimientos productivos y huellas de carbono superiores debido a diferencias en el rendimiento digestivo del ganado, sus índices de conversión alimenticia y otros factores de manejo local (Velarde-Guillén et al., 2021). Por lo tanto, los aumentos observados en este estudio podrían atribuirse a la variabilidad en la eficiencia de insumos o a cambios no documentados en la base de datos.

### **Análisis de Literatura Sobre el Potencial de Reducción de Huella de Carbono en Sistemas Ganaderos**

El uso de prácticas de manejo sostenible ha demostrado ser efectivo para aumentar la captura de carbono y contribuir en la reducción de huella de carbono en la ganadería. Una de las estrategias que ha demostrado ser efectiva es la introducción de especies forrajeras de alto rendimiento, especies perennes y leguminosas en los pastizales. Estas especies no solo aumentan la productividad del sistema, sino que también incrementan el contenido de carbono en el suelo. Lo anterior se demuestra en el estudio realizado por Yang et al. (2019), quienes realizaron un estudio durante 22 años en Minnesota, Estados Unidos, donde demostraron que los pastizales combinados con múltiples especies perennes y leguminosas lograron almacenar un 178% más de carbono en el suelo en comparación con las pasturas establecidas como monocultivo. En ese mismo sentido, diversos estudios realizados en México comprobaron mayores almacenes de carbono en aquellos suelos de pastizales con pastoreo racional en combinación con altas coberturas de pastos forrajeros, a diferencia de los pastizales sobrepastoreados con poca cobertura vegetal (Jurado-Guerra et al., 2021).

Hablando más de actividades relacionadas a sistemas silvopastoriles, se determinó que estos sistemas y los remanentes forestales almacenan entre un 27% y un 163% más de carbono en comparación con pastizales abiertos (Aryal et al., 2022). Además, se observó una correlación positiva entre la biomasa leñosa, las raíces finas y las concentraciones de carbono orgánico en el suelo, lo que resalta la importancia de promover sistemas silvopastoriles adecuados y conservar los remanentes

forestales dentro de paisajes dominados por la ganadería, como una estrategia de mitigación basada en la captura de carbono en biomasa aérea y suelo. Esto concuerda con los hallazgos de Valenzuela Que et al. (2022), quienes evidenciaron, en fincas ganaderas de Tabasco, México, que los sistemas silvopastoriles mejoran significativamente la captura de carbono en los suelos y la biomasa, convirtiendo las fincas en sumideros netos de carbono.

Otra medida importante de mitigación es la gestión adecuada del estiércol. Prácticas como el compostaje o la reducción del tiempo de almacenamiento en condiciones anaeróbicas, puede disminuir considerablemente las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). En ese sentido, los biodigestores anaeróbicos se han consolidado como una estrategia efectiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos, pues no solo mitigan las emisiones, sino que también generan beneficios energéticos y agronómicos. Venegas-Venegas et al. (2023) en México, estimaron una reducción potencial de 10,044 Mt CO<sub>2</sub>e/año mediante la implementación de biodigestores en establos lecheros a nivel nacional, reduciendo aproximadamente el 77% de las emisiones totales generadas por esta actividad. Además, el biogás estimado equivale a un potencial de generación de energía eléctrica de 2,327.3 GW anuales, que es suficiente para satisfacer las necesidades de más de un millón de habitantes.

Además de las estrategias ya mencionadas, se han documentado otras que demostraron cierto nivel de eficacia en reducir las emisiones de GEI. Como resultado del análisis de literatura realizado, en el Cuadro 3 se resumen sus principales impactos en los estudios encontrados.

### Cuadro 3

#### *Estrategias de Reducción de Huella de Carbono Aplicadas en Sistemas Ganaderos*

Estrategia/ intervención	Impacto principal	Magnitud estimada	Referencias
Suplementación con alga roja ( <i>Asparagopsis taxiformis</i> )	Inhibición de producción de metano entérico	Reducción del 80 % en CH <sub>4</sub> entérico	Roque et al. (2021)

Estrategia/ intervención	Impacto principal	Magnitud estimada	Referencias
Compostaje de estiércol	Manejo mejorado de residuos orgánicos; reducción de emisiones de GEI	Reducción del 30 % en GEI	Agostini et al. (2015)
Sistemas silvopastoriles y agroforestales	Incremento del forraje disponible y nutrientes; mayor captura de carbono	Mejora cualitativa del sistema productivo	Contreras-Santos et al. (2022); Olaya-Montes et al. (2021)
Aplicación de biochar	Captura de CO <sub>2</sub> y reducción de la huella de carbono de la cadena láctea	Hasta 59 % de reducción en emisiones de la cadena láctea (potencial: 5 Mt CO <sub>2</sub> e/año en Reino Unido)	Xing et al. (2018); Vivid Economics (2019)
Reservas de carbono en biomasa arbórea viva	Aumento del carbono almacenado en árboles dentro del sistema productivo	Hasta 134.6 Mg C/ha según uso del suelo (México)	Aryal et al. (2022)
Uso de biodigestores en establos lecheros	Captura y aprovechamiento de metano; reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> e a escala nacional	Potencial de reducción: 10,044 Mt CO <sub>2</sub> e/año (México)	Venegas-Venegas et al. (2023)

### Comparación de Emisiones de GEI Estimadas Mediante Normativa IPCC y Base de Datos

A continuación, se detallan las características de cada uno de los sistemas productivos seleccionados según los criterios previamente establecidos. La información recopilada en las unidades productivas permitió contrastar los hallazgos de la literatura científica con las observaciones realizadas en campo.

#### *Descripción de las Unidades Productivas*

##### **Unidad Productiva San Manuel.**

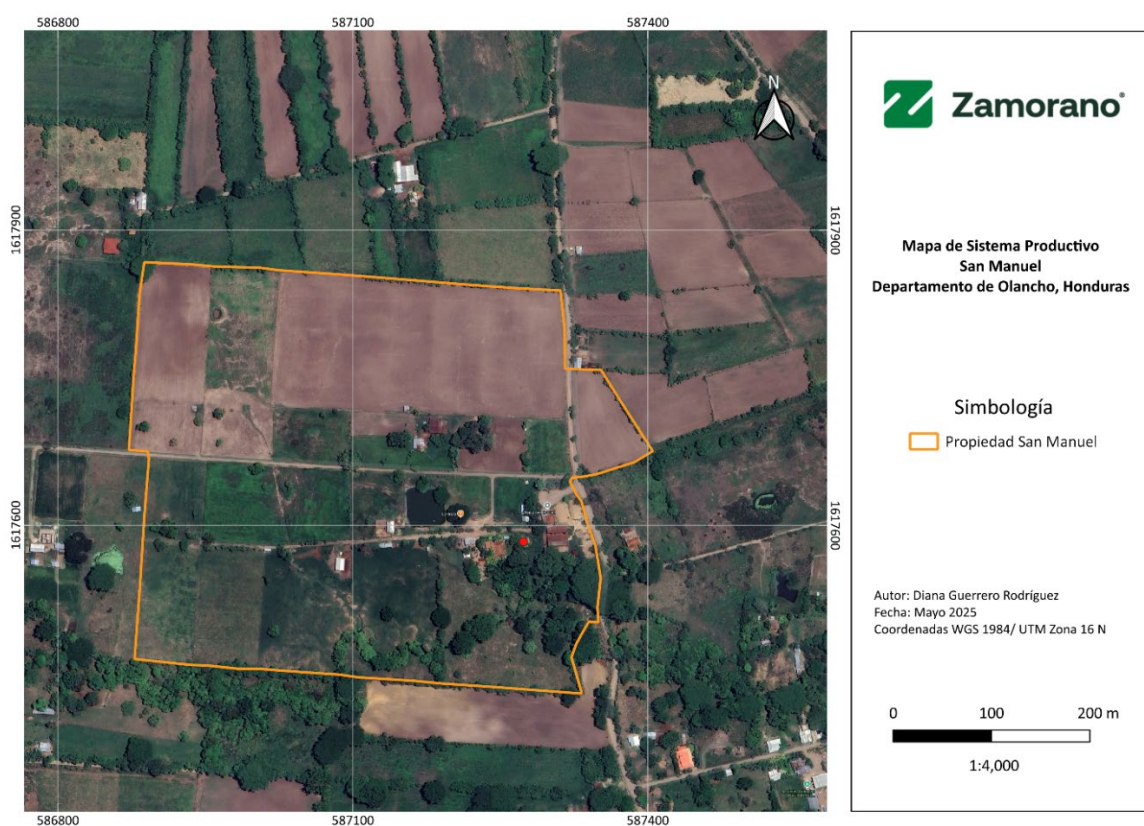
En la Figura 7 se observa el mapa de la unidad productiva San Manuel, que comprende una extensión alrededor de 18 ha de terreno e implementa un sistema de producción extensivo con

