



Solutions for Inclusive Green Development
Soluciones para el Desarrollo Verde Inclusivo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRIA EN GESTIÓN DE AGRONEGOCIOS Y MERCADOS SOSTENIBLES

**PROPUESTA DE PLAN DE MITIGACIÓN DE HUELLA DE CARBONO EN
FINCA DEL COLEGIO TÉCNICO PROFESIONAL, LIBERIA, GUANACASTE,
COSTA RICA**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL GRADO DE

MÁSTER EN GESTIÓN DE AGRONEGOCIOS Y MERCADOS SOSTENIBLES

JERRY ZAMORA ESPINOZA

TURRIALBA, COSTA RICA

2024

Este trabajo final de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Examinador del estudiante, como requisito para optar por el grado de

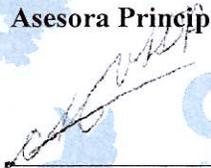
División de Educación
MÁSTER EN GESTIÓN DE AGRONEGOCIOS Y MERCADOS SOSTENIBLES

FIRMANTES:

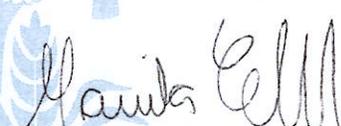




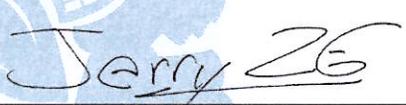
Felicia Granados Cordero, M.Sc.
Asesora Principal del Trabajo de Graduación



Marco Vinicio Lobo Di Palma, MBA
Miembro Comité Asesor del Trabajo de Graduación



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i. de la Escuela de Posgrado



Jerry Emmanuel Zamora Espinoza

Escuela de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres, por su apoyo y estímulo en todo momento. A pesar de la comunicación a distancia, siempre estuvieron presentes para que yo pudiera culminar con éxito este nuevo eslabón profesional.

A los profesores del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por compartir sus conocimientos y experiencias en la promoción de los agronegocios sostenibles; sobre todo, por impulsarnos a seguir adelante hasta lograr la meta propuesta.

Agradezco especialmente, a mis asesores académicos del Trabajo Final de Graduación, Felicia Granados y Marcos Lobo, por su orientación y excelentes aportes y contribuciones que hicieron posible culminar con éxito este proceso formativo.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS.....	III
INDICE DE CUADROS.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VII
ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES.....	IX
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes	1
Justificación.....	3
Importancia	3
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo General.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. MARCO REFERENCIAL.....	6
3.1 Cambio climático	6
3.2 Efecto invernadero.....	6
3.3 Gases de Efecto invernadero.	7
3.4 Emisiones de gases de efecto invernadero del sector agro	8
3.5 Huella de Carbono.....	8
3.6 Carbono neutralidad	8
3.7 Cálculo de la huella de carbono.....	9
3.8 Estrategias de compensación y/o mitigación.	10
3.8.1 Normas ISO y Certificaciones ambientales.....	11
3.8.2 Buenas prácticas agrícolas BPA.....	13
3.8.3 Agricultura sostenible	14
3.8.4 Sistemas silvopastoriles en la producción ganadera.....	15
3.8.5 NAMA Ganadería	16
3.8.6 Mercado internacional de carbono.....	17
4. METODOLOGÍA.....	18

4.1	Ubicación y descripción del área de estudio	18
4.2	Procedimientos metodológicos	21
4.3	Método de cuantificación	23
4.4	Límite operacional y temporal.....	25
4.5	Mapeo del área de estudio	25
4.6	Cálculo de emisiones por actividad	26
4.6.1	Explotación bovina.....	26
4.6.2	Explotación porcícola.....	28
4.6.3	Explotación avícola	29
4.6.4	Explotación agrícola.....	30
4.6.5	Consumo eléctrico y de combustible.....	31
4.7	Propuestas de mitigación de huella de carbono (fase final)	31
5.	RESULTADOS	32
5.1	Elaboración de Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero.....	32
5.2	Año base	32
5.3	Identificación de fuentes.....	32
5.4	Diseño de programa.....	32
5.5	Análisis de resultados.....	33
5.6	Estrategias de mitigación	36
5.6.1	Tecnologías NAMA	37
5.6.2	Bandera Azul Agropecuaria	39
5.6.3	Muestreo de suelos.....	41
5.6.4	Implementar el enfoque de las 4R`s para la gestión de nutrientes	42
5.6.5	Economía circular en la administración de residuos pecuarios y agrícolas	43
5.6.6	Rotación y manejo de pasturas.....	44
5.6.7	Sistemas Silvopastoriles	51
5.6.8	Mercado de Carbono: Programa de Servicios Ambientales (PSA)	52
5.6.9	Buenas prácticas agrícolas (BPA).....	53
5.6.10	Activador ruminal	56
5.6.11	Agricultura de precisión: Inteligencia Artificial para monitoreo y recomendaciones	58

5.6.12 Consumo eléctrico y combustible.....	60
6. Conclusiones y recomendaciones.....	62
7. Referencias.....	64
ANEXOS.....	74
Anexo 1.....	74
Anexo 2.....	75
Anexo 3.....	76
Anexo 4.....	77

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Gases de Efecto Invernadero (GEI) y duración en la atmósfera y potencial de calentamiento global.....	7
Cuadro 2. Lista de actividades consideradas en las BPA	13
Cuadro 3.Variables climáticas del cantón Liberia.....	19
Cuadro 4. Fases metodológicas	23
Cuadro 5. Actividades según alcance del GHG Protocol	24
Cuadro 6. Alcance 1 de Emisiones Directas	35
Cuadro 7. Alcance 2. Emisiones indirectas asociadas a la electricidad.....	36
Cuadro 8. Tecnologías de la NAMA, cuadro resumen	37
Cuadro 9. Panorama actual de la explotación bovina en la Finca CTP Liberia	46
Cuadro 10. Parámetros calculados para la Finca CTP Liberia bajo el sistema rotación de pasturas proyectados para 2024 en época de invierno.	47
Cuadro 11. Formulación de activador ruminal casero del Ing. Suarez Domínguez	57
Cuadro 12.Cálculo del ahorro energético obtenido en la sustitución de Lámpara convencional MH400W por Lámpara LED 200W	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de producción del efecto invernadero	6
Figura 2.Acrílico informativo en exposición de Museo del Jade, enero 2024, Costa Rica. 16	
Figura 3.Mapa de Costa Rica señalando Liberia.....	18
Figura 4.Imagen de finca del CTP Liberia tomada desde Google Earth Pro, 2023.....	21
Figura 5. Esquema de actividades	22
Figura 6. Interfaz de hoja Excel programada para la estimación de emisiones	33
Figura 7.Emisiones estimadas de GEI en la finca por alcance.....	34
Figura 8.Emisiones de GEI por explotación	34
Figura 9.Finca visitada bajo el programa NAMA, Liberia, Guanacaste.....	38
Figura 10.Parámetros para Bandera Azul Agropecuaria	40
Figura 11.Concepto de las 4R en el uso de nutrientes agrícolas	42
Figura 12.División actual (2023) de apartos finca CTPL	45

Figura 13.Propuesta división apartos finca CTPL bajo el sistema de rotación racional de pasturas.....	48
Figura 14.Patrón climático de la zona de Liberia.....	49
Figura 15. Condición de potreros en época seca. Febrero 2024.....	49
Figura 16.División de apartos por cerca eléctrica, finca La Emilia, Liberia, 2024	50
Figura 17.Asociación de papaya con frijol para el control de malezas sin químicos.....	55
Figura 18.Emisión de CO2 de parcelas comparadas por Ordoñez et al (2008).....	56
Figura 19 Dispositivo IoT Arable Mark para monitoreo en parcela de cacao UCR Santa Cruz,2023.....	59

ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

BPA: Buenas Prácticas Agrícolas

C: Carbono

CA: Carga Animal

CEPAL: Comisión Económica para América Latina

CH₄: Gas Metano

CO₂eq: Dióxido de Carbono equivalente

FAO: Food and Agriculture Organization

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GHG: Protocolo de Gases de Efecto Invernadero

Ha: Hectárea

IA: Inteligencia Artificial

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ISO: International Organization for Standardization

Kg/ha: Kilogramos por hectárea

KWH: kilovatio hora

m²: Metro cuadrado

MEP: Ministerio de Educación Pública

MINAET: Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones

N: Nitrógeno

N₂O: Óxido nitroso

NAMA: Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas

O₃: Ozono

PSA: Pago por Servicios Ambientales

SFE: Servicio Fitosanitario del Estado

SS: Sistema Silvopastoril

T: Tonelada

TEC: Instituto Tecnológico de Costa Rica

t/ ha: Toneladas por hectárea

UA: Unidad Animal

UNA: Universidad Nacional de Costa Rica

WRI: World Resources Institute

RESUMEN

En esta investigación se logró estimar la huella de Carbono de la finca del Colegio Técnico Profesional de Liberia, ubicada en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, en el año 2024. Los objetivos planteados para este estudio se orientan a identificar la problemática ambiental de la citada entidad educativa, tomando en cuenta todas las áreas de producción desarrolladas; mediante el análisis dichos resultados, se proponen estrategias de mitigación adaptables al contexto económico, social y ambiental de la propiedad para contrarrestar las emisiones producidas. La estimación de gases de efecto invernadero se logró aplicando formulaciones del Protocolo GHG, así como algunas metodologías del IPCC nivel 1 y nivel 2 para estimar emisiones de fermentación entérica, gestión de estiércol, uso de fertilizantes, consumo energético y de combustibles. Se programó una hoja electrónica Excel con las fórmulas para los Alcances 1 y 2 de los protocolos, así como con los factores de emisión proporcionados por el IMN de Costa Rica. La estimación fue de 17 841,00 toneladas CO_{2eq} para el año 2023. La mayor cantidad de GEI se emiten a través de la fermentación entérica de los animales (81%). La actividad que más libera gases es la explotación bovina, aporta un 85% de las emisiones del Alcance 1, donde la fermentación entérica y manejo de excretas son las mayores productoras de estos GEI.

Otros cálculos también demostraron que el sector agrícola de la finca debe disminuir el uso de fertilizantes, representa un 4% de las emisiones totales; además, el uso de fertilizantes nitrogenados favorece la acidificación del terreno y limita el aporte de otros nutrientes. Finalmente, el consumo energético tanto eléctrico como de combustible, no representa emisiones considerables debido a su bajo consumo durante los periodos lectivos. Una vez concluido el inventario, se plantean propuestas ajustadas para mitigar estas emisiones en cada actividad desarrollada en la finca. Integran una descripción detallada y contextualizada para la aplicación dentro del recinto; asimismo, se cita el potencial de mitigación que podría representar para la finca, al permitir no solo la reducción de GEIs, sino también mejoras en rendimientos productivos y calidad del suelo.

ABSTRACT

This research successfully estimated the Carbon footprint of the farm of the Technical Professional College of Liberia located in the province of Guanacaste, Costa Rica, and proposes mitigation strategies adaptable to the economic, social, and environmental context of the property to counteract the emissions produced. The estimation of greenhouse gases was achieved by applying formulations from the GHG Protocol, as well as some methodologies from IPCC level 1 and level 2 to estimate emissions from enteric fermentation, manure management, fertilizer use, energy consumption, and fuel use. An Excel spreadsheet was programmed with formulas for Scopes 1 and 2 of the protocols, as well as with emission factors provided by Costa Rica's National Meteorological Institute (IMN).

The estimation was 17841,00 tons CO₂eq for the year 2023. The majority of GHG emissions are emitted through animal enteric fermentation (81%). The activity that emits the most gases is in the cattle operation, which contributes 85% of Scope 1 emissions, where enteric fermentation and manure management are the major producers of these GHGs.

Other calculations also showed that the farm's agricultural sector should reduce the use of fertilizers as this represents 4% of total emissions, besides the fact that the use of nitrogen fertilizers favors soil acidification and limits the contribution of other nutrients. Finally, energy consumption, both electrical and fuel, does not represent significant emissions due to its low consumption during academic periods. Once the inventory is completed, tailored proposals are presented to mitigate these emissions in each activity carried out on the farm. These proposals contain a detailed and contextualized description for implementation within the premises, and also cite the mitigation potential that it could represent for the farm, allowing not only the reduction of GHGs but also improvements in productivity and soil quality.

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La comprensión del clima como un fenómeno global va más allá de una simple descripción atmosférica; implica una intrincada red de interacciones entre diversos componentes de la biosfera terrestre. Al respecto, Useros (2013), plantea que el clima no es simplemente el estado momentáneo de la atmósfera, sino más bien, la manifestación tangible de una dinámica compleja que abarca la interacción entre la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos, las aguas, los glaciares continentales y los seres vivos. Este sistema interrelacionado de elementos naturales trabaja en conjunto para regular la temperatura y las condiciones climáticas en el planeta. La presencia crucial de ciertos gases atmosféricos, como el dióxido de carbono y el vapor de agua, actúa como una suerte de cobertura térmica, capturando y reteniendo el calor del sol.

Por otra, las actividades humanas incrementan estas capturas atmosféricas por lo que las comunidades presentes y futuras deberán esforzarse para adaptarse a las modificaciones en los sistemas naturales, sociales y económicos provocados por la variación climática. Por ello, Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), 2019; el calentamiento global es un fenómeno de preocupación global que ha provocado cambios en el clima de la Tierra, como aumentos en la temperatura promedio de la atmósfera y los océanos. Useros (2013), argumenta que la Tierra se ha calentado entre 0,3 y 0,6°C en los últimos 80-100 años, por lo que es probable que la actividad humana sea responsable del aumento.

Este fenómeno mundial según la CEPAL en un informe de 2015, demanda a los gobiernos y a las mismas comunidades, una nueva situación en la que deberán enfrentarse a un conjunto de desafíos de carácter multidisciplinario que requiere directrices comunes y coordinación de esfuerzos. La demanda de información referente al cambio climático y sus efectos posibles crea la necesidad de la vigilancia e investigación del clima, así como el estudio y toma de medidas para dar una respuesta. Ante este fenómeno, a nivel global se han desarrollado varias iniciativas para analizar los impactos futuros del cambio climático y las formas de mitigar el calentamiento global mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por tal motivo, iniciativas como el Protocolo de Kioto desarrollan un marco en el que los países signatarios se comprometerían a reducir y limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero (Duarte, 2018). Hasta hace poco, el mundo luchaba por limitar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂); sin embargo, Pierola (2021), evidencia que, a partir de los últimos datos, la comunidad internacional ha diversificado sus esfuerzos para impulsar políticas de adaptación y mitigación del cambio climático, orientados a minimizar el impacto de este fenómeno en diferentes puntos del planeta. Cabe destacar que ambas estrategias se complementan, aunque presentan desafíos diferentes, están alineadas por su objetivo final.

En congruencia con lo anterior, se han intentado medidas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel internacional, mediante esfuerzos realizados por el Protocolo de Kioto. Con respecto a la diferencia entre las estrategias de mitigación del cambio climático y las estrategias de adaptación es que las primeras, se centran en abordar las causas del cambio climático para minimizar los impactos potenciales del cambio climático, mientras que las estrategias de adaptación se orientan a reducir las consecuencias adversas provocadas por el cambio climático e identificar posibles oportunidades (Pierola, 2021).

A nivel centroamericano, Costa Rica ha asumido liderazgo en materia de cambio climático al formalizar, según comenta Delgado (2008); el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2010, en la iniciativa presidencial "Paz con la Naturaleza". En el citado documento se identifica el cambio climático como un tema prioritario de acción; asimismo, el país se compromete a que Costa Rica sea carbono neutral al 2021. En este sentido, se aprecia una apuesta política bastante más utópica que arriesgada, muestra de ello es que Costa Rica reporta un avance del 61% de metas cumplidas para el primer periodo de implementación del Plan Nacional de Descarbonización hasta febrero de 2022, de acuerdo con datos presentados por el gobierno en el tercer reporte del proyecto (Madriz, 2022).

Desde esta perspectiva, el Plan Nacional propone dos ejes de mitigación, el primero centrado en la reducción de las fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero y el segundo, en la captura y almacenamiento de carbono (MINAET, 2009). Con el propósito de bajar las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agrícola, estas ideas se centran en contener y reducir emisiones procedentes de la fermentación entérica y manejo de residuos al mejorar la calidad de la alimentación animal y a través de un mejor manejo de las excretas de los animales. Se pretende reducir las emisiones, disminuyendo la cantidad de fertilizantes químicos aplicados, así como agroquímicos en pasturas y plantaciones agrícolas. (MINAET, 2009).

Desde esta iniciativa, Costa Rica ha estado aplicando programas innovadores para lograr la neutralidad de carbono o "mitigación". Uno de esos planes es el desarrollo de Medidas de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA); para el sector ganadero, la NAMA se centra en lograr una reducción potencial de 12,93 millones de toneladas de CO₂e en los próximos 15 años. Esto se logrará fortaleciendo las cadenas productivas ganaderas, mejorando los sistemas de medición, revisión y verificación (MRV), capacitando a los sectores productivo, industrial e institucional, y vinculando la NAMA a las estrategias nacionales de REDD+ en el marco de los programas de neutralidad de carbono (MAG, 2014).

De acuerdo con los planteamientos descritos en párrafos precedentes, en el presente estudio se analizan alternativas o estrategias de mitigación para que instituciones educativas del Estado de Costa Rica con propiedades (fincas) dedicadas a actividades agropecuarias, dispongan de un plan factible de implementar mediante la propuesta de mitigación de GEI para compensar la huella de carbono transparente y verificable, que se estudian y describen en detalle. Más allá de que el CTP Liberia se sume a los esfuerzos nacionales y ponga en práctica las políticas ambientales y de mitigación; se pretende generar educación, impacto social y un efecto multiplicador para quienes accedan a la finca; es decir, crear oportunidades de aprendizaje, mediante esta innovadora experiencia.

Justificación

En la actualidad, enfrentar y ajustarse a las consecuencias derivadas del cambio climático representa uno de los retos más significativos que la comunidad debe abordar. Este fenómeno global está generando una serie de impactos ambientales, sociales y económicos que demandan respuesta urgente y coordinada en las diversas áreas. Todas las sociedades, ya sean industrializadas o en desarrollo, generan emisiones de gases, incluidos los de efecto invernadero (GEI), fuertemente asociados con el calentamiento global; el cambio climático se ha acelerado en los últimos años y la tendencia es una aceleración exponencial si no se toman medidas para controlarla. Tal situación genera diversos problemas como: a) Aumento de la temperatura en la superficie terrestre, b) Aumento del nivel del mar que provoca inundaciones, e) Erosiones y salinización de zonas costeras, d) Migración de especies a latitudes más frías y e) Aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos.

Estrechamente vinculado con lo anterior, las actividades ganaderas y agrícolas provocan un fuerte impacto ambiental y sus efectos se agravan por el cambio climático; por ello, es necesario modificar el paradigma de la producción agroalimentaria, ordenando e impulsando el crecimiento económico del sector, mediante prácticas sostenibles.

A partir de lo anterior, el cambio climático también plantea riesgos para la industria y los recursos naturales. La razón principal es que provoca temperaturas más cálidas y menos precipitaciones en algunas zonas, y una mayor frecuencia de sequías e inundaciones. Estos problemas, junto con la mayor demanda de agua por el crecimiento del sector agrícola, lo hacen vulnerable al cambio climático.

Desde esta óptica, las investigaciones actuales se centran en dos áreas fundamentales: comercio y ganadería; ambas en el sector privado, pero omiten un importante nicho muy representativo en Costa Rica: las instituciones públicas dedicadas a la formación técnica como es el caso de los Colegios Técnicos Profesionales. Según el MEP (2021), existen más de 90 fincas o propiedades agropecuarias dedicadas a la educación técnica en secundaria que cuentan con diversas explotaciones a baja escala como es ganadería, porcicultura, avícola, producción agrícola, entre otras, las cuales de la misma manera, que otras fincas productivas de índole privado; también emiten gases contaminantes que no son cuantificados ni mitigados mediante algún programa que involucre temas de sostenibilidad y compensaciones de huella de carbono. Por ende, surge la iniciativa de desarrollar una propuesta de mitigación de huella de Carbono para la finca del Colegio Técnico Profesional de Liberia, la cual podría funcionar y replicarse en las fincas de los demás centros educativos del país. En dicha propuesta se prevé divulgar actividades y tecnologías capaces de mitigar y compensar la huella de Carbono que se emite en cada sector productivo de la propiedad.

Importancia

La mitigación implica cambios en las actividades diarias y económicas de las personas con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para reducir o mitigar los efectos del cambio climático. A corto y mediano plazo, los impactos del cambio climático dependerán principalmente, de la vulnerabilidad de las poblaciones, su capacidad para adaptarse a los ritmos actuales del cambio climático y el alcance y la velocidad de la

adaptación. A más largo plazo, el impacto dependerá cada vez más de cómo se tomen ahora medidas transformadoras para reducir las emisiones y evitar alcanzar umbrales de temperatura peligrosos y puntos de inflexión potencialmente irreversibles.

Por las razones mencionadas, surge la necesidad de cuantificar y diseñar estrategias para mitigar la huella de carbono generada por las actividades agropecuarias, especialmente, en los agronegocios que desarrollan varias actividades productivas, como la finca didáctica productiva del Colegio Técnico Profesional de Liberia (CTPL). Dichas estrategias podrán servir de guía para incentivar al desarrollo sostenible a fincas privadas y públicas que desarrollan actividades similares en la región. Con esta propuesta se podrá encaminar al CTP Liberia a una producción sostenible acorde con las certificaciones ambientales y Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos en 2015 para la agenda 2030.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Diseñar una propuesta de estrategias de mitigación de la huella de Carbono factible de aplicar en la finca del CTP Liberia.

2.2 Objetivos específicos

- Inventariar las emisiones de gases de efecto invernadero actuales en la actividad agropecuaria de la finca del CTP Liberia
- Identificar las mejores prácticas y tecnologías agropecuarias disponibles a nivel nacional e internacional para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en actividades agropecuarias similares a las de la finca del CTP Liberia.
- Diseñar una estrategia de mitigación y plan para implementarla en la finca del CTP Liberia, ajustada a los recursos de la institución.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 Cambio climático

Según la definición del IPCC (2019): “El cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo debido a cambios naturales en el sistema climático o actividades humanas. Ambas causas están relacionadas con el efecto invernadero, que actúa atrapando el calor y sobrecalentando la Tierra. Puede estimarse midiendo cambios en algunas propiedades estadísticas, como el valor promedio de alguna variable a lo largo del tiempo (por ejemplo, precipitación, temperatura del aire, temperatura del mar, nivel del mar, etc.). Estos cambios suelen ser graduales, permanentes y persisten durante décadas, alteran lentamente las condiciones predominantes y los cambios en el sistema climático. Estos cambios en las condiciones climáticas promedio en la Tierra, tal como sucede en la temperatura global promedio, traen consecuencias como incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos tales como olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas y otros eventos extremos”.

De acuerdo con el texto anterior, las consecuencias del cambio climático impactan todos los entornos naturales y ambientales, de ahí, la importancia de tomar previsiones para disminuir las consecuencias generadas por este fenómeno climático. A continuación, en el siguiente apartado, se hace énfasis en la problemática relacionada con el efecto invernadero.

3.2 Efecto invernadero

Se define como un fenómeno natural por el cual determinados gases que componen la atmósfera retienen parte de la energía solar reflejada desde el suelo, la absorben y la convierten en movimiento molecular interno; en consecuencia, provoca un aumento de temperatura. (Bocados, 2018).

En la Figura 1 se describe de forma visual cómo se produce el fenómeno: la radiación infrarroja que se irradia de vuelta a la Tierra causa mayor calentamiento en la superficie y en la atmósfera inferior, ese nivel extra se denomina efecto invernadero.

