

**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y
UTILIZACIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN UNIDADES
PRODUCTORAS DE LECHE COMO ALTERNATIVA AL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGION HUETAR NORTE DE
COSTA RICA**



GONZALO QUIRÓS VINDAS



Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Agronomía como
requisito parcial para optar al grado de Bachillerato en Ingeniería en Agronomía

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
SEDE REGIONAL SAN CARLOS
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

2015

**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y UTILIZACIÓN
DE ENERGÍA SOLAR EN UNIDADES PRODUCTORAS DE LECHE
COMO ALTERNATIVA AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGION
HUETAR NORTE DE COSTA RICA**

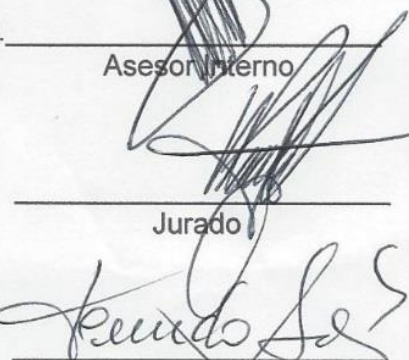
GONZALO QUIRÓS VINDAS

Aprobado por los miembros del Tribunal Evaluador:

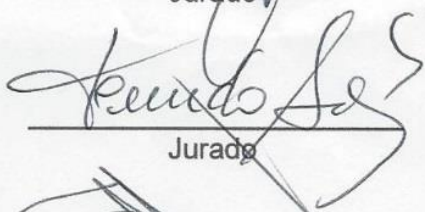
Ing. Agr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Ph. D.


Asesor Interno

Ing. Agr. Wilfrido Paniagua Madrigal, M.G.A


Jurado

Ing. Agr. Fernando Gómez Sánchez, MAE


Jurado

Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph.D.


Coordinador
Trabajos Finales de Graduación

Ing. Agr. Alberto Camero Rey, M.Sc.


Director
Escuela de Agronomía

2015

DEDICATORIA

Es mi más profundo deseo dedicar este trabajo a Dora Vindas Sánchez, quien me ha dado una vida llena del amor más puro y desinteresado que hay en la faz de la tierra, mismo amor que ha tenido para todos mis hermanos. Mi madre persona trabajadora sinónimo de paciencia, llena de sueños y anhelos.

A Gonzalo Quirós Mena, quien desde mis primeros pasos lleno de amor me guio a convivir con nuestra tierra, el amor a labor más digna y humilde como lo es la agricultura. Mi padre que con sabiduría y paciencia ha tratado de guiarme siempre en pro de que pueda ser un mejor ser humano.

A mis hermanos, Daniela, Génesis, Eduardo y Geraldo, y a mi sobrina Sofía, personas que me impulsan a convivir con armonía y en crecimiento día a día. Los seres más cercanos a mis sueños y objetivos venideros, a quienes amo.

A la familia Benavides Macre, quienes Dios puso en mi camino para ser grandes responsables de que al día de hoy pueda cumplir con este objetivo. Infinitamente agradecido por su cariño, ayuda desinteresada y acogimiento en su seno familiar, llenos siempre de buenas intenciones y actitudes con mí persona.

Por ultimo dedico este trabajo a mis hermanos y hermanas de diferentes madres, los que en esta etapa de mi vida me han ayudado a definirme y crecer como persona. La familia de Agronomía TEC que vivirá por siempre en mi mente y corazón.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, quien me dio las fuerzas necesarias para levantarme día a día y tratar de salir adelante con esta tarea.

Humildemente agradezco a mis profesores y cuerpo administrativo de la carrera de Ingeniería en Agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede San Carlos; ha sido su trabajo el que me ha dado más que lo necesario, académica y personalmente, para cumplir satisfactoriamente con esta tarea.

Agradezco a mi profesor asesor, Ing. Agr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Ph. D en Ciencias Agrícolas, por su colaboración y confianza durante el proceso de ejecución de este trabajo. A mis profesores jurados Ing. Agr. Wilfrido Paniagua Madrigal, M.G.A y Ing. Agr. Fernando Gómez Sánchez, MAE por sus correcciones y objetividad. También quiero agradecer al profesor Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph.D. coordinador de trabajos finales de graduación por su gestión y coordinación en este proceso que culmina con el presente documento.

Agradezco a mis amigos Luis Andrés Barrantes Valverde, Juan Carlos Kopper Sandoval, Jonathan Masis Solano, Carlos Arguedas Gutiérrez y Wainer Ortiz por estar hombro a hombro en momentos importantes durante estos últimos años.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Justificación del trabajo	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
2 REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Calentamiento global, cambio climático y gases de efecto invernadero.....	7
2.2 Efecto del cambio climático sobre la producción ganadera.....	9
2.3 Huella de Carbono y metodologías para la estimación de gases de efecto invernadero en ganadería	12
2.4 Emisión de gases de efecto invernadero en la ganadería.....	19
2.4.1 Cambios en usos de suelo.....	19
2.4.2 Fermentación entérica y manejo de los desechos	21
2.4.3 Manufactura y aplicación de fertilizantes nitrogenados.....	23
2.4.4 Consumo de combustibles fósiles y matriz energética	25
2.5 Condiciones climáticas y el uso de energía solar	26
2.6 Equipos de captación de energía solar fotovoltaicos y térmicos	28
2.7 Utilización de sistemas solares en unidades de producción agropecuaria.....	31
3 MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 Ubicación.....	33
3.2 Período y material de estudio	33
3.3 Descripción de la investigación	34
3.4 Definición de variables a evaluadas	41
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1 Inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero en lechería del ITCR sede San Carlos	45
4.2 Sistemas de captación de energía solar térmicos y fotovoltaicos.....	52

5	CONCLUSIONES.....	63
6	RECOMENDACIONES	64
7	BIBLIOGRAFIA.....	65
8	ANEXOS	73

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de algunas de las fuentes de emisión de GEI a considerar en la elaboración del inventario para un sistema productivo lechero.	16
Cuadro 2. Factores y fuentes de emisión consideradas en la elaboración del inventario de GEI de la lechería del ITCR sede San Carlos con año base 2014.	38
Cuadro 3. Descripción de las variables evaluadas en el levantamiento del inventario para las fuentes de emisión de GEI de la lechería del ITCR sede San Carlos.	42
Cuadro 4. Variables evaluadas en la determinación de la eficacia energética de los paneles térmicos y fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.	42
Cuadro 5. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la lechería del ITCR sede San Carlos para el año 2014.	45
Cuadro 6. Medidas de resumen para las variables evaluadas en los paneles térmicos y fotovoltaicos ubicados en la lechería del ITCR sede San Carlos durante los meses de Mayo a Julio del 2015.	52
Cuadro 7. Generación energética, potencial disminución de factura económica y disminución en las emisiones de GEI logrados por los sistemas de captación de energía solar ubicados en el sistema lechero del ITCR sede San Carlos.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de colectores solares instalados en la lechería del ITCR sede San Carlos.	43
Figura 2. Distribución de los termómetros colocados en el sistema de colectores solares.	43
Figura 3. Equipo de paneles fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR sede San Carlos.	44
Figura 4. Distribución porcentual de las fuentes de emisión cuantificadas en el inventario de GEI de la lechería del ITCR Sede San Carlos para el año, 2014.	47
Figura 5. Distribución porcentual de las fuentes emisoras de metano CH ₄ cuantificadas en el inventario de GEI de la lechería del ITCR Sede San Carlos para el año base 2014.	49
Figura 6. Distribución porcentual de las fuentes emisoras de óxidos nitrosos N ₂ O cuantificadas en el inventario de GEI de la lechería del ITCR Sede San Carlos para el año base 2014.	51
Figura 7. Coeficientes de variación en función del tiempo para las variables evaluadas en la producción energética de los paneles térmicos y fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.	54
Figura 8. Temperaturas diarias registradas en el sistema de paneles térmicos instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.	55
Figura 9. Distribución de las frecuencias absolutas y porcentuales para la variable Ganancia de temperatura promedio al día utilizando los colectores solares instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de mayo a julio del 2015.	55
Figura 10. Distribución de las frecuencias absolutas y porcentuales para la variable kWh/día generados por los paneles fotovoltaicos ubicados	

en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de Mayo a Julio del 2015.	56
Figura 11. Comportamiento del equivalente energético generado (kW/h) en función del tiempo por cada sistema de captación solar instalado en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de mayo a julio del 2015.	57
Figura 12. Equivalente energético (kW/h) generado por los sistemas fotovoltaico y térmico instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.	58
Figura 13. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de mayo del 2015.	60
Figura 14. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de junio del 2015.	61
Figura 15. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de julio del 2015.	61

RESUMEN

El sector productor de ganado bovino tiene el importante reto de establecer sistemas productivos sostenibles y amigables con el ambiente; para esto es fundamental conocer el nivel real de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que genera esta actividad. La ganadería juega un papel importante en el fenómeno de calentamiento global liberando principalmente gases como el metano (CH₄) y los óxidos nitrosos (N₂O) subproductos de procesos biológicos intrínsecos de la actividad. En caso de las fuentes energéticas consumidas en el proceso productivo cada una de ellas tiene un potencial de emisiones de CO₂ diferente, por lo que la composición de la matriz de la oferta de energía y las tecnologías de los equipos de consumo determinarán el nivel de emisiones y con ello su impacto ambiental.