rotación de potreros. Cuentan con pastos mejorados desde hace al menos 20 años, entre los que predominan las especies de *Brachiaria brizantha* y *Bachiaria decumbes*. Actualmente, el hato se compone de 100 animales de las razas Holstein y Jersey, al momento de la visita, 55 de sus vacas estaban designadas al ordeño con una producción promedio diaria de 1,000 L de leche.

En esta propiedad están optando por un sistema agroforestal al mantener arreglos de cercas vivas con mezcla de árboles maderables y forrajeros, donde predominan las especies *Bursera simaruba* y *Gliricidia sepium*. Además, cuentan con árboles nativos con manejo natural y árboles en remanente. Las edades de los árboles varían desde 6 hasta los 80 años, aproximadamente; del mismo modo presentan un amplio rango de DAP de 8 cm hasta alcanzar 198 cm y diversas alturas.

### Figura 7

Mapa de Unidad Productiva San Manuel



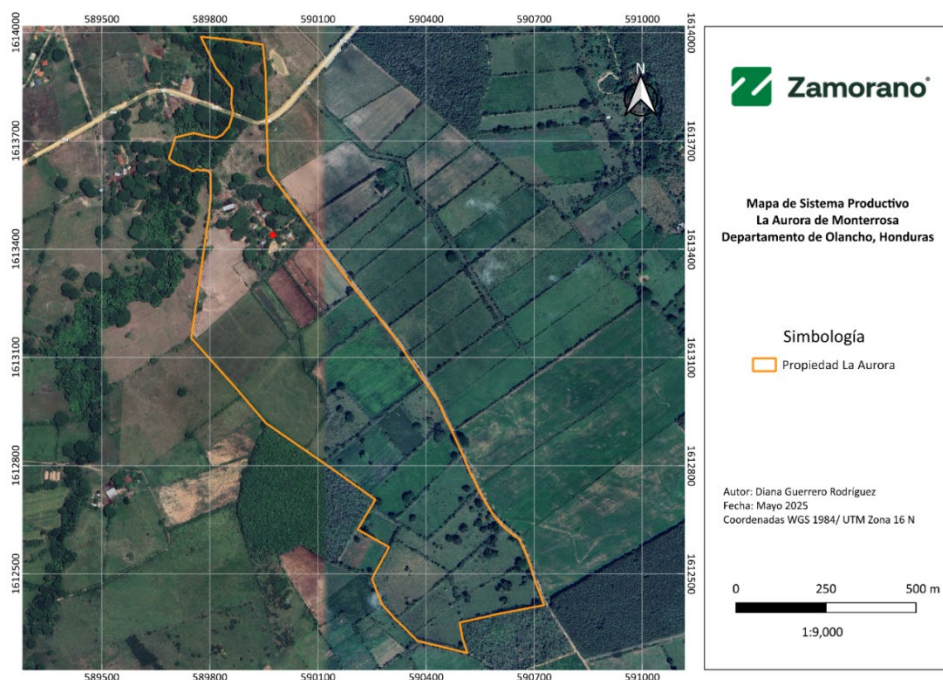
### Unidad Productiva la Aurora.

En la Figura 8 se muestra el mapa de la unidad productiva La Aurora. La propiedad se extiende alrededor de 81 mz de terreno, de las cuales 20 mz están destinadas a producción de sorgo y maíz para alimento del ganado. Han implementado pastos mejorados desde hace 20 años, principalmente con las especies *Brachiaria brizantha*, *Bachiaria decumbes*, *Megathyrus maximus* (Pasto Mombasa) y los pastos híbridos Mulato I y Mulato II. Actualmente, su hato se compone de 100 animales con diversas razas como Holstein, Jersey, Girolando, Guzerat y Red Sindhi. Al momento de la visita, 30 de sus vacas estaban designadas al ordeño con una producción promedio diaria de 300 L de leche.

Los propietarios de la unidad mantienen un sistema agroforestal con arreglos de cercas vivas y árboles dispersos, incluyendo especies maderables, frutales y forrajeras, donde predominan las especies *Bursera simaruba* y *Gliricidia sepium*. Las edades de los árboles varían entre los 10 y 70 años, aproximadamente; así mismo su DAP va de 16 cm hasta 140 cm y diversas alturas.

**Figura 8**

*Mapa de Unidad Productiva La Aurora*

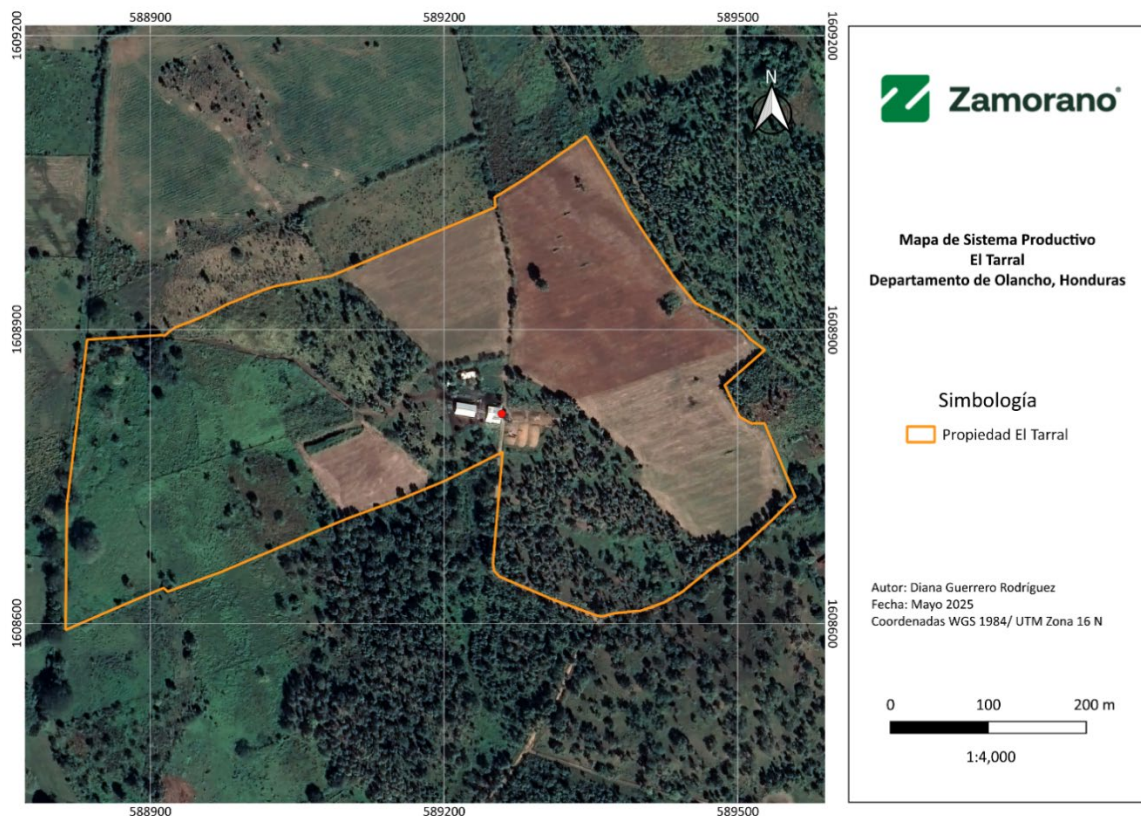


### **Unidad Productiva el Tarral.**

En la Figura 9 se observa el mapa de la unidad productiva El Tarral, que tiene unas 30 mz de extensión territorial. Cuentan con pastos mejorados hace al menos 20 años, entre los que predominan las especies *Brachiaria brizantha* y *Megathyrsus maximus*. Actualmente, su hato se compone de 170 animales de las razas Jersey, Holstein y Pardo suizo, así como encastes de Brahman x Jersey y Girolando x Holstein. Al momento de la visita, 60 de sus vacas estaban designadas al ordeño con una producción promedio diaria de 500 L de leche.