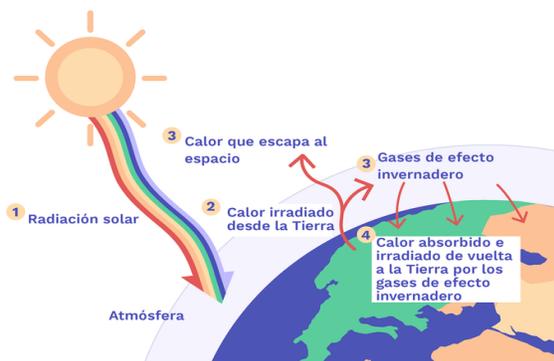


Figura 1. Proceso de producción del efecto invernadero
Fuente: climatescience.org (2019)

El cambio climático y el efecto invernadero están relacionados, pero no son lo mismo. El efecto invernadero es un fenómeno natural que existe desde la formación de la atmósfera terrestre y ha contribuido al desarrollo de la vida en la Tierra. Sin embargo, las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación han aumentado la emisión de gases de efecto invernadero, que atrapan el calor en la atmósfera terrestre y provocan un aumento de las temperaturas globales (Musmanni, 2014).

3.3 Gases de Efecto invernadero.

Los gases de efecto invernadero (GEI), son gases localizados en la atmósfera que absorben la radiación infrarroja procedente de la Tierra o radiación saliente. A los gases que atrapan el calor en la atmósfera se les llama gases de efecto invernadero (GEI). Entre ellos se citan: el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃).

Es importante aclarar que del efecto invernadero surgen emanaciones de distintos gases perjudiciales para los humanos y para la biodiversidad. Entre los gases antes mencionados, es necesario destacar uno especialmente, el dióxido de carbono por ser el que más ha contribuido al forzamiento radiactivo positivo.

A continuación, en el Cuadro 1 se muestra los GEI más importantes con sus respectivos valores de Potencial de Calentamiento Global (PCG) para un período de 100 años. El CH₄ y el N₂O son componentes naturales de la atmósfera, pero gases como los hidroclorofluorocarbonados (HCFC), los perfluorocarbonos, y el Hexafluoruro de Azufre (SF₆) son resultado únicamente de la actividad humana. (Varela, 2020).

Cuadro 1. Gases de Efecto Invernadero (GEI) y duración en la atmósfera y potencial de calentamiento global

GEI	Duración en la atmósfera	Potencial de calentamiento Global (período de 100 años)
Vapor de agua	Pocos días	-
Dióxido de Carbono (CO ₂)	variable	1
Metano (CH ₄)	12	28
Óxido Nitroso (N ₂ O)	114	265
HFC 23 (CHF ₃)	250	12.400
HFC 134 a (CH ₂ FCF ₃)	13,8	1.300
HFC 152 a (CH ₃ CHF ₂)	1,4	138
Perfluorometano (CF ₄)	>50.000	6.630
Perfluoroetano (C ₂ F ₆)	10.000	11.100
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	3200	23.500

Fuente: IPCC (2013)

El término "equivalente de dióxido de carbono" (CO₂eq) es una medida estandarizada a nivel mundial utilizada para expresar el potencial de calentamiento global inherente de cada gas de efecto invernadero en términos de equivalentes de dióxido de carbono (CO₂). Esta medida se utiliza para evaluar los efectos de emisión o mitigación de diferentes gases que contribuyen al efecto invernadero (SINIA, 2019).

El exceso de Gases de Efecto Invernadero intensifica el efecto invernadero, lo que se traduce en un calentamiento global y es que algunos gases provocan mucho más calentamiento que el CO₂, pero desaparecen de la atmósfera en un tiempo menor. Por esta razón, ciertos gases pueden constituir un problema evidente y considerable durante un periodo corto; luego, una vez transcurrido, el problema resultará menor. Lo contrario ocurre con otros gases que tienen mayor persistencia en la atmósfera, por ejemplo, los PFC o perfluorocarbonos, estos son compuestos sintéticos, realizados por el hombre; tienen una vida media en el ambiente de años, lo que originará problemas durante un periodo mayor (Espada *et al*, 2016).

3.4 Emisiones de gases de efecto invernadero del sector agro

La agricultura es la actividad necesaria para la producción de alimentos requeridos por una población mundial creciente; es considerada como la cuarta causa de emisiones de GEI. Emite grandes cantidades de los llamados “gases que no son CO₂” incluyendo al N₂O y el CH₄ con un poder de calentamiento 265 y 28 veces, respectivamente, mayor en comparación con el CO₂ (Saynes *et al*, 2016).

De acuerdo con la FAO (2014), las emisiones generadas por la fermentación entérica representan cerca del 44% del total de emisiones del sector ganadero; el resto, es causada por la producción de alimentos para animales (41%), la gestión del estiércol (10%) y el consumo de energía en la granja (5%). Aunado a esta situación; según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2014); en la agricultura, las emisiones generadas durante la aplicación de fertilizantes sintéticos constituyen la fuente de emisiones de más rápido crecimiento en la agricultura además de los gases resultantes en los procesos biológicos en los cultivos extensivos, como el arroz, generan metano, el cual tiene un potencial de calentamiento 21 veces mayor al CO₂.

3.5 Huella de Carbono

La Huella de Carbono es un indicador clave para evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas y estilos de vida modernos. Este concepto refleja la cantidad de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono) liberados a la atmósfera directa o indirectamente. Todo, desde la producción de materias primas hasta el consumo de energía, contribuye y tiene profundas implicaciones para el cambio climático, ya sea como herramienta de gestión ambiental, comunicación, formación o sensibilización. La huella de carbono se posiciona en el mercado como una herramienta cada vez más importante para las organizaciones (Durán, 2019).

Todas las personas liberan CO₂, que se difunde en el ambiente por las acciones realizadas diariamente; y precisamente, estas emisiones de gases dañinos son los causantes del calentamiento global. La evolución se evidencia en la forma, no así en la manera como se consume energía, agua y otros recursos (ECA, 2014).

3.6 Carbono neutralidad

La *Carbono Neutralidad* o C-Neutralidad consiste en un “Balance cuantitativo entre las emisiones de *gases de efecto invernadero* (GEI) de un conjunto de actividades humanas y

aquellas acciones para reducirlas o compensarlas, de manera que el resultado sea igual a cero” (OSD, 2021). Es una forma de prevenir las consecuencias generadas por el efecto invernadero. Se le conoce también como “huella de carbono cero”. Se libera a la atmósfera la misma cantidad de CO₂ que el que se elimina de ella de diversas formas, dejando un balance de cero. Para lograr la neutralidad de carbono, es necesario emitir a la atmósfera la misma cantidad de GEI que los eliminados mediante otros métodos; esto equivale a no tener ninguna emisión de GEI. La neutralidad de carbono significa que el resultado final de una actividad, proceso o proyecto, como la producción de bienes, la prestación de servicios o su consumo, no emite a la atmósfera más gases de efecto invernadero de los que se han capturado o eliminado. (Ambrosio, 2022).

Por consiguiente, Estrada (2014), señala que las emisiones netas de GEI son iguales a cero; en términos de ecuación se podría representar de la siguiente manera:

$$EGEI_{generadas} = EGEI_{compensadas}$$

Según estudios, lograr la neutralidad de carbono no está exento de desafíos. Uno de los mayores problemas es el costo. Esto se debe a que las tecnologías y prácticas necesarias para reducir las emisiones de carbono pueden ser muy costosas; además, muchas organizaciones y países carecen de los recursos financieros para invertir en ellas. También existen desafíos con la aceptación y la voluntad del público; sobre todo, porque diversos cambios necesarios para reducir las emisiones pueden ser impopulares, difíciles de implementar y podría enfrentar resistencia por parte de los sectores interesados. Sin embargo, en los últimos años, la responsabilidad social de las empresas ha provocado un aumento significativo en el interés por este tema (Berrocal, 2023).

3.7 Cálculo de la huella de carbono

Las empresas, independientemente de su tamaño y alcance de operaciones, son cada vez más conscientes de la urgente necesidad de reducir las emisiones de carbono y abordar cuestiones de sostenibilidad en el marco de sus operaciones para alcanzar el estatus de "empresa cero emisiones". Sin embargo, la mitigación del cambio climático es un proceso que requiere el desarrollo de estrategias de corto y largo plazo y la implementación de medidas concretas y cuantificables (UNA, 2014).

De acuerdo con lo anterior, los valores producidos por el proceso de evaluación de la huella de carbono son indicadores integrales del impacto ambiental de las operaciones de una organización. La medición de esta huella de carbono se convierte en un importante punto de partida para implementar acciones encaminadas a reducir el consumo energético y adoptar recursos y materiales que tengan un menor impacto ambiental.

Es importante destacar que las metodologías más populares para el cálculo de la huella de carbono son las siguientes: la norma ISO 14064, Norma PAS 2050 y el protocolo GHG o Protocolo de Gases de Efecto Invernadero.

Para efecto de este proyecto, se utiliza la metodología GHG Protocolo ya que permite contabilizar los seis tipos de gases GEI (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆). Está enfocado únicamente en la contabilidad y reporte de las emisiones. Fue desarrollado por el World

Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), en cooperación con empresas privadas, gobiernos y grupos ambientalistas. La primera edición fue publicada en septiembre de 2001 (Dávila, 2023).

Según el GHG Protocolo, las emisiones de gases se clasifican en dos tipos:

- a) Emisiones directas: consideradas como fuentes propias o propiedad de la organización o finca.
- b) Emisiones indirectas: son emisiones producidas por las actividades de la organización, pero no se tiene el control directo tal y como sucede con las emisiones directas.

La identificación de las fuentes de emisión permite establecer perfiles generales de emisión, esto consiste en actividades o procesos considerados de alto valor de consumo o por alta intensidad de emisión de gases de efecto invernadero. Cuantificar la producción de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂) permitirá monitorear estas actividades, entender los costos que implican y los tipos de actividades a las que corresponden, para diseñar propuestas que equilibren estas cifras (MITECO, 2023).

El cálculo de la huella de carbono integra cuatro pasos fundamentales:

1. Elegir la metodología. Se trata de comprender la orientación del estudio, por ejemplo, para una empresa incluyendo fincas productivas, la metodología GHG es apropiada. En cambio, para medir la huella de carbono de un producto, resulta de gran utilidad, el ISO 14064 o la norma PAS.
2. Definir límites. Se debe de decidir el ámbito de aplicación, es decir; qué áreas, zonas, o procesos entrarán en la medición.
3. Datos. La recolección de datos para cuantificar emisiones.
4. Cálculo de la huella de carbono. Los datos del punto 3 se deben convertir a fórmulas matemáticas permitiendo resultados de análisis.

En una primera aproximación, el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono consiste en aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Huella de Carbono} = \text{dato actividad} \times \text{factor de emisión}$$

Dato actividad: define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI.

En otras palabras, se refiere a la unidad en que se mide el contaminante, por ejemplo: litros de combustible o kilogramos de metano.

Factor de emisión: cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad”. Estos factores varían en función de la actividad tratada. Se obtiene a partir de datos brindados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica en el documento titulado “Factores de Emisión de GEI” con fecha a julio 2023.

3.8 Estrategias de compensación y/o mitigación.

La mitigación implica modificaciones en las actividades cotidianas de las personas y en las económicas, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; o bien, lograr que los

efectos del cambio climático resulten menos severos. Las medidas de mitigación son aquellas políticas y tecnologías tendientes a limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar las consecuencias. Tomando en cuenta la diversidad y complejidad de cada país y región, así como las circunstancias que obstaculizan el desarrollo y la implantación de tecnologías y prácticas de mitigación, se requiere implementar medidas combinadas y adaptadas a las particularidades nacionales, regionales y locales (SAGyP, s.f.).

Por otra parte, en el ámbito de la agricultura, es posible disminuir significativamente las liberaciones de gases de efecto invernadero en la actividad agrícola, mediante la alteración de métodos de agricultura o la recolección de residuos y subproductos de esta. El procedimiento de una administración del agua correcta y la optimización en el uso de fertilizantes, así como la sustitución de cereales por subproductos fibrosos de la industria agroalimentaria puede contribuir a reducir la estimación de emisiones de GEI de la producción de piensos, además, de utilizar tecnologías adelantadas por parte de los productores, se consideran como complementos esenciales para reducir las emisiones de CO₂ (MAyDS, s.f.).

Se pretende lograr modelos de desarrollo bajos en emisiones y resilientes al clima, realizando cambios en los planes de producción y consumo, guiados por estándares de economía verde, socialmente inclusivos y amigables con el clima; asimismo, que brinden nuevas y únicas oportunidades de empleo; además, proteger los recursos en ciclos cerrados de aprovechamiento, tanto en lo natural como en lo técnico; forman parte de las estrategias por promover. Entre las opciones de mitigación para el sector agro, se propone la intensificación sostenible de las prácticas para el uso de la tierra, restauración de ecosistemas y aumentar la captura de carbono, orientado a generar sinergias con la eficiencia productiva, la competitividad, la conservación y seguridad alimentaria (Musmanni, 2014).

A continuación, se describe una serie de estrategias destinadas a abordar eficazmente la reducción, compensación y mitigación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el contexto de empresas y actividades agropecuarias. Estas propuestas comprenden desde la adopción de prestigiosas certificaciones internacionales hasta la implementación de soluciones locales de bajo costo, todas diseñadas con el objetivo de enfrentar el desafío del cambio climático de manera integral y sostenible.

3.8.1 Normas ISO y Certificaciones ambientales

En un mundo cada vez más consciente de los desafíos ambientales y la sostenibilidad, las normas ISO y la certificación ambiental desempeñan un papel fundamental en las áreas de buenas prácticas agrícolas y reducción de emisiones de carbono. Estas regulaciones y certificaciones proporcionan un marco sólido y reconocido internacionalmente para garantizar que las actividades agrícolas se cumplan de manera responsable y sostenible, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental, especialmente, en lo que respecta a la huella de carbono (UNA, 2014). En este contexto, se describen dichas herramientas y estándares que pueden contribuir a promover prácticas agrícolas más ecológicas y cumplir con los compromisos globales para combatir el cambio climático, tales como las normas ISO y las certificaciones ambientales global gap, Rainforest Alliance.

ISO 14064, 14065 y 14067: la CEPAL en su documento del 2010 relacionado con metodologías para el cálculo de huella de carbono, menciona que el International Standard Organization (ISO) ha desarrollado estándares relacionados con la medición de emisiones de GEI. Se basan en estándares y metodologías desarrolladas para ser un marco reconocido de confianza a los operadores de proyectos de medición de emisiones de GEI. Estas normas tienen como objetivo dar fe y confiabilidad a los reportes de emisiones de GEI y declaraciones de disminución o supresión de GEI en el caso de empresas obligadas a reducción de emisiones según el Protocolo de Kioto. Estas normas pueden utilizar organizaciones comerciales, proyectos o empresas que deseen reducir emisiones. Una de las ventajas descritas es que se puede aplicar en todos los tipos de GEI y no únicamente al CO₂ (CEPAL, 2010).

Por su parte, la ISO 14067 se centra, en cuantificar la cantidad de GEI que produce la fabricación de un producto, un servicio o un evento; asimismo, genera un plan de reducción para tratar de prevenir situaciones problemáticas (Intedya, 2021).

Global GAP: esta norma es reconocida a nivel internacional para la producción agropecuaria. Demanda, entre otros aspectos, una mayor eficiencia en la producción. Mejora el desempeño del negocio y reduce el desperdicio de recursos necesarios. También requiere un enfoque general en la producción agropecuaria que desarrolla las mejores prácticas para las próximas generaciones (Globalgap, 2022).

Al respecto, la Asociación Española para la Calidad (AEC), establece que dicha certificación cubre el proceso de manufactura de un producto certificado y todas las actividades agrícolas posteriores, hasta que se retira de la finca. También define los elementos de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). Esto incluye:

- Manejo integrado de cultivos (MIC).
- Manejo Integrado de Plagas (CIP).
- Sistema de Gestión de Calidad (SGC).
- Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC).
- Salud, seguridad y bienestar de los trabajadores.
- Gestión de la protección del medio ambiente.

Rainforest alliance: la certificación Rainforest Alliance contribuye a producir mejores cultivos, adaptarse al cambio climático, aumentar su productividad y reducir costos. Busca promover el uso de las buenas prácticas de manejo de fincas que permitan atesorar los recursos naturales, mejorar las condiciones de vida de los trabajadores y las relaciones comunitarias, así como la protección del medio ambiente. Esta certificación exige el cumplimiento de reglas ambientales y sociales más estrictas comparadas con las de la producción convencional (Rainforest Alliance, 2020).

En síntesis, los programas de certificación promueven métodos de gestión responsable de la tierra que aumentan el almacenamiento de carbono y evitan la deforestación que alimenta las emisiones de gases de efecto invernadero (Pinargote *et al*, 2020). Tomando en cuenta estas

ventajas, también es fundamental ejercer adecuadas prácticas agrícolas, tema que se abordará a continuación.

3.8.2 Buenas prácticas agrícolas BPA

Las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), integra un conjunto de principios, normas y recomendaciones técnicas aplicables a la producción, procesamiento y transporte de alimentos, orientados a asegurar la protección de la higiene, la salud humana y el medio ambiente, mediante métodos ecológicamente seguros, higiénicamente aceptables y económicamente factibles (CASAFE, 2015). Por eso, se deben implementar buenas prácticas agrícolas para disminuir los riesgos de contaminación y descomposición; sobre todo, porque llevar los alimentos del campo a la mesa implica un proceso (siembra, cultivo, cosecha, transporte, envasado, almacenamiento y distribución).

Las acciones de dicha área abarcan la producción, procesamiento y transporte de productos agrícolas, para asegurar la inocuidad del producto, la protección al medio ambiente, del personal y mejorar las condiciones adecuadas de trabajo. En el caso de los productos pecuarios involucra también, el bienestar animal.

Su importancia radica en que fortalece las prácticas agrícolas responsables, desde la selección del sitio y la preparación de la tierra hasta la cosecha y el manejo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las BPA aplican el conocimiento existente para abordar la sostenibilidad ambiental, económica y social de los procesos de producción y postproducción en las granjas para lograr productos agrícolas seguros y saludables. La aplicación de BPA puede mejorar los medios de vida de los productores y economías locales enteras, contribuyendo al logro de los objetivos de desarrollo nacional o de los objetivos de desarrollo sostenible. Por tanto, la agricultura debe adoptar nuevas prácticas que se acerquen a las tradicionales, pero a su vez, no comprometan la productividad actual. Además, en lugar de ser una actividad emisora de gases de efecto invernadero, en lo que se ha convertido en las últimas décadas, debe recuperar su capacidad de sumidero de carbono contribuyendo así a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (Adapta, 2011).

En el Cuadro 2 se muestra la lista de actividades consideradas en las buenas prácticas agrícolas .

Cuadro 2. Lista de actividades consideradas en las BPA

<ul style="list-style-type: none"> • Abono verde • Bancos forrajeros con especies para corte y acarreo • Diques de contención • Cultivos en callejones. • Lumbricultura: manejo de residuos de cultivos • Lirios acuáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de patios de acopio • Gaviones. • Cultivos en hidroponía • Protección de riberas • Protección de manantiales (nacientes) • Captación del agua de su techo
--	---

- | | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none">• Diques para almacenar agua y controlar erosión |
|--|--|

Entre los principales impactos negativos asociados al cambio climático se citan los siguientes:

- Pérdida de propiedades, nutrientes y capacidad productiva de los suelos agrícolas.
- Pérdida de suelos por mayor efecto de la erosión en episodios de lluvias intensas
- Pérdida de la capacidad de retención de agua en los suelos que ayude a la generación de reservas frente a procesos de sequía.
- Igualmente, la mejora de la capacidad de secuestro de carbono de los suelos agrícolas contribuirá a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Adapta, 2011).

Considerando lo anterior, se tiene certeza de que en el futuro cercano, el éxito duradero de los productores agrícolas en los mercados nacionales e internacionales dependerá de la aplicación de buenas prácticas agrícolas para evitar o reducir el daño ambiental, asegurar una productividad adecuada de las actividades agrícolas y obtener productos seguros para los consumidores.

3.8.2.1 Certificación TICO BPA

La Certificación TICO BPA del Servicio Fitosanitario del Estado es la implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas, que promueve la inocuidad química, microbiológica y física de los productos de consumo fresco en Costa Rica, para dar fe al consumidor de que fueron cultivados aplicando los parámetros establecidos para la protección de la salud humana y el ambiente. Dicho programa distingue a los productores que implementan estas medidas que contribuyen a fortalecer la salud de los trabajadores de campo y de los consumidores, así como la protección del ambiente (SFE, 2022).

La citada Certificación tiene dos años de vigencia, luego de lo que se debe realizar un trabajo de evaluación y gestión, para comprobar que las condiciones sigan cumpliendo con lo solicitado. Actualmente, esta certificación es completamente gratuita (SFE, 2022).

El proceso consiste en capacitar a los agricultores inscritos en el programa, se les brinda educación integral en BPA, se les evalúa y proporciona acompañamiento durante la implementación de las prácticas necesarias en sus fincas. Al final del periodo formativo, se realiza una auditoría para verificar que los productores cumplen con lo estipulado en la normativa del Programa de Certificación TICO-BPA (SFE, 2022).

3.8.3 Agricultura sostenible

Se entiende por agricultura sostenible o sustentable aquella que, en el largo plazo, contribuye a mejorar la calidad ambiental, satisface las necesidades básicas de fibra y alimentos humanos, es económicamente viable y mejora la calidad de vida del productor y la sociedad (TEC, 2017).

A diferencia de la agricultura convencional, que va más allá de sus límites, la agricultura sostenible se caracteriza por garantizar una producción segura para el consumo, mediante el uso eficiente de los recursos y prácticas respetuosas con el medio ambiente, contribuyendo al mismo tiempo a la mitigación del cambio climático (Alcaldía Medellín, 2023). Por ello, su foco está en lograr resultados positivos en los ámbitos social, económico y ambiental. Este cambio implica un cambio en los patrones agrícolas que conducen a un uso inadecuado de los recursos, como la deforestación, el uso indiscriminado de productos químicos, alto consumo de agua, aumento de plagas animales y vegetales y las emisiones de gases; todo este impacto, induce a la implementación de métodos agrícolas sostenibles (IICA, 2021).

Entre las prácticas sostenibles se inscriben la rotación de cultivos, los sistemas multicultivos, el uso de cultivos de cobertura; los sistemas de labranza cero y de labranza reducida, el manejo integrado de plagas (MIP), los sistemas agro-pastoriles, las prácticas agroforestales sostenibles y la agricultura de precisión, entre otras (IICA, 2021).

3.8.4 Sistemas silvopastoriles en la producción ganadera

Los sistemas de producción agropecuario en el país han surgido a partir del cambio de uso del suelo deforestación o convirtiendo tierras agrícolas en pastos. En la creación del sistema se suele utilizar tecnologías desarrolladas en diferentes condiciones sin pensar en las características actuales de la finca; en consecuencia, contribuyen al surgimiento de problemas ambientales y económicos (Navas, 2007).

Por lo anterior, surgen ideas como los sistemas silvopastoriles, que combinan especies forestales o frutales y animales en una misma área. Se practican en diferentes niveles, desde las grandes plantaciones arbóreas comerciales con inclusión de ganado, hasta el pastoreo de animales como complemento a la agricultura de subsistencia (FAO, 2012).

Según lo descrito, es una alternativa para la sostenibilidad de la producción ganadera en los que se incluye el árbol como elemento productivo que contribuye a mejorar la nutrición animal, además, creando relaciones positivas entre suelo, pastos y animales. En este sentido, Navas, (2007) afirma que el árbol aumenta la fertilidad del suelo mediante el ciclo de nutrientes (algunas especies pueden fijar nitrógeno); mejora el equilibrio hídrico; reduce la evaporación, el estrés térmico en los animales mediante la creación de sombra y las emisiones de CO₂, la fijación en el sistema y permite la diversificación de la producción (por ejemplo, madera, leña, frutas). Estos beneficios ayudan a mejorar la rentabilidad de la operación; sobre todo, porque los sistemas silvopastoriles reducen el impacto de los agroecosistemas que podrían limitar la producción ganadera.