En el presente trabajo se cuantificaron las emisiones de GEI provenientes del sistema de producción de leche perteneciente al Programa de Producción Agropecuaria del Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos además se propuso la utilización de sistemas de captación de energía solar, tanto térmicos como fotovoltaicos, como una acción dirigida a la disminución de emisiones provenientes de la matriz energética del proceso productivo.

Como resultados se encontró que para el año 2014 esta lechería emitió aproximadamente 199.10 ton CO₂e lo que equivale a 1.474 kg CO₂e/kg leche corregido por sus contenidos de grasa y proteína (FPCM). Del total de emisiones del periodo el componente animal es responsable del 77.51% (la fermentación entérica de un 61.78%, la gestión del estiércol 12.42% y el composteo de desechos 3.31%), la utilización de fertilizantes sintéticos representa el 12.12% y un 7.06% fue emitido por las coberturas forrajeras. Por último la matriz energética emitió el 3.31% del total (2.71% por consumo eléctrico y un 0.58% por el consumo de combustibles fósiles). Los colectores solares durante el periodo de evaluación del 04 de mayo al 24 de julio del 2015 lograron en promedio una ganancia diaria de temperatura de 22.41 ± 9.28 °C y en el caso de los paneles fotovoltaicos se registró en promedio una producción diaria de 5.49 ± 2.02 kWh.

ABSTRACT

The producers of cattle industry has an important challenge of establishing sustainable production systems friendly to the environment, for this is fundamental to know the real level of emission of the greenhouses gases that are generated by this activity. The livestock farming plays an important role in this phenomenon of global warming releasing gases such Methane (CH₄) and nitrous oxides (N₂O) products of the biological process.

The source of energy that are consumed in the production process each one of them has a different potential of emission of CO₂ this way the composition of the matrix of the energy supply technologies and the equipment will determine the level of the emission and the environmental impact.

In this paper work the GEI inventory belonging to the system of milk production farming program of the Instituto Tecnológico de Costa Rica in San Carlos are quantified also was proposed the system using solar energy thermal and photovoltaic as an action for the reduction of the emission for the production process.

As a result it was found that by the year 2014 this livestock farming release about 199.9.10 ton CO₂ the equivalent to 1.474 kg of CO₂/MILK FPCM. The animal component is the responsible for the 77.51% of the total of the emission (the enteric fermentation 61.78%, manure management 12.42% and composting waste 3.3%) the use of synthetic fertilizers represent the 12.12% and 7.06% that was released by grassland. Finally the matrix energy throw off the 3.31% of the total (2.71% by electric consumption and 0.58% by the fossil fuels). Solar collector during the evaluation period from May 4 to July 24 of the year 2015 achieve an average of daily gain temperature of 22.41 ± 9.28 °C and in the case of the photovoltaic panels it was recorded an average daily production of 5.49 ± 2.02 kWh

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la humanidad es el llamado cambio climático; el continuo deterioro del medio ambiente está amenazando el acceso a recursos no renovables y por ende el bienestar de las próximas generaciones. En el sector agropecuario es bien sabido que la producción de ganado bovino, tanto de leche como de carne, constituye un importante reto en cuanto a establecer sistemas productivos sostenibles y amigables con el ambiente.

El cambio climático al ser un fenómeno que está directamente relacionado con las actividades humanas puede ser susceptible a cambios en pro de revertir la situación presente, pero sobre todo mejorar el panorama a futuro. Si bien es cierto que este proceso de cambio se han venido desarrollando durante los últimos años y se debe a la totalidad de actividades antropogénicas que provan un aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera, no deja de ser un proceso que se podría ir mitigando de forma paulatina abordándolo con consciencia y sobre todo con compromiso.

En nuestra sociedad la ganadería es sinónimo de cultura, generación de alimentos y empleos; por tanto un pilar fundamental de nuestra economía. Visto el cambio en las condiciones climáticas actuales y la cuota que suponen las prácticas en las que se basa esta actividad productiva es necesario examinar de la forma más minuciosa posible las fuentes o procesos de impacto al ambiente. Una vez hecho esto se deben gestionar diferentes prácticas para aprovechar el potencial que tiene una ganadería responsable y consciente en el desarrollo sostenible y mitigación de factores predisponentes al cambio climático.

Un análisis como el descrito anteriormente supone un reto interdisciplinario, abordar la actividad desde el punto de vista de un agroecosistema en el cuál la totalidad de factores involucrados y su integración para un desarrollo amigable con el ambiente son un reto-

Hoy día ante la gran dependencia energética de los combustibles fósiles, cuyo consumo produce altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, es necesario impulsar medidas de uso racional y eficiencia energética por lo que podríamos suponer de forma correcta que una mayor participación de fuentes renovables en la matriz energética, como por ejemplo la energía geotérmica, solar, eólica y biomasa y el descenso en el uso de las no renovables como carbón, petróleo y gas presumen una alternativa viable para mitigar el cambio climático. Sobre la base de estos planteamientos, queda clara la necesidad de optar por sistemas de producción que utilicen fuentes energéticas renovables.

Es importante concebir un futuro cercano basado en el desarrollo sostenible, tanto en los sistemas agropecuarios como las actividades humanas en general. Las fuentes energéticas utilizadas en cualquier proceso productivo poseen un potencial de emisiones de CO₂ equivalente diferente, por lo que, la composición de la matriz de la oferta de energía y las tecnologías de los equipos de consumo (vehículos, equipos industriales y agrícolas, entre otros) determinarán el nivel de emisiones del sistema provenientes del consumo energético y con ello su impacto ambiental en términos de gases de efecto invernadero.

1.1 Justificación del trabajo

El presente trabajo final de graduación nace bajo la inquietud de cuantificar, en términos de gases de efecto invernadero, cuanto está emitiendo el sistema de producción de leche perteneciente a la lechería del Programa de Producción Agropecuaria del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en Florencia de San Carlos.

La especificidad de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector ganadero procedentes del sistema de producción animal difiere de las emisiones de otros sectores, esto como resultado de un conjunto de procesos biológicos inherentes y variables, por lo que el gestionar estas emisiones

inevitables supone un reto. Es por esta razón que en un sistema productivo primario como la actividad lechera el gestionar la disminución de emisiones provenientes de las fuentes de la matriz energética, en una primera fase, supone una mayor facilidad y resultados más cuantificables a corto plazo.

Costa Rica, tal y como aparece en el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 citado por el MINAET (2011), presenta un potencial teórico en el caso de la energía solar de 10 000 MW, del cual el grado de utilización actual es mínimo aproximadamente 0,14 MW. Ante esta situación en este trabajo se propone aplicar en los sistemas productivos lecheros el uso de la energía solar tanto para el calentamiento de agua como en la utilización de equipos eléctricos dentro del sistema.

Basado en esto se propone como una acción dirigida a la disminución de emisiones provenientes de la matriz energética la utilización de un sistema de captación de energía solar cuyo destino sea su uso en el proceso productivo. Esta propuesta se fundamenta en que las condiciones ambientales en la zona suponen un buen rendimiento de estas tecnologías y lo más importante su articulación con el proceso productivo es total dado que tanto la generación proveniente de paneles fotovoltaicos como térmicos puede ser aprovechada en su totalidad debido a la demanda tanto de energía eléctrica como agua caliente en cualquier lechería.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar la huella de carbono en Kg CO_{2e}/Kg leche FPCM y su potencial disminución aplicando sistemas de captación de energía solar en la lechería ubicada en la finca “La Esmeralda” del Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar las diferentes fuentes de emisión de efecto invernadero del sistema de producción de leche ubicado en la finca “La Esmeralda” del Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos para el año base 2014.
- Cuantificar la potencial disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero al implementar sistemas solares de captación térmica y fotovoltaica en el proceso productivo de la lechería de la finca “La Esmeralda” del Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos.
- Registrar el potencial real del sistema de captación térmica y fotovoltaica en la la lechería de la finca “La Esmeralda” del Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Calentamiento global, cambio climático y gases de efecto invernadero

El calentamiento global se puede definir como el aumento de la temperatura superficial de la tierra causado por el crecimiento en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. A su vez el fenómeno denominado cambio climático se define como el conjunto de cambios ambientales debidos al impacto de las actividades humanas, aquellas actividades cuyos efectos trascienden el ámbito local o regional y afectan el funcionamiento global de la Tierra; *“toda modificación del clima habitual, atribuido o no a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante largos periodos de tiempo”* tal como lo delimita el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) citado por Alonso *et al.*, (2012).

Según el Cuarto Informe de Evaluación IPCC se ratifica que *“el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como es evidente el aumento de las temperaturas globales promedio de la atmósfera y los océanos, el derretimiento de la nieve y el aumento global del nivel medio del mar”*. Las temperaturas promedio han tenido un aumento de 0.74°C (0.56 a 0.92) entre los años de 1906 y 2005, y las temperaturas oceánicas se han incrementado en profundidades hasta de 3 000 metros. Con esto queda en evidencia, textualmente, que *“la mayor parte del calentamiento global observado durante el siglo XX se debe muy probablemente (90% de confianza) al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero causado por las sociedades humanas”*; por tanto está en nuestras manos tratar de mitigar este proceso que ya se está dando (Conde y Saldaña 2007).

Es necesario aclarar que el efecto invernadero es un proceso natural y no es más que el calentamiento de la Tierra debido a la retención de calor por ciertos gases en la atmósfera con capacidad absorber y emitir ciertas radiaciones procedentes del sol, este proceso se da para mantener un rango de temperaturas

óptimo para la vida, sin embargo, el proceso de calentamiento global es el incremento a largo plazo de la temperatura media de la atmosfera debido al aumento en las concentraciones en las emisiones de estos gases de efecto invernadero a causa de actividades antropogénicas.