Esta unidad productiva utiliza energía solar para suplir los equipos de iluminación y cámaras de seguridad y su equipo de ordeño funciona con bomba de combustión, por lo tanto, no se han visto en la necesidad de conectarse a la red eléctrica nacional. También, implementan un sistema agrosilvopastoril que mantiene rodales puros para pastoreo, arreglos de cercas vivas y árboles dispersos con mezcla de árboles maderables y forrajeros, donde predominan *Bursera simaruba* y las especies de *Quercus*: pino encino y roble amarillo. La mayoría de los árboles superan los 20 años, a excepción de los árboles plantados en cerco vivo, el DAP se mueve entre 18 y 155 cm y el promedio de alturas es de 10.7 m.

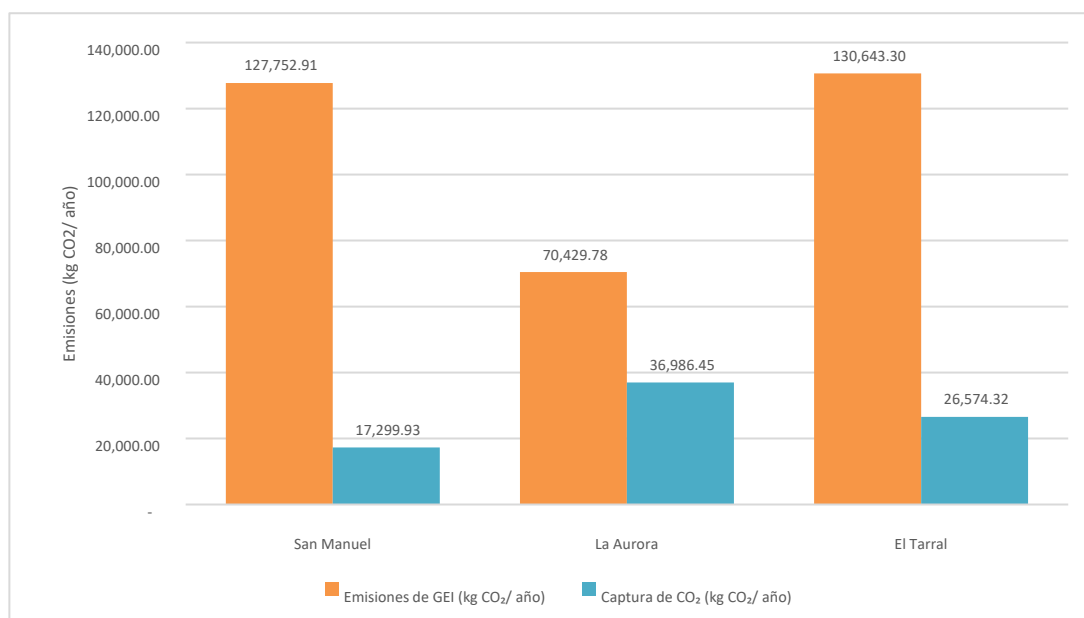
Figura 9

*Mapa de Unidad Productiva El Tarral****Balace de GEI***

El balance de carbono realizado para las tres unidades productivas visitadas reveló notables diferencias entre las emisiones anuales de GEI y la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> por finca (Figura 10). Los datos muestran que San Manuel y El Tarral registran las mayores emisiones mientras que La Aurora presenta el nivel más bajo, esto se debe principalmente a que los dos primeros tienen casi el doble de animales en ordeño, lo que genera directamente mayores emisiones por fermentación entérica del ganado. Sin embargo, al considerar la capacidad de captura, La Aurora destaca con el valor más alto entre las tres, que representa un 52.5% de compensación respecto a sus emisiones.

**Figura 10**

*Comparación de los Inventarios de Emisiones y Captura de CO<sub>2</sub> Para Cada Uno de las Unidades Productivas*



El Cuadro 4 muestra detalladamente los valores de emisiones de CO<sub>2</sub>, la captura anual de CO<sub>2</sub> y el balance de los gases efecto de efecto invernadero tanto en valores netos como en la unidad funcional de kg CO<sub>2</sub>/ L leche para cada uno de los sistemas productivos. Se observa que el sistema productivo San Manuel tiene el menor valor de captura de carbono, esto aunado con sus altas emisiones permite que esta unidad sea la de mayor balance neto de emisiones con 110,452.98 kg CO<sub>2</sub>/año. No obstante, su balance expresado como unidad funcional es el menor de los tres. Esta contradicción ocurre debido a la alta productividad del sistema, pues al ser la huella de carbono una unidad funcional relativa a la producción de leche, el hecho de incrementar la producción distribuye las emisiones totales sobre un volumen mayor de producto, dando una percepción errónea de reducción del impacto.

En esta línea, Zhang et al. (2017) señalan que las estrategias de mitigación que se enfocan únicamente en reducir la huella por unidad de producto, sin modificar el tamaño del hato, pueden resultar insuficientes para disminuir las emisiones totales de los sistemas productivos. Además, Darré et al. (2021) destacan que, aunque las emisiones por kg de leche pueden disminuir con una mayor productividad, los impactos ambientales locales, como el uso de recursos y la eutrofización, pueden incrementarse debido a una mayor demanda de insumos y generación de residuos.

En el sistema productivo El Tarral, el cual presenta emisiones más altas que en San Manuel y su producción anual es casi 50% menos, ocurre una situación completamente opuesta. A pesar de que El Tarral reporta mayor nivel de emisiones GEI, su balance neto es menor que el de San Manuel, debido a sus altos valores de captura de CO<sub>2</sub>. Sus altos niveles de captura se deben a la abundancia arbórea de su finca, que posee alrededor de 1,252 árboles en una extensión de 21.4 ha, capturando unas 19.26 ton CO<sub>2</sub>/año. Esta situación concuerda con una investigación realizada en una finca lechera de Costa Rica, donde se demostró que la incorporación de árboles en cercas vivas permitió capturar 1.43 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo que equivale aproximadamente a 5.24 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, compensando entre el 21 % y el 37 % de la huella de carbono de la producción de leche (Brook et al., 2022).