La mayoría de los sistemas ganaderos se desarrollan bajo condiciones extensivas, donde predomina el monocultivo de gramíneas y la ausencia de la cobertura arbórea, producto de conceptos y tecnologías de revolución verde que, en la actualidad, están siendo reevaluadas. Estas tecnologías han generado problemas ambientales como degradación del suelo, contaminación de las aguas y emisiones de gases con efecto invernadero (Navas, 2007).

3.8.5 NAMA Ganadería

La ganadería es crucial en la producción de alimentos y la economía mundial; sin embargo, tiene un gran impacto en el cambio climático por las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a esta actividad. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado las NAMA (Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas, por sus siglas en inglés) en el sector ganadero. Estas iniciativas representan estrategias y medidas específicas que buscan mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que promueven la sostenibilidad y la adaptación en la ganadería (MAG, 2014).

El término NAMA ganadería representa la ruta hacia un sector ganadero más eco competitivo que promueve el uso de tecnologías y medidas dirigidas al desarrollo de una ganadería climáticamente inteligente, rentable, productiva y socialmente sostenible. Uno de sus objetivos es abordar el problema del cambio climático global con la fuerte participación de diferentes actores y sectores, teniendo en cuenta los siguientes ejes estratégicos de trabajo: reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, adaptación al cambio climático, medición, reporte y verificación, desarrollo de capacidades, transferencia de la tecnología y la conciencia pública y cambios en los hábitos de consumo (MAG, 2014).

FAO (2022) afirma que la NAMA prevé que a través del desarrollo, difusión y adopción de nuevas medidas (tecnologías y procesos) de mitigación y adaptación en el sector ganadero bovino se transformará no solo la producción primaria de carne y leche, sino también la producción y procesamiento del producto en la agrocadena costarricense. De igual manera, se procura mejorar el servicio de extensión y apoyo técnico tanto público como privado. Además, se pretende fomentar a nivel de consumidores, mayor concientización sobre la importancia de la reducción de los GEI en el sector.



Figura 2. Acrílico informativo en exposición de Museo del Jade, enero 2024, Costa Rica.

El Ministerio de Agricultura y Ganadería ha mostrado gran interés en la descarbonización del sector ganadero que desde el 14 de diciembre de 2023; ha celebrado una exposición denominada “Historias de arrieros y bovinos hacia la descarbonización”, en el Museo del Jade del INS. Busca mediante un enfoque cultural, histórico, museográfico y educativo, destacar las estrategias sociales y ambientales, generadas por el sector ganadero, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como un paso más hacia la descarbonización de

Costa Rica. La anterior Figura 3, es un ejemplo del contenido que se puede encontrar en dicha exposición.

3.8.6 Mercado internacional de carbono

En pocas palabras, los mercados de carbono son sistemas comerciales en los que se venden y compran créditos de carbono. Las empresas y personas pueden utilizar los mercados de carbono para compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la compra de créditos de carbono de entidades que eliminan o reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (PNUD, 2022).

Los gases de efecto invernadero, se distribuyen uniformemente en la atmósfera, lo que significa que tienen concentraciones similares en todo el mundo. Entonces, cuando se trata de concentraciones globales de gases de efecto invernadero y sus impactos, las fuentes específicas de emisiones o dónde se evitan no importan (Climatepartner.com, 2022). Por lo tanto, las emisiones que no es posible reducir localmente, pueden prevenirse mediante proyectos de compensación de carbono en otros lugares. Según un artículo publicado por el ECA en 2014, esto se puede lograr, por ejemplo, conservando los bosques, reforestando o ampliando las energías renovables.

Además, Musmanni (2014), menciona que una de las posibles paradojas, que podría poner en peligro los esfuerzos globales para reducir las emisiones, es la aplicación de créditos de carbono a ciertos sectores. El mecanismo es que los "ahorros" de emisiones pueden calcularse y transferirse a otros sectores e industrias, que podrían comprar esos ahorros en forma de bonos para excusarse de reducir las emisiones (ya lo han hecho de otras maneras).

En Costa Rica el mercado interno de carbono es un mecanismo que coopera activamente con los esfuerzos del país para lograr la neutralidad de carbono. El mercado opera con instrumentos diseñados para facilitar el intercambio y comercialización de créditos de carbono generados por proyectos o actividades específicas, destinadas a apoyar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el país. El Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE) es quien certifica que la empresa u organización ha dejado de emitir gases de efecto invernadero o compensa sus emisiones con "créditos" (créditos de emisión) comprados en el mercado de carbono. Cada "crédito" comprado por una empresa u organización emisora de gases de efecto invernadero le da a ella derecho de emitir una tonelada de dióxido de carbono, o el equivalente en otros gases (UNA, 2014). En el próximo apartado, se describe la metodología aplicada en el presente estudio

4. METODOLOGÍA

4.1 Ubicación y descripción del área de estudio

Liberia representa más del 40% de la población de la provincia de Guanacaste y el desarrollo poblacional de la región tiende hacia una urbanización precaria en sus regiones más altas. Históricamente sus actividades productivas han sido la engorda extensiva, la cría y producción lechera de ganado vacuno y el cultivo de granos básicos (Municipalidad de Liberia, 2017) .Sin embargo, además del turismo y la producción de energía geotérmica, actualmente existen otras actividades económicas importantes como la producción de cultivos como caña de azúcar, melones, sandías, mangos; todos adaptados al carácter tropical seco de la región



Figura 3. Mapa de Costa Rica señalando Liberia

Fuente: Municipalidad de Liberia, 2017

A una altura promedio de 144 msnm con una temporada de lluvia arbitraria y nublada, la estación seca es bochornosa, ventosa y parcialmente nublada, por lo que el calor está presente todo el año. Razón por la cual las temperaturas generalmente, oscilan entre 22 °C y 33 °C, y rara vez bajan de los 22 °C o superan los 37 °C (MAG, 2022). En el siguiente Cuadro 3 se describen las variables climáticas de la zona considerando la radiación solar, alta, y la humedad relativa, que ronda el 74%.

Cuadro 3. Variables climáticas del cantón Liberia

Variable	Rango
Temperatura promedio	27,1°C (Min 22,1 °C a Max 33,0 °C)
Precipitación	1.656,8 mm
Horas luz	11h 30 min a 12 h 30 min
Radiación solar	15,9
Brillo solar	7,3
Humedad relativa	74%
Días con lluvia al año	115
Periodos secos /lluvia	Estación seca de diciembre a abril, estación lluviosa de mayo a noviembre

Fuente: MAG, 2022

El cantón de Liberia integra más del 40% de la población de la provincia de Guanacaste. El desarrollo de la zona tiende a ser urbano, precario en sus zonas más altas. Sus actividades productivas son la ganadería extensiva de engorde, desarrollo y leche, así como el cultivo de granos básicos. Sin embargo, en la actualidad se encuentran posicionadas otras actividades económicas importantes como la producción de caña de azúcar de forma extensiva, melón, sandía, mango entre otros cultivos, además del turismo, actividad muy afectada en tiempos de pandemia; dejó a muchos sin sustento y con dificultades en la producción de energía geotérmica; todas estas adaptadas al trópico seco característico de la zona (Costa, 2020).

Una de las instituciones emblemáticas en Liberia, es El Colegio Técnico Profesional de Liberia (CTPL). Según el Plan Quinquenal de 2022 o plan de desarrollo institucional; la infraestructura del colegio se localiza frente a la Cámara de Ganaderos, mientras que su finca didáctica se ubica a 500 metros de las instalaciones principales del colegio. En sus cercanías se encuentran otras instituciones públicas como Universidad Nacional, Instituto Nacional de Aprendizajes, UNED e Instituto de Guanacaste.

En cuanto a las características de la finca objeto de estudio, debe indicarse que posee un total de 17 hectáreas, de las cuales únicamente 8 son utilizadas en actividades didácticas con estudiantes; el resto del terreno se alquila a terceros para producción de forraje *Transvala (Digitaria decumbens)*, requerido en las pacas. La actividad didáctica está ligada a la cantidad de estudiantes interesados y matriculados en talleres exploratorios o especialidades agropecuarias. En los periodos 2022 y 2023 había un total de 16 secciones involucradas en el sector, es decir; aproximadamente 220 estudiantes visitan y desarrollan diversas actividades en la finca por cada ciclo lectivo.

Entre las actividades que desarrollan se encuentran:

- i. Explotación avícola. Producción a baja escala de pollos de engorde (50 pollos) con 2 a 3 ciclos por año y gallinas ponedoras Isa Brown (12 gallinas). El estudiante que curse el taller aprende la crianza de pollos desde el día 1 hasta el sacrificio, reconoce procesos nutricionales, etapas de vida, sanidad avícola y proceso de matanza.
- ii. Explotación porcícola. Actividad dedicada a la cría y venta de lechones de 30 días. Actualmente, se administran cuatro (4) cerdas adultas para reproducción bajo el sistema de Inseminación Artificial (I.A). El aprendiente que cursa el taller. Entre sus

aprendizajes logra: atender lechones desde el nacimiento, cálculo de gestación y parto, nutrición y sanidad animal, pasos para IA, entre otras.

- iii. Explotación bovina. Se cuenta un hato en formación (joven) de 10 animales, de los cuales 5 son hembras adultas, 4 son terneras en edades de 5 a 13 meses y un toro en desarrollo. El tipo de explotación se orienta hacia el doble propósito con cruces de Girolando, Pardo Suizo y Gyr. Para esta actividad se cuenta con 7 apartos con pasturas de *Brachiaria decumbens* que suman un total de 4,0 hectáreas. Además de un área de 500m² para forrajes de corta como, de los cuales 200m² son Cuba 22 (*Pennisetum Purpureum X Pennisetum Glaucum*). Aquí el estudiante se encarga de labores diarias en ganadería tales como: alimentación, controles profilácticos, manejo y sujeción, establecimiento de pasturas, manejo de potreros e instalación y mantenimiento de cercas vivas y eléctricas.
- iv. Explotación agrícola. La actividad agrícola cuenta un área de 3 has para el cultivo de plantas de ciclo rápido como maíz, pepino, chile dulce, vainicas. Debido a la carencia de un sistema de riego actual, únicamente se aprovechan para el cultivo los meses de invierno (julio a octubre). En esta actividad se utiliza fertilizantes químicos de formulación tradicional como Nitrato de amonio, 10-30-10 y Urea. También existen dos invernaderos modernos de 200m² cada uno; uno de ellos se utiliza para cultivo hidropónico como lechuga americana (*Lactuca sativa*). Aquí el estudiante, en los talleres de “Reproduzcamos la huerta” o agricultura, aprende los procesos de preparación, cultivo y cosecha de la lechuga. El segundo invernadero tenía como objetivo el desarrollo de plantas frutales y maderables, pero desde su construcción en 2021, no se ha utilizado.

Seguidamente, aparece la Figura 5, se obtuvo del programa Google Earth; muestra la ubicación de cada explotación y zonas de pastoreo en el terreno de la finca del CTP Liberia.



Figura 4. Imagen de finca del CTP Liberia tomada desde Google Earth Pro, 2023

4.2 Procedimientos metodológicos

Para cuantificar las emisiones en la finca del CTP Liberia se debe de implementar procesos sistémicos que permitan una buena organización y recolección de datos y su adecuado procesamiento. Se diseña una propuesta de mitigación con recursos accesibles a la institución para que el proyecto no quede solo en papel. Dicho de este modo, para el logro de los objetivos se llevará a cabo la metodología descrita en la Figura 5:

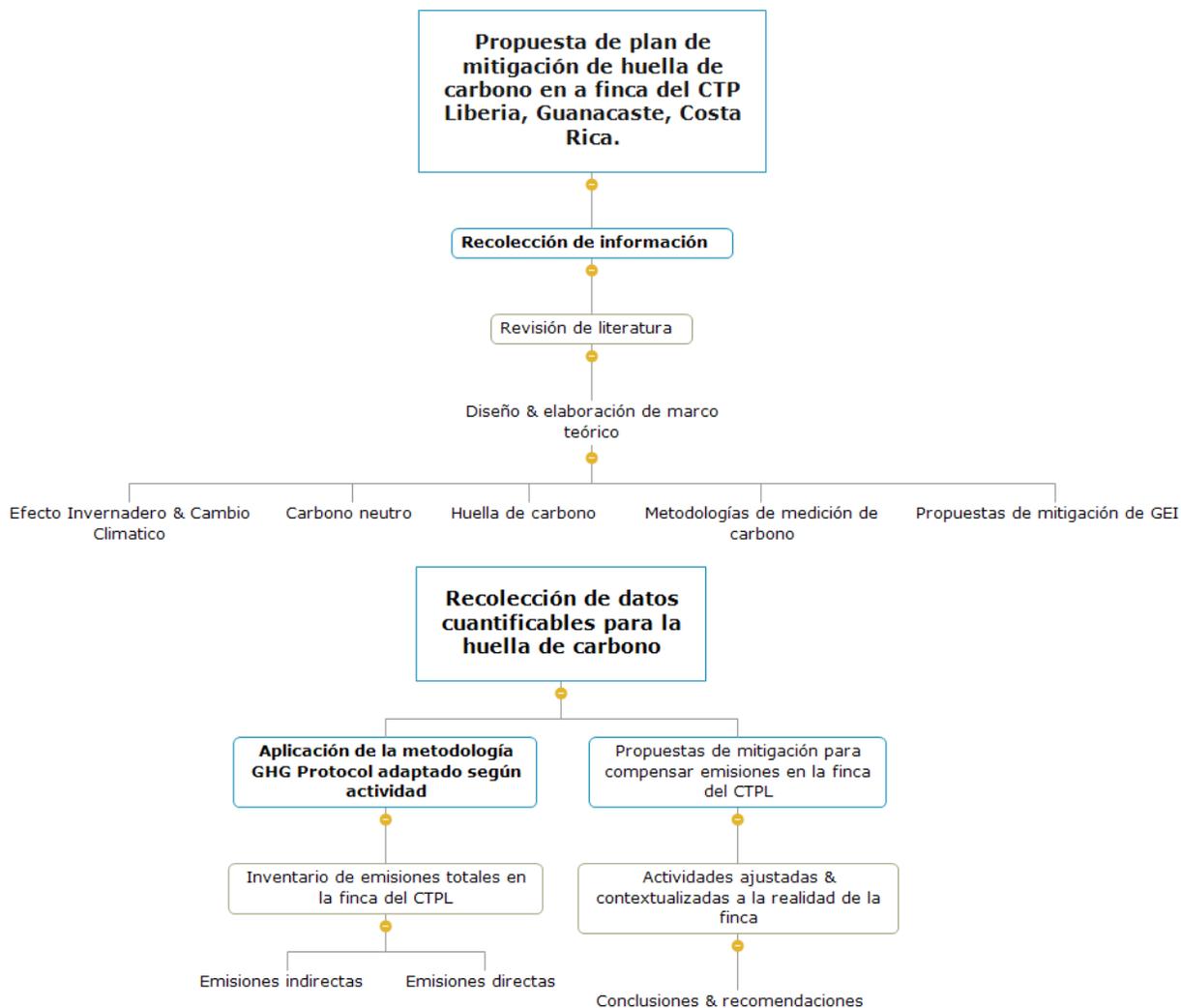


Figura 5. Esquema de actividades

Estrechamente ligado a la información anterior, en el Cuadro 4, se describen diferentes fases en las que se dividirá la metodología por seguir en esta propuesta de proyecto, considerando las principales actividades, de manera secuencial; es decir, se inicia con la solicitud formal, mediante carta a la jefatura del colegio (Anexo1) y se concluye con el procesamiento de la información, ejecución de cálculos y emisión de los resultados obtenidos.

Cuadro 4. Fases metodológicas

Fase planificación	Fase de campo	Fase final
Solicitud de permiso o visto bueno para desarrollar la investigación en el área asignada.	Diseño de cronograma de actividades a ejecutar en el campo.	Procesamiento de la información obtenida en campo.
Solicitud y aceptación de estudio de trabajo.	Elaboración de materiales guía para ordenar datos.	Elaboración de informe y guía con propuesta de acción.
Revisión de información secundaria.	Recolección de información: Visitas a campo	Presentación final.
Elaboración de la matriz información.	Análisis de consumo eléctrico y combustibles (recibos)	
Elaboración de propuesta metodológica.	Diseño de analíticas para la presentación de resultados	
Presentación final de propuesta de trabajo de grado (anteproyecto).		

4.3 Método de cuantificación

Para el caso en estudio, se prevé ejecutar un cálculo de emisiones originadas por las actividades y procesos dentro de la finca, utilizando una adaptación propia para fincas agropecuarias del GHG Protocol original, disponible y actualizado en la página web ghgprotocol.org. Dicha adaptación excluye el alcance 3, además de una inclusión de factores de emisión de gases emitidos por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (13° edición) que puede ser revisado en el sitio cglobal.imn.ac.cr. En casos donde no se cuenta el factor de emisión se utilizarán valores y fórmulas otorgados por el IPCC de 2006, Volumen 4, Capítulo 10 disponible en: ipcc-nggip.iges.or.jp.

Además, se organizarán las actividades, según el alcance mostrado en el siguiente Cuadro 5.

Cuadro 5. Actividades según alcance del GHG Protocol

	Actividad
Alcance 1	<p>Manejo de residuos agrícolas sólidos y líquidos dentro de la finca.</p> <p>Aplicación de fertilizantes sintéticos a los cultivos de la finca.</p> <p>Fermentación entérica producto de los procesos de digestibilidad del ganado y otras especies.</p> <p>Combustibles utilizados en transporte y en actividades productivas.</p>
Alcance 2	<p>Consumo en energía eléctrica empleada en la finca</p>

Fuente: ghgprotocol.org (2023)

El protocolo GHG original, establece 5 principios básicos que deben respetarse en cualquier adaptación, según el sector o área por investigar. Dichos principios se citan a continuación:

- 1) Relevancia: las emisiones reportadas deben reflejar de forma apropiada las emisiones generadas por las actividades y los patrones de consumo. El cálculo debe ser un elemento para la toma de decisiones.
- 2) Consistencia: el cálculo de las emisiones debe corresponder al enfoque, al límite y al alcance del inventario.
- 3) Transparencia: los datos de actividad, las fuentes, los factores de emisión y las metodologías de contabilidad requieren de una documentación adecuada y divulgación para permitir la verificación.
- 4) Precisión: el cálculo de las emisiones de GEI no deberá exagerar ni minimizar la verdadera cantidad de emisiones de GEI.
- 5) Integridad: implica que se abarquen todas las fuentes de GEI, así como todas las actividades, según el estudio.

En resumen, la modificación al protocolo GHG original, consiste en ligeras modificaciones, sin alterar la base del protocolo. Permite utilizar una herramienta adaptada a la actividad con las siguientes características:

- Se cuantificarán alcances 1 y 2 únicamente.
- El año base o límite temporal será de 9 meses máximo y 4 meses mínimo, debido a que es el tiempo donde se ejecutan actividades y se pueden obtener registros.

- Utilización de factores de emisión nacionales proporcionados por el IMN. Como segunda alternativa, datos del IPCC serán aceptados.
- Total, de emisiones de GEI será expresado únicamente en CO₂ equivalente, para ello se utilizará el Potencial de Calentamiento Global (PCG) de cada gas para dicha conversión.
- Se efectuará un cálculo global de emisiones para el sector eléctrico y de combustibles para facilitar el conteo a través de los recibos o facturas. Además, no existen datos que detallen cuánto combustible o kWh se utilizan en cada actividad.
- El plan de gestión de emisiones se cambiará a un plan de mitigación de la huella de Carbono que incluya actividades estratégicas rentables y asequibles para la institución.

Es importante aclarar que la metodología establecida puede ser implementada en cualquier institución educativa en Costa Rica, que posea terrenos agropecuarios; asimismo, podría aplicarse en fincas o parcelas que voluntariamente deseen conocer su huella de Carbono.

4.4 Límite operacional y temporal

El año lectivo en el sistema educativo público del MEP está establecido entre los meses de febrero a diciembre. El primer mes es organizativo a nivel interno de la institución, aquí se registran estudiantes, se forman grupos, aplican exámenes de ampliación y se organiza al personal, así que el periodo lectivo comienza en marzo y finaliza la última semana de noviembre de forma efectiva; en diciembre, se realizan actividades de ampliación para los estudiantes; es decir, se dejan 9 meses efectivos para el desarrollo de actividades dentro de la finca.

El periodo productivo agrícola en la finca del CTPL depende de las precipitaciones; se limita a los meses de invierno (julio a octubre); sobre todo, por la escasez de agua y daños en el actual sistema de riego. Por otro lado, el límite temporal para el conteo de emisiones de la actividad avícola comprende un periodo de 8 meses (marzo a octubre) y finalmente, para el resto de las explotaciones pecuarias, así como el consumo energético se estimará por todo el año 2023.

4.5 Mapeo del área de estudio

Mapear las fincas es un proceso que consiste en recolectar, analizar y representar de forma gráfica y textual la información de las actividades a estudio dentro de la propiedad. Esto, con el fin de obtener información relevante para los cálculos necesarios, y por ende emitir resultados fiables.

El protocolo GHG establece que se debe desarrollar un flujo de proceso o lista de actividades involucradas en los cálculos de emisiones de Carbono; sin embargo, con la adaptación propuesta al protocolo GHG, se ofrece un mapeo de todas las actividades destinadas a medir las emisiones, con base en una hoja electrónica de Microsoft Excel, incluye algunos datos relevantes como tipo de actividad, dato actividad, factor de emisión, factor de conversión, entre otros. La recolección de datos se efectúa a partir de visitas de campo y cuestionario oral a profesores y administrativos encargados de cada área productiva.

El anexo 2 muestra una vista general de la hoja diseñada para dicho inventario.

4.6 Cálculo de emisiones por actividad

La identificación de las fuentes de emisión permite establecer perfiles generales de emisión. consiste en definir actividades o procesos de alto valor de consumo o por alta intensidad de emisión de gases de efecto invernadero. Cuantificar la producción de gases de efecto invernadero como Dióxido de Carbono (CO₂) permite monitorear dichas actividades, conocer los costos involucrados y a qué tipo de actividad corresponden; datos fundamentales para diseñar propuestas que equilibren esas cifras (MITECO, 2023).

En una primera aproximación puede decirse que el cálculo de la huella de carbono consiste en aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Huella de Carbono}_{\text{subtotal}} = \text{dato actividad} \times \text{factor de emisión}$$

Posteriormente, si el factor de emisión está expresado en otro tipo de Gas diferente al CO₂, se deberá ejecutar la conversión utilizando los factores de conversión PCG del IPCC de la siguiente manera:

$$\text{Huella de Carbono CO}_{2\text{eq}} = \text{Subtotal} \times \text{factor PCG}$$

Las fórmulas emiten resultados en Kg CO_{2eq.} ; sin embargo, al realizar la sumatoria total del año en estudio, las cifras serán aumentadas; por tanto, en la hoja electrónica para realizar el inventario de emisiones se realiza la conversión a Toneladas CO_{2eq.}, facilita mayor comprensión y simplificación de cifras.

4.6.1 Explotación bovina

Emisiones de CH₄ por Fermentación entérica.

Para la cuantificación de estas emisiones se realiza una caracterización del hato ganadero, a partir de la composición por categorías y número de cabezas de ganado, utilizando los factores de emisión propuestos por el IMN en su 13° edición del 2023. Las agrupaciones del ganado serán: Terneros, novilla, vaca adulta y torete (novillo). Se estima su aporte mediante la ecuación:

$$\text{KgCH}_4 = \sum (\text{FE} * \#\text{animales}_{\text{cat}})$$

Donde:

FE: Factor de Emisión obtenido del IMN de Costa Rica en su 13° edición, según categoría animales.

#animales_{cat.}: Número de animales de cada categoría o agrupación según el FE.

Como se ha mencionado anteriormente, todas las emisiones se adquieren utilizando datos de un año productivo y deben convertirse a CO_{2equivalente}. Para la conversión de CH₄ se utiliza el factor de conversión 21, con la siguiente multiplicación:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgCH_4 * 21$$

Emisiones de CH₄ en estiércol en potrero

El término «estiércol» se utiliza para incluir bosta y orina (es decir, los sólidos y líquidos) producidos por el ganado.