El principal gas de efecto invernadero es el vapor de agua, el resto de gases son denominados gases traza dado que existen en bajas concentraciones en la naturaleza, sin embargo por su potencial de absorción y emisión de radiaciones de onda larga se les atribuye importante fracción de la responsabilidad de la condición térmica de la atmosfera (Lorente 2010).

Según Estrada (2001) la temperatura del planeta está definida por factores como la distancia respecto al sol, su masa y la composición de la atmosfera; en nuestro caso el 78% de los gases en la atmosfera es nitrógeno, 21% oxígeno y 1% otros gases. Entre ese 1% se encuentran los gases de efecto de invernadero (GEI) dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos nitrosos (N_2O), el ozono estratosférico (O_3) además de tres gases industriales fluorados como los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6). Estos gases tienen la capacidad de retener parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre manteniéndola así más caliente lo que ocasiona que la temperatura media aumente gradualmente en respuesta al aumento en sus concentraciones.

Las emisiones de gases de efecto invernadero tienen efecto contaminante debido a las concentraciones que están alcanzando en la atmosfera, no así por su naturaleza. En este sentido los cambios en su abundancia están afectando el balance energético del sistema de cambio climático alterando directamente el efecto radioactivo y propiedades de la superficie terrestre. Es necesario recordar que un contaminante es aquel agente que induce a desequilibrio de forma irreversible (Estrada 2001).

Según indicadores presentados por el IPCC citado por Estrada (2001) del año 1750 a la fecha la concentración de gases de invernadero en la atmosfera ha

aumentado en mayor parte debido a actividades antropogénicas tales como la quema de combustibles fósiles, deforestación y actividades agrícolas. La concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado en un 31% desde entonces (una tasa de crecimiento sin precedente en 20 mil años), además las concentraciones de CH₄ atmosférico han aumentado en un 151% y la de los N₂O en un 17%; siendo en 420 años las tasas más altas de aumento.

Los impactos que el cambio climático provoca en la agricultura y el bienestar humano se puede clasificar según Nelson *et al.*, (2009) en efectos biológicos sobre el rendimiento (granos, pasturas, leche, aparición de enfermedades), consecuencias sobre producción, consumo y precios (relacionado con la oferta/demanda), y los impactos sobre el consumo humano per cápita. Los efectos biológicos del cambio climático, al haber un aumento de las temperaturas ambientales y cambios en los regímenes pluviales van a observarse directamente sobre la producción e indirectamente en los cambios de disponibilidad de recursos como el agua.

En síntesis como consecuencia al aumento en concentraciones de GEI en el siglo XX se ha registrado un aumento de la temperatura media de la atmosfera de 1 °C aproximadamente, se ha dado un aumento en el nivel del mar aumentando entre 10 y 20 cm, los deshielos no polares están produciendo fuertes precipitaciones y sucesos climáticos extremos tales como sequías, lluvias y huracanes en ciertas regiones del mundo cada vez más frecuentes y persistentes además de las alteraciones en las dinámicas biológicas tanto en la etología animal como los procesos fisiológicos de la flora impactando en la producción de alimentos (Estrada 2001).

2.2 Efecto del cambio climático sobre la producción ganadera

Debido a la magnitud de emisiones de GEI provenientes de los diferentes eslabones productivos del sector agroalimentario y las actividades que participan de él indirectamente, desde la perspectiva ambiental, hay una gran influencia de este sector en el deterioro actual del medio ambiente. No obstante el sector

pecuario representa el 40% de la producción agraria total y es la base de subsistencia para más de mil millones de personas en el mundo. Teniendo en cuenta esto y el vínculo territorio-ambiente no todas las actividades de este sector contribuyen de igual manera al detrimento del ambiente, cabe destacar que según la FAO (2009) el sector pecuario es el mayor usuario y administrador del recurso tierra del planeta.

Para empezar a abordar los efectos del cambio climático en la ganadería primero debemos entender que el bienestar del animal como individuo, de una forma muy abstracta, es su estado respecto a las dificultades que tiene que enfrentar en el entorno en que esté y que tan bien o mal hace frente a estas circunstancias. Este estado es medible, se puede cuantificar de diferentes formas utilizando por ejemplo parámetros productivos, parámetros reproductivos, estado de salud entre otros. Estos parámetros están directamente relacionados con las interacciones que tengan el animal con el ambiente en el que se encuentre y su material genético. Es por esto que debemos recordar que el potencial genético de una raza, así como el de cualquier especie animal o vegetal, se expresa en medida a las condiciones ambientales se lo permitan y el ambiente no modifica de forma directa la constitución genética del individuo sin embargo determina el potencial con que se expresa (Cerón-Muñoz y Nápolis 2001).

El principal problema que supone el cambio climático a la ganadería radica en que tanto el bienestar del animal como la productividad están en situación de riesgo debido al rápido cambio de las condiciones ambientales influyendo en el comportamiento y adaptación del animal al medio en pro de una respuesta con vista hacia la sobrevivencia. Desde el punto de vista productivo se podría decir que el clima afecta la producción animal en cuatro sentidos: 1) Impacta sobre la disponibilidad, precio de granos y materias primas para alimentación. 2) Impacta sobre la producción y calidad de pastizales. 3) Tiene efecto directo en el estado del tiempo y fenómenos meteorológicos extremos sobre la salud, crecimiento y reproducción del animal. 4) Existe un cambio en la distribución de enfermedades de las plantas y animales (Alonso *et al.*, 2012).

Lorente (2010) da un enfoque un poco más extenso pero de igual forma puntual a las consecuencias directas del cambio climático diciendo que el modelo de producción tradicional ganadero deberá adaptarse a condiciones menos propicias en donde se presenten fenómenos como el aumento en temperaturas, influyendo en ingestas de alimento menor, menor crecimiento, menores producciones. En cuanto a pastos la usencia o exceso de precipitaciones hará su crecimiento más lento lo que en condiciones de sobreexplotación provocará degradación del recurso tanto forrajero como suelo y supone un aumento en la demanda de insumos como los fertilizantes nitrogenados.

Desde el punto de vista de productividad se puede observar como durante el paso de estos últimos años cada vez es marcadamente más baja en las regiones más cálidas. Este efecto está relacionado directamente con las temperaturas ambientales presentes y como sus cambios afectan procesos metabólicos y de confort animal pero también de forma indirecta a la predisposición a otros factores como los parásitos, enfermedades, forrajes de mala calidad con alto contenido de fibra y bajos en proteína todo esto en conjunto va a deteriorar la calidad del hato y por ende la producción (Echeverria y Miazzo 2002).

La producción tanto de carne como de leche está dada en función del crecimiento normal del animal, en el trópico y subtrópico el desequilibrio térmico ambiente-animal provoca cambios metabólicos en respuesta de adaptación a condiciones ambientales desfavorables y esto, entre otras cosas, lleva a un desarrollo de tejido muscular deprimido sobre todo durante los dos primeros años de vida lo que en la vida adulta del animal influirá directamente sobre el rendimiento (Bavera y Beguet 2003).

En ganadería de leche los efectos más importantes del estrés producido por el calentamiento del ambiente o estrés calórico van desde el crecimiento del ritmo respiratorio provocando pérdida de saliva y energía metabólica, incremento de temperatura corporal a más de 39°C, incremento de las necesidades de agua pudiendo incluso duplicarse en condiciones extremas, decrece la ingestión de

alimento limitando la actividad ruminal y asimilación energética, distorsión de parámetros reproductivos como intervalos de días abiertos cada vez mayores, menores tasas de preñez, menores pesos al nacer, menores ganancias de peso, todo esto dando al traste con las producciones de leche siendo cada vez menores (Mujika 2005).

2.3 Huella de Carbono y metodologías para la estimación de gases de efecto invernadero en ganadería

La Huella de Carbono (HdC) es un indicador integral que representa la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera, tanto de forma directa como indirecta, derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios. Se expresa en toneladas de CO₂ equivalente y es considerada una de las más importantes herramientas para cuantificar las emisiones de dichos gases permitiendo evaluar la presión de las actividades antropogénicas sobre los ecosistemas de remoción y almacenamiento de carbono (Espíndola y Valderrama 2012) (Papendieck 2010) (Guerra 2013).

Dentro de este contexto podemos citar que Costa Rica es el primer país latinoamericano decidido a llegar a la carbono neutralidad nacional, por lo cual es necesario sistematizar todo el conocimiento que se tenga y genere sobre los procesos productivos involucrados en nuestra economía. La estrategia de Cambio Climático de Costa Rica expresa que el 38.2% de las emisiones de CO₂ provienen de la agricultura, entre este porcentaje se incluye la ganadería considerándose como una fuente intensiva de emisión de GEI, principalmente CH₄ y N₂O (MAG 2009). Fundamentado en esta propuesta es necesario que en nuestra área tengamos a mano las herramientas pertinentes para el desarrollo de datos fiables y coherentes con nuestra realidad.

En la actualidad existen tres normativas con alcance internacional y en vigencia que se pueden utilizar para la determinación de la huella de carbono de un sistema productivo; el primero es la normativa PAS2050 *“Especificaciones para la evaluación del análisis del ciclo de vida de las emisiones de Gases de*

Efecto Invernadero de productos y servicios". El segundo "The Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol desarrollado por el ISO)"; y el tercer documento basado en mercados de compensación llamado "Voluntary Carbon Standar" este ultimo desarrollado para tener un enfoque para cuantificación de potenciales bonos de carbono para ser ofrecidos de forma confiable, verificable y monitoreable contando con el apoyo de International Emissions Trading Association (IETA) y The World Economic Forum por ser una normativa sin fines de lucro (Guerra 2013).