#### Cuadro 4

##### *Balance de los Gases de Efecto Invernadero por Unidad productiva*

Sistema productivo	Vacas en ordeño	Producción anual (L leche/ año)	Emisiones de GEI (kg CO <sub>2</sub> / año)	Captura de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> / año)	Balance (kg CO <sub>2</sub> / año)	Huella de carbono (kg CO <sub>2</sub> / L leche)
San Manuel	55	365,000.00	127,752.91	17,299.93	110,452.98	0.30
La Aurora	30	91,250.00	70,429.78	36,986.45	33,443.34	0.37
El Tarral	60	182,500.00	130,643.30	26,574.32	104,068.99	0.57

*Nota.* Balance = (Emisiones totales – Captura de CO<sub>2</sub>) / Producción anual

### ***Comparación de los resultados obtenidos con los resultados del proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer***

En el Cuadro 5 se presentan los valores de huella de carbono realizados aplicando la metodología IPCC de estimación de emisiones de GEI y los resultados reportados por la base de datos del proyecto Ganadería Sostenible de USAID/TMS-Heifer. Los balances estimados con el IPCC son notablemente más conservadores, pero también, pueden ser los más cercanos a realidad debido al uso de una metodología internacional aprobada para dicha estimación, lo que permite realizar comparaciones consistentes y verificables entre diferentes contextos productivos (Eggleston et al., 2006).

En contraste, los valores de huella de carbono estimados por el proyecto resultan considerablemente más altos, llegando a ser hasta 15 veces superiores a los obtenidos mediante la metodología del IPCC, a pesar de que la base de datos de este reporta un menor número de vacas en ordeño y niveles similares de producción lechera. Diversos estudios han advertido que las herramientas digitales de monitoreo ambiental pueden generar resultados inconsistentes cuando no se calibran adecuadamente o se alimentan con datos incompletos o no representativos (Gerber et al., 2013). Sin embargo, se desconoce el detalle de la metodología empleada y las consideraciones asumidas para generar las estimaciones del proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer, lo que limita su interpretación, por lo que las posibles incongruencias requieren de una revisión más detallada.

Por otro lado, las incongruencias entre los resultados obtenidos mediante la metodología del IPCC y los reportados en la base de datos pueden atribuirse a varios factores interrelacionados. Entre ellos destacan el uso de factores de emisión no específicos para condiciones tropicales, la posible introducción de datos poco precisos o generalizados sobre el manejo real de los sistemas productivos, y la aplicación de algoritmos cuya validación científica aún no ha sido documentada públicamente. Lo

anterior coincide con los hallazgos de Spandonidis et al. (2024), quienes identificaron desviaciones de hasta 136 t de CO<sub>2</sub> entre diferentes calculadoras digitales de huella de carbono, y refuerza la advertencia de Zhang et al. (2017) respecto a que el uso de herramientas tecnológicas para la estimación de impactos ambientales debe ir acompañado de una revisión crítica de sus supuestos, modelos de cálculo y escalabilidad a contextos diversos.

### **Cuadro 5**

*Comparación de Resultados Obtenidos Aplicando la Metodología IPCC Contra los Resultados Reportados por la Base de Datos del Proyecto Ganadería Sostenible USAID/TMS-Heifer*

Unidad productiva	Balance IPCC (kg CO <sub>2</sub> / L leche)	Balance Base de Datos (kg CO <sub>2</sub> / L leche)
San Manuel	0.30	4.4
La Aurora	0.37	3

Las discrepancias identificadas en las estimaciones de huella de carbono subrayan la necesidad de adoptar métodos de cálculo homologados, transparentes y consistentes para evaluar el desempeño ambiental entre diferentes sistemas productivos. La ausencia de estandarización en el panorama actual de metodología de contabilidad de carbono ha generado variaciones significativas en los resultados, incluso cuando se aplican dentro del mismo sector o región.

Según Rosa et al. (2018), pequeñas diferencias en los supuestos metodológicos pueden resultar en discrepancias de entre 0.4 y 69% en los factores de emisión de red, lo que evidencia que la uniformidad metodológica es clave para obtener resultados robustos y replicables. Por lo tanto, la estandarización no es un ejercicio técnico, sino la base para fortalecer políticas públicas efectivas, diseñar mecanismos de compensación e incentivos ambientales que sean justos y verificables, y

garantizar que los beneficios sean asignados de forma imparcial, sobre la base de resultados comparables y medibles en distintos contextos productivos.

## Conclusiones

La clasificación de las fincas está directamente asociada a tres aspectos principales: la reducción en los días de pastoreo, la inclusión de fuentes de captura de carbono, como cercas vivas, y la productividad de leche. Entre estos, el incremento de la productividad y la reducción en los días de pastoreo fueron los aspectos determinantes que influyeron en la reducción de la huella de carbono, principalmente para el departamento de Olancho.

De acuerdo con la literatura científica revisada, las prácticas con mayor eficiencia en la reducción de la huella de carbono en sistemas ganaderos incluyen la implementación de sistemas silvopastoriles y agroforestales, el uso de biodigestores y la aplicación de biochar. Estas estrategias resultan especialmente efectivas cuando incorporan especies forestales nativas o adaptadas a las condiciones climáticas locales. Asimismo, se ha evidenciado un mejor rendimiento de los biodigestores en zonas cálidas, lo que refuerza la necesidad de adaptar las tecnologías a los contextos agroecológicos específicos para maximizar su efectividad en la mitigación de emisiones.

Por último, los valores estimados a partir de la metodología IPCC no son comparables con los resultados reportados por la base de datos del proyecto, debido a diferencias en las variables consideradas durante los respectivos procesos de recolección de datos, así como a diversas incongruencias entre los registros del proyecto y los obtenidos en este estudio. Esta discrepancia pone de manifiesto la necesidad de mejorar la calidad, consistencia y trazabilidad de la información reportada, con el fin de fortalecer futuras evaluaciones del balance de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente.

### **Recomendaciones**

Extender la evaluación de la huella de carbono a fincas adicionales incluidas en el proyecto USAID/TMS-Heifer, a fin de comparar y verificar la consistencia de los resultados obtenidos, así como, aumentar la representatividad de la investigación.

Retomar el estudio comparando las huellas de carbono en las épocas seca y húmeda, con el objetivo de determinar la significancia estadística de las variaciones estacionales y de identificar los factores que explican dichas diferencias.

Incorporar mediciones directas de la composición de la dieta y del consumo de forraje en cada unidad productiva, con el propósito de refinar las estimaciones de emisiones por fermentación entérica y evaluar la influencia de la calidad nutricional sobre la huella de carbono.

Realizar muestreos de raíces y sistemas radicales en pastos y árboles para estimar el carbono almacenado en biomasa subterránea, proporcionando así un balance más completo de carbono a nivel de finca.

Ejecutar análisis bromatológico de los pastos predominantes, de manera que los valores de captura y de emisiones modelados durante el proyecto puedan contrastarse con parámetros específicos de las pasturas locales.

Realizar monitoreos anuales de la estimación de huella de carbono, para asegurar una mayor precisión en la información reportada.