Se modifica la fórmula recomendada por las Directrices del IPCC de 2006, Volumen 4, Capítulo 10, sección 10.4; para el conteo de emisiones en estiércol. Dicha modificación consiste en utilizar el factor de emisión FE del Instituto Meteorológico Nacional el cual tiene valor 1,1 y deja la siguiente fórmula:

$$CH_{4est} = \sum (FE * \#animales_{cat})$$

$$CH_{4est} = \sum (1,1 * \#animales_{cat})$$

Para la conversión de CH₄ se utiliza el factor de conversión 21. Deja la siguiente multiplicación:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgCH_4 * 21$$

Emisiones N₂O de estiércol en potrero

Las emisiones de óxido nitroso en pasturas se calcularán con un método país específico integral, basado en las Directrices del IPCC de 2006, Volumen 4, Capítulo 10 y Capítulo 11. Para este cálculo se utilizará la fórmula país desarrollada por el programa NAMA ganadería para Costa Rica:

$$NO_{2est} = (N_{exc} * \#animales * FE_{(D+I)}) * \frac{44}{28} = KgN_2O/año$$

Donde:

N_{exc} : Nitrógeno excretado o depositado. Se obtiene a partir de la tabla 10.19 del IPCC de 2006, Volumen 4, Capítulo 10. Corresponde a 0,48.

$\#animales$: Cantidad expresada en animales +449kg, correspondiente a una unidad animal (UA)

$FE_{(D+I)}$: Factor de Emisión para las emisiones directas y factores de emisión de óxido nitroso y fracciones de nitrógeno volatilizado y lixiviado para las emisiones indirectas, corresponde a 0,03 y 0,20 respectivamente.

$\frac{44}{28}$: las emisiones por heces y orina depositados directamente en los pastos, se considera el multiplicador 44/28 para convertir de kg de nitrógeno a kg N₂O (de acuerdo con sus pesos moleculares).

En la conversión de N₂O a CO₂ se utiliza el factor de conversión 310 como potencia de calentamiento global, según el informe de Factores de emisión del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de la siguiente manera:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgN_2O * 310$$

4.6.2 Explotación porcícola

Emisiones de CH₄ por Fermentación entérica.

Para la cuantificación de estas emisiones, únicamente se establece el total número de cerdos adultos sin realizar una caracterización de la piara. Los lechones de deben de convertir a un equivalente de cerdo adulto; para ello, se obtiene un peso promedio y se multiplica por el número de lechones. El factor de conversión se elige a partir de una alimentación 100% de piensos.

En la finca del CTP Liberia, se cuenta con 4 cerdas adultas destinadas a la reproducción a través de I.A. Por lo general, el ciclo productivo se calcula con el año lectivo, permite: 1 cerda en lactancia, 2 en gestación (1 mes de diferencia) y 1 cerda vacía o esperando inseminación. De ahí, el historial de registro evidencia que de media son 8 lechones con peso promedio de 8 kg. Al estimar la equivalencia en peso a cerdo adulto, se obtiene:

$$Eq = (N * peso\bar{x}) = kgEq$$

$$Eq = (8 * 8kg) = 64kgEq$$

El resultado equivale a un cerdo adulto; por lo tanto, para efectos de las estimaciones el valor N (total de cerdos) será de 5.

A partir de lo anterior, se utiliza el factor de emisión propuesto por el IMN en su 13° edición del 2023. Se estima su aporte mediante la ecuación:

$$KgCH_4 = \sum (FE * N)$$

Donde:

FE: Factor de Emisión obtenido del IMN de Costa Rica en su 13° edición, según categoría animales. Para cerdos se utiliza 1.

N: Número de cerdos adultos.

Como se ha mencionado anteriormente, todas las emisiones se emiten utilizando datos de un año productivo y deben convertirse a CO₂equivalente. Para la conversión de CH₄ se utiliza el factor de conversión 21. Deja la siguiente multiplicación:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgCH_4 * 21$$

Emisiones de CH₄ por estiércol

Se modifica la fórmula recomendada por las Directrices del IPCC de 2006, Volumen 4, Capítulo 10, sección 10.4; para el conteo de emisiones en estiércol. Dicha modificación consiste en utilizar el factor de emisión FE del Instituto Meteorológico Nacional el cual tiene valor 1, se obtiene la siguiente fórmula:

$$CH_{4est} = \sum (FE * N)$$

4.6.3 Explotación avícola

Emisiones de CH₄ por Fermentación entérica.

El Inventario Nacional de emisiones considera las emisiones de metano derivadas de la fermentación entérica, despreciable, en las aves; sin embargo, para efectos de estimar e inventariar fuentes de GEI se calculará con la siguiente ecuación:

$$KgCH_4 = \sum (FE * N) * Y$$

Donde:

N: Total de aves por ciclo.

Y: Número de ciclos al año. Generalmente en el CTP Liberia se ejecutan 3 ciclos máx. por año.

Datos del IMN recomienda: Factor de Emisión de 0,002 para pollos de engorde y un 0,001 para gallinas.

En la estimación para gallinas se omite el elemento, debido a que no rotan ciclos durante el año.

Para la conversión de CH₄ a CO₂ se utiliza el factor de conversión 310, como resultado se obtiene la siguiente multiplicación:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgCH_4 * 21$$

Emisiones N₂O por estiércol

La estimación se obtiene al aplicar la fórmula:

$$NO_{2est} = \left[(N_{exc} * N_{aves} * FE_{N_2O}) * \frac{44}{28} \right] * Y = KgN_2O/año$$

Donde:

N_{exc}: Nitrógeno excretado. Para aves de engorde corresponde a 1,10 y gallinas 0,82.

N_{aves}: Número total de aves por ciclo

FE_{N₂O}: Factor de emisión para el Óxido nitroso, corresponde a 0,02 según la tabla 11.1 del IPCC 2006.

Y: Ciclos por año.

Se realiza un ajuste a la fórmula para la estimación en gallinas, eliminando el elemento “Y” (ciclos por año), queda:

$$NO_{2est} = (N_{exc} * N_{aves} * FE_{N_2O}) * \frac{44}{28} = KgN_2O/año$$

Para la conversión de N₂O a CO₂ se utiliza el factor de conversión 310. Se obtiene la siguiente multiplicación:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgN_2O * 310$$

4.6.4 Explotación agrícola

Emisiones N₂O por fertilizantes

La actividad inventariada será el uso de fertilizantes nitrogenados, se tomará como base los datos facturados provistos por la Finca, correspondientes al año 2022. También se aplicará entrevista a profesores encargados del terreno agrícola, con el fin de indagar sobre la formulación utilizada, así como cantidades en kilogramos.

Su aporte se estimará mediante la ecuación:

$$Emisiones Urea = \frac{[(M * FE) * \frac{44}{12}]}{1} * 1000 = KgCO_{2eq}$$

M: Toneladas anuales de urea aplicado.

FE: 0,20 como recomendación general tanto en el protocolo GHG e IPCC.

$\frac{44}{12}$:Factor nominal para conversión de emisiones de CO₂-C (Carbono contenido en el CO₂) a CO₂.

Para el cálculo de emisiones, a partir de otros fertilizantes se utiliza la denominada Herramienta GEI Agropecuario, elaborada para Costa Rica por la Fundación para la Sostenibilidad y la Equidad (Fundecooperación) en 2017. Dicha herramienta comparte los criterios y recomendaciones emitidas por el GHG protocolo y el IPCC.

La fórmula general recomendada para el conteo de N₂O es:

$$(N_t * FE) * \frac{44}{28} = Kg N_2O$$

Donde:

N_f: Kilogramos de Nitrógeno aplicado, según la formulación. Por regla general, Sela (2021), establece las siguientes equivalencias de fertilizantes conocidos:

Nitrato de Amonio: 0,35kg Nitrógeno/kg producto.

10-30-10: 0,10kg Nitrógeno/kg producto.

FE: Factor de emisión. Se utiliza la recomendación por defecto proporcionado en la tabla 11.1 de la guía IPCC, el cual corresponde a 0,01 kg de N₂O por cada kg de Nitrógeno, proveniente de fertilizantes minerales aplicado al suelo correspondiente a “aportes de N de fertilizantes minerales, abonos orgánicos y residuos agrícolas” de dicha tabla.

$\frac{44}{28}$: conversión de emisiones de N₂O-N a emisiones de N₂O

Una vez obtenida la cantidad de Kg N₂O se debe convertir a CO_{2eq} por medio de la ecuación:

$$KgCO_{2eq} = \sum KgN_{2O} * 310$$

4.6.5 Consumo eléctrico y de combustible

Para la cuantificación de estas emisiones se utiliza el factor de emisión para consumo energético en Costa Rica. Se estima el aporte mediante la ecuación:

$$Huella\ de\ Carbono = kWh\ anual \times 0,0534 = kgCO_{2eq}$$

En términos de kg CO_{2eq} para el combustible facturado se obtendrá en función del resultado de:

$$Huella\ de\ Carbono = litros\ anuales \times 2,231 = kgCO_{2eq}$$

4.7 Propuestas de mitigación de huella de carbono (fase final)

Finalmente, se busca generar un informe descriptivo que muestre las emisiones por cada actividad en la finca, así como una propuesta detallada con actividades prácticas y asequibles que acerquen al carbono neutralidad de la finca del CTP Liberia. De esta manera, contarán con registros de emisiones de cada área y el equipo disciplinado y profesional (docentes y jefaturas). Los resultados del estudio permitirán la toma de decisiones técnicas a los responsables de cada actividad programada; de igual manera, facilitará el control de las emisiones en los próximos años.

5. RESULTADOS

5.1 Elaboración de Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero

Se desarrolló un inventario de emisiones de GEI en una hoja electrónica Excel, la cual contiene elementos del alcance 1 así como alcance 2 para cuantificar la totalidad de emisiones de CO₂ equivalente. A continuación, se menciona el contenido requerido para la elaboración del inventario de emisiones:

- Inventario de animales por categoría por explotación.
- Kilogramos de fertilizante agrícola por formulación por año productivo.
- Kilowatts consumidos anualmente en energía eléctrica.
- Litros de combustible consumidos anualmente por año productivo.

5.2 Año base

El estudio consideró como base, los datos correspondientes al año 2023 para generar el inventario, debido a secuelas de años anteriores ocasionadas por el COVID 19.

5.3 Identificación de fuentes

Se identificaron las fuentes productoras GEI, mediante registro para la identificación de fuentes de gases de efecto invernadero; para tal efecto, se toman en cuenta las actividades macro, ejecutadas en la finca del CTP Liberia: explotación bovina, porcícola, avícola y explotación agrícola. Adicional a las actividades agropecuarias, el protocolo GHG establece como recomendación inventariar el consumo energético (combustible y/o electricidad), mediante las ecuaciones del IPCC de 2006.

5.4 Diseño de programa

Se programó una hoja electrónica Excel con diseño atractivo y amigable que funciona de manera sencilla. Cualquier usuario puede introducir datos específicos para obtener una estimación explícita por cada actividad desarrollada en la finca del CTP Liberia; es decir, para cada fuente de GEI se estableció la fuente de datos (estadística, medida o combinación de ambos) así como el procedimiento o documento asociado con cada fuente (fórmula programada). Esta información se representa en el apartado que describe cada columna; se realizó el cálculo respectivo a cada fuente basado en los datos de actividad de GEI y las formulaciones propuestas por el Protocolo GHG, IPCC y programas como NAMA Ganadería del Ministerio de Agricultura de Costa Rica, utilizando factores nacionalizados, según el caso.

Finalmente, la hoja electrónica por medio de factores de conversión expresa cada emisión en KgCO₂ y T CO₂ cuando las ecuaciones utilizadas emiten resultados en otros gases tales como N₂O o CH₄. La figura 6, presenta una captura de pantalla de la interfaz de la hoja programada.

	A	N	O	P	Q	R	S	T
Finca CTP Liberia								
Ubicación								
Proceso/subproceso	PCC N	PCC CH4	Kg CH4 Ferm Enteri	Kg CH4 Gest estierc	Kg N2O Gest estierc	EMISIONES kgCO2	Unidad	
Alcance 1								
Explot Bovina			428.350	5.500		9526.753	KgCO2	
			41.910	1.100	1.342	1319.113	KgCO2eq	
			50.430	3.300		1128.330	KgCO2eq	
			111.700	1.100		2368.800	KgCO2eq	
UA							KgCO2eq	
Explot Porcina			4.400	4.000		176.400	KgCO2eq	
	310	21	1.100	1.000		44.100	KgCO2eq	
Explot Avícola			0.012		0.309	96.122	KgCO2eq	
			0.300		3.457	1078.014	KgCO2eq	
Agrícola						168.667	KgCO2eq	
						470.580	KgCO2eq	
Combustible						497.107	KgCO2eq	
Alcance 2								
Energía						966.807	KgCO2eq	
						17840.793	KG	
								17.841 TON

Figura 6. Interfaz de hoja Excel programada para la estimación de emisiones

5.5 Análisis de resultados

El estudio consideró las emisiones de las explotaciones didácticas productivas de la finca y sus diversas actividades desarrolladas por unidad de producción. Aunado a ello, se consideró el consumo eléctrico anual para el año base, así como el combustible por litros facturado destinados al uso de máquinas para labores en la finca.

Las emisiones totales en el año 2023 para la Finca del CTP Liberia fueron 17 840,793 Kg de Dióxido de Carbono equivalente (Kg CO_{2eq}) estuvieron asociadas a los diferentes procesos y subprocesos de producción, así como insumos energéticos para el desarrollo de actividades diarias. Esta huella de Carbono difiere a los resultados presentados por Páliz (2019) en Honduras y Quirós (2015) en Costa Rica, donde las estimaciones fueron de 485 870,85 Kg CO_{2eq} y 199 090,00 Kg CO_{2eq} respectivamente. Eso se debe a que el panorama de cada finca es diferente e influyen factores como: cantidad de equipos, unidades productivas, hectáreas de terreno, animales, consumo eléctrico, etc.

En acuerdo con el protocolo GHG para Gases de Efecto Invernadero, su cuantificación estuvo limitada a los dos alcances reglamentarios sugeridos. Mediante esta delimitación se incluyeron todas las fuentes de emisión, desde los procesos agrícolas, el manejo del hato, fertilizaciones, fermentación entérica animal y manejo de residuos. En la Figura 7 se observa una distribución de las emisiones de GEI de la propiedad en estudio en cada uno de los alcances analizados. El Alcance 1 tiene una mayor contribución en el total de emisiones (95%). En este se cuantificaron los procesos de fermentación entérica del total de cabezas de

ganado que conforman el hato, ya que es uno de los puntos críticos en estos sistemas productivos. Los ruminantes son responsables de la mayor parte de la fermentación entérica y la producción de estiércol, que son procesos importantes en emisiones de GEI (Buratti *et al*,

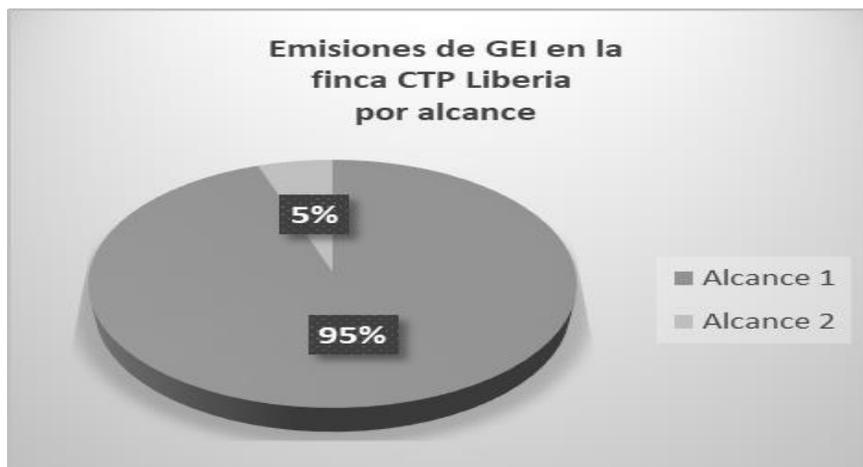


Figura 7. Emisiones estimadas de GEI en la finca por alcance

2017).

El gráfico de la Figura 8 representa únicamente las emisiones totales por explotación contemplada en el alcance 1, así como el CO_{2eq} producido por el combustible. Se aprecia que el 85% de las emisiones del Alcance 1, corresponde a la explotación bovina (ganado), mientras que la explotación porcina por la poca cantidad de animales; solo representa un 1% de las emisiones del Alcance 1.

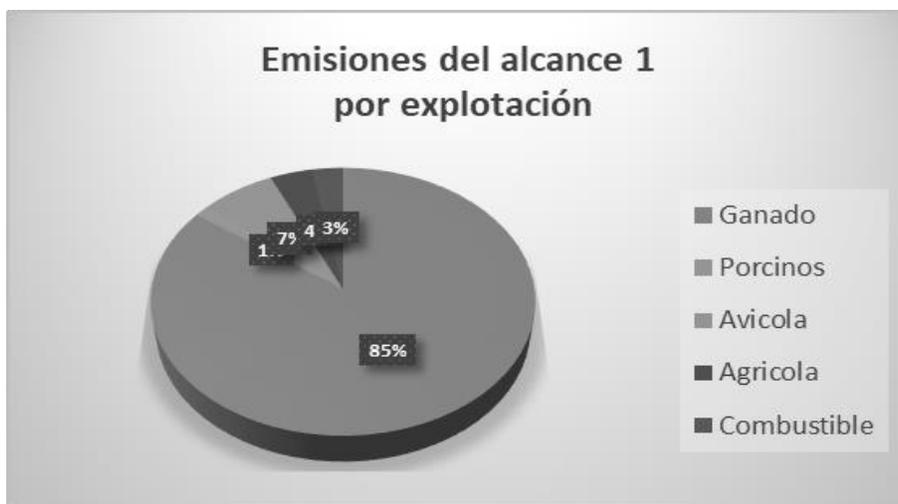


Figura 8. Emisiones de GEI por explotación

Por consiguiente, en el siguiente Cuadro 6, se evidencia que el 81% de las emisiones del alcance corresponden a la fermentación entérica de las especies localizadas en la finca. El de mayor aporte corresponde a la ganadería. Es preciso aclarar que la base de la alimentación del ganado en la finca es el pasto de piso; principalmente, pasto Peludo (*Brachiaria*

decumbens) 90% con un manejo extensivo y 10% forraje de corta (Cuba 22). Este resultado es similar al de Quirós (2015) en el Instituto Tecnológico de San Carlos, Costa Rica donde las emisiones por fermentación entérica representaron el mayor aporte a la huella de carbono en la cadena de producción ganadera, con un 77,51% respectivamente. Este estudio coincide en que la ganadería en producción genera mayores emisiones, atribuido a los procesos metabólicos por su gran capacidad para almacenar alimento; adicional a ello, las cantidades de hemicelulosa, celulosa y almidón (calidad del alimento) representan un factor importante para las emisiones de CH₄ por fermentación entérica (Montenegro *et al*, 2020).

CUADRO 6. ALCANCE 1 DE EMISIONES DIRECTAS

Categoría	Emisiones (Kg CO₂eq)	%
Fertilizantes	639,247	4%
Fermentación entérica	13 400,142	81%
Gestión estiércol	1919,487	12%
Combustible	497,107	3%
Total, alcance 1	16 455,983	100%

El aporte de emisiones provenientes del uso de fertilizantes sintéticos representa el 4% del alcance 1 en la Finca del CTP Liberia. Los fertilizantes son utilizados exclusivamente en la explotación agrícola. El pedido anual está estimado en 552kg con formulaciones nitrogenadas como Urea y Nitrato de Amonio, debido al tipo de suelo (arenoso) que provoca una baja retención de nutrientes y materia orgánica. Este dato significa que el total de N exógeno aportado de forma anual fue de 202 kg en un área de 3 hectáreas, es decir 67,33 Kg N/Ha. La cantidad es menor a la utilizada por Garbanzo *et al* (2021), en Guanacaste, Costa Rica, donde se estima 100kg N/Ha para el cultivo de maíz. El cálculo también difiere a lo encontrado por Páliz (2019), en Honduras, reporta 320kg N/ha en una explotación lechera.

Las emisiones por aplicación de Nitrógeno en los suelos están relacionadas principalmente, con los mecanismos de desnitrificación que liberan N₂O el cual tiene un potencial de calentamiento global (PPC) 310 veces mayor que el CO₂ (IMN, 2023). Para el cálculo se utiliza la ecuación nivel 1 del IPCC recomendada en el Protocolo GHG, la cual utiliza constantes científicas para estimar con mayor certeza la emisión de este gas.

Con respecto al combustible, el consumo anual facturado fue de 223 litros, lo cual representa un bajo porcentaje (3%) de emisión por combustibles fósiles (emisión directa de alcance 1). Este consumo se puede atribuir al poco uso que se le da al equipo motriz existente, por ejemplo, el combustible consumido al utilizar por 2 horas una motoguadaña es de 0,5 litros (tanque lleno), según datos de los profesores encargados; además, no es una práctica diaria. Por tanto, un consumo de 223 litros podría ser mínimo comparado con otros sistemas productivos de igual naturaleza, donde esta fuente de emisión tiene una mayor cuota de

participación sobre el total de emisiones, debido a un mayor consumo de combustibles demandado para el acceso a insumos, transporte y tractores agrícolas (Quirós, 2015).

En el siguiente Cuadro 7, se presentan las emisiones indirectas ligadas al uso de energía eléctrica, lo cual representa un aporte muy bajo al total de emisiones, con tan solo el 5%. El consumo para el año en estudio fue 18105,00 kWh. Este valor es muy similar al de Quirós (2015) en la finca del Instituto Tecnológico en San Carlos, Costa Rica, donde el consumo representa el 3% con respecto al resto de emisiones; sin embargo, en términos de kWh, existen diferencias significativas entre estos estudios, debido a la cantidad de energía utilizada por los equipos de ordeño y maquinaria eléctrica del Tecnológico de San Carlos donde se consumieron 46143 kWh para el año base de estudio.

5.6 Estrategias de mitigación

Las fincas que miden su huella de carbono pueden promover el cumplimiento de la legislación ambiental nacional que buscan la neutralidad de carbono. También optimizar el uso de insumos, principalmente fortaleciendo o creando bancos de carbono que les permitan competir en el mercado al contar con un indicador de desempeño ambiental que permite medir y demostrar las acciones que realiza la finca en términos de sostenibilidad ambiental y

CUADRO 7. ALCANCE 2. EMISIONES INDIRECTAS ASOCIADAS A LA ELECTRICIDAD

CATEGORÍA	Emisiones (kg CO _{2eq})	%
ENERGÍA	966,807.00	100%
TOTAL, DE EMISIONES FINCA	966,807.00	5%

gestionar adecuadamente las fuentes que producen GEI (Umaña A. J., 2012).

Al respecto se aclara que el presente estudio se presenta únicamente propuestas económicas y socialmente adaptadas al panorama de la finca del CTP Liberia; considera factores climáticos, poblacionales y otros elementos, con la finalidad de que cada propuesta de mitigación pueda ejecutarse completamente en el momento preferido por el personal técnico.

5.6.1 Tecnologías NAMA

La visión para la ganadería costarricense a mediano plazo (10 a 15 años) es tener un sector intensificado, ambientalmente sostenible, más tecnificado y eficiente en la producción de carne y lácteos, con un crecimiento en el sistema de producción de doble propósito, como resultado de una mayor tecnificación de este sistema. En el marco de las estrategias y programas país, el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica procura que la NAMA Ganadería Bovina responda a la problemática mundial del cambio climático, con amplia participación de los diferentes actores y sectores. Contempla los siguientes ejes estratégicos de trabajo: mitigación de GEI, adaptación al cambio climático, medición reporte y verificación (MRV), desarrollo de capacidades, transferencia de tecnología y sensibilización pública y cambio de hábitos de consumo (MAG, 2014).