Por la complejidad que presentan los sistemas agropecuarios debido a las dinámicas biofísicas que se dan en las fincas algunas emisiones quedan excluidas de este tipo de análisis. No siendo el sector ganadero una excepción se recomienda centrarse en los procesos relacionados directamente con la producción durante el proceso de determinación de la huella de carbono de una finca o proceso productivo (Guerra 2013).

Según INTECO (2006) un inventario de gases de efecto invernadero está compuesto por la cuantificación de la totalidad de fuentes de emisión de GEI, los sumideros GEI de la atmosfera y las remociones o unidades que remuevan dichos gases dentro de los límites operativos y organizacionales definidos para el análisis del sistema productivo.

Las fuentes de emisión de GEI en una organización son aquellas unidades o procesos que liberan este tipo de gases a la atmosfera como resultado de un proceso bien será intrínseco o extrínseco a la producción, a su vez un sumidero es aquella unidad que remueve estos gases de la atmosfera. El concepto emisión de gases de efecto invernadero en este contexto corresponde a la masa total de gases liberada en un determinado periodo de tiempo mientras que la remoción es la masa total secuestrada de la atmosfera en el mismo periodo de tiempo (INTECO 2006).

Se define como factores de emisión (FE) o remoción (FR) de gases de efecto invernadero a los tasas de emisión o remoción de una fuente determinada

que permiten relacionar cada fuente con el total del sistema productivo (FAO 2015).

Estos factores de emisión o remoción relacionan con especificidad todas las variables que pueden influir en la magnitud de emisión o remoción en términos de GEI según la fuente y las condiciones en las que se presente. Lo recomendable al momento de seleccionar los factores de emisión que se utilizaran en un análisis es tener presente que estén acordes con la finalidad del inventario, hayan sido desarrollados de un origen conocido, estén actualizados en el momento de cuantificación, tengan en cuenta la incertidumbre, sean precisos y reproducibles (INTECO 2006).

Según INTECO (2006) para un poder realizar un levantamiento correcto de las fuentes tanto de emisión como de remoción de GEI de un sistema productivo primero debemos definir los límites de la organización misma que puede estar compuesta por una o más instalaciones y cada instalación debe consolidar sus emisiones siguiendo un enfoque de control o de cuota de participación. El enfoque de control considera todas las emisiones y/o remociones sobre las que se tiene control operacional mientras que la cuota de participación correspondiente la organización responde a su parte de remociones y/o emisiones de las respectivas instalaciones.

Una vez definidos los límites de la organización se debe establecer y documentar los límites operativos (emisiones directas, indirectas por energía y otras indirectas), dentro de estos límites se deben identificar las fuentes de emisión y sumideros, seleccionar la metodología con la que se cuantificaran y recopilaran los datos, además de los factores de emisión. Se debe de procurar usar metodologías de cuantificación que minimicen razonablemente la incertidumbre y produzcan resultados exactos, coherentes y reproducibles.

Estas metodologías de cuantificación pueden ser: 1) Basadas en cálculos según datos de la actividad multiplicados por factores de emisión o remoción, uso de modelos, correlaciones específicas, enfoques relacionados con masa. 2)

Medición continua o intermitente de las fuentes de emisión o remoción. 3) Combinación de medición y cálculo. Cuando se usan los datos de la actividad las emisiones o remociones se deben calcular multiplicando estos datos por los factores de emisión o remoción seleccionados y a su vez por los potenciales de calentamiento global de cada gas, así ponderar en términos de CO₂ equivalente.

El potencial de calentamiento global de un gas (PCG) está dado por un factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una unidad con base en la masa de un gas de efecto invernadero determinado esta relación se da en base a la unidad equivalente de CO₂ durante un periodo. En el caso del CO_{2e} o Dióxido de Carbono Equivalente es la unidad en la que se presentan los inventarios y balances de gases de efecto invernadero, equivale a la comparación de la fuerza de radiación de un GEI con el del CO₂, el equivalente de CO₂ se calcula utilizando la masa de un GEI determinado multiplicada por su potencial de calentamiento global según INTECO (2006).

El cálculo de emisiones se puede realizar utilizando diferentes metodologías sin embargo es básico el identificar los alcances que se van a trabajar, con alcances se define la fase del encadenamiento productivo que se van a analizar en el levantamiento del inventario para una estimación correcta del total de emisiones de GEI provenientes del sistema productivo. En el cuadro 1 adaptado de Guerra (2013) e INTECO (2006) se detallan los alcances y fuentes de emisión que se presentan en el análisis de fincas ganaderas.

Es importante al abordar el levantamiento del inventario de GEI tener bien definidos los alcances del análisis, esto nos va a llevar a ser lo más objetivos posibles con la obtención de la información y por tanto se obtendrán resultados coherentes con la realidad del sistema productivo. Conceptualmente las emisiones tanto directas como indirectas del sistema se diferencian por su origen, las emisiones directas o de alcance 1 son aquellas que se producen dentro de los límites definidos para el sistema en análisis y sobre las cuales se tiene cierto grado de control por parte nuestra; por otro lado las emisiones indirectas

(alcances 2 y 3) son aquellas cuyo origen se encuentra fuera del sistema y sobre las cuales no hay control operativo.

Cuadro 1. Clasificación de algunas de las fuentes de emisión de GEI a considerar en la elaboración del inventario para un sistema productivo lechero.

Tipo de emisión	Fuente de emisión	GEI Emitido		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Alcance 1	Transporte de insumos	X		
	Uso de combustibles fósiles en maquinaria	X		
	Aplicación de fertilizantes en pasturas			X
	Fermentación entérica		X	
	Manejo de residuos sólidos y líquidos		X	X
Alcance 2	Utilización de combustibles fósiles para generación de energía eléctrica	X		
	Energía eléctrica utilizada en el proceso productivo	X		
Alcance 3	Fabricación de fertilizantes	X		
	Fabricación de concentrados	X		
	Fabricación de herbicidas	X		
	Fabricación de equipos y maquinarias	X		

Sintetizando un poco sobre lo que proponen las normativas para el levantamiento del inventario de las fuentes de emisión de GEI en un sistema de producción de ganado bovino se recomienda ser lo más puntual en el acceso a la siguiente información según Guerra (2013) y MAG (2013).

I. Caracterización de las zonas de estudio:

A. Historial del uso de suelo: Registrar cambios de uso, buenas prácticas de manejo en especial si ha habido cambio en usos forestales.

B. Temperatura y precipitación media: La estacionalidad afecta la intensidad de emisiones en distintos componentes, suelo, animales, oferta de forraje entre otros.

C. Pendientes: Tomar en cuenta si es una fuente de degradación de pasturas e eficiencia de fertilizantes utilizados.

II. Caracterización productiva de la organización:

- A. Productividad: Registrar la producción de leche diaria por animal y el % de grasa y proteína; además de la producción anual de leche de la finca.
- B. Uso de suelo: Número de hectáreas en uso productivo y otros usos.
- C. Caracterización de la dieta: % de digestibilidad (%DIVMS), % proteína cruda (%PC) de la dieta.
- D. Caracterización de insumos: Uso de fertilizantes nitrogenados, combustibles fósiles, energía eléctrica en el sistema
- E. Caracterización del hato: Registro de vacas secas, vacas en producción, novillos, novillas, ternero y toros reproductores

III. Límites del sistema productivo a analizar:

- A. Alcance 1 de emisiones: Emisiones directas de gases de efecto invernadero de las cuales el propietario tiene control.
- B. Alcance 2 de emisiones: Todas las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por las actividades productivas de origen antropogénico.
- C. Alcance 3 de emisiones: Todas las emisiones indirectas relacionadas hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la cadena productiva.

IV. Determinación del horizonte temporal y levantamiento del inventario:

- A. Horizonte temporal: En caso de lecherías los ciclos productivos tienen relación con los periodos de lactancia lo que incide en la curva de producción durante el año afectado por la estacionalidad.
- B. Levantamiento del inventario: Mediante monitoreo y registro para dar seguimiento a las emisiones en el tiempo.

V. Calidad de información y unidades funcionales:

- A. Información primaria: Entrevistas presenciales para establecer los insumos utilizados, la frecuencia de aplicación, la distancia del centro más cercano de compra de insumos, el tipo de maquinaria utilizado en la finca, sistema de riego y la composición del hato.
- B. Información secundaria: Consulta de literatura e información disponible

C. Proveniente de modelaciones: Los factores de emisión provienen de la metodología (Tier) 1, 2 y 3 del IPCC

Tomando en cuenta todo lo anteriormente citado y una vez elaborado un inventario de GEI fiable y coherente con la realidad del proceso productivo que se esté analizando es posible realizar un balance de gases de efecto invernadero; este balance es una herramienta dinámica que relaciona las entradas, salidas (emisiones) y capacidad de captura (remociones) de los gases que competen. Dicho balanceo puede ser positivo, negativo o neutro; esta condición depende de la intensidad del sistema productivo y la capacidad del capital natural para absorber y almacenar los gases. Esto nos dirá cuál es el impacto real de la totalidad del sistema productivo en un periodo determinado al ambiente (MAG 2009).