## Referencias

- Abagandura, G. O., Mamo, M., Schacht, W. H., Shropshire, A. y Volesky, J. D. (2024). Soil carbon and nitrogen after eight years of rotational grazing in the Nebraska Sandhills meadows. *Geoderma*, 442, 116776. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116776>
- Abdalla, K., Mutema, M., Chivenge, P., Everson, C. y Chaplot, V. (2022). Grassland rehabilitation significantly increased soil carbon stocks by reducing net soil CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management*, 38. <https://doi.org/10.1111/sum.12790>
- Agostini, A., Battini, F., Giuntoli, J., Tabaglio, V., Padella, M., Baxter, D., Marelli, L. y Amaducci, S. (2015). Environmentally Sustainable Biogas? The Key Role of Manure Co-Digestion with Energy Crops. *Energies*, 8(6), 5234–5265. <https://doi.org/10.3390/en8065234>
- American Society for Testing and Materials International (1996). *Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke*. (Norma, D3173). <https://store.astm.org/d3173-11.html>
- Aryal, D. R., Morales-Ruiz, D. E., López-Cruz, S., Tondopó-Marroquín, C. N., Lara-Nucamendi, A., Jiménez-Trujillo, J. A., Pérez-Sánchez, E., Betanzos-Simon, J. E., Casasola-Coto, F., Martínez-Salinas, A., Sepúlveda-López, C. J., Ramírez-Díaz, R., La O Arias, M. A., Guevara-Hernández, F., Pinto-Ruiz, R. y Ibrahim, M. (2022). Silvopastoral systems and remnant forests enhance carbon storage in livestock-dominated landscapes in Mexico. *Scientific Reports*, 12(1), 16769. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21089-4>
- Brook, R., Forster, E., Styles, D., Mazzetto, A. M., Arndt, C., Esquivel, M. J. y Chadwick, D. (2022). Silvopastoral systems for offsetting livestock emissions in the tropics: A case study of a dairy farm in Costa Rica. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5), 101. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00834-z>
- Broward, C. (2018). *How to calculate the amount of CO<sub>2</sub> sequestered in a tree per year*. [https://www.unm.edu/~jbrink/365/Documents/Calculating\\_tree\\_carbon.pdf](https://www.unm.edu/~jbrink/365/Documents/Calculating_tree_carbon.pdf)
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., 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, E. y Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Contreras-Santos, J. L., Falla-Guzmán, C. K., Rodríguez, J. L., Fernando-Garrido, J., Martínez-Atencia, J. y Aguayo-Ulloa, L. (2022). Reserva de carbono en sistemas silvopastoriles: Un estudio en el Medio Sinú, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 49138. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49138>
- Darré, E., Llanos, E., Astigarraga, L., Cadenazzi, M. y Picasso, V. (2021). Do pasture-based mixed dairy systems with higher milk production have lower environmental impacts? A Uruguayan case study. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 64(3), 444–462. <https://doi.org/10.1080/00288233.2020.1750433>
- Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. y Wagner, F. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 Energy*. [https://www.researchgate.net/publication/271202125\\_2006\\_IPCC\\_Guidelines\\_for\\_National\\_Greenhouse\\_Gas\\_Inventories\\_Volume\\_2\\_Energy](https://www.researchgate.net/publication/271202125_2006_IPCC_Guidelines_for_National_Greenhouse_Gas_Inventories_Volume_2_Energy)

- Food and Agriculture Organization of United Nations. (2015). *Economic and Policy Analysis of Climate Change*. <https://www.fao.org/in-action/epic/ex-act-tool/suite-of-tools/ex-act/en/>
- Food and Agriculture Organization of United Nations. (2017). *Climate Smart Agriculture Sourcebook: Climate-smart livestock production*. <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/production-resources/module-b2-livestock/chapter-b2-3/en>
- Food and Agriculture Organization of United Nations. (2024). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-food-and-agriculture/es>
- Galloway, C., Swanepoel, P. A. y Haarhoff, S. J. (2024). A carbon footprint assessment for pasture-based dairy farming systems in South Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1333981. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1333981>
- Gerber, P. J [P. J.], Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C [C.], Dijkman, J., Falcucci, A [A.] y Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/4/i3437e/i3437e.pdf>
- Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A. y Williams, A. G. (2019). Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69–76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
- Henderson, B., Gerber, P. J [P. J.], Hilinski, T. E., Falcucci, A [A.], Ojima, D. S., Salvatore, M. y Conant, R. T. (2015). Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 207, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.029>
- Herrera Rivera, J. E., Chará, J., Murgueitio, E. y Barahona Rosales, R. (2015). Estimación de la huella de carbono en sistemas silvopastoriles intensivos y convencionales para la producción de leche bovina en Colombia. *3° Congreso Nacional De Sistemas Silvopastoriles - VIII Congreso Internacional D*. [https://www.researchgate.net/profile/Rolando-Barahona-Rosales-2/publication/276026843\\_Estimacion\\_de\\_la\\_huella\\_de\\_carbono\\_en\\_sistemas\\_silvopastoriles\\_intensivos\\_y\\_convencionales\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_leche\\_bovina\\_en\\_Colombia/links/5551732108ae93634eca1004/Estimacion-de-la-huella-de-carbono-en-sistemas-silvopastoriles-intensivos-y-convencionales-para-la-produccion-de-leche-bovina-en-Colombia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Rolando-Barahona-Rosales-2/publication/276026843_Estimacion_de_la_huella_de_carbono_en_sistemas_silvopastoriles_intensivos_y_convencionales_para_la_produccion_de_leche_bovina_en_Colombia/links/5551732108ae93634eca1004/Estimacion-de-la-huella-de-carbono-en-sistemas-silvopastoriles-intensivos-y-convencionales-para-la-produccion-de-leche-bovina-en-Colombia.pdf)
- Herrero, M., Gerber, P. J [Pierre J.], Vellinga, T., Garnett, T., Leip, A., Opio, C [Carolyn], Westhoek, H., Thornton, P., Olesen, J., Hutchings, N., Montgomery, H. y Soussana, J.-F. (2011). Livestock and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right. *Animal Feed Science and Technology - ANIM FEED SCI TECH*, 166, 779–782. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.083>
- Hristov, A. N., Kebreab, E [E.], Niu, M., Oh, J., Bannink, A., Bayat, A. R., Boland, T. M., Brito, A. F., Casper, D. P., Crompton, L. A., Dijkstra, J., Eugène, M., Garnsworthy, P. C., Haque, N., Hellwing, A. L. F., Huhtanen, P., Kreuzer, M., Kuhla, B., Lund, P., . . . Yu, Z. (2018). Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 6655–6674. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13536>

- Jurado-Guerra, P., Velázquez-Martínez, M., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Álvarez-Holguín, A., Domínguez-Martínez, P. A., Gutiérrez-Luna, R., Garza-Cedillo, R. D., Luna-Luna, M. y Chávez-Ruiz, M. G. (2021). Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: Estatus actual, retos y perspectivas. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 12(3), 261–285. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11242021000500012&script=sci\\_arttext#B89](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11242021000500012&script=sci_arttext#B89)
- Kiggundu, N., Ddungu, S. P., Wanyama, J., Cherotich, S., Mpairwe, D., Zziwa, E., Mutebi, F. y Falcucci, A [Alessandra] (2019). Greenhouse gas emissions from Uganda’s cattle corridor farming systems. *Agricultural Systems*, 176, 102649. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102649>
- López Guerrero, C. C. y Meneses Quelal, W. O. (2023). Modulación de las emisiones de gases efecto invernadero de un hato lechero. *Revista Alfa*, 7(20), 428 –. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.226>
- Lorenz, K. y Lal, R. (2018a). Agroforestry systems. En K. Lorenz y R. Lal (Eds.), *Carbon sequestration in agricultural ecosystems* (pp. 235–260). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5_6)
- Lorenz, K. y Lal, R. (Eds.). (2018b). *Carbon sequestration in agricultural ecosystems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5>
- Mavisoy, H., Vallejos, A. R. R., Rincón, E. C., Narváez-Herrera, J. P., Rosas, L., Del Socorro Guerra Acosta, A., Salcedo, A. A. R., Alban, D. M. A., Chingal, C., Fanguero, D. y Almeida, A. M. de (2025). Carbon balance in dairy cattle silvopastoral production systems in Colombia’s Andean-Amazon region. *Agroforestry Systems*, 99(6). <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01233-5>
- Mejía-Castillo, H. J. (2016). Impacto de la educación no formal en el desarrollo del sector ganadero del departamento de Olancho, Honduras 2013-2015. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 2(1), 133–145. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5689>
- Mosier, S., Apfelbaum, S., Byck, P., Calderon, F., Teague, R., Thompson, R. y Cotrufo, M. F. (2021). Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. *Journal of Environmental Management*, 288, 112409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112409>
- O’Brien, D., Capper, J. L., Garnsworthy, P. C., Grainger, C. y Shalloo, L. (2014). A case study of the carbon footprint of milk from high-performing confinement and grass-based dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 97(3), 1835–1851. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7174>
- Olaya-Montes, A., Llanos-Cabrera, M. P., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F. A. y Silva-Olaya, A. M. (2021). Restoring soil carbon and chemical properties through silvopastoral adoption in the Colombian Amazon region. *Land Degradation & Development*, 32(13), 3720–3730. <https://doi.org/10.1002/ldr.3832>
- Organización Internacional de Estandarización (ISO) (2021). *Gestión ambiental — Evaluación del desempeño ambiental — Directrices*. (Norma ISO, 14031). chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/81453/f50796ff56fe4923a1d866a5b6788e1e/ISO-14031-2021.pdf>

- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- Pardo Rozo, Y. y Andrade Adaime, M. (2023). Emisión de carbono equivalente en la generación de beneficios económicos de la ganadería en el piedemonte amazónico colombiano. *Revista EIA*, 20(39), 1–17. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1614>
- Rajapakshe, R., Karthigesu, J., Thavananthan, S., Sivachandiran, S., Navaneetham, V. y Sinnamani, S. (2024). Restoring a dry tropical forest through assisted natural regeneration: enhancing tree diversity, structure, and carbon stock. *Trees, Forests and People*, 17, 100616. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100616>
- Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., Nys, R. de, Duarte, T. L., Yang, X. y Kebreab, E [Ermias] (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS One*, 16(3), e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Rosa, M. de, Pizzol, M. y Schmidt, J. (2018). How methodological choices affect LCA climate impact results: the case of structural timber. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(1), 147–158. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1312-0>
- Salazar Leiva, K. (2023). *Ganadería de Honduras inicia su transformación hacia una economía baja en emisiones y resiliente*. CATIE. <https://www.catie.ac.cr/2023/09/19/ganaderia-de-honduras-inicia-su-transformacion-hacia-una-economia-baja-en-emisiones-y-resiliente/>
- Sharma, S., Dhal, S., Rout, T. y Acharya, B. S. (2022). Drones and machine learning for estimating forest carbon storage. *Carbon Research*, 1(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s44246-022-00021-5>
- Sorley, M., Casey, I., Styles, D., Merino, P., Trindade, H., Mulholland, M., Resch Zafra, C., Keatinge, R., Le Gall, A., O'Brien, D. y Humphreys, J. (2024). Factors influencing the carbon footprint of milk production on dairy farms with different feeding strategies in western Europe. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140104>
- Spandonidis, C., Belioka, M.-P. y Eriksson, O. (2024). Multi-criteria-based evaluation of digital carbon footprint tools from a household user perspective. *Journal of Cleaner Production*, 481, 144151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144151>
- Valenzuela Que, F. G., Villanueva-López, G., Alcudia-Aguilar, A., Medrano-Pérez, O. R., Cámara-Cabral, L., Martínez-Zurimendi, P., Casanova-Lugo, F. y Aryal, D. R. (2022). Silvopastoral systems improve carbon stocks at livestock ranches in Tabasco, Mexico. *Soil Use and Management*, 38(2), 1237–1249. <https://doi.org/10.1111/SUM.12799>
- Vega-Puga, M., Romo Leon, J., Castellanos, A., Castillo-Gómez, R., Garatuza-Payan, J. y Ángeles-Pérez, G. (2022). Uso de imágenes aéreas de alta resolución para la detección de cambios en el almacén de carbono en biomasa aérea en comunidades semiáridas, tras la introducción de la especie exótica *Cenchrus ciliaris*. *Botanical Sciences*, 100. <https://doi.org/10.17129/botsci.3026>

- Velarde-Guillén, J., Arndt, C. y Gómez, C. A. (2021). Carbon footprint in Latin American dairy systems. *Tropical Animal Health and Production*, 54(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-03021-6>
- Venegas-Venegas, J. A., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Pérez-Fernández, A., Aryal, D. R. y Aguilar-Aguilar, F. A. (2023). Potencial de biogás, energía eléctrica, reducción de CO<sub>2</sub>eq y rentabilidad de biodigestor-motogenerador para establos lecheros en México. *Revista De Alimentación Contemporánea Y Desarrollo Regional*, 33(62), e231374. <https://doi.org/10.24836/es.v33i62.1374>
- Vivid Economics. (2019). *Energy Innovation Needs Assessment: Sub-theme report: Carbon capture, utilisation, and storage*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5dc5872be5274a4f2286fc76/energy-innovation-needs-assessment-ccus.pdf>
- Wu, L., Du, J., Liu, X., Li, L., Zhu, X., Chen, X., Gong, Y. y Li, Y. (2025). Comparative Analysis of Carbon Density Simulation Methods in Grassland Ecosystems: A Case Study from Gansu Province, China. *Remote Sensing*, 17(1), 172. <https://doi.org/10.3390/rs17010172>
- Xing, X., Fan, F. y Jiang, W. (2018). Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures. *Royal Society Open Science*, 5(8), 172346. <https://doi.org/10.1098/rsos.172346>
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G. y Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications*, 10(1), 718. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>
- Zehetmeier, M., Baudracco, J., Hoffmann, H. y Heißenhuber, A. (2012). Does increasing milk yield per cow reduce greenhouse gas emissions? A system approach. *Animal*, 6(1), 154–166. <https://doi.org/10.1017/S1751731111001467>
- Zhang, Y., McCarl, B. y Jones, J. (2017). An Overview of Mitigation and Adaptation Needs and Strategies for the Livestock Sector. *Climate*, 5(4), 95. <https://doi.org/10.3390/cli5040095>

## Anexos

### Anexo A

#### Entrevista

##### Información General

- Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

-Nombre del productor: \_\_\_\_\_ Teléfono: \_\_\_\_\_

- Nombre de la finca: \_\_\_\_\_ Ubicación: \_\_\_\_\_

1. Área total de la finca: \_\_\_\_\_

2. Sistema Agroforestal: Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

3. Área por uso: Pastoreo \_\_\_\_\_ Potreros \_\_\_\_\_ Ordeño \_\_\_\_\_ Guamil \_\_\_\_\_

Cultivos \_\_\_\_\_ Bosque \_\_\_\_\_ Domicilio \_\_\_\_\_

4. Sistema de pastoreo predominante: Continuo \_\_\_\_\_ Rotacional \_\_\_\_\_

Intensivo \_\_\_\_\_ Extensivo \_\_\_\_\_ Mixto \_\_\_\_\_

5. Rotación de potreros: Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ ¿Por qué? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. División de potreros: Cerca eléctrica \_\_\_ Cercas vivas \_\_\_ Cercas de alambre púas \_\_\_

7. Pasto: Brachiaria \_\_\_\_\_ Estrella \_\_\_\_\_ Otro: \_\_\_\_\_

8. Edad promedio de sus pastizales: \_\_\_\_\_

9. Registra el manejo de pastizales: Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

10. Raza de ganado: \_\_\_\_\_

11. Cantidad de animales: \_\_\_\_\_

12. Consumo diario estimado: Concentrado \_\_\_\_\_ kg    Pasto \_\_\_\_\_
13. Propósito de Ganado: lechero \_\_\_ carne \_\_\_ doble propósito \_\_\_
14. Fertilización de pastizales: Sí \_\_\_ No \_\_\_
15. Tipo de fertilizante: Químico \_\_\_ Orgánico \_\_\_ Mixto \_\_\_  
(especifique) \_\_\_\_\_
16. Riego: Sí \_\_\_ No \_\_\_
17. Tipo de riego: Aspersión \_\_\_ Goteo \_\_\_
18. Energía (tipo, consumo)
19. Equipo y mecanización: Tractor \_\_\_ Picadora \_\_\_ Otros \_\_\_
20. Prácticas complementarias de alimentación: Heno \_\_\_ Ensilaje \_\_\_ Otros \_\_\_
21. Ensilaje: Fabricado \_\_\_ Comprado \_\_\_
22. Número de vacas: \_\_\_\_\_
23. Recibió capacitaciones o talleres sobre manejo sostenible de ganado o pastizales: Sí \_\_\_ No \_\_\_
24. Prácticas conservación de suelo: Ninguna \_\_\_ Terrazas \_\_\_ Barreras vivas \_\_\_ Barreras muertas  
\_\_\_ Cobertura vegetal \_\_\_ Otra (especifique) \_\_\_\_\_
25. Arreglo forestal: Árboles dispersos \_\_\_ Cercas vivas \_\_\_ En bloque \_\_\_