- Las tecnologías recomendadas a nivel nacional por NAMA, se resumen en el Cuadro 8 elaborado por el Ministerio de Agricultura, donde se nombra la actividad y algunos puntos clave como el potencial de mitigación e impacto en la productividad basados en una de huella que se mide en una escala del 1 al 5, donde 5 es el mayor impacto en la mitigación.

Cuadro 8. Tecnologías de la NAMA, cuadro resumen

Tecnología	Potencial de mitigación	Potencial de adaptación	Impacto en la productividad
Pastoreo racional	4	1	5
Mejora de pastos	4	1	5
Cercas vivas	3	1	1
Planes de fertilización	2	1	1
Bancos Forrajeros	2	3	5
Uso de minerales	1	1	3
Ensilajes	2	5	5
Mejora Genética	1	5	5
Prácticas agroforestales	3	5	1
Granos y leguminosas	2	1	5

Fuente: Adaptado de hoja resumen NAMA- MAG, 2023.

En el cantón de Liberia, se han desarrollado tecnologías NAMA en cinco fincas específicas las cuales tienen seguimiento constante por parte del Ministerio de agricultura. López (2023),

menciona que se ha orientado a educar al finquero para que comprenda los beneficios de dividir las grandes extensiones de terreno en potreros más pequeños; asimismo, crear conciencia para la conservación de bosques o zonas forestales en la finca. Por ende, las actividades NAMA son muy replicables en la zona guanacasteca. De esta manera, con apoyo del programa, se ha logrado avanzar en la mitigación de la huella de carbono.

Para confirmar la viabilidad de esta estrategia de mitigación, en febrero 2024 se visitó una finca bajo el programa NAMA, ganadería localizada en el sector de Liberia. En esta propiedad implementan con éxito un sistema de rotación de potreros con 1 día de ocupación en apartos debidamente separados según criterios técnicos; además, de tener cercas vivas como parte de las mejoras. Otra tecnología incluida por NAMA es el cercado eléctrico, el cual ha disminuido significativamente la mano de obra y materiales por reparación de cercas. Adicionalmente, se pudo observar la implementación de sistemas silvopastoriles (SSP) como parte de un sistema para reducir estrés calórico y secuestrar más carbono por área. Finalmente, la sectorización permitió establecer apartos para bancos forrajeros. En la siguiente Figura 9 se aprecia parte de las tecnologías implementadas en la finca visitada, como parte de las actividades logradas por el programa de medidas de mitigación nacionalmente apropiadas (NAMA).



Figura 9. Finca visitada bajo el programa NAMA, Liberia, Guanacaste

Lopez (2023), también, menciona, que NAMA es sólo el primer paso hacia la descarbonización de la finca, puesto que una vez implementadas todas las tecnologías requeridas en la finca se puede incluir en un programa piloto denominado “Fincas MRV” con el propósito de realizar estimaciones anuales de GEI total producidas, y paralelo a ello, se estima el secuestro de Carbono por parte de los sumideros localizados en la propiedad: bosques, árboles en pasturas y zona de potreros. Luego, el Ministerio de Agricultura emite un certificado válido por un año

donde avala que dicha finca compensa el 80%, 90% o 100% de las emisiones producidas, según los análisis. Al respecto, en Anexo 3 se aprecia un certificado compartido por la agencia agropecuaria del cantón de Liberia donde confirma la participación de una finca en el programa NAMA y su apoyo para reducir gases de efecto invernadero.

Lo mencionado anteriormente, evidencia que en la Finca del CTP Liberia, es posible ejecutar satisfactoriamente el paquete tecnológico NAMA, el cual contribuye a mejorar las tasas de adopción de prácticas innovadoras de mitigación que reducen emisiones de GEI, aplicando técnicas probadas de adaptación, donde en sinergia con la Agencia de Servicios Agropecuarios del MAG, es factible convertirla en finca didáctica demostrativa para divulgar las herramientas y técnicas de adaptación al cambio climático tal y como se ha realizado a nivel nacional en otras fincas.

De acuerdo con lo anterior, las actividades mencionadas en el anterior Cuadro 8, se identifican por ser accesibles para ejecutar en conjunto en el CTP Liberia. Además, son necesarias tomando en cuenta el panorama actual de la propiedad en cuestión. Se consideran actividades imprescindibles para mitigar las emisiones de CO₂ por el ganado, las cuales representan el 85% de las emisiones del alcance 1, es decir; 14,3 T CO_{2eq}/ año.

Por otra parte, en el año 2021, NAMA Ganadería logró mitigar 81 294,00 Ton CO_{2eq} en un total de 1252 fincas, según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2024), presentado por Segura, en 2024; gracias a las medidas propias de adaptación que incluye el programa se logra disminuir emisiones de la siguiente manera:

- Pastoreo racional: reducción de emisiones de CH₄ por fermentación entérica y reducción de emisiones de N₂O por orina y heces en pasturas e Incremento de captura de C en suelos.
- Cercas vivas: captura de C en árboles.
- Mejora de pasturas: reducción de emisiones de CH₄ por fermentación entérica y reducción de emisiones de N₂O por orina y heces en pasturas e Incremento de captura de C en suelos.
- Mejoras en fertilización: reducción de emisiones de N₂O por uso de fertilizantes químicos.
- Aumento de cobertura boscosa: captura de C en árboles.

5.6.2 Bandera Azul Agropecuaria

El Programa Bandera Azul Ecológica (PBAE) es un galardón que premia el esfuerzo y el trabajo voluntario en la búsqueda de la conservación, desarrollo y la protección de los recursos naturales. Son acciones contra el cambio climático y contribuye a mejorar las condiciones higiénico-sanitarias y la salud. Actualmente, existen muchas categorías para bandera azul, pero para efectos de este estudio se analizará la categoría agropecuaria contra el cambio climático (Bonilla A. K., 2020).

Un beneficio adicional que aporta este programa ambiental es que sirve de base; es decir, facilita la gestión requerida, en caso de que el CTP de Liberia, en algún momento, estuviera interesado en certificaciones más exigentes como las normas ISO 14001, Carbono Neutralidad, Certificación en Sostenibilidad Turística o la Marca Esencial Costa Rica.

A continuación, la figura 10 permite comprender con mayor claridad los parámetros que se deben medir y controlar para obtener la certificación, entre otros, destacan aspectos de mitigación al cambio climático como reducción de la dependencia de combustibles y medidas de adaptación al cambio climático. Todas las acciones realizadas y los resultados logrados se documentan anualmente, para su respectiva evaluación por parte de personal de las Agencias de Extensión Agropecuaria del MAG y los especialistas regionales en materia de Producción Agroambiental, así como de los miembros del Equipo Técnico coordinador nacional de la categoría Agropecuaria quienes son los encargados de recibir la solicitud de inscripción, brindarles requisitos y emitir resultados de aprobación de la certificación para la finca (Periódico Mensaje, 2021).

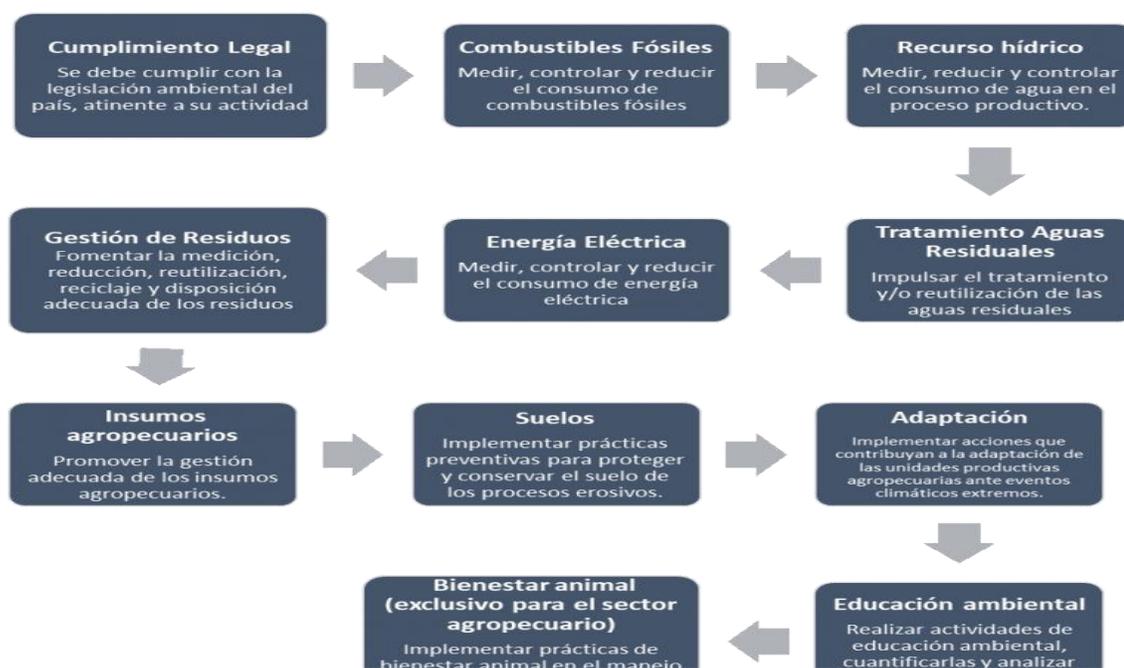


Figura 10. Parámetros para Bandera Azul Agropecuaria

Tomado de: sdiconsultores.com, 2020

De acuerdo con Mora & Chaves, (2019); la categoría Agropecuaria promueve la conservación de los recursos naturales presentes en los sistemas productivos y estimula la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como una mayor adaptación de los sistemas productivos ante los efectos del cambio climático. Por esta razón; el programa Bandera Azul se convierte en una estrategia muy atractiva para implementar en la Finca del CTP Liberia.

5.6.3 Muestreo de suelos

Considerando que el suelo tiene el potencial de almacenar tres veces más cantidad de CO₂ que la atmósfera, es posible suponer que un análisis químico del suelo contribuya a mitigar el cambio climático (EOS, 2023). Pese al problema global del cambio climático, el suelo, puede contribuir a mitigar el cambio climático, en la medida en que se racionalice el uso y preserve el carbono orgánico, mediante prácticas de manejo idóneas que inclinen la balanza a favor de la fijación o secuestro de carbono, antes que a la salida del carbono del sistema suelo, con la consiguiente formación de GEI.

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del mismo, tanto en sus funciones agrícolas como ambientales (captura de carbono y calidad del aire). Los flujos entre el carbono orgánico del suelo y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂ (Hernández et al, 2014). Sin embargo, Pérez *et al* (2021), mencionan que las actividades agrícolas afectan principalmente, la concentración de Carbono en suelo, provoca degradación del Carbono; en consecuencia, genera pérdidas en la calidad del suelo y representa una amenaza para los sistemas de producción agropecuaria. Al asegurar la sustracción neta del CO₂ de la atmósfera hacia el suelo, se incrementa la sustentabilidad de los sistemas agrícolas en los que se laboren. A partir de ahí, el análisis de suelos como parte de los mecanismos de mitigación y adaptación al cambio climático permite contar con información detallada sobre la capacidad de captura de gases de efecto invernadero en áreas de pastoreo y en parcelas agrícolas de la finca.

Según estudio realizado por Conant *et al* (2017) se demuestra que la acumulación anual de C en suelos agrícolas y pasturas tiene el potencial de compensar el 7.9% (3.7 al 12.2%) de las emisiones totales anuales mundiales netas antropogénicas de GEI, debido a la agricultura y el 4.1% (1.9 al 6.3%) de las emisiones totales anuales mundiales netas antropogénicas de GEI ocasionadas por la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra. Dicho estudio demuestra que la práctica de analizar suelos y tomar medidas con respecto a su contenido de materia orgánica, densidad aparente y otros elementos cuantificables tales como pH, balances catiónicos y porosidad, podría ser una alternativa accesible para fincas como la del CTP Liberia, orientadas a mitigar la huella de Carbono actual.

5.6.4 Implementar el enfoque de las 4R's para la gestión de nutrientes

A medida que las plantas y el suelo transforman el fertilizante en nutrientes útiles, se generan algunos subproductos identificados como gases de efecto invernadero (GEI). Si se aplica la cantidad de fertilizante adecuada, las plantas crecen y la cantidad de gases de efecto invernadero emitido es mínima. Sin embargo, cuando hay tanto fertilizante las plantas no son capaces de procesarlo y quedan restos de fertilizante almacenados en el suelo; por ende, las emisiones aumentan exponencialmente (Mikhailova, 2018).

Desde esta óptica, el concepto del manejo responsable de nutrientes bajo las 4R (Figura 11) valora la conexión de las tres dimensiones de la sostenibilidad (económica, social y ambiental). Las 4R's (por sus siglas en inglés) del manejo de nutrientes, incluyen el momento oportuno, la dosis adecuada, la fuente correcta y el lugar ajustado. El fin es mantener los nutrientes donde se necesitan: dentro del campo. El momento adecuado (Right time) significa hacer coincidir la aplicación de nutrientes con la demanda de los cultivos. La dosis adecuada (Right rate) se refiere a alinear la cantidad de fertilizante con la absorción de nutrientes del cultivo. La fuente adecuada (Right rate) considera el tipo de fertilizante elegido y si contiene una tecnología de eficiencia mejorada, como inhibidores, liberación lenta o controlada y el



Figura 11. Concepto de las 4R en el uso de nutrientes agrícolas

lugar adecuado (Right place) es la colocación precisa del fertilizante para que los cultivos puedan acceder con éxito a los nutrientes (ICL, 2023).

Resultados en investigaciones, según Mikhailova (2018), han evidenciado formas de optimizar la utilización de fertilizante en una superficie de más de 100 hectáreas de terreno, dedicadas al pastoreo y al cultivo de arroz, maíz y trigo, donde las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen hasta en un 50 % y el rendimiento de los cultivos se incrementa en un 10 %.

Sustentado en las premisas anteriores, esta propuesta de mitigación debería ser aplicada obligatoriamente en las fincas bajo la mira de ser rentables y económicamente eficientes; sobre todo, porque este enfoque no solo funciona como medida de reducción de GEI, sino que también significa economía y eficiencia en la agricultura. Sin embargo, esta estrategia está estrechamente ligada a la anterior (muestreo de suelos), ya que depende de ello para estimar las aplicaciones, por tanto cronológicamente la implementación de esta estrategia dependerá de resultados del análisis químico del suelo que permitirán estimar la cantidad de fertilizante requerido según el cultivo y poder realizar una aplicación que incluya esta innovadora estrategia.

5.6.5 Economía circular en la administración de residuos pecuarios y agrícolas

En segmentos anteriores, se ha afirmado que el estiércol representa una de las mayores fuentes de gases de efecto invernadero en una finca pecuaria. Al respecto, Lorenzo et al, (2023) sostiene que lo generado en sistemas pecuarios puede provocar impactos ambientales negativos, si no existe un control en el almacenamiento o utilización de este, debido a la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera y la acumulación de micro y macronutrientes en el suelo o en los cuerpos hídricos superficiales. Esto mismo sucede con los rastrojos y desechos postcosecha del sector agrícola.

La idea primordial de relacionar la economía circular y la gestión de residuos pretende que la economía circular apueste por una transformación más profunda en la forma como se produce. Busca generar menor impacto al medioambiente al otorgar a los residuos un nuevo propósito, no de desperdicio, sino de reutilización y revalorización, reincorporándolos a los procesos productivos como fuente de materia prima.

Al respecto, Lorenzo et al (2023), afirma que incorporar el modelo de la economía circular en la gestión de los residuos de los animales de una finca, incentiva la utilización de los excrementos como fuente de fertilización o energía; además, permite aprovechar las potencialidades económicas al utilizar los residuales como fertilizantes orgánicos. A su vez, mejora la gestión de los residuos, al incentivar prácticas de recogida selectiva, la segregación en la fuente de origen, la reutilización y el reciclaje; también disminuye la necesidad de rellenos sanitarios e incrementa la educación y la cultura ambiental de la población estudiantil de la entidad en estudio.

Entre las alternativas de economía circular que fácilmente podrían implementarse en la finca del CTP Liberia, se mencionan las siguientes:

- El lombricompost y compostajes para comercializar, reincorporar al potrero o bien, disminuir el uso de fertilizantes químicos generadores de GEI en el campo agrícola de la misma institución. Pese a que la descomposición que realizan las lombrices de la materia orgánica es positiva, por un lado, tal y como ya se sabía; también tiene un alto precio ambiental, ya que las lombrices generarían con su actividad CO₂. Según un artículo publicado en 2013 en la revista *Nature Climate Change*, Ingrid M. Lubbers, investigadora de suelos de la Universidad de Wageningen, revela que la relación entre

el carbono y las lombrices es compleja. Descomponen la materia orgánica liberando nutrientes para las plantas, pero a la vez, liberan dióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto invernadero. Sin embargo, pese a al dato emitido, resalta que se ignora el potencial de los beneficios de las lombrices para la descomposición de residuos contaminantes y el uso del nitrógeno de estos, lo cual podría contrarrestar las tendencias negativas aquí observadas.

- Tratamiento anaeróbico con obtención de energía (biogás) para conseguir un control de los olores y de los organismos patógenos; posteriormente, se pueden separar las fracciones líquida y sólida e incorporarla al suelo o verter en él, el material fermentado.
- Alimentación animal con residuos agrícolas. En un artículo de la revista *Nutrición Animal Tropical* de 2020 Bonilla *et al*, mencionan que los efectos del suministro de residuos agrícolas en rumiantes (rastros de maíz, semilla de algodón y colza) disminuyen los niveles de metano entérico ya que generalmente tienen una cantidad elevada de taninos que puede modificar la riqueza de especies metanogénicas en el rumen, afectando así, los niveles de metano (CH₄). Un estudio realizado en Chile demostró, por ejemplo, que los rastros de maíz emiten un equivalente de 0,83ton/ha de CO₂; además, la incorporación de estos a la alimentación animal, la cifras disminuirían (Ruiz, 2015).

Esta actividad traería múltiples beneficios; por un lado, aumentaría la cantidad de alimento disponible para el ganado, en época seca por el uso de técnicas de conservación como el ensilaje; mientras tanto, las parcelas agrícolas solventarían la problemática que conlleva el manejo de rastros, comúnmente eliminados mediante quemas agrícolas y subsecuentemente, el deterioro de la calidad física, química y biológica de los suelos daña su fertilidad y en consecuencia, su productividad.

Además de dañar la calidad del aire, ya que su combustión emite gases de efectos invernadero (INIA, 2019).

5.6.6 Rotación y manejo de pasturas

Aunque el programa NAMA incluye esta estrategia, es de vital importancia aclarar que el concepto NAMA ganadería es una serie de técnicas y estrategias para la mitigación de Gases de Efecto Invernadero lo cual se convierte en un paquete tecnológico para el sector pecuario. El ejecutar alguna de las actividades que recomienda NAMA no convierte la propiedad en Finca NAMA. Por esta razón, en el documento oficial de NAMA Ganadería Costa Rica del 2014, se menciona que las propiedades serán sometidas a un sistema verificación y reporte (MRV) de las actividades que incluye el programa. A partir de lo anterior, pueden separarse las actividades del programa NAMA e implementar las necesarias, ajustadas al contexto económico, social y ambiental de la finca.

El pastoreo rotacional, así como las diferencias de carga animal, promueven el desarrollo del carbono radicular subterráneo en los ecosistemas de pastizales, lo que a su vez, reduciría la erosión del suelo; también contribuir a reponer las aguas subterráneas. Según Milera *et al* (2019), se estima que, con estrategias de manejo adecuadas, la capacidad de secuestro de Carbono de las tierras de pastoreo podría ser mayor que sus emisiones.

La situación del CTP Liberia es distinta; actualmente, el área de pastoreo de la finca del CTP Liberia, es de 7 apartos con un total de 4,0 hectáreas. La siguiente figura 12 muestra un dato aproximado de la división actual de apartos, donde se localizan potreros de hasta 5000m². No existe rotación ni división de apartos efectiva. Por lo tanto, en aras de mejorar la biodisponibilidad de forraje verde (FV) durante las diversas épocas del año, así como garantizar un uso eficiente de potreros; seguidamente, se propone un sistema de pastoreo rotacional.

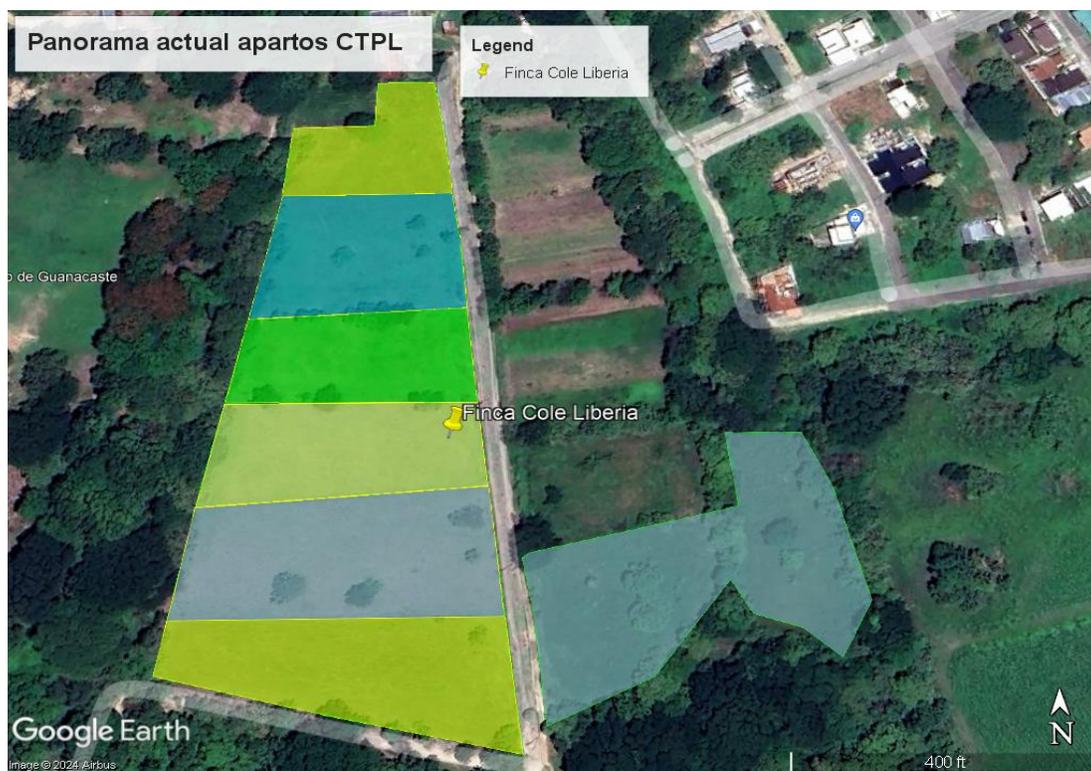


Figura 12. División actual (2023) de apartos finca CTPL

Siri & Ernst (2010) comentan que una división de apartos correcta seguido de una rotación donde se pueda asegurar que el ganado cambie de espacio con frecuencia; permitiría mejorar la calidad del forraje, capturar más Carbono y mejora la dieta del ganado al reducir la fermentación entérica por buena calidad de los pastos lo que conlleva a un aumento de la productividad y tasas de reproducción. Adicionalmente, esta técnica al combinarse con cercas vivas implica una mayor captura de Carbono por área.

En noviembre 2023, se realizó un aforo de potreros; al aplicar el porcentaje de pérdidas (10%) y no disponibilidad por rondas (5%), se obtuvo una capacidad productiva de 5700 Kg FV/Ha. Este resultado difiere en cantidades encontradas por Cerdas & Vallejos (2012), en Santa Cruz, Guanacaste, donde se reporta hasta 6 969,59kg FV/Ha en *Brachiaria Decumbens* con una fertilización de 192kg N/Ha. Cabe destacar que esta diferencia debe relacionarse con la fertilización aplicada. Ahora bien, basado en las 4 Leyes del pastoreo de André Voisin citadas por Rúa (2009): Ley de reposo, de ocupación, rendimiento máximo y Ley de requerimiento

regular, se establece un programa de manejo de pasturas racional, siguiendo las leyes anteriores e implementando cálculos zootécnicos y agronómicos para obtener el resultado más optimizado posible.