El principal objetivo de aplicar esta herramienta es la obtención de una imagen clara sobre las actividades o procesos de mayor decisión, de cuáles pueden ser intervenidos para reducir emisiones dentro de los potenciales técnicos, económicos y de mercado que se permita el sistema productivo. Se entiende como potencial técnico la cantidad de emisiones que se pueden reducir mejorando la tecnología y rendimiento energético utilizando un tecnología o práctica en todas las aplicaciones en que pueda adoptarse técnicamente justificada, sin consideración de su costo o viabilidad práctica. El potencial económico es aquel que permite la reducción o mejora del rendimiento energético de forma rentable y sin obstáculos de mercado. Por último el potencial de mercado es parte del potencial económico para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o mejoras de rendimiento energéticos que puedan lograrse actualmente en las condiciones de mercado existentes, basándose en las políticas y medidas vigentes (MAG 2009).

Una acción dirigida en un proyecto de gases de efecto invernadero es aquella actividad específica implementada por la organización para reducir o prevenir las emisiones directas o indirectas de gases de efecto invernadero. Las acciones dirigidas pueden ser continuas o no y las diferencias en las emisiones o

remociones de un gas de efecto invernadero resultado de ellas pueden ocurrir dentro o fuera de los límites de la organización (INTECO 2006).

2.4 Emisión de gases de efecto invernadero en la ganadería

La ganadería, según la FAO (2009), aporta un 18 % de gases de efecto invernadero del total proveniente de actividades antropogénicas. En resumen el ganado genera un 9 % de las emisiones de CO₂ antropogénicas, un 37 % de las emisiones de CH₄ y un 65 % de las emisiones de N₂O, que en conjunto suponen el 18 % de los GEI citados anteriormente.

En Costa Rica según el MINAET y el IMN (2014) en el Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono para el 2010, la actividad ganadera genera un 62% del total de emisiones de GEI antropogénicas, fragmentados de la siguiente manera: 18% CO₂, 42% CH₄ y 2% N₂O; equivaliendo esto a 2 983 225 toneladas de CO₂ equivalente.

Las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la ganadería se pueden clasificar en: procesos fisiológicos de los animales como la fermentación entérica y el manejo de desechos sólidos y líquidos (CH₄ y N₂O), cambios en usos de suelo para producción de granos o pasturas (CO₂), manufactura y aplicación de fertilizantes nitrogenados (N₂O) y consumo de combustibles fósiles para transporte y maquinaria dentro de la finca (CO₂). La intensidad de dichas emanaciones dependerá de aspectos culturales como el manejo de la finca, cambios tecnológicos y la variabilidad climática que afecta la calidad de las pasturas (Guerra 2013) (MAG 2009).

A continuación se abordan cada una de estas fuentes de emisión como unidades o procesos que liberan GEI hacia la atmosfera de una forma más detallada.

2.4.1 Cambios en usos de suelo

La deforestación causada por el cambio de uso de la tierra es responsable de cerca de la mitad del 18% de GEI que se le atribuyen a la ganadería a nivel

mundial según FAO (2009). El problema radica en que la pérdida de zonas boscosas equivale a pérdida de unidades que absorben y retienen CO₂ para convertirlo en tejido leñoso, a esto se le llama efecto sumidero de carbono, además de que las nuevas coberturas del suelo bien sean pastos o arbustos no absorberán carbono de la misma forma que un árbol.

La ganadería utiliza el 30% de la superficie terrestre lo que corresponde a un 80% del área agrícola total, principalmente en pastizales. En este sentido la actividad pecuaria ocupa un tercio de la superficie cultivable solamente para producir forraje, áreas que han sido deforestadas de forma continua lo que ha eliminado la capacidad de la tierra para actuar como sumidero de carbono, aunado a esto el efecto de un pastoreo mal ejecutado puede causar una elevada nitrificación del suelo que propicie las emisiones de óxidos nitrosos (Lorente 2010).

Uno de los efectos directos de los cambios de uso de suelo es la degradación del recurso suelo como tal. Esto se da debido a que los suelos en uso forestal pueden sustentar una mejor dinámica de microorganismos y nutrientes, dicha dinámica se fundamenta en la abundante incorporación de biomasa proveniente de hojas y ramas, asimismo hay un efecto positivo con la protección a erosión por la abundancia de raíz y protección al impacto directo de la lluvia. Cuando ya no hay árboles el suelo se agota rápidamente a causa de la baja oferta de nutrientes por parte de las nuevas coberturas, caso de los pastos degradados, y la escasa protección del suelo aparte de que en regímenes de pastoreos intensivos la pérdida de nutrientes se acentúa (FAO sf)

También se debe considerar en este apartado como un efecto indirecto de las actividades agropecuarias la tendencia al aumento en tierras agrícolas deforestadas que se están destinando a la expansión de la producción de granos reservados para la producción ganadera, cultivos como la soya y forrajes. En caso de Costa Rica no escapamos a esta tendencia, según datos de la FAO (sf) del 100% de superficie deforestada entre los años 2000 y 2010 cerca de un 90% se destinó al establecimiento de pasturas y el restante 10% a cultivos. Según el

MINAET e IMN (2014) en el año 2010 hubo una emisión de 887 680 toneladas de CO₂ equivalente causadas por la conversión de bosques a pastizales.

Respecto al aumento que se ha dado en las concentraciones de GEI a nivel mundial durante los últimos años, se fundamenta que se deben principalmente al cambio de usos de suelo y la utilización de combustibles de origen fósil. Se estima que el cambio de usos de suelo emite 1.6 ± 1.0 Giga toneladas de carbono al año; en lo que respecta a la ganadería se le atribuye parte de la responsabilidad de que esto se dé por los cambios en el uso de tierra para el establecimiento de pasturas. En Centroamérica para el año 1961 la extensión correspondiente a praderas destinadas a la ganadería era de 9.1 millones de hectáreas y para el año 2001 era de 13.6 millones; misma tendencia se presenta en Sudamérica donde para el año 1961 existían 418.1 millones de hectáreas de pasturas y para el 2001 con 515.9 millones (Ibrahim *et al.*, 2007).

2.4.2 Fermentación entérica y manejo de los desechos

El metano (CH₄) es un gas producto de la fermentación que sufren los alimentos en el rumen del animal, en términos energéticos constituye una pérdida y en términos ambientales la emisión de un GEI; contribuyendo así al proceso de calentamiento y cambio climático global. La producción de CH₄ en rumiantes está influenciada por factores como el consumo de alimento, composición de la dieta, digestibilidad del alimento, procesamiento previo del alimento y frecuencia de alimentación (Bonilla y Lemus 2012).

El CH₄ producido en el rumen es producto de la acción de microorganismos altamente especializados, los cuales son anaerobios obligados del dominio *Archaea* y anteriormente también se consideraban los del dominio *Bacteria*. La producción del CH₄ por estos microorganismos es parte de su metabolismo energético y la mayoría usan el CO₂ como aceptor terminal de electrones en la respiración anaerobia, convirtiéndolo en CH₄. Las condiciones de ausencia de oxígeno, ausencia de luz y presencia de NO₃, S y SO₄ que caracterizan la fermentación de materia orgánica en el rumen conducen a la biogénesis de CH₄.

Así estos microorganismos convierten carbohidratos, proteínas y lípidos en fragmentos de menor peso molecular y estos son utilizados para formar acetato, H₂ y CO₂ los cuales se utilizan en la metanogénesis (Bonilla y Lemus 2012) (Carmona *et al.*, 2005).

Para reducir la producción de CH₄ ruminal se pueden citar diferentes estrategias o propuestas, cada una en respuesta al análisis que se haga en finca y la gestión que mejor se adapte al sistema productivo. Estas estrategias se pueden clasificar de una forma muy general en tres grupos: 1) Disminución de CH₄ en el rumen indirectamente, mediante la defaunación, estimulando la fermentación propiónica en el rumen, disminuyendo la cantidad de carbohidratos estructurales y aumentando la de carbohidratos de fácil fermentación en la dieta. 2) Evaluación de productos que inhiben directamente a las bacterias metanogénicas; utilización de vacunas, utilizando extractos de plantas, ionóforos, antibióticos específicos, bacteriófagos y bacteriocinas. 3) Evaluación de vías alternas para la utilización del H⁺ producido en rumen, con el objetivo de limitar la producción de CH₄. Se han adicionando ácidos orgánicos precursores del propionato y se investigan diferentes bacterias acetogénicas que pueden usar H⁺ y CO₂ en la producción de acetato (Bonilla y Lemus 2012).

La fermentación entérica es una emisión directa del componente animal; en Costa Rica se estima que aproximadamente se emiten al año 1 920 030 toneladas de CO₂ equivalente provenientes del total del hato bovino de las cuales el 24% las emite la ganadería de leche (MINAET y IMN 2014).

Por otro lado para referirnos a la otra fuente de emisión del componente animal, la gestión del estiércol, definiremos estiércol como el excremento animal y su orina es decir material sólido y líquido producido por el ganado (FAO 2015). Por su constitución química durante su descomposición produce N₂O; este gas es producto de la desnitrificación del nitrógeno contenido en la bosta y orina del ganado. Además por la misma descomposición de la bosta se produce CH₄, principalmente en condiciones anaeróbicas, sin embargo las emisiones de este gas son mínimas en condiciones aerobias como la superficie de pastos y campos;

en este aspecto también influye la temperatura a la que se produzca dicha descomposición y de la dieta del animal (Lorente 2010).