**Anexo B***Formato de inventario forestal*

Parcela	No. árbol	Especie	Altura (m)	∅ DAP (cm)	Edad

Nota. ∅DAP = Diámetro a la Altura del Pecho

## Anexo C

*Resultados de biomasa seca de los pastos muestreados en los sistemas productivos*

ID	Peso fresco total (kg)	Peso fresco submuestra (gr)	Peso seco submuestra (gr)	Biomasa seca total (kg/m <sup>2</sup> )	Carbono en Biomasa seca (t CO <sub>2</sub> /ha)		
25352M1	1.70	24.09	17.20	1.214	0.570		
25352M2	1.70	19.00	13.00	1.163	0.547	0.554	
25352M3	1.70	22.00	15.00	1.159	0.545		
25353M1	1.50	19.64	13.45	1.027	0.483		
25353M2	1.50	23.39	14.51	0.931	0.437	0.466	Unidad productiva La Aurora
25353M3	1.50	22.30	15.09	1.015	0.477		
25354M1	2.75	25.02	15.88	1.745	0.820		
25354M2	2.75	27.53	17.21	1.719	0.808	0.827	
25354M3	2.75	27.03	17.85	1.816	0.854		
25355M1	1.40	100.00	41.01	0.574	0.270		
25355M2	1.40	100.02	42.08	0.589	0.277	0.273	
25355M3	1.40	100.02	41.44	0.580	0.273		
25356M1	0.94	100.01	50.86	0.478	0.225		
25356M2	0.94	100.01	52.48	0.493	0.232	0.228	Unidad productiva San Manuel
25356M3	0.94	100.03	51.44	0.483	0.227		
25357M1	1.56	31.38	14.80	0.736	0.346		
25357M2	1.56	41.53	20.18	0.758	0.356	0.352	
25357M3	1.56	27.01	13.04	0.753	0.354		
25359M1	1.16	28.74	22.42	0.905	0.425		
25359M2	1.16	30.29	23.62	0.905	0.425	0.429	
25359M3	1.16	27.53	22.04	0.929	0.436		Sistema productivo El Tarral
25360M1	2.18	26.64	19.15	1.567	0.737		
25360M2	2.18	26.23	18.58	1.544	0.726	0.733	
25360M3	2.18	23.43	16.88	1.571	0.738		

## Anexo D

## Detalle de Inventario Forestal y Aplicación de Ecuaciones Alométricas en el Sistema Productivo La Aurora

No. Árboles	Especie	Altura (m)	∅DAP (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	∅ DAP <sup>2</sup>	∅ AGB (kg/árbol)	∅ AGB (kg)	∅ AGB (t)	Edad (años)	Peso verde con raíces (t)	Peso seco (t)	Peso de carbono (t)	Peso de CO <sub>2</sub> (t)	Captura (t CO <sub>2</sub> /especie-año)
4	<i>Araucaria sp</i>	15	39	0.52	1521	637.47	2,549.87	2.549	17	3.06	2.218	1.109	4.071	0.24
4	<i>Samanea Saman</i>	10	46	0.74	2116	835.77	3,343.09	3.343	28	4.01	2.908	1.454	5.337	0.19
153	<i>Bursera simaruba</i>	6	16	0.34	256	30.25	4,630.54	4.63	9	5.56	4.029	2.014	7.392	0.82
2	<i>Byrsonima crassifolia</i>	5	32	0.59	1024	167.73	335.46	0.335	19	0.40	0.292	0.146	0.536	0.03
2	<i>Castilla elastica</i>	5	35	0.315	1225	108.29	216.58	0.216	15	0.26	0.188	0.094	0.346	0.02
4	<i>Cedrela odorata</i>	7	36	0.41	1296	205.50	822.00	0.822	13	0.99	0.715	0.358	1.312	0.10
20	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	20	140	0.38	19600	7,532.36	150,647.20	150.647	70	180.78	131.063	65.532	240.501	3.44
302	<i>Gliricidia sepium</i>	5	19	0.64	361	65.64	19,849.53	19.85	9	23.82	17.269	8.635	31.689	3.52
1	<i>Gravillea robusta</i>	10	42	0.53	1764	505.23	505.23	0.505	18	0.61	0.440	0.220	0.807	0.04
4	<i>Guazuma ulmifolia</i>	7	25	0.54	625	131.96	527.82	0.527	19	0.63	0.459	0.230	0.843	0.04
3	<i>Inga sp</i>	8	33	0.5	1089	239.75	719.26	0.719	12	0.86	0.626	0.313	1.148	0.10

No. Árboles	Especie	Altura (m)	∅DAP (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	∅ DAP <sup>2</sup>	∅ AGB (kg/árbol)	∅ AGB (kg)	∅ AGB (t)	Edad (años)	Peso verde con raíces (t)	Peso seco (t)	Peso de carbono (t)	Peso de CO <sub>2</sub> (t)	Captura (t CO <sub>2</sub> /especie-año)
7	<i>Mangifera indica</i>	9	59	0.55	3481	917.60	6,423.19	6.4231	22	7.71	5.588	2.794	10.254	0.47
1	<i>Polyalthia longifolia</i>	11	28	0.54	784	255.91	255.91	0.256	12	0.31	0.223	0.111	0.409	0.03
1	<i>Calycophyllum candidissimum</i>	5	31	0.7	961	186.28	186.28	0.186	24	0.22	0.162	0.081	0.297	0.01
2	<i>Simarouba glauca</i>	6	37	0.42	1369	190.95	381.89	0.382	16	0.46	0.332	0.166	0.610	0.04
1	<i>Spondias purpurea</i>	7	45	0.35	2025	272.21	272.21	0.272	21	0.33	0.237	0.118	0.435	0.02
2	<i>Ceiba pentandra</i>	16	99	0.27	9801	2,206.62	4,413.24	4.413	55	5.30	3.840	1.920	7.046	0.13
12	<i>Tabebuia rosea</i>	12	36	0.48	1296	405.59	4,867.11	4.867	15	5.84	4.234	2.117	7.770	0.52
5	<i>Tamarindus indica</i>	7	80	0.8	6400	1,875.33	9,376.66	9.377	28	11.25	8.158	4.079	14.969	0.53

Nota. ∅DAP = Diámetro a la Altura del Pecho; AGB = "Above Ground Biomass" o Carbono capturado en biomasa aérea.