El Cuadro 9. Muestra la situación actual en la que se encuentra la explotación bovina del CTP Liberia con respecto a potreros y pasturas, donde es apreciable la inexistencia de periodos de descanso para los apartos, esto debido a la carencia de divisiones internas dentro del área de pastoreo.

Cuadro 9. Panorama actual de la explotación bovina en la Finca CTP Liberia

Parámetro	Índice
Unidad animal (kg)	450
Unidades Animales en total (UA)	7,7
Consumo FV por UA (%)	12
Consumo UA/ día (KgFV/día)	54
Periodo Descanso potreros en días (PD)	0

Mientras que el Cuadro 10, es el resultado de los cálculos agronómicos y zootécnicos propuestos para realizar una adecuada rotación y manejo de pasturas dentro de la finca del CTP Liberia. Estos cálculos se proyectan a un mayor número de unidades animales (UA) debido al crecimiento proyectado del hato para el año 2024. Además, se incorporan los porcentajes de pérdidas por pisoteo, caminos internos y rondas dentro del área de potreros.

También es apreciable la cantidad máxima de Unidades Animal que la finca podría soportar durante el invierno siempre y cuando se cumplan las condiciones de disponibilidad de forraje estimado, así como los periodos de descanso y recuperación del pasto.

Cuadro 10. Parámetros calculados para la Finca CTP Liberia bajo el sistema rotación de pasturas proyectados para 2024 en época de invierno.

Parámetro	Índice
Unidades Animales (UA)	9.23*
Porcentaje de consumo FV por UA (%)	12
Consumo UA/ día (KgFV/día)	54
Forraje Verde disponible total en Kg (4has efectivas)	21 660
Periodo Descanso potreros en días (PD)	34
Periodo de Ocupación en días (PO)	3
Forraje Verde disponible/ día (Kg)	637
Capacidad máxima de UA en finca	11,79
Consumo/ hato/ día (Kg)	498,42 ≈ 500,00
Consumo total de UA proyectadas (Kg)/ día	1 650**
Número de apartos (N)	12
Área de apartos mínima (m ²)	3 166≈ 3 200

*proyectadas por crecimiento y desarrollo de terneras actuales

** adiciona 10% por pisoteo.

Al establecer parámetros óptimos para la finca, según sus condiciones actuales y proyectadas; es posible mapear y presentar un diseño del nuevo ordenamiento recomendado. La figura 13, muestra la propuesta elaborada para implementar en la Finca del CTP Liberia como estrategia de mitigación de GEI. Cada nuevo apartado presenta un área entre 3200m² y 3400m² capaz de sostener la carga animal proyectada con los respectivos días de ocupación propuestos. Por razones de topografía y distanciamiento de apartos, resulta difícil establecer la división uniforme para los potreros. Esta situación permite ampliar potreros que actualmente cuentan con un área de pastura escasa por sobrepastoreo el cual con este periodo de

descanso y ocupación se pretende estimular el crecimiento natural al promover la producción de semilla y la resiembra de este; aunado a esta estrategia se podrá tomar la decisión de resiembra manual o fertilización esporádica para la recuperación. En este diseño también toma en cuenta los porcentajes de pérdidas por pisoteo (10%), así como un porcentaje de la finca destinado a callejones (5%).

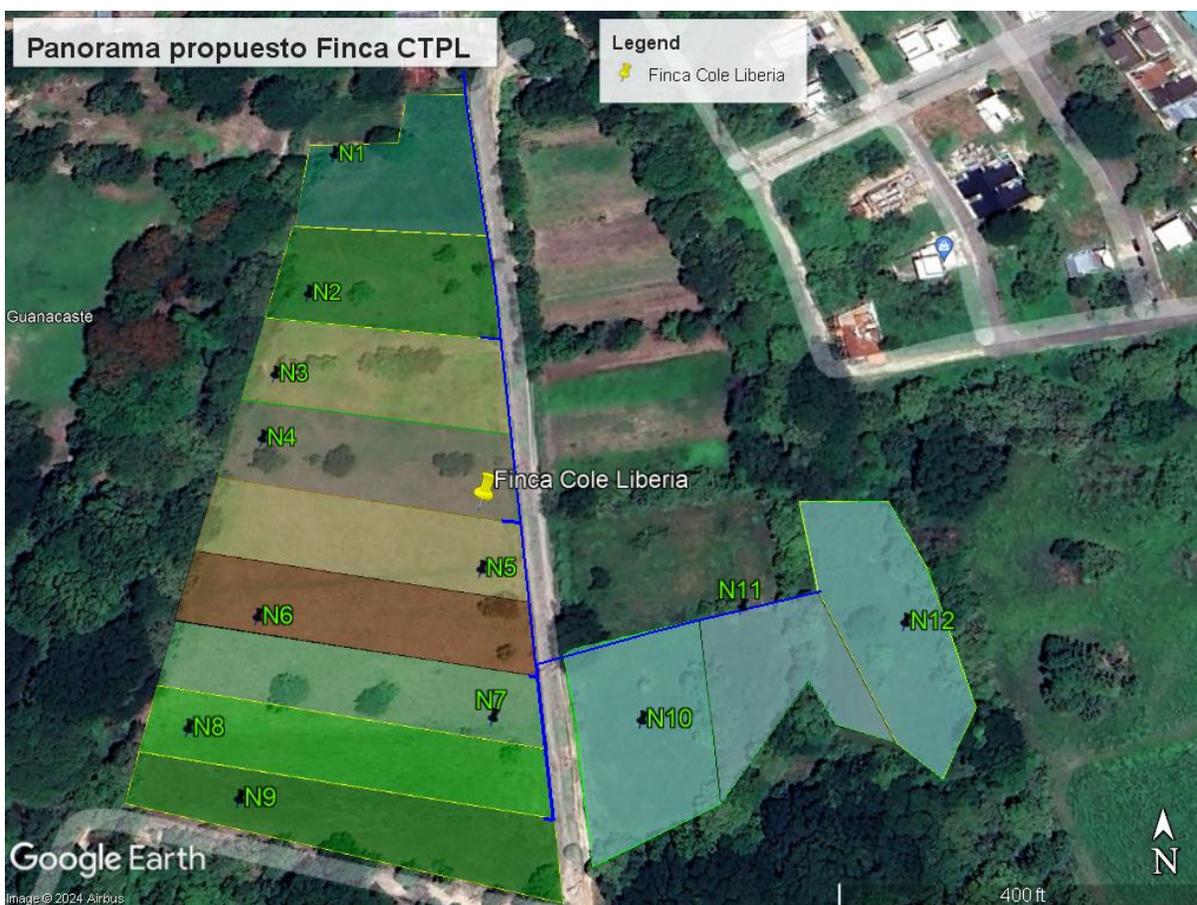


Figura 13. Propuesta división apartos finca CTPL bajo el sistema de rotación racional de pasturas

La propuesta también incluye mejoras en el sistema de acueductos para el fluido hídrico dentro de los apartos, de manera que se instale una prevista o toma de agua compartida para dos apartos con bebederos portátiles que faciliten el movimiento para evitar degradación del terreno alrededor del bebedero. Otra alternativa económica prevista y muy fácil de trasladar es el uso de cajones de refrigeradora los cuales son donados gratuitamente por personal del colegio así como estudiantes (anexo 4) como bebederos entre apartos, donde únicamente se requiere conectar una manguera de poliducto a la toma de agua para el llenado. Aunado a ello, es importante rescatar que la propuesta se elabora con datos de época lluviosa donde la disponibilidad de pasto es óptima para sostener las unidades animales en desarrollo. Según datos climatológicos evidentes en la figura 14, para el año 2022 la época seca en Liberia inició desde diciembre y concluyó hasta finales de abril; meses donde la precipitación fue inferior a 1mm y se presentaron temperaturas superiores a 25°C, dichos datos demuestran una escasa disponibilidad de pasto.

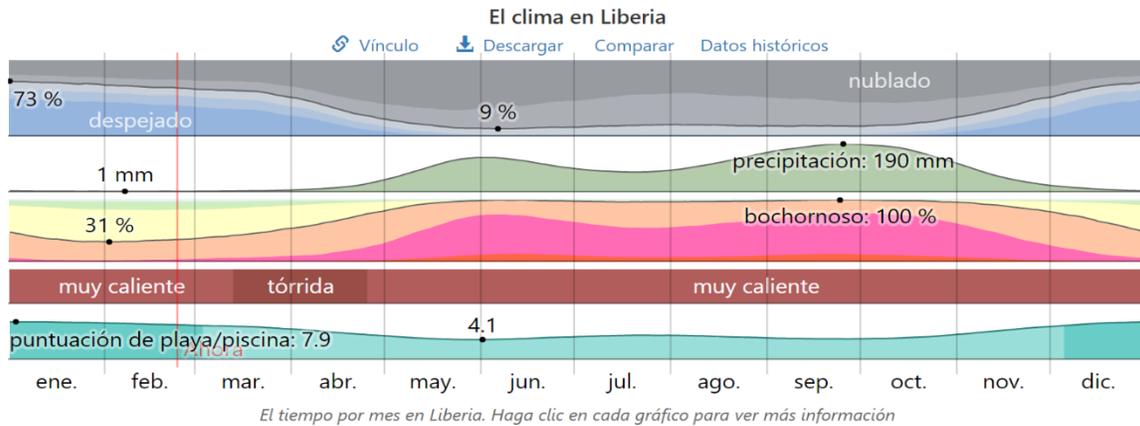


Figura 15. Patrón climático de la zona de Liberia.

Fuente: <https://es.weatherspark.com> (2022)

Para reforzar esta información, se realizó un aforo de potrero en febrero 2023 dentro de la finca del CTP Liberia, el cual estimó una disponibilidad de 1789kg FV/Ha, esta cantidad es muy baja comparada con estudios realizados en Guanacaste por Cerdas & Vallejos (2012) donde reportan un rendimiento de 2460 FV/Ha en *Brachiaria decumbens*. La Figura 15 muestra la condición árida de los potreros durante este aforo, lo que motiva a emitir una recomendación de reducir el Periodo de Ocupación (PO) a 2 días o menos, según criterios técnicos del profesional encargado del ganado durante la época seca. Además, se implementó el uso de bancos forrajeros con pasto Cuba 22 y caña de azúcar obtenida por donación del ingenio CATSA. Esta idea es de forma preventiva para satisfacer los requerimientos diarios de mantenimiento de cada animal durante épocas de escasez mayoritariamente.



Figura 14. Condición de potreros en época seca. Febrero 2024

La rotación de pasturas puede contribuir de manera significativa en la evolución de la propiedad, provocando una mejor utilización de la materia orgánica por el pasto, mayor retención de la humedad, evitan la compactación y finalmente todo esto incide en la captación y retención del carbono, lo cual favorece este tipo de manejo la relación suelo-planta-animal y la resiliencia al cambio climático. En cuanto a la captura de carbono, Ibrahim et al, (2007) encontraron una captura de carbono, 1,63 T CO₂/Ha en potreros mejorados con árboles en Esparza, Costa Rica bajo sistemas de rotación. Asimismo, coincide con el valor encontrado por Torres *et al* (2011), los cuales estimaron una captura de 1,78 T de CO₂/Ha en potreros sin árboles en México. Por lo cual se puede discernir que estas cantidades podrían funcionar como un promedio esperado de captura de CO₂ para la finca del CTP Liberia, siendo una cantidad significativa siempre y cuando se proteja el sistema radicular con la rotación.



Figura 16. División de apartos por cerca eléctrica, finca La Emilia, Liberia, 2024

Para evidenciar esta práctica como viable y funcional, durante la visita a la Finca La Emilia, en Liberia, Guanacaste; se pudo constatar que la rotación de potreros es efectiva para las condiciones climáticas de la zona, donde las dos estaciones (seca y lluviosa) son muy predecibles durante el año. Aunado a ello, la degradación del suelo es menor y se disminuyen las pérdidas por sobrepastoreo, esta evidencia deja como resultado un uso eficiente de los pastos, a su vez, desencadena más retención de carbono en la estructura de la planta. La anterior figura 16, muestra una intersección de potreros bajo el sistema de rotativo en finca La Emilia, Liberia, Guanacaste.

En relación con el tema presupuestario, el levantado de cercas y reestructurar todos los potreros demanda un gasto económico significativo. La alternativa de bajo costo, rápida instalación y capaz de ser flexible a cambios en la topografía del terreno según el MAG (2014), es la implementación de cerca eléctrica. Permite reducir el gasto en el alambrado y postes

que requiere la cerca convencional en un 40%, según datos del programa NAMA Ganadería (2022), además, es de fácil reparación en caso de daño. Actualmente, la finca en estudio cuenta con cercado eléctrico en el perímetro, pero no entre apartos; sin embargo, en bodega se tiene almacenado parte de los materiales para continuar el proyecto, también existe la posibilidad que mediante un proyecto presupuestado por la coordinación técnica del colegio; se logre comprar el material faltante para la división de apartos, utilizando fondos de Educación Técnica bajo la Ley 7372. Por tanto, esta propuesta se encuentra dentro del plan de trabajo como ejecución prioritaria en 2024.

5.6.7 Sistemas Silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles (SSP) se refiere a un tipo de sistema agroforestal en el cual interactúan una leñosa perenne con una herbácea (en este caso el pasto) y la presencia del ganado. Se combinan en el mismo espacio, plantas forrajeras como gramíneas y leguminosas rastreras con arbustos y árboles destinados a la alimentación animal o usos complementarios como maderables (Murgueito & Ibrahim, 2008).

La implementación de SSP en la ganadería, implica un cambio fundamental en el uso del suelo, al pasar de los sistemas ganaderos tradicionales, basados en una dieta animal conformada por solo gramíneas, a sistemas que asocien especies gramíneas con componentes arbóreos, lo cual aumenta la acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS), debido al volumen de material orgánico que aportan las especies (Contreras *et al* 2019).

Entre las opciones de sistemas silvopastoriles factibles de implementar e la finca del CTP Liberia, se pueden mencionar los nombrados por Murgueitio & Ibrahim(2001); “sistemas silvopastoriles con manejo de la sucesión vegetal, pasturas en callejones de árboles o arbustos, silvopastoriles de alta densidad arbórea, sistemas de corte y acarreo (bancos de proteína o energéticos) puros o en policultivos de varios estratos, árboles y arbustos dispersos en potreros, pastoreo en plantaciones de árboles maderables o frutales, leñosas perennes sembradas como cercas vivas y cortinas rompe vientos”. Sin embargo, la propuesta apunta a la implementación de árboles maderables o forrajeros dentro de los apartos y sus divisiones, así como establecimiento de bancos forrajeros energéticos y/o proteicos.

La estimación de la huella d Carbono demuestra que la explotación ganadera en la finca CTP Liberia genera más de 14.000 kg CO₂ por año, en emisiones, y seguirá en aumento por las pariciones a futuro. Por tal razón, la necesidad de mitigar estas emisiones es prioridad. Contreras *et al* (2021) demostraron en su investigación realizada en Colombia que el carbono orgánico acumulado en el suelo (COS) presentaba valores superiores al 14 % dentro de los sistemas silvopastoriles comparado con sistemas tradicionales. También la mitigación o reducción de emisiones de N₂O eran notorias al asociar la especie gramínea de piso (pasto) con una especie leñosa perenne Acacia mangium (leguminosa), en dicha evaluación, los flujos N₂O se encontraban valores cinco (5) veces más elevados de emisiones del suelo provenientes de la atmósfera comparados con pasturas sin SSP. Estos resultados se atribuyen a la capacidad que tiene la especie Acacia mangium (leguminosa) de asociarse y fijar nitrógeno (N) atmosférico en nódulos de raíz, lo que aumenta el ciclo nitrógeno del suelo

y muestra mayor tasa de nitrificación y alta concentración de nitratos, lo que resulta en mayores retenciones de N₂O en el suelo.

Por tanto, la implementación de SSP es una de las mejores propuestas de mitigación en cualquier finca ganadera, esto se debe al uso eficiente de los potreros, tanto dentro como en su perímetro. Pueden sostener árboles o arbustos, así también, genera otros beneficios como el efecto de las raíces de los árboles en el proceso de descompactación, asociado a la acumulación de materia orgánica bajo estos sistemas por las especies maderables (hojas, tallos, ramas y raíces); además, mejora las propiedades físicas y químicas del suelo.

En el caso de la finca del Colegio Técnico Profesional de Liberia, actualmente, presenta capacidad para albergar especies arbóreas en sus potreros, así como la posibilidad de ir incorporando especies leguminosas en cercas vivas y bancos forrajeros con especies fijadoras de Nitrógeno como *Cratylia argentea* y *Leucaena* o bien No leguminosas como Botón de Oro, Nacedero, entre otras. Esta práctica no solo beneficiaría el control de emisiones, sino que podría dar un beneficio socioeconómico tal y como se analizará en la siguiente propuesta de este documento.

5.6.8 Mercado de Carbono: Programa de Servicios Ambientales (PSA)

El PSA o Programa de Pago por Servicios Ambientales, es un reconocimiento financiero que otorga el Estado costarricense por medio del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) a los propietarios (as) de fincas que establecen plantaciones forestales, sistemas agroforestales y/o realizan proyectos de regeneración natural, protección y manejo de los bosques. (ONF, 2023). Se centra en el fortalecimiento de políticas públicas. Parte de la prohibición de cambio en el uso del suelo cubierto de bosque; de esta manera, fortalece el sistema de áreas protegidas para garantizar la conservación de la biodiversidad en áreas críticas del país y establecer pagos por servicios ambientales como instrumento de política para garantizar la conservación de bosques y fomentar la mejora de las existencias de carbono, mediante actividades de reforestación en plantaciones y sistemas agroforestales y agrosilvopastoriles (FONAFIFO, sf).

El programa PSA integra una modalidad denominada “Recuperación de cobertura forestal”. Agrupa tres submodalidades diferentes; en este caso, los Sistemas Agroforestales Mixtos, es considerado el proyecto más apto para ejecutar en la finca del CTP Liberia. En esta modalidad se incluyen 3 tipos de actividades de PSA (protección de bosque, regeneración natural, árboles forestales en sistemas agroforestales y/o silvopastoriles), donde se establecen pagos por árbol existente o bien, por hectárea de bosque dentro de la propiedad. Para 2023, el pago por árbol era de ₡ 1615 y ₡36823 por hectárea de bosque (ONF, 2023).

Para participar en el programa, es preciso cumplir con los requisitos explícitos en un formulario, evidenciar planos catastrados de la propiedad. Además, el área de bosque solicitada para ingresar al programa debe ser como mínimo 1 hectárea y no poseer contratos vigentes dentro del Programa de Pago por Servicios Ambientales. Posteriormente, se debe esperar la visita de técnicos encargados por parte del FONAFIFO para la verificación de datos en la propiedad.

Actualmente, la finca del CTP Liberia cuenta con una cobertura de bosque de aproximadamente 0,7has en regeneración natural, la cual es conservada para que estudiantes puedan reconocer plantas, árboles y aves silvestres. Dicha área no está registrada para PSA, por tanto, la propuesta vendría a ser beneficiosa, tanto ambiental como económicamente al recibir pago por tener secuestro y almacenamiento de carbono, protección de la diversidad, protección de cuencas hidrográficas y belleza escénica. Aunado a ello, la propuesta de sistemas silvopastoriles dentro de las pasturas, en años posteriores, el CTP Liberia podría también incorporar el sistema dentro de programa de pagos por servicios ambientales.

5.6.9 Buenas prácticas agrícolas (BPA)

En la agricultura, la huella de Carbono y control de emisiones es un tema que cada vez toma más relevancia y se estudia con frecuencia ya que todos los productores de una u otra forma, apuntan al mismo enfoque: Amigables con el ambiente (Agrospray, 2022).

Existen tareas que favorecen más y otras menos a esta reducción de emisiones. Por lo tanto, en este apartado, se analizarán tres buenas prácticas específicas al sector agrícola que, a su vez, aumentan la materia orgánica y la capacidad de sumidero de carbono en el suelo, estas prácticas son: La asociación de cultivos y el nuevo enfoque de agricultura regenerativa el cual engloba una minuciosa cantidad de técnicas alternativas a la agricultura convencional capaces de mitigar y compensar los efectos que los métodos de agricultura tradicional han dejado a nivel ambiente.

La agricultura regenerativa según Cañet *et al* (2022), es un enfoque agrícola que se centra en restaurar la calidad del suelo mediante la adopción de prácticas de gestión sostenible por medio cuatro principios:

1. Minimizar la perturbación del suelo.
2. Mejorar la fertilidad del suelo
3. Reducir los eventos espacio temporales de suelo desnudo
4. Diversificar los sistemas de cultivo

Muchas de las tareas que reducen la huella de carbono, también generan mayor productividad; por ende, facilita la adaptación del productor. Una de ellas es la **asociación de cultivos**, consiste en un sistema complejo el que dos o más especies de plantas se cultivan a una distancia espacial suficiente para competir o complementarse entre sí (Ortiz & Orihuela, 2022). Esta práctica como propuesta de mitigación, busca minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la cantidad de carbono almacenado en el suelo y en las plantas por medio del proceso conocido como secuestro de carbono.

Los sistemas de preparación del suelo afectan el balance entre la absorción de Carbono (C) fotosintetizado y las emisiones de CO₂ del suelo para la atmósfera, que lleva a caracterizar al suelo como banco (absorción>emisión) o fuente (emisión>absorción) de este gas. En ese sentido, los sistemas en monocultivos tienden acumular C en forma de materia orgánica (MO),

siendo mayores las tasas de acumulación cuando los sistemas son en asocio o rotación de cultivos con altos aportes de residuos vegetales (Sosa & García, 2019).

Aunado a lo anterior, también constituyen una alternativa para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad del cultivo, debido a que incrementan el contenido de la materia orgánica, la capacidad de intercambio de cationes y la disponibilidad de macro y micronutrientes del suelo. Otra ventaja es que disminuyen la presencia de arvenses, plagas y enfermedades; favorecen la formación de agregados estables, mejoran la infiltración del agua e incorporan Nitrógeno (N) al suelo través de la fijación biológica (Álvarez *et al*, 2016).

Desde esta perspectiva, Sosa & García, (2019) también defienden que el manejo de mezclas entre especies leguminosas y gramíneas, puede ser una alternativa de mitigación al proveer N al suelo desde fuentes biológicas en comparación con los métodos convencionales, así se podrían mejorar las relaciones de Carbono: Nitrógeno (C: N) de los residuos, reduciendo la velocidad de mineralización y consecuentes liberaciones de N₂O al ambiente.

En el inventario de emisiones, elaborado para la finca del CTP Liberia, se estima que la producción de CO₂ en el sector agrícola es menos de 1T y está ligada mayoritariamente al uso de fertilizantes nitrogenados. Por tanto, el problema de emisiones radica en el Nitrógeno aportado por abonos químicos que pasa a convertirse en N₂O tras su aplicación excesiva, y una buena solución para reducir su uso es el asocio de cultivos. Por ejemplo, en la época de siembra, se puede iniciar con parcelas experimentales donde se agrupen siembras de maíz en monocultivo y maíz asociado con leguminosas como Mucuna (*Mucuna pruriens*) o frijol mungo (*Vigna radiata*) para que tanto docentes como estudiantes puedan valorar y analizar resultados relacionados a calidad y desarrollo de plantas, control de malezas y calidad de producto cosechado, así como costos. Además, los desechos (rastros) combinados entre leguminosas y gramíneas; aumentaría la palatabilidad y contenido nutricional para la alimentación animal.

Entre los años 2016 a 2018, se evaluó la efectividad de las asociaciones en cultivos de papaya (Figura 17), para exportación tanto orgánicas como convencionales, en la zona Atlántica. El Dr. Robin Gómez Gómez, investigador de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la UCR, menciona que los estudios demostraron que es posible tener un excelente control de malezas al sembrar especies como *Vigna radiata* y *Crotalaria spectabilis* como asociaciones de cultivo. Aunado a ello, detalla que estas especies prometen ser la clave para que los agricultores puedan librarse de las malezas sin necesidad de usar herbicidas, también previenen la erosión, aportan nutrientes, secuestran nitrógeno atmosférico y mejoran la salud del suelo (O`neal, 2019)

Ahora bien, Strauss (2022), cree que promover prácticas agrícolas que regeneren la tierra y sean conscientes del clima, con un enfoque centrado en los agricultores, puede aumentar la productividad de los cultivos. Estas medidas pueden transformar las áreas de cultivo en sumideros de Carbono, revertir la pérdida de bosques, mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y replantear las cadenas de suministro a nivel global y local para hacerlas más sostenibles, disminuyendo así la generación de residuos.