El estiércol del ganado está compuesto principalmente de materia orgánica y agua. Bajo condiciones aeróbicas, la materia orgánica se descompone y los productos finales de este proceso son en diferentes proporciones CH_4 , CO_2 y materia orgánica estabilizada. El potencial de producción de CH_4 del ganado depende de la composición específica del estiércol, que a su vez depende de la composición y digestibilidad de la dieta del animal (FAO 2015).

En condiciones de pastoreo se estima que las emisiones de CH_4 provenientes de la gestión del estiércol serán mínimas dado que el grueso del boñigueo se da en los repastos lo que desfavorece el proceso de descomposición que da como producto este gas, por lo que según el IPCC (2006) se puede estimar que la emisión de este gas correspondiente a la actividad oscilaría entre 1 y 2 Kg de CH_4 al año por cabeza animal dependiendo de las condiciones ambientales del sistema en estudio. En Costa Rica se emiten 1 493 toneladas de CO_2 equivalente al año, aproximadamente provenientes de la gestión del estiércol de las cuales la ganadería de leche es responsable del 22% (MINAET y IMN 2014).

2.4.3 Manufactura y aplicación de fertilizantes nitrogenados

En nuestro medio, por nuestros sistemas de producción considerando que los insumos para la producción como los fertilizantes son traídos al sistema productivo ya elaborados y por la complejidad en el análisis que traería el considerar emisiones indirectas provenientes de sus procesos de manufactura abordaremos en este apartado solamente la emisión de N_2O proveniente del proceso de desnitrificación a causa de la utilización del insumo en pasturas.

El nitrógeno aplicado a los cultivos como fertilizante no es aprovechado al 100% por éstos, uno de los mecanismos por el cual se pierde nitrógeno y disminuye su eficiencia al aplicarlo es la desnitrificación, proceso que libera cierta fracción de óxidos de nitrógeno desde el suelo hacia la atmósfera. Esto afecta

negativamente tanto la economía del agricultor como el ambiente; uno de los gases emitidos es el N_2O (Mora *et al.*, 2007).

La desnitrificación biológica es la reducción del nitrato (NO_3^-) o nitrito (NO_2^-) a gases de óxidos de nitrógeno y N_2 molecular por bacterias esencialmente aeróbicas. La nitrificación, es la oxidación biológica del amonio (NH_4^+) a NO_2^- o NO_3^- bajo condiciones aeróbicas. Bajo condiciones limitadas de oxígeno los nitrificantes pueden usar el NO_2^- como electrón terminal aceptor para evitar la acumulación del NO_2^- tóxico, mediante el cual se producen el N_2O y el NO (FAO y IFA 2004).

Al grupo de bacterias que participan en la producción de N_2O se les llama desnitrificantes y tiene el potencial genético de producir por la acción de óxidonitro reductasas, la conversión de NO_3^- hasta llegar a N_2 . Muchas de estas bacterias utilizan compuestos de carbono orgánico (C_{org}) o CO , para crecer y otras pueden hacerlo autotróficamente con H_2 y CO_2 . La tasa de desnitrificación es afectada por diversos factores que modifican la concentración de NO_3^- , C y O_2 en el suelo, así como las poblaciones de bacterias y nutrimentos que éstas requieren (Mora *et al.*, 2007).

Los factores más importantes que influyen en la tasa de desnitrificación son:

- I. El tipo de fertilizante nitrogenado aplicado (N_{org} , NH_4^+ , NO_3^-) que promueve la emisión de N_2O por nitrificación y desnitrificación.
- II. La tasa de mineralización de la materia orgánica la cual produce el NO_3^- que puede desplazarse a capas más profundas de suelo. A menor contenido de materia orgánica el proceso de lixiviación es más lento por ausencia de bacterias ya que el carbono o los compuestos orgánicos base de este elemento son fuente de energía para los microorganismos, aunque hay otros nutrimentos como el mismo nitrógeno en forma de NO_3^- , NH_4^+ y Ca .
- III. Secreción de exudados por las raíces que regulan la dinámica de las poblaciones de bacterias desnitrificantes.

IV. El nivel de oxigenación dado que la óxido reductasa es reprimida por el O_2 , que también inhibe la formación de reductasa probablemente por la competencia de electrones. La reducción de NO_3^- a NO_2^- se observa a baja concentración de O_2 .

V. Contenido de humedad del suelo dado que elevados contenidos hídricos, mayores a 70-80% del agua durante periodos prolongados favorecen la desnitrificación.

VI. Textura del suelo, los suelos de textura arcillosa poseen mayores niveles de materia orgánica o carbono lábil por ende mayor actividad microbiana.

VII. El pH del suelo, la reacción del suelo neutra o ligeramente alcalina promueve la desnitrificación por su efecto positivo en el desarrollo de las bacterias del suelo capaces de producir desnitrificación.

El IPCC (2001) ha propuesto que del nitrógeno aplicado como fertilizante a pasturas se pierde aproximadamente 1.25% como N_2O sin embargo teniendo en cuenta los factores que interfieren en el proceso de desnitrificación sería correcto suponer que este porcentaje de pérdida dependa en términos generales del tipo de suelo, clima, cultivo y manejo (Mora *et al.*, 2007). En Costa Rica se emiten según el MINAET y IMN (2014) cerca de 212 970 toneladas de CO_2 equivalente en óxidos nitrosos (687 ton N_2O) provenientes de 1 265 113 hectáreas de suelos cubiertos con diferentes tipos de pasturas.

2.4.4 Consumo de combustibles fósiles y matriz energética

Dentro de nuestros sistemas productivos actualmente existe una alta demanda de combustibles fósiles. Las emisiones provenientes de este insumo se clasifican como directas y provienen del consumo que realice todo cuerpo motriz que se utilice para labores dentro de la finca. Por ejemplo sierras de motor, bombas de motor, estufas, calentadores que utilicen gas, la flotilla de autos que se utilicen en labores directas de la finca como traer o llevar insumos o animales. En lo que respecta a ganadería la combustión de fósiles emite 5.5 ± 0.5 Giga toneladas al año a nivel mundial (Ibrahim *et al.*, 2007).

Dentro de los gases de efecto invernadero que pueden producir durante el proceso de combustión los combustibles como la gasolina, diésel, gas licuado de petróleo y sus derivados se encuentran tanto el CO₂ como el CH₄ y N₂O; la mayor fracción de emisión corresponde al CO₂ que según el IMN (2015) por cada litro de gasolina se emiten 2.26 kilogramos de este gas, en caso del diésel 2.69 kilogramos y con el GLP 1.61. Los restantes gases se emiten en el orden de los 300 gramos aproximadamente por litro, esto variando entre el tipo de combustible que se use y el estado del equipo en el que se utilice.

La matriz energética de los sistemas ganaderos que han sido evaluados en nuestro país son altamente dependientes de las energías fósiles, esto hace necesario replantear la posibilidad de generar otros tipos de fuentes energéticas que permitan disminuir las emisiones por este componente. Por ejemplo cultivos bioenergéticos y utilización de energías renovables como la solar (MAG 2009).

Dentro de la matriz energética de un sistema productivo se debe de incluir la energía eléctrica que se demande y se use para operar los equipos necesarios que garantizan la eficiencia productiva. 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 y el impacto que tiene al ambiente su generación por terceros.

2.5 Condiciones climáticas y el uso de energía solar

La utilización de energía solar como alternativa para que los sistemas productivos planteen proyectos de disminución de emisiones indirectas de GEI presenta como principal interrogante. ¿Qué cantidad de energía solar llegará al lugar donde se pretende realizar la captación? Para ello es necesario entender qué es y cómo se comporta la radiación solar así como su captación e interacción con el medio ambiente. Los rayos solares son ondas electromagnéticas de energía llamadas radiación solar y este fenómeno es el responsable de que el planeta tierra reciba aproximadamente 1.327 W/m² como aporte energético

continuo. Este valor recibe el nombre de constante solar y al cabo de un año equivaldría si se pudiese acumular tal cual a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustible fósiles del mundo (López 2006).

La declinación del planeta tierra al Sol, 23.5° respecto a su eje, es la razón de que los mayores valores de radiación no se produzcan en el ecuador sino en latitudes por encima y debajo de los trópicos dado que en estas zonas los rayos caen de forma más perpendicular y atraviesan una capa atmosférica más fina hasta la superficie. Establecer con exactitud la cantidad de energía que se puede aprovechar en un sitio concreto requiere de integrar otras variables ambientales como las horas luz, nubosidad entre otras condiciones climáticas. En días nublados la intensidad de la radiación disminuye considerablemente y por tanto el aporte energético, esta relación entre nubosidad y radiación solar de por sí ya es muy compleja pero probablemente sea este el factor de mayor incidencia sobre el cálculo en el aprovechamiento de la radiación y la producción de energía (López 2006)

El planeta tierra recibe del sol aproximadamente unos 1,6 millones de kWh anuales de los cuales solamente un 40% es aprovechable, dicho porcentaje podría suplir o representa varias cientos de veces la energía que se consume en forma mundial siendo esta una fuente de energía descentralizada, limpia e inagotable. Este potencial aprovechamiento energético está condicionado por la intensidad de radiación solar recibida directamente, los ciclos diarios y anuales y las condiciones climatológicas del lugar (Coordinación de Energías Renovables 2008).