## Anexo E

## Detalle de Inventario Forestal y Aplicación de Ecuaciones Alométricas en el Sistema Productivo San Manuel

No. Árboles	Especie	Altura (m)	ϕ DAP (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	ϕ DAP <sup>2</sup>	ϕ AGB (kg/árbol)	ϕ AGB (kg)	ϕ AGB (t)	Edad (años)	Peso verde con raíces (t)	Peso seco (t)	Peso de carbono (t)	Peso de CO <sub>2</sub> (t)	Captura (t CO <sub>2</sub> /especie-año)
6	<i>Senna siamea</i>	15	33	0.65	1,089	572.04	3,432.21	3.43	25.0	4.12	2.99	1.49	5.48	0.22
3	<i>Samanea Saman</i>	4	18	0.74	324	54.74	164.21	0.16	24.0	0.20	0.14	0.07	0.26	0.01
4	<i>Samanea Saman</i>	10	34	0.74	1,156	463.27	1,853.07	1.85	24.0	2.22	1.61	0.81	2.96	0.12
94	<i>Azadirachta indica</i>	3	8	0.66	64	7.59	716.14	0.72	6.0	0.86	0.62	0.31	1.14	0.19
1	<i>Azadirachta indica</i>	8	32	0.66	1,024	296.05	296.05	0.30	15.0	0.36	0.26	0.13	0.47	0.03
1	<i>Bursera simaruba</i>	7	22	0.34	484	65.46	65.46	0.07	13.0	0.08	0.06	0.03	0.10	0.01
193	<i>Bursera simaruba</i>	3	12	0.34	144	8.77	1,694.25	1.69	8.0	2.03	1.47	0.74	2.70	0.34
17	<i>Bursera simaruba</i>	10	50	0.34	2,500	446.91	7,776.18	7.78	22.0	9.33	6.77	3.38	12.4	0.56
1	<i>Bursera simaruba</i>	3	11	0.34	121	7.40	7.40	0.01	8.0	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
7	<i>Senna siamea</i>	7	22	0.65	484	123.21	862.46	0.86	14.0	1.03	0.75	0.38	1.38	0.10
1	<i>Cedrela odorata</i>	18	38	0.41	1,444	574.08	574.08	0.57	23.0	0.69	0.50	0.25	0.92	0.04
6	<i>Ceiba pentandra</i>	18	80	0.27	6,400	1,633.07	9,471.78	9.47	60.0	11.37	8.24	4.12	15.1	0.25

No. Árboles	Especie	Altura (m)	ϕ DAP (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	ϕ DAP <sup>2</sup>	ϕ AGB (kg/árbol)	ϕ AGB (kg)	ϕ AGB (t)	Edad (años)	Peso verde con raíces (t)	Peso seco (t)	Peso de carbono (t)	Peso de CO <sub>2</sub> (t)	Captura (t CO <sub>2</sub> /especie-año)
1	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	13	120	0.38	14,400	3,661.46	3,661.46	3.66	83.0	4.39	3.19	1.59	5.85	0.07
1	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	21	198	0.38	39,204	15,540.33	15,540.3	15.54	85.0	18.65	13.52	6.76	24.8	0.29
1	<i>Eucalyptus sp.</i>	7	28	0.73	784	220.95	220.95	0.22	18.0	0.27	0.19	0.10	0.35	0.02
143	<i>Gliricidia sepium</i>	7	16	0.64	256	65.18	9,323.14	9.32	8.0	11.19	8.11	4.06	14.8	1.86
63	<i>Gliricidia sepium</i>	7	14	0.64	196	50.22	3,158.03	3.16	7.0	3.79	2.75	1.37	5.04	0.72
1	<i>Gliricidia sepium</i>	8	34	0.64	1,156	323.38	323.38	0.32	14.0	0.39	0.28	0.14	0.52	0.04
19	<i>Gliricidia sepium</i>	7	27	0.64	729	181.00	3,439.05	3.44	11.0	4.13	2.99	1.50	5.49	0.50
3	<i>Guazuma ulmifolia</i>	7	23	0.54	529	112.13	336.40	0.34	10.0	0.40	0.29	0.15	0.54	0.05
2	<i>Leucaena leucocephala</i>	14	24	0.76	576	334.57	669.13	0.67	10.0	0.80	0.58	0.29	1.07	0.11
5	<i>Mangifera indica</i>	11	32	0.55	1,024	338.11	1,690.56	1.69	17.0	2.03	1.47	0.74	2.70	0.16
1	<i>Melicoccus bijugatus</i>	4	13	0.98	169	38.15	38.15	0.04	8.0	0.05	0.03	0.02	0.06	0.01
2	<i>Psidium guajava</i>	5	13	0.65	169	31.77	63.54	0.06	6.0	0.08	0.06	0.03	0.10	0.02

No. Árboles	Especie	Altura (m)	∅ DAP (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	∅ DAP <sup>2</sup>	∅ AGB (kg/árbol)	∅ AGB (kg)	∅ AGB (t)	Edad (años)	Peso verde con raíces (t)	Peso seco (t)	Peso de carbono (t)	Peso de CO <sub>2</sub> (t)	Captura (t CO <sub>2</sub> /especie-año)
1	<i>Sideroxylon foetidissimum</i>	11	47	0.90	2,209	1,157.95	1,157.95	1.16	30.0	1.39	1.01	0.50	1.85	0.06
2	<i>Simarouba glauca</i>	14	24	0.42	576	187.54	375.08	0.38	13.0	0.45	0.33	0.16	0.60	0.05
2	<i>Spondias purpurea</i>	17	41	0.35	1,681	539.63	1,079.26	1.08	26.0	1.30	0.94	0.47	1.72	0.07
10	<i>Swietenia macrophylla</i>	11	35	0.50	1,225	366.97	3,669.69	3.67	21.0	4.40	3.19	1.60	5.86	0.28
221	<i>Tabebuia rosea</i>	15	28	0.48	784	308.76	68,174.7	68.17	13.0	81.81	59.3	29.66	108.8	8.37
10	<i>Tabebuia rosea</i>	13	36	0.48	1,296	438.55	4,385.49	4.39	16.0	5.26	3.82	1.91	7.00	0.44

Nota. ∅DAP = Diámetro a la Altura del Pecho; AGB = "Above Ground Biomass" o Carbono capturado en biomasa aérea.

## Anexo F

## Detalle de Inventario Forestal y Aplicación de Ecuaciones Alométricas en el Sistema Productivo El Tarral

No. Árboles	Especie	Altura (m)	∅DAP (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	∅ DAP <sup>2</sup>	∅ AGB (kg/árbol)	∅ AGB (kg)	∅ AGB (t)	Edad (años)	Peso verde con raíces (t)	Peso seco (t)	Peso de carbono (t)	Peso de CO <sub>2</sub> (t)	Captura (t CO <sub>2</sub> /especie-año)
2	<i>Samanea Saman</i>	5	35	0.74	1225	249.23	498.46	0.50	21	0.60	0.43	0.22	0.80	0.04
101	<i>Bursera simaruba</i>	3.5	18.25	0.34	333.0625	23.11	2,337.22	2.34	14	2.80	2.03	1.02	3.73	0.27
7	<i>Byrsonima crassifolia</i>	5	40	0.59	1600	259.29	1,815.02	1.82	18	2.18	1.58	0.79	2.90	0.16
1	<i>Castilla elastica</i>	10	60	0.315	3600	609.98	609.98	0.61	36	0.73	0.53	0.27	0.97	0.03
3	<i>Ceiba pentandra</i>	14	80	0.27	6400	1,277.85	3,833.54	3.83	46	4.60	3.34	1.67	6.12	0.13
1	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	14	98	0.38	9604	2,650.81	2,650.81	2.65	75	3.18	2.31	1.15	4.23	0.06
1	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	16	155	0.38	24025	7,389.80	7,389.80	7.39	88	8.87	6.43	3.21	11.80	0.13
5	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	9	48	0.38	2304	427.57	2,137.85	2.14	42	2.57	1.86	0.93	3.41	0.08
29	<i>Gliricidia sepium</i>	7	28	0.64	784	194.32	5,635.25	5.64	10	6.76	4.90	2.45	9.00	0.90
118	<i>Quercus sp. (pino encino)</i>	19	39	0.7	1521	1,073.13	126,629.35	126.63	28	151.96	110.17	55.08	202.16	7.22

209	<i>Quercus sp. (roble amarillo)</i>	13	18	0.57	324	134.04	28,015.34	28.02	22	33.62	24.37	12.19	44.73	2.03
775	<i>Quercus sp. (roble amarillo)</i>	13	18.8	0.57	353.44	145.92	113,175.27	113.18	22	135.81	98.46	49.23	180.68	8.21

---

Nota.  $\varnothing$ DAP = Diámetro a la Altura del Pecho; AGB = "Above Ground Biomass" o Carbono capturado en biomasa