Figura 17. Asociación de papaya con frijol para el control de malezas sin químicos

Fotografía de Robin Gómez, UCR 2018

Al considerar las posibilidades descritas en párrafos precedentes, se propone aplicar como **agricultura regenerativa** en la Finca del CTP Liberia, las siguientes prácticas: rotación de cultivos, labranzas mínimas según épocas del año, cultivos de cobertura. Antes se mencionó que se produce alrededor de 1 Ton CO₂ en la finca, como parte de la explotación agrícola desarrollada durante el ciclo lectivo con estudiantes. Por tal motivo, implementar técnicas regenerativas, puede llegar a tener mayor impacto positivo en la reducción del calentamiento global. Al respecto, Rinehart *et al* (2023) en estudios del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés), mencionan que implementar cultivos en cobertura y rotación de cultivos pueden secuestrar un estimado de 0,64 T CO₂ eq /acre (1,58 T de CO₂ eq/Ha) anual en una finca con cultivos intensivos durante todo el año.

Para confirmar lo anterior, en España, Ordoñez *et al* (2008), ya habían demostrado que los suelos con el manejo convencional para siembra (mecanización, preparación de terreno, insumos), emitían 30,1 y 11,8 Kg CO₂/ha por día más que los de agricultura de conservación o regenerativa (siembra directa) donde reportaban en sus parcelas de ensayo 2,5 y 4,6 Kg CO₂/ha. Lo anterior, evidencia que esta práctica mejora el secuestro de Carbono en el suelo, al reducir emisiones a la atmósfera. La siguiente figura 18, es un gráfico comparativo, de las emisiones estudiadas por Ordoñez *et al* (2008), donde *Laboreo* se refiere a siembra convencional y *No laboreo*, hace referencia a la siembra directa (agricultura de conservación), donde se puede notar la diferencia entre las emisiones de CO₂ en sus diferentes muestreos (*Campañas*).

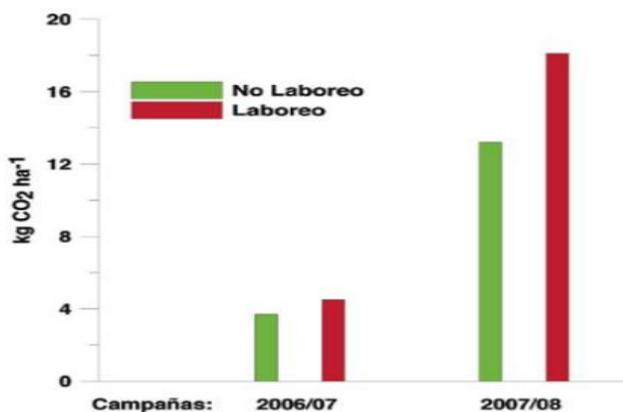


Figura 18. Emisión de CO₂ de parcelas comparadas por Ordoñez *et al* (2008).

Por otra parte, Rattan (mencionado en IICA, 2019), afirma que la agricultura regenerativa no es una sola práctica, sino una filosofía productiva inspirada en la innovación ecológica y el uso de energías no generadas con combustibles fósiles que se propone volver a poner el Carbono de la atmósfera en los suelos.

De acuerdo con esta perspectiva, desarrollar una agricultura que tome en cuenta la vegetación nativa de los campos y la complementa con prácticas agrícolas sostenibles, como la siembra directa, la rotación de cultivos y los cultivos de cobertura, es un paso firme hacia la descarbonización de la agricultura y la protección de la salud del suelo, un recurso vital para la agricultura. producción y seguridad alimentaria mundial (IICA, 2023). En los próximos años, esta práctica puede convertirse en un modelo de negocio que pretenda incrementar la mitigación del cambio climático pagando a los agricultores para que apliquen prácticas de gestión agrícola respetuosas con el clima, a través de los créditos de carbono (Olmos, 2023).

5.6.10 Activador ruminal

En los rumiantes, según Lorenzo *et al* (2015); la mayor parte de la energía y las proteínas disponibles se producen mediante la fermentación ruminal. Los ácidos grasos volátiles

proporcionan energía para los procesos metabólicos en estas especies. De esta manera, las proteínas microbianas se producen a partir de la fermentación de diferentes compuestos nitrogenados (nitrógeno proteico verdadero y no proteico) y de la energía disponible en el rumen, además de constituir la principal fuente de proteínas (principalmente proteínas metabolizables) para los animales en condiciones normales de alimentación.

La fermentación ruminal es posible manipularla al utilizar un conjunto de estrategias, cuyo propósito es activar o cambiar sitios sensibles de desarrollo microbiano, producción de enzimas y productos finales de la acción microbiana; especialmente, patrones de fermentación y entrega de nutrientes. Según Galindo *et al*, (2017) las enzimas pueden ayudar en muchos ámbitos, como mejorar la digestión y la utilización de los alimentos, la alteración positiva de los microbiomas de los animales, la alteración de los patrones de fermentación para descomponer los residuos y la mitigación de las toxinas ambientales.

En Costa Rica, existe una variedad de estas formulaciones registradas las cuales contienen ingredientes similares entre ellas están: Rumen Sacch de la marca Faryvet, Ruminal Plus del laboratorio Virbac y Rumonade de laboratorios Nutrovet.

Como menciona Suarez en una videoconferencia, “los animales consumen gran cantidad de alimentos y por ende, es necesario apoyar su sistema digestivo con una solución accesible como es el activador ruminal”. (BMEditores, 2022). Dicha formulación pretende mejorar la flora ruminal y por ende disminuir el gas metano (CH₄) por fermentación entérica. En el Cuadro 11, se resume la fórmula otorgada por el experto que fácilmente puede ejecutarse como práctica didáctica frecuente dentro del programa de estudio para los estudiantes de la especialidad agropecuaria del CTP Liberia, donde se realicen procedimientos de pesado, preparación y administración al hato existente, de esta forma, ayudar a mejorar los desbalances digestivos existentes en estos animales, debido a la escasez de alimento nutritivo en las extensas épocas secas presentes en la provincia de Guanacaste. Es de vital importancia mencionar que la suplementación de este activador tiene una frecuencia de aplicación de máximo 2 veces al mes y que la levadura a utilizar es la utilizada para panadería.

Cuadro 11. Formulación de activador ruminal casero del Ing. Suarez Domínguez	
Ingredientes	Preparación
90 kg melaza	Mezclar en su totalidad sin agregar agua, dejar reposar mínimo 24 horas para suministrar a libre consumo. *La formulación está recomendada para 10 unidades animal (U.A)
3 kg sal con minerales	
1 kg úrea	
200 g levadura	

La importancia de ejecutar esta actividad en la finca, objeto de estudio, radica en que la fermentación entérica produce tantos gases contaminantes al utilizar forrajes, residuos de cosecha y otras materias primas altamente fibrosas y de baja calidad, para la alimentación, genera baja digestibilidad y grandes cantidades de metano (CH₄). Ante esta situación, Henao *et al*, (2023), considera que los activadores ruminales son importantes mitigadores de GEI, al

mejorar la digestibilidad de alimentos fibrosos. Con ello, se disminuye el impacto de dichos gases de origen entérico, puesto que se reduce su generación en el ganado.

El efecto en la reducción de Metano (CH₄) que produce la adición de estos activadores en las dietas de las vacas, según menciona (Chung *et al*, (2011), ronda el -11,5%, lo cual evidencia una buena alternativa de reducción de gases de efecto invernadero.

5.6.11 Agricultura de precisión: Inteligencia Artificial para monitoreo y recomendaciones

Las soluciones con Inteligencia Artificial (IA), están relacionadas con una agricultura más inteligente, como el uso de datos, sensores inteligentes y máquinas autónomas para respaldar la toma de decisiones, basada en datos para una adecuada gestión del cultivo y brindar soluciones precisas de nutrición vegetal, por ejemplo. Estos enfoques innovadores basados en tecnología resuelven los desafíos de la agricultura actual, tal es el caso de la reducción de la huella de carbono.

La creciente conciencia sobre la crisis climática ha conducido a un renovado enfoque en la sostenibilidad y a la Inteligencia Artificial (IA). Demuestra ser una aliada poderosa en esta lucha. Desde optimizar la eficiencia energética hasta revolucionar la agricultura y la movilidad sostenible, la IA está dejando su huella en la reducción de emisiones de carbono y en la preservación del planeta (Road to data, 2023). Una de las aplicaciones más destacadas es el uso de sensores y algoritmos inteligentes para el monitoreo y control de los recursos en tiempo real. Entre las actividades agrícolas que se podrían monitorear y controlar con la tecnología están; el análisis de datos climáticos, horarios de luz solar y demanda energética de los sistemas de riego y climatización, la IA puede sugerir los momentos más eficientes para realizar estas tareas y reducir así el consumo de energía. Otra actividad es la gestión de fertilizantes, clave para obtener cosechas saludables y maximizar la productividad agrícola (Flores, 2022). Aquí es donde la IA brilla nuevamente, al determinar las necesidades nutricionales de los cultivos en función de análisis de suelo, datos climáticos y características específicas de cada planta. Esto permite aplicar los fertilizantes de manera precisa y evitar su exceso, reduciendo el impacto ambiental.

En este sentido, Umaña (2023), realizó un estudio en la finca Piñalbo en San Carlos, Costa Rica, cuyo objetivo era comparar el cultivo de piña bajo manejo tradicional de la finca versus el monitoreo asistido por una estación meteorológica y monitor de cultivos llamada Arable Mark 2 con IA. Dicho evidenció, que las plantas monitoreadas tuvieron un menor consumo de agua y menor grado de estrés durante este ciclo vegetativo dando una mejor respuesta en su crecimiento; además, la eficiencia en conversión de unidades de nitrógeno y magnesio aplicados por hectárea fue mejor en la parcela monitoreada debido al tiempo justo y exacto de aplicaciones, cuyo resultado concluye en una reducción de insumos y energía, por ende, una reducción en emisiones.

Esto no solo disminuye los costos operativos, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reducir la huella de carbono de la agricultura tradicional. Esta tecnología permite a los agricultores tomar decisiones basadas en datos sólidos y precisos, lo que conduce a un uso

más eficiente de los recursos y como resultado, se reducen emisiones de Carbono (Road to data, 2023).

Contextualizando la información antes mencionada; el uso de dispositivos como el de la figura 19, se aprecia en la imagen, un dispositivo Mark 2 instalado en la UCR Sede Santa Cruz. Dicho equipo monitorea precipitaciones, humedad y luz solar en cacao, resulta una opción accesible para la finca del CTP Liberia y muy ligada a la política del Ministerio de Educación Pública con la agricultura de precisión; permitiría que el estudiantado desarrolle conocimientos, cuente con las herramientas tecnológicas necesarios para formarse y aprender a obtener mayor productividad. Gracias a esta política, la adquisición del producto se puede lograr a través de proyectos de Educación Técnica con la Ley 7372 que el MEP tiene para los colegios Técnicos, donde abastecen de equipo, materiales y todo lo que se necesite para desarrollar un proyecto previamente estudiado (viabilidad) a largo plazo (MEP, 2021). Actualmente el precio anual por suscripción o alquiler del equipo Arable es de \$1600 para Costa Rica, este precio incluye todas las funcionalidades, además, la instalación del equipo.



Figura 19 Dispositivo IoT Arable Mark para monitoreo en parcela de cacao UCR Santa Cruz, 2023

5.6.12 Consumo eléctrico y combustible

En los actuales sistemas de producción, existe gran necesidad de combustibles fósiles. Las emisiones derivadas de este recurso se dividen en categorías directas, originadas por el uso de cualquier dispositivo a combustible empleado en tareas dentro de la finca. Esto incluye, por ejemplo, motoguadañas, motosierras, bombas y los vehículos utilizados para labores directas en la finca, como el transporte de insumos o animales.

En lo concerniente a combustibles fósiles, la mayor fracción de emisión corresponde al CO₂ que según el IMN (2023), por cada litro de gasolina se emiten 2,26 kilogramos de Dióxido de Carbono, en caso del diésel 2,69 kilogramos y con el GLP 1,61. El inventario de emisiones elaborado para la finca, estima que los combustibles, en general producen 0,5 Ton CO₂ eq/año. Como propuesta para disminuir estas emisiones se destacan las mencionadas por Domingo (2015), las cuales involucran la optimización de motores, incluido el mantenimiento continuo como limpieza de carburadores, filtros de aire y lubricación de rotores o turbinas, aunado a un uso eficiente de la gasolina al lograr una mezcla óptima para motores de 2 tiempos.

El consumo de energía eléctrica que demanda la finca para el año base de estudio fue de 18105KwH, utilizada para brindar electricidad a la casa del colaborador (peón), cerca eléctrica e iluminación a los recintos dentro de la misma, tales como corral, porqueriza, galpón y patios. Este componente del sistema se considera una emisión indirecta de alcance 2, por lo que su impacto en el total de emisiones está relacionado directamente con el factor de emisión que relacione el volumen de consumo.

La utilización de paneles solares (energía fotovoltaica) es una propuesta por utilizar en la finca. Sin embargo, debido al alto costo del proyecto y por razones de presupuesto anual; esta propuesta únicamente se menciona para que futuras administraciones conozcan el potencial ahorro económico y de reducción de emisiones que representa.

De acuerdo con Portilla (2015), el potencial previsto anual de energía fotovoltaica en Costa Rica es de 656 195 GWh/año (Gigavatio hora/año), suficiente para justificar el uso de paneles solares fotovoltaicos en todo el país. Anteriormente, el Instituto Nacional de Transferencia de Tecnologías Agropecuarias de Argentina, en su informe de 2011 exponía a la industria cárnica y lechera costarricense esta opción para mejorar su eficiencia energética, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producto, puesto que la ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de GEI, porcentaje mayor que el generado por la industria de los transportes.

Otra oportunidad para reducir el consumo eléctrico y, por ende, las emisiones de CO₂ es el tema de la iluminación. En su investigación, Serrano *et al* (2015), demostraron que se podría ahorrar un 48% de la energía eléctrica consumida gracias a la utilización profesional de la tecnología LED, así se observa en el Cuadro 12, donde se muestra el ahorro energético por luminaria obtenido para una instalación con 5280horas de funcionamiento anual.

Cuadro 12. Cálculo del ahorro energético obtenido en la sustitución de Lámpara convencional MH400W por Lámpara LED 200W

	Consumo (W)	Hras/día	kWh/día	Días laborales	Hora/año	kWh/año
MH400W	428	24	10,27	220	5280	2259,8
LED200W	220	24	5,28	220	5280	1161,6
Ahorro	208		4,99			1098,2

Fuente: Adaptado de Serrano et al (2015).

Aunque la propuesta no es una medida específica de mitigación de Gases de Efecto Invernadero; la tecnología LED ha ganado popularidad no solo por ofrecer una iluminación más eficaz, sino por su eficiencia energética, sustentabilidad y, en general, reducir el impacto en el medio ambiente logra reducir consumo eléctrico y al mismo tiempo, disminuir la huella de Carbono.

6. Conclusiones y recomendaciones

Una amenaza directa que afecta ambiente es el calentamiento global. Por tal razón, se han desarrollado herramientas para estimar emisiones de GEI. La metodología de la Huella Carbono permite crear conciencia sobre el aporte que una entidad o actividad, provoca a estas emisiones; a su vez, es un elemento clave en la evaluación y ejecución de futuras acciones para mitigar los efectos adversos que día a día se ven reflejados en el ambiente.

En relación con el objetivo principal de la investigación: Desarrollar una propuesta de mitigación para las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la finca del CTP Liberia, se concluye que:

- El desarrollo de una calculadora de huella de Carbono nacionalizada permitió obtener datos nunca medibles en la finca objeto. Dicha actividad permitió conocer el impacto ambiental de cada actividad desarrollada dentro de la finca; asimismo, indujo a postular propuestas de mitigación para cada área de explotación. Para la propiedad, analizada, la Huella de Carbono establecida bajo el nivel 1 y 2 del protocolo GHG e IPCC, se estima en 17, 841 Ton CO_{2eq} para el año 2023 procedentes tanto de actividades pecuarias como agrícolas dentro de la propiedad, donde la fermentación entérica del ganado bovino es responsable de la mayor cantidad de emisiones de GEI, por lo cual se proponen diversas estrategias y tecnologías centradas en este sector específico.
- La investigación, así como las herramientas desarrolladas en este trabajo, pueden servir como guía referente para los más de 90 Colegios de Costa Rica de este tipo.
- La huella de carbono de la finca del CTP Liberia es más baja en comparación con estudios en otras fincas según literatura consultada para la investigación, por lo cual revela la oportunidad de no solo mitigar los GEI producidos, sino lograr un balance positivo al implementar las propuestas recomendadas.
- Al realizar un manejo más eficiente de las pasturas por implementación de la rotación, es posible alcanzar un mejor aprovechamiento por metro cuadrado, con el cual se puede aumentar la carga animal (CA. Aunado a ello, los Sistemas Silvopastoriles (SSP) son considerados herramientas claves en la transformación de la agricultura convencional hacia una agricultura climáticamente inteligente, aumentando la productividad en forma sostenible y resiliente; a la vez, reduce, evita o disminuye los GEI.
- Gracias a la Ley 7273 del Ministerio de Educación de Costa Rica los Colegios Técnicos tienen la facilidad de implementar tecnologías para mitigar GEI gracias al financiamiento que esta ley otorga.

Finalmente, se presentan las recomendaciones, fundamentadas, principalmente, en los tres pilares de la sostenibilidad. Se espera que se implementen las tecnologías y actividades propuestas. Asimismo, es fundamental ir generando conciencia en el personal docente, administrativo y estudiantil, no sólo del CTP Liberia, sino de todos los Colegios Técnicos del país; por tanto, se recomienda:

- Implementar análisis de suelos al menos una vez al año dentro de la finca podría brindar una perspectiva más detallada del secuestro de Carbono real que ejerce el suelo. Además del resto de las estrategias de mitigación propuestas en este documento; sobre todo, porque no requieren presupuesto económico específico a corto y a largo plazo; sin embargo, son necesarias para reducir GEI en próximas estimaciones anuales, sino convertir a la finca en Carbono positivo en menos de cinco años.
- Es necesario crear conciencia en la educación de los actores involucrados (docente, administrativos y estudiantes) en aspectos como: manejo de los sistemas de cultivos productivos y sostenibles, huella de carbono de las actividades agropecuarias, oportunidades de mitigación de GEI en la finca y mercados de Carbono para lograr la sostenibilidad del ecosistema productivo.
- Registrar todas las actividades y sucesos concernientes a cada explotación desarrollada en la finca del CTP Liberia para poder comparar y establecer soluciones futuras con respecto a huella de carbono.
- Ejecutar aforos a potreros de forma periódica para incrementar la precisión en el cálculo de disponibilidad en apartos y poder mejorar parámetros como días de ocupación y periodos de descanso.
- Evaluar el impacto del establecimiento de sistemas silvopastoriles (SSP) como las cercas vivas y arboles forrajeros o maderables en potreros, no solo por la oportunidad de obtener ingresos por Servicios Ambientales (PSA), sino para secuestrar mayor cantidad de Carbono en la finca, así como aumentar la disponibilidad de biomasa en los apartos al utilizar especies forrajeras.

7. Referencias

- Adapta. (2011). *Buenas prácticas agrícolas para mejorar la conservación de suelos y el secuestro de carbono*. Obtenido de granadaenergia.es: <https://granadaenergia.es/wp-content/uploads/2022/02/proyecto-no-11--buenas-practicas-agricolas-para-mejorar-la-conservacion-de-suelos.pdf>
- AEC. (Asociación Española para la Calidad) 2016. *Globalgap*. Obtenido de Asociación Española para la Calidad: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/globalgap>
- Agrospray. (19 de enero de 2022). *Agricultura de precisión: una BPA para reducir la huella de carbono en la agricultura*. Obtenido de AgroSpray: <https://agrospray.com.ar/blog/huella-de-carbono-en-la-agricultura/>
- Alcaldía Medellín. (29 de mayo de 2023). *La agricultura sostenible: clave en el bienestar de las sociedades*. Obtenido de Alcaldía de Medellín: <https://www.medellin.gov.co/>
- Álvarez, S. J., Muñoz, A. R., Huerta, L. E., & Nahed, T. J. (junio de 2016). Balance parcial de nitrógeno en el sistema de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) con cobertura de leguminosas en Chiapas, México. *Agronomía Costarricense*, 40(1), 29-39. doi:<http://dx.doi.org/10.15517/rac.v40i1.25322>
- Ambrosio, M. (13 de octubre de 2022). *La carbono neutralidad: qué es y cómo se come*. Obtenido de Climatetracker.org: <https://climatetrackerlatam.org/herramientas/que-es-la-carbono-neutralidad/>
- Berrocal, S. (27 de febrero de 2023). *¿Qué es y cómo alcanzar la carbono neutralidad?* Obtenido de <https://www.carbonneutralplus.com/>
- BMEditores (Dirección). (11 de marzo de 2022). *Conferencia Magistral "Principios en la alimentación del ganado bovino"* [Película]. Mexico. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de https://www.youtube.com/watch?v=A7G2NLmr6Lk&ab_channel=BMEditores
- Bocados, D. (08 de mayo de 2018). *Efecto invernadero y calentamiento global: qué son y cómo se relacionan*. Obtenido de <https://eacnur.org/>
- Bonilla, A. K. (20 de diciembre de 2020). *Bandera Azul Ecológica Agropecuaria*. Obtenido de SDI Consultores: <https://sdiconsultorias.com/bandera-azul-agropecuaria/>
- Bonilla, S. D., Noboa, J. L., Portuguez, M. V., & Quinto, U. F. (enero de 2020). Metanogénesis microbiana en animales poligástricos. *Nutrición Animal Tropical*, 1(14), 36-49. doi:DOI: 10.15517/nat.v14i1.4257
- Buratti, C., Fantozzi, F., Barbanera, M., L., E., C., M., & Cecchini, L. (2017). Carbon footprint of conventional and organic beef production systems: An Italian case study. . *Science of the Total Environment*, 576, 129-137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.075>

- Cañet, P. F., Sio, G. J., Müller, C. E., Chassot, O., & Arango, B. A. (2022). Aplicación de los principios de la agricultura regenerativa para aumentar los niveles de nutrientes en el suelo y enfrentar una emergencia de seguridad alimentaria y nutricional local en Guanacaste, Costa Rica. *Regeneratio*, 1(2), 17-28. doi:10.55924/ucireg.v1i2.12
- CASAFE. (Camara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes). 2015. Obtenido de <https://www.casafe.org/buenas-practicas-agricolas/>
- CEPAL. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010. *Metodologías de calculo de huella de carbono y sus potenciales implicaciones para America Latina..* Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37288-metodologias-calculo-la-huella-carbono-sus-potenciales-implicaciones-america>
- CEPAL.(Comisión Económica para América Latina y el Caribe) 2015. *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible.* Recuperado el 02 de agosto de 2023, de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/37310>
- Cerdas, R., & Vallejos, E. (2012). Comportamiento productivo de varios pastos tropicales a diferentes edades de cosecha en Guanacaste, Costa Rica. *Intersedes*, 13(26), 6-22. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66624662001>
- Chung, Y., Walker, N., McGinn, S., & Beauchemin, K. (mayo de 2011). Efectos diferentes de dos cepas activas de levadura seca (*Saccharomyces cerevisiae*) sobre la acidosis ruminal y la producción de metano en vacas lecheras no lactantes. *Journal Dairy Science*, 94, 31-39. doi:<https://doi.org/10.3168/jds.2010-3277>
- Climatepartner.com. (abril de 2022). *Carbono Neutro: ¿Qué significa en realidad?* Obtenido de Climatepartner: <https://www.climatepartner.com/es/carbono-neutro>
- Conant, R., Cerri, C., Osborne, B., & Paustian, K. (2017). Impactos de la gestión de los pastizales en las reservas de carbono del suelo: una nueva síntesis. *Ecological Applications*, 3, 29-44. doi:<https://doi.org/10.1002/eap.1473>
- Contreras, S. J., Martínez, A. J., Cadena, T. J., & Fallas, G. C. (2019). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 29-41. doi:<https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Contreras, S. J., Martinez, A. J., Raghavan, B., Lopez, R. L., & Garrido, P. J. (setiembre de 2021). Sistemas silvopastoriles: mitigación de gases de efecto invernadero, bosque seco tropical en Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 900-919. doi:<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.15517/am.v32i3.43313>
- Costa, E. (17 de noviembre de 2020). *La pandemia golpeó a la Guanacaste turística que conocemos: así contestó la provincia.* Obtenido de La voz de Guanacaste: <https://vozdeguanacaste.com/>
- Dávila, B. G. (29 de agosto de 2023). *¿Conoces en qué consiste el GHG Protocol?* Obtenido de eurofins: <https://www.eurofins-environment.es/es/ghg-protocol/>