Sin embargo no toda la radiación solar que es capaz de llegar hasta la tierra sobrepasa las capas altas de la atmósfera, esto se debe a los procesos de rebote y contacto con diferentes gases presentes en estos estratos. Una tercera parte de la energía solar interceptada en estos niveles de la atmosfera vuelve al espacio exterior, mientras las restantes dos terceras penetran hasta la superficie terrestre. Esto se debe a las proporciones de vapor de agua, metano, ozono y dióxido de carbono, gases de efecto invernadero, presentes en la atmosfera que

actúan como capa protectora. A esta pérdida del aporte energético hay que añadir otras variables que influyen en la cantidad de radiación que llega a un punto determinado, por ejemplo la intensidad de radiación no será igual cuando los rayos solares estén perpendiculares a la superficie que cuando sean oblicuos, tal como ocurre en los polos (López 2006).

En nuestro caso se entendería como energía solar a aquella fracción de la radiación proveniente del sol que mediante su conversión a calor o electricidad se puede aprovechar (Coordinación de Energías Renovables 2008).

Según el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente y Energía y Telecomunicaciones, Costa Rica es un país con un alto potencial en recursos naturales renovables que podrían utilizarse con fines energéticos, sin embargo, nuestro país basa su desarrollo en el uso de los derivados del petróleo. La generación de corriente eléctrica se basa en fuentes renovables como la hidráulica, geotérmica y eólica; existiendo una escasa participación de energía solar. El crecimiento promedio del consumo de hidrocarburos en los últimos 20 años fue del 4,7% anual y el de la electricidad del 5,3% anual (MINAET 2011).

2.6 Equipos de captación de energía solar fotovoltaicos y térmicos

Los paneles solares son dispositivos ideados para aprovechar la energía que llega a la Tierra en forma de radiación solar mediante procesos químicos y físicos. Actualmente existen dos tipos distintos de paneles solares: el primero es el panel solar para el calentamiento del agua que puede ser de circuito abierto y cerrado (colectores solares), el cual a través de un circuito cerrado calienta el agua que es almacenada en un depósito para su posterior uso. El agua de consumo pasa directamente por los colectores solares lo que produce el cambio de temperatura por conducción de calor este sistema reduce costos y es más eficiente (energéticamente hablando) que el fotovoltaico. En las instalaciones de circuito cerrado se distinguen dos sistemas: flujo por termosifón y flujo forzado.

Los paneles solares térmicos tienen un muy bajo impacto ambiental (RES & RUE DISEMINATION 2005) (Khan *et al.*, 2010) (Quirós 2011).

Los paneles fotovoltaicos basan la producción de electricidad en lo que se denomina efecto fotovoltaico, el cual consiste en la producción de voltaje en un material que tenga características semiconductoras mediante la absorción de radiación electromagnética como el haz de luz. Dichos materiales se utilizan para formar lo que se denomina las células fotovoltaicas, bien sean de silicio, telurio de cadmio, seleniuro de cobre e indio, arseniuro de galio y las CdS con cobre; siendo las más utilizadas las constituidas por silicio. En general para ambos tipos de paneles la optimización del aprovechamiento de la energía solar depende de la cantidad y tipo de radiación recibida que varía según la época del año, así como de los materiales utilizados para su captación y de las formas de almacenamiento (EVE *sf*).

Según EVE (*sf*) la duración de un panel fotovoltaico de silicio monocristalino y policristalino es superior a veinticinco años, pero es necesario el recalcar que en instalaciones en las cuales es necesario establecer un sistema de almacenamiento se presenta un problema ambiental derivado. La durabilidad de las baterías es de entre diez y doce años, lo que podría generar un problema ambiental siendo necesario reciclar el material del cual estén hechas en función del sistema de almacenamiento.

La energía fotovoltaica es realmente, contemplando que se trata de sistemas autónomos llegando a encarecer esto la inversión inicial, por mucho la más rentable fuente de energía de origen renovable; se pueden examinar gastos derivados, costos ambientales, rentabilidad económica, inversión en equipo y aun así este tipo de energía se constituye como una excelente oportunidad.

Conviene resaltar como desventaja económica de la implementación de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica con respecto a las convencionales; en primer lugar el contar con un sistema de almacenamiento que supone según EVE (*sf*) entre un 20% y un 30% del costo de instalación, además

los equipos de regulación, control y conversión de la electricidad y por último costos de fabricación del equipo e intermediación.

Al día de hoy la mayor parte de los captadores solares instalados en el mundo tienen como finalidad la producción de agua caliente para uso doméstico. Entre los usos de la energía térmica se pueden anotar como de interés agropecuario la capacidad de calentar fluidos o la producción de calor en multitud de procesos industriales. En la actualidad la energía solar térmica ofrece una solución idónea para la producción de agua caliente sanitaria hasta unos 60 grados centígrados en sistemas simples pudiéndose aumentar con equipos especializados, una alternativa completamente madura y rentable (López 2006).

La generación de energía térmica será más viable en zonas donde sobre todo el número de horas sol sean mayores ya que los captadores solares obtendrán rendimiento superiores cuando los rayos caen de forma más perpendicular, por el contrario en el caso de paneles fotovoltaicos se deberá considerar de mayor forma los valores de radiación difusa porque ellos aprovechan de mayor manera está radiación incluso en condiciones de nubosidad (López 2006).

Está claro que la principal problemática para acumular y aprovechar la energía solar radica en la imposibilidad de coincidir con las horas de necesidad térmica y las de captación de energía; para lo que se han diseñado sistemas de almacenamiento. Es vital señalar que para definir el tipo de instalación y cuál sería la más adecuada se debe tener en cuenta el consumo calorífico que se desea satisfacer, el grado de eficiencia que se desea alcanzar en el sistema y la existencia de sistemas de apoyo o energía convencional, índices de radiación del lugar donde se va a ubicar el equipo y los rendimientos de este (EVE sf).

En general la eficiencia, según López (2006), de un sistema de captura de energía solar estará definido por su curva de rendimiento permitiendo saber cuál es la cantidad de energía que se puede aprovechar en cada situación. Respecto a esto existen normativas oficiales para la homologación de estos equipos en la que se evalúa la curva característica para cada modelo diferente. Esta valoración

se realiza sobre captadores nuevos y de forma puntual no haciéndose representativa del comportamiento del captador a lo largo de su vida útil ya que su eficiencia va a variar de diferente manera con el paso del tiempo según el mantenimiento que se le dé al equipo.

2.7 Utilización de sistemas solares en unidades de producción agropecuaria

Según el INTA (2011) *“Mitigar es pensar cómo la producción de carne y leche debe mejorar su eficiencia energética para reducir las emisiones de GEI por unidad de producto”*. Siendo así que es imperativo el aplicar tecnologías que minimicen este impacto generado por los procesos productivos del sector es aquí donde podemos ver una ventana para la implementación de las tecnologías de captura de energía solar en nuestros sistemas productivos.

Abordando la problemática que representa la sobre dependencia energética de combustibles fósiles en los procesos productivos y la producción amigable con el ambiente; tratando de articular esto al proceso productivo lechero sería posible integrar la producción de energía térmica y eléctrica a ciertos eslabones productivos. Por ejemplo la importancia del tratamiento térmico en la industria láctea radica en la eliminación de los microorganismos y dificultar su desarrollo, pero además, puede funcionar como un método de conservación, así como un método de higienización (Veisseyre 1972).

El tratamiento térmico en productos como la leche es necesario debido a que naturalmente los fluidos animales están contaminados con microorganismos y/o enzimas, los que originan cambios indeseables en el producto durante su almacenamiento. La pasteurización es un proceso térmico utilizado para disminuir en gran parte estos organismos, es usada por consecuencia para aquellos alimentos que son procesados nuevamente o que serán guardados bajo condiciones que minimicen el crecimiento microbiano.

La aplicación de un proceso térmico a una leche de buena calidad se hace con el propósito de hacerla segura para consumo humano y que conserve su

valor nutritivo siendo capaz de sobrevivir en anaquel por un período de diez a veinte días bajo condiciones de refrigeración, es por esto que además de un proceso térmico idóneo es necesario asegurar la asepsia del equipo utilizado para su obtención y manipulación por lo que en caso de los equipos de ordeño automatizados es vital asegurar su adecuada limpieza y mantenimiento (Eubank *et al.* 1993).

En la actualidad existen diversidad de procesos que pueden ser ejecutados con equipos que utilicen conducción de calor por fluidos como parte del buen manejo de productos tales como la leche cruda, así se puede aprovechar sistemas de captación solar térmicos que generen rangos de temperaturas óptimos. Estos equipos especializados que se utilizan para llevar a cabo los procesos térmicos que garanticen un producto de la mejor calidad es necesario asegurar también su correcto mantenimiento y parte de ello se basa en la limpieza, parte de esta limpieza se realiza bajo estándares de temperaturas idóneos que garanticen la eliminación de grasas y prevengan su acumulación como fuente de contaminación del producto y deterioro del equipo. Es por esto necesario recurrir a sistemas de lavado con agua caliente como en el caso de las máquinas de ordeño.

Las buenas prácticas en la manufactura de productos lácteos se da para garantizar la inocuidad de los alimentos y disminuir al mínimo los riesgos asociados al consumo de derivados o leche contaminada con alto potencial de riesgo para el humano, en el caso de la leche se encuentran asociados riesgos microbiológicos por la presencias de *Salmonella*, *E. coli*, *Lysteria monocytogenes*, *C. perfringens*, *Staphylococcus aureus*, *Mycobactxterium tuberculoso*, *Brucella*. Esto implica que a nivel de procesamiento el cumplimiento de programas mínimos de aseguramiento de la calidad lo que lleva a la introducción de las buenas prácticas de manufactura y su complementación con los sistemas de Análisis de Riesgos y evaluación de Puntos Críticos de Control HACCP, como mecanismos para garantizar la inocuidad de los productos (Melendez sf).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

La presente investigación se llevó a cabo en la lechería de la finca “La Esmeralda” del Programa de Producción Agropecuaria (PPA) perteneciente al Instituto Tecnológico de Costa Rica en Florencia de San Carlos, provincia de Alajuela. Esta lechería está asociada a la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L; posee una extensión de 24 hectáreas, con una producción promedio para el año 2014 de 335 kilogramos de leche al día; el gasto de agua caliente oscila entre los 160 litros de agua caliente por día a una temperatura de uso en este caso de 70 grados Celsius.

La lechería se ubica a los 10°21'41" latitud Norte y 84°30'48" longitud Oeste, donde se presenta una precipitación promedio anual de 3640 mm, una temperatura media anual de 25.5 grados Celsius y una humedad relativa media anual de 87% según datos de la estación meteorológica ubicada en la finca con registro desde el año 2000 al 2014.

3.2 Período y material de estudio

Esta investigación se realizó entre los meses de febrero a julio del año 2015. En una primera etapa se trabajó en el diseño y levantamiento del inventario de las fuentes de emisión de GEI involucradas en el proceso productivo de la lechería para el periodo que comprende desde el 1 de enero al 31 de diciembre del 2014, como año de referencia.

Este inventario se realizó considerando las emisiones y reducciones tanto directas como indirectas, dentro de los alcances 1 y 2 que se presentan dentro del proceso de producción de leche. Las emisiones directas que se cuantificaron fueron: fuentes de emisión en combustibles fósiles utilizados en el proceso productivo tales como diésel y gasolina tanto para transporte de insumos como para uso de equipos menores, el componente animal, la utilización de fertilizantes nitrogenados, pasturas y composteo de desechos orgánicos. En caso de las

emisiones indirectas se cuantificó las emisiones provenientes del uso de electricidad.

En una segunda etapa se analizó el diseño e implementación de la infraestructura para la utilizar sistemas de captación solar en la gestión/producción de energía/consumo del sistema del sistema lechero durante los meses de mayo a julio del 2015. En este apartado de la investigación el material de estudio fueron los paneles solares tanto térmicos como fotovoltaicos y su respectiva producción de energía, ambos sistemas de captación de energía solar fueron colocados al costado sur de la planta de ordeño de la lechería.

3.3 Descripción de la investigación

Esta investigación se llevó a cabo para poder determinar la huella de carbono del sistema de producción de leche establecido en la finca La Esmeralda; se siguieron los conceptos para el levantamiento del inventario de gases de efecto invernadero descritos en la normativa INTE-ISO 14064-1: 2006 Primera Edición, Gases de efecto invernadero – Parte 1: especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. Esta normativa es presentada por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), desarrollada por el International Organization for Standardization (ISO) por sus siglas en inglés.

La metodología utilizada para la cuantificación de las fuentes de emisión fue la medición intermitente y extrapolación a un año. Una vez estimadas las fuentes de emisión se calcularon las emisiones multiplicando los datos de la actividad por los factores de emisión correspondientes. Una vez cuantificadas las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de cada fuente aplicando el potencial de calentamiento global de cada gas se estimó el impacto total de emisión en toneladas de dióxido de carbono equivalente (ton CO_{2e}).

Las emisiones de CH₄ provenientes del ganado a partir de la fermentación entérica se calcularon para cada categoría animal con la siguiente formula.

$$\mathbf{Emisiones} = \mathbf{EF}_{(t)} * \mathbf{A}_{(t)} \text{ (Ecuación 1)}$$

Dónde: **Emisiones** = kg de CH₄ al año, **EF_(t)** corresponde al factor de emisión para la población de ganado definida en kg CH₄ por cabeza al año según el IMN 2015, **A_(t)** corresponde a los datos de la actividad en este caso las cabezas de ganado bajo estudio y **t** es la categoría de ganado en estudio.

En el caso de las emisiones de CH₄ producidas por la gestión del estiércol es necesario citar que considerando el manejo de la finca bajo un sistema de pastoreo rotacional y la temperatura media anual de 26.5°C, se trabajó con el factor de emisión para la descomposición de bostas y orinas establecido por la IPCC (2006) de 2 Kg/año de emisión de CH₄ por animal al año. Finalmente se aplicó la ecuación 1.

Para las emisiones de N₂O provenientes de la gestión del estiércol se aplicó un factor de corrección para estimar las emisiones directas e indirectas de esta variable. El factor de corrección corresponde al porcentaje de bosta que se maneja en diferentes sistemas de gestión, boñigas excretadas en pastoreo y boñigas colectadas en corrales de ordeño, este factor de corrección aplica solamente para la categoría Hembras adultas que se encuentren en ordeño, las demás categorizaciones animales se calcularon en un sistema de gestión del estiércol bajo un régimen de pastoreo continuo.

Las emisiones directas de N₂O provenientes de animales en pastoreo se calcularon con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{N_2O} = (\mathbf{N}_{(t)} * (\mathbf{N}_{\text{excreción (t)}} * \mathbf{TAM} / 1000 * 365) * \mathbf{EF}) * 1.57 \text{ (Ecuación 2)}$$

Dónde: **N₂O** = kg N₂O al año, **N_(t)** corresponde al número de animales por categoría **t** de clasificación, **N_{excreción (t)}** índice de excreción de Nitrógeno por 1000 kg de peso vivo animal de cada categoría **t** según IPCC, 2006: Vol. 4, Cap. 10, Tab. 10.19., **TAM** es el peso promedio animal calculado para cada categoría y **EF** corresponde al factor de emisión correspondiente al sistema de gestión de estiércol según IPCC 2006, Vol. 4, Cap. 10, Tab. 10.21.

Para el cálculo de emisiones de N₂O indirectas producto de procesos como la lixiviación y/o volatilización se utilizó la siguiente ecuación:

$$N_2O = ((N_{(t)} * (N_{\text{excreción}(t)} * TAM / 1000 * 365) * FracGas) * EF) * 1.57 \text{ (Ecuación 3)}$$

Dónde: **N₂O** = kg N₂O al año, **N_(t)** corresponde al número de animales por categoría **t** de clasificación, **N_{excreción(t)}** índice de excreción de Nitrógeno por 1000 kg de peso vivo animal de cada categoría **t** según IPCC, 2006: Vol. 4, Cap. 10, Tab. 10.19., **TAM** es el peso promedio animal calculado para cada categoría, **FracGas** son las fracciones por volatilización por animal según el sistema de gestión de estiércol tomado del IPCC, 2006: Vol. 4, Cap. 10, Tab. 10.22. y **EF** corresponde al factor de emisión correspondiente al sistema de gestión de estiércol según IPCC 2006, Vol. 4, Cap. 10, Tab. 10.21.

En el caso de las fuentes energéticas como electricidad y combustibles fósiles, según su categorización se aplicó la ecuación 1, donde los datos de la actividad corresponden a la sumatoria del volumen anual utilizado de cada fuente multiplicada por su correspondiente factor de emisión. De igual forma se aplicó la ecuación 1 para calcular las emisiones por pasturas (datos de la actividad es igual a número de hectáreas por especie analizada) y en el caso de los fertilizantes utilizados los datos de la actividad corresponden al total de nitrógeno puro aplicado al año en el sistema.

Para calcular la emisión correspondiente a la variable Composteras se utilizó la ecuación 1 pero antes se procedió a la estimación de la cantidad de boñiga recolectada de los corrales de ordeño destinada al proceso de compostaje. Para esto se utilizó un factor de boñigueo para animales de ordeño en lecherías de la Zona Huetar Norte en condiciones de pastoreo desarrollado por Paniagua *et al.*, (2005). Dicho factor es de 1 kg de desecho por hora de estancia en corral durante el ordeño. Así se aplicó la siguiente ecuación:

$$Emisión = (A_{(O)} * H_{\text{día}} * F * 365) * EF \text{ (Ecuación 4)}$$

Dónde: **Emisión** = kg de desecho al año, **A_(o)** corresponde al promedio de animales en ordeño al día, **H_{día}** a las horas de ordeño por día y **EF** al factor de emisión correspondiente.

Los factores de emisión utilizados fueron los desarrollados para el sector agrícola por el Instituto Meteorológico Nacional (2015). Las incertidumbres van asociadas a cada factor de emisión que se ha evaluado y en caso de los factores que no tienen una incertidumbre asociada fueron tomados del IPCC y las incertidumbres se encuentran en sus directrices, las cuales se pueden encontrar en la página: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.

Respecto a la información utilizada para la elaboración del inventario y las unidades funcionales utilizadas, se trabajó con información primaria obtenida de entrevistas presenciales para establecer los insumos utilizados, las frecuencias y volúmenes. Así mismo se obtuvo información secundaria mediante la consulta de literatura disponible y también información proveniente de modelaciones, como los factores de emisión provenientes de las metodologías del IPCC.

Dentro de las fuentes de emisión encontradas en el sistema se identificó una pequeña laguna de oxidación la cual tenía como objetivo el tratamiento de los afluentes provenientes del lavado de las instalaciones, agua con boñiga y orinas, sin embargo debido a un mal manejo el proceso no se está dando la correcta degradación de los desechos ni la dinámica de microorganismos idónea para esto; por lo cual se excluye del informe esta fuente de emisión.

Por la complejidad que presentan los sistemas productivos pecuarios en general y su dinámica biofísica se abordaron directamente las variables involucradas en la producción de leche, se procedió a levantar el registro