- Delgado, G. (16 de julio de 2008). *Paz con la Naturaleza*. Recuperado el 02 de agosto de 2023, de CANARA: <https://www.canara.org/capsulas/Paz-con-la-Naturaleza>
- Domingo, A. S. (2015). *Optimización del rendimiento de un motor de dos tiempos y pequeña cilindrada mediante simulación numérica*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Valencia: <http://hdl.handle.net/10251/56062>
- Duarte, M. C. (5 de enero de 2018). *El Protocolo de Kioto: ¿logro o fracaso?* Obtenido de Diario El Español: https://www.elespanol.com/ciencia/20180105/protocolo-kioto-logro-fracaso/272842718_12.html
- Durán, S. (octubre de 2019). *¿Qué es la huella de carbono?* Obtenido de SinCeO2 Consultoría Energética: <https://www.sinceo2.com/>
- ECA. (Ente Costarricense de Acreditación). 2014. Los organismos validadores/verificadores de gases de efecto invernadero y la demostración de C-Neutralidad por parte de las empresas. *Ambientico*(247), 24-25. Obtenido de https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/25928/247_24-30.pdf
- EOS. (19 de setiembre de 2023). *Secuestro De Carbono En El Suelo: Descubriendo Su Potencial*. Obtenido de EOS data Analytics: <https://eos.com/es/blog/secuestro-de-carbono-en-suelo/>
- Espada, R. L., Martínez, C. V., Sobrino, B. J., Rodríguez, R. F., & Rey, G. G. (28 de noviembre de 2016). *Contribución local al cambio climático global. Aplicación al municipio de Vigo*. Obtenido de Fundación Conama: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998973825.pdf>
- Estrada, G. L. (noviembre de 2014). Implementación de medidas de reducción y compensación de huella de carbono en proyectos constructivos de la empresa constructora EDIFICAR S.A. San Pedro, San José, Costa Rica. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10669/29761>
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación) 2009. Obtenido de. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: La ganadería a.:* <https://www.fao.org/3/i0680s/i0680s00.htm>
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación) 2012. *Sistemas Silvopastoriles*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/ah647s/AH647S05.htm>
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación) 2014. *Aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura*. Obtenido de: <https://www.fao.org/news/story/es/item/218907/icode/>
- Flores, R. (10 de octubre de 2022). *La inteligencia artificial en la Agroindustria podría reducir la huella de carbono en Ecuador*. Obtenido de Ecualink: <https://www.ecualink.com.ec/2022/10/la-inteligencia-artificial-en-la.html>

- FONAFIFO.(Fondo Nacional de Financiamiento Forestal). (sf). *Programa de Reducción de Emisiones*. Obtenido de: <https://www.fonafifo.go.cr/es/servicios/programa-de-reduccion-de-emisiones/>
- Galindo, J., A. E., Marrero, Y., González, N., & Sosa, A. (2017). Activadores ruminales, aspectos generales y sus ventajas en la alimentación de animales rumiantes. *51(1)*, 11-23. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802017000100002
- Garbanzo, L. G., Alvarado, H. A., Vargas, R. J., Cabalceta, A. G., & Vega, V. E. (2021). Fertilización con nitrógeno y potasio en maíz en un Alfisol de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, *32(1)*, 137-148.
- GHG Protocol. (s.f.). *Protocolo Global para Inventarios de Emisión Gases de Efecto Invernadero*. Obtenido de Protocolo de Gases de Efecto Invernadero : https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHGP_GPC%20%28Spanish%29.pdf
- Globalgap. (2022). *Certificación Global G.A.P.* Obtenido de <https://www.globalgap.org/es/for-producers/globalg.a.p./>
- Henao, B. I., Borrás, S. L., & Rodríguez, M. C. (2023). Evaluación de tres activadores ruminales sólidos (SAR) adicionados con un preparado microbiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *14(1)*, 159-176. doi:<https://doi.org/10.22490/21456453.5581>
- Hernández, J., Tirado, D., & Beltrán, I. (enero de 2014). Captura de Carbono en los suelos. *PADI*, *1*, 23-28. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n2/e4.html>
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., . . . Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, *45*, 27-36. Obtenido de https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7934/Almacenamiento_de_carbono_en_el_suelo.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- ICL. (ICL Specialty Fertilizers) 2023. *Reduciendo la Huella de Carbono de la Agricultura*. Obtenido de: <https://icl-growingsolutions.com/es-mx/agriculture/knowledge-hub/reducing-agricultures-carbon-footprint/>
- IICA. (Instituto Centroamericano de Cooperación para la Agricultura) 2019. *Agricultura regenerativa es herramienta fundamental para afrontar crisis climática*. Obtenido de: <https://iica.int/es/prensa/noticias/agricultura-regenerativa-es-herramienta-fundamental-para-afrontar-crisis-climatica>
- IICA. (Instituto Centroamericano de Cooperación para la Agricultura) 2021. *El camino hacia prácticas agrícolas sostenibles en américa latina y el caribe*. Obtenido de: <https://iica.int/>

- IICA. (Instituto Centroamericano de Cooperación para la Agricultura) 2023.. *Las prácticas agrícolas sustentables: una llave para potenciar la descarbonización del agro en las Américas*. Obtenido de: <https://iica.int/es/prensa/noticias/las-practicas-agricolas-sustentables-una-llave-para-potenciar-la-descarbonizacion>
- IMN.(*Instituto Meteorológico de Costa Rica*). 2023. Obtenido de Factores de Emisión GEI: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-decimo-tercera-edicion-2023/>
- INIA. (Instituto Nacional de Innovación Agraria) 2019. *Quema de rastrojo de maíz una negativa práctica agrícola que tiende a desaparecer*. Recuperado el 13 de febrero de 2024, de Instituto de Investigaciones Agropecuarias: <https://web.inia.cl/blog/2019/06/06/quema-de-rastrojo-de-maiz-una-negativa-practica-agricola-que-tiende-a-desaparecer/>
- INTA. (*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina*). 2011. *Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación*. Obtenido de INTA informa: <https://www.todoagro.com.ar/ganaderia-y-efecto-invernadero-mejor-produccion-menos-contaminacion/>
- Intedya. (2021). *ISO 14067:2018 Huella de Carbono de Producto*. Obtenido de International Dynamic Advisor: <https://www.intedya.com/internacional/191/consultoria-iso-140672018-huella-de-carbono-de-producto.html>
- López, G. (14 de diciembre de 2023). Tecnologías NAMA aplicadas en el cantón de Liberia. (J. Zamora, Entrevistador)
- Lorenzo, D., Rostoll, S., Guevara, B., & Ruiz, M. (2015). Manipulación de la fermentación ruminal para mejorar la productividad en ganado bovino. *XVII Congreso Bienal AMENA, Marianna, FL, USA*. Florida, Estados Unidos. Recuperado el 10 de febrero de 2024, de https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/163-manipulacion_fermentacion.pdf
- Lorenzo, K. E., Palacios, H. Á., & Souza, V. C. (01 de julio de 2023). La economía circular en la gestión de residuos ganaderos. *Economía y Desarrollo*, 167(2), 5. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0252-85842023000200008&lng=es&tlng=es
- Lubbers, M. I., Fonte, J. S., & Brussaard, L. (2013). Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nature Climate Change*(3), 187-194. doi:<https://doi.org/10.1038/nclimate1692>
- Madriz, A. (25 de febrero de 2022). Carbono neutralidad de Costa Rica está a la mitad del camino. *La Republica*. Recuperado el 02 de agosto de 2023, de <https://www.larepublica.net/>
- MAG. (Ministerio de Agricultura y Ganadería) 2014. *Concepto NAMA Ganadería*. Recuperado el 02 de agosto de 2023, de: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-3396.PDF>

- MAG. (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2022. *Caracterización del área de influencia de la agencia de extensión agropecuaria Liberia*. Recuperado el 18 de agosto de 2023, de: <https://www.mag.go.cr/regiones/chorotega/CARACTERIZACION-AEA-LIBERIA.pdf>
- MAG. (Ministerio de Agricultura y Ganadería) 2022. *Política de Ganadería Sostenible de Costa Rica*. San José: MAG. Obtenido de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-11121.pdf>
- MAYDS. (s.f.). *Mitigación o reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/mitigacion>
- MEP. (Ministerio de Educación Pública) 2021. *Colegios Técnicos Profesionales*. Recuperado el 12 de agosto de 2023, de Ministerio de Educación Pública: <https://www.mep.go.cr/palabras-clave/colegios-tecnicos-profesionales>
- MEP. (Ministerio de Educación Pública). 2021. *Proceso General para Juntas de Educación*. Obtenido de Ministerio de Educación Pública: <https://juntas.mep.go.cr/proceso-general/>
- Mikhailova, N. (2018). El uso equilibrado de fertilizante gracias a las técnicas nucleares contribuye a aumentar la productividad y a proteger el medio ambiente. *IAEA Boletín*, 11-13. Obtenido de <https://www.iaea.org/sites/default/files/18-05866sweb.pdf>
- Milera, R. M., Machado, M. R., Hernández, C. M., & Sánchez, C. S. (2019). Pastoreo racional intensivo como alternativa para una ganadería baja en emisiones. *Pastos y forrajes*, 42(1), 3-12. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942019000100003&lng=es&tlng=es
- MINAET. (Ministerio de Ambiente y Energía). 2009. *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Recuperado de: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/ENCC.pdf>
- MITECO. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) 2023. *Guía para el cálculo de huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización*. Obtenido de: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
- Montenegro, B. J., Barrantes, G. E., & Ivankovich, C. S. (2020). Cuantificación de metano entérico según estado fisiológico en vacas lecheras de alta producción en costa rica. *Agronomía Costarricense*, 79-92. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/40003/40547>
- Mora, A. D., & Chaves, A. A. (2019). Aporte del Programa Bandera Azul Ecológica en la lucha contra el cambio climático en Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 32, 158-167. doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4889>

- Municipalidad de Liberia. (09 de febrero de 2017). *Cantón de Liberia*. Recuperado el 18 de agosto de 2023, de Municipalidad de Liberia: <https://www.muniliberia.go.cr/muni/std/92/canton-de-liberia>
- Murgueitio, E., & Ibrahim, M. (2001). Agroforestería pecuaria para la reconversión de la ganadería en Latinoamérica. *Livestock Research for Rural Development*, 13(26). Obtenido de <http://www.lrrd.org/lrrd13/3/murg133.htm>
- Murgueito, R. E., & Ibrahim, M. (2008). Ganadería y Medio Ambiente en América Latina. 21-39. Cali, Colombia: Fundación CIPAV. Obtenido de Repositorio Institucional Agrosavia: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/19090>
- Musmanni, S. (setiembre de 2014). Implementación de la estrategia de Carbono- Neutralidad como modelo de desarrollo bajo en emisiones en Costa Rica. *Ambientico*(247), 4,5. Obtenido de <https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/implementacion-de-la-estrategia-de-carbono-neutralidad-como-modelo-de-desarrollo-bajo-en-emisiones-en-costa-rica/>
- Navas, P. A. (2007). Sistemas silvopastoriles para el diseño de fincas ganaderas sostenibles. *ACOVEZ*(16), 16-20. Obtenido de https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/manejo%20silvopastoril/85-sistemas.pdf
- O`neal, C. K. (enero de 31 de 2019). *Plantas de la familia del frijol permiten controlar malezas sin químicos*. Obtenido de UCR Informa: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/01/31/plantas-de-la-familia-del-frijol-permiten-controlar-malezas-sin-quimicos.html>
- Olmos, L. M. (21 de noviembre de 2023). *La agricultura del carbono como modelo de negocio y sostenible para el sector agrícola*. Obtenido de Tecnología Hortícola: <https://www.tecnologiahorticola.com/la-agricultura-del-carbono-como-modelo-de-negocio-y-sostenible-para-el-sector-agricola/>
- ONF. (Oficina Nacional Forestal) 2023. *Programa de Pago por Servicios Ambientales*. Obtenido de: <https://onfcr.org/psa-2>
- Ordoñez, R., Carbonell, R., González, P., & Veroz, O. (noviembre de 2008). Efecto de las operaciones agrícolas sobre las emisiones de CO2 a la atmósfera. *Agricultura de conservación*(10), 40-44. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AC%2FAC_2008_10.pdf
- Ortiz, T. C., & Orihuela, A. J. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1), 32-39. doi:<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- OSD. (*OSD Consultoría integral*) 2021. Obtenido de: <https://osdconsultores.com/blog/que-es-carbono-neutralidad/>

- Páliz, B. C. (noviembre de 2019). Huella de Carbono de la Finca María Verónica de Industrias Lácteas Toni. *Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano*. Zamorano, Honduras.
- Pérez, I. H., Rodríguez, D. I., & García, B. R. (2021). Secuestro de carbono por el suelo y sus fracciones en agroecosistemas tropicales de la región costa ecuatoriana. *Universidad y Sociedad*, 13(2).
- Periódico Mensaje. (20 de mayo de 2021). *Bandera Azul Agropecuaria destaca iniciativas que procuran mejorar condiciones de inocuidad, ambientales y de adaptación al Cambio Climático*. Obtenido de Periódico Mensaje: <https://www.periodicomensaje.com/ambientales/6820-bandera-azul-agropecuaria-destaca-iniciativas-que-procuran-mejorar-condiciones-de-inocuidad-ambientales-y-de-adaptacion-al-cambio-climatico>
- Pierola, G. M. (2021). *Protocolo de Kioto: Objetivos alcanzados al término de su vigencia en 2020*. Recuperado el 02 de agosto de 2023, de Universidad de Lima: <https://acortar.link/9dfHEH>
- Pinargote, I. G., Vélez, V. S., Zambrano, Z. M., & Santos, M. J. (junio de 2020). Impacto de las certificaciones sociales y ambientales sobre la responsabilidad social y empresarial de la empresa Atunera Manabita Marbelize S.A. *ECA Sinergia*, XI(3), 102.
- PNUD. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) 2022. Obtenido de <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-son-los-mercados-de-carbono-y-por-que-son-importantes>
- Portilla, R. (2015). Energía solar para generación eléctrica: un recurso abundante pero con limitaciones. *Ambientico*, 29-35.
- Quirós, V. G. (2015). Determinación de la huella de carbono y utilización de energía solar en unidades productoras de leche como alternativa al cambio climático en la región huetar Norte de Costa Rica. Costa Rica: TEC. Obtenido de https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/hdc_gquirc3b3s.pdf
- Rainforest Alliance. (2020). *Certificación Rainforest Alliance*. Obtenido de <https://www.rainforest-alliance.org/es/>
- Rinehart, L., Favor, K., & Haschke, E. (junio de 2023). *Prácticas Agrícolas para el Cambio Climático*. Obtenido de Programa de Agricultura Sostenible del Centro Nacional de Tecnología Apropiada: <https://attra.ncat.org/es/publication/practicas-agricolas-para-el-cambio-climatico/>
- Road to data. (26 de setiembre de 2023). *Agricultura sostenible: cómo la inteligencia artificial impulsa la eficiencia y la productividad en los cultivos*. Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/agricultura-sostenible-c%C3%B3mo-la-inteligencia-artificial-impulsa>
- Rúa, F. M. (2009). *Las leyes universales de André Voisin para el pastoreo racional*. Obtenido de Producción Animal Argentina: https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/115-Voisin.pdf

- Ruiz, S. C. (2015). *Rastrojos de cultivo y residuos forestales*. (M. d. Chile, Ed.) Chile, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Recuperado el 14 de febrero de 2024, de <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40196.pdf>
- SAGyP. (s.f.). *Mitigación o reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/mitigacion>
- Saynes, S. V., Etchevers, B. J., Paz, P. F., & Alvarado, C. L. (marzo de 2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00083.pdf>
- Segura, G. J. (2024). *Manual MRV 2023*. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería Costa Rica. Obtenido de <https://www.mag.go.cr/informacion/prog-ganaderia/Manual-MRV-2023.pdf>
- Sela, G. (04 de junio de 2021). *Cómo calcular tasas de fertilizantes*. Obtenido de Cropaia: <https://cropaia.com/es/blog/tasas-de-aplicacion-de-fertilizantes/>
- Serrano, T. A., Martínez, I. A., Guarddon, M. O., & Santolaya, S. J. (junio de 2015). Análisis de ahorro energético en iluminación LED industrial: Un estudio de caso. *Dyna*, 231-239. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49639089029>
- SFE. (Servicio Fitosanitario del Estado). 2022. *Certificación TICO- BPA*. Obtenido de: <https://www.sfe.go.cr/SitePages/Residuosdeagroquimicos/Certificacion-Voluntaria-BPA.aspx>
- SFE. (Servicio Fitosanitario del Estado). 2022. *Servicio Fitosanitario del Estado certifica implementación de Buenas Prácticas Agrícolas*. Obtenido de Servicio Fitosanitario del Estado: https://www.sfe.go.cr/Prensa_2022/12%20Servicio%20Fitosanitario%20del%20Estado%20certifica%20implementaci%C3%B3n.pdf
- SINIA. (Sistema Nacional de Información Ambiental). 2019. *SINIA*. Obtenido de: <https://sinia.minam.gob.pe/indicadores/emisiones-dioxido-carbono-equivalente>
- Siri, P. G., & Ernst, O. (2010). Manejo del suelo y rotación de pasturas: Efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Informaciones agronómicas*(45), 22-26. Obtenido de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/6C6ED79A384121EA8525798400581129/\\$FILE/22.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/6C6ED79A384121EA8525798400581129/$FILE/22.pdf)
- Sosa, R. B., & García, V. Y. (2019). Emisión de gases de efecto invernadero en el suelo bajo el uso de abonos verdes. *Agronomía mesoamericana*, 30(3), 767-782. doi:<https://doi.org/10.15517/am.v30i3.36103>
- Strauss, T. (29 de diciembre de 2022). *¿Qué es la agricultura regenerativa y cómo puede ayudarnos a alcanzar sistemas alimentarios con cero emisiones netas?* Obtenido de Foro Mundial de Economía: <https://es.weforum.org/agenda/2022/12/que-es-la-agricultura-regenerativa-y-como-puede-ayudarnos-a-alcanzar-sistemas-alimentarios-con-cero-emisiones-netas-3-lideres-explican/>

- TEC. (Instituto Tecnológico de Costa Rica) 2017. Agricultura sustentable: volver al origen. (I. T. Rica, Ed.) *Pensis*, 28. Obtenido de <https://www.tec.ac.cr/pensis/articulos/agricultura-sustentable-volver-origen>
- Torres, R. J., Espinoza, D. W., Reddiar, L., & Vázquez, A. A. (2011). Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio en Huatusco, Veracruz, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 543-549. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93920942033.pdf>
- Umaña, A. J. (octubre de 2012). *Huella de Carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falán*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12390/1/UmanaArboledaJohnAlexander2012.pdf>
- Umaña, Y. (16 de enero de 2023). *Paquetes tecnológicos para la nutrición del cultivo de piña (Sensor mark2 de ARABLE)*. Obtenido de Piña de Costa Rica: <https://www.pinadecostarica.com/paquetes-tecnologicos-para-la-nutricion-del-cultivo-de-pina-sensor-mark2-de-arable/>
- UNA. (Universidad Nacional de Costa Rica). 2014. La certificación C-Neutral no es una marca-país sino una marca-empresa. *Ambientico*(247), 3.
- Useros, F. J. (2013). El cambio climático: sus causas y sus efectos medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98. Recuperado el 02 de agosto de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4817473.pdf>
- Varela, V. (2020). *Ciencia del cambio climático y gobernanza internacional*. Obtenido de PNUD Ecuador: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/59246/59401.pdf>

ANEXOS

Anexo 1.

Carta de solicitud de permiso para realización del estudio.

Liberia, agosto 2023

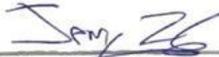
Señor:
Msc. Héctor Briceño Hernández.
Director CTP Liberia.

Por este medio Jerry Zamora Espinoza; facilitador en Plan Nacional, le saluda de una manera muy cordial y atenta. A la vez hago de su conocimiento la siguiente situación en relación con mi persona. Desde 2022 he estado estudiando y ejecutando proyectos de una maestría universitaria bimodal (virtual y presencial), en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Dicha carrera está culminando y como requisito final es necesario una tesis, por lo que he apostado como propuesta, una investigación de *mitigación de huella de carbono en la finca del CTP Liberia*. Dicha propuesta requiere actividades de campo en la finca, así como acceso a recibos de servicios públicos (agua y electricidad) de esta. Todo con el objetivo de cuantificar las emisiones producidas y poder diseñar una propuesta con actividades compensatorias y de mitigación de esas emisiones.

El beneficio obtenido será una guía con actividades y buenas practicas para mitigar y compensar las emisiones que se producen dentro de la finca. Misma guía puede ser la base o referencia para que docentes tanto de la institución, así como de otros colegios puedan calcular y tomar medidas que orienten a la sostenibilidad de las fincas.

Por todo lo anterior, *solicito su permiso y/o visto bueno para poder llevar a cabo esta investigación en dicha finca, así como para obtener copias de los recibos de los servicios públicos y de combustible que se realizan al mes y, por último; el plan quinquenal del CTP Liberia. Todo con el fin de investigar antecedentes y cuantificar emisiones dentro de la propiedad (finca).*

Sin mas que agregar, esperando su apoyo, agradece:


Jerry Zamora Espinoza
Docente Agropecuaria.



c/c: secretaria Junta Administrativa

Anexo 3.

Certificado de verificación emitido por el MAG sobre compensación de GEI en finca.



PROGRAMA NACIONAL DE GANADERÍA
COSTA RICA

El Programa Nacional de Ganadería de Costa Rica
verifica que



HOJOCHÉ DE NICOYA S.A

La finca registrada en el SDNEA-MAG bajo el número: 88392:
Participa en el modelo NAMA Ganadería
Y calculó el 100% de la emisión de GEI en el año 2021 y 2022, y compensando:

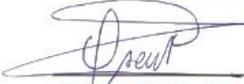
100 %
En el periodo de evaluación

Estas acciones apoyan las metas de descarbonización de la economía costarricense y contribuyen con el NDC de Costa Rica ante la Convención Marco de Cambio Climático.

Compruebe la veracidad de este certificado escaneando el código QR



GLORIANA LOPEZ ORDOÑEZ
Agencia de Extensión Agropecuaria de Liberia
Ministerio de Agricultura y Ganadería



OSCAR VASQUEZ ROSALES
Dirección de Desarrollo Chorotega
Ministerio de Agricultura y Ganadería



VÁLIDO POR UN AÑO A PARTIR DE SU FECHA DE EMISIÓN Emitido el día 11 de 12 del 2023 CERTIFICADO No. 1953-2023

Anexo 4.

Refrigeradoras recicladas para uso como bebedero en Finca CTP Liberia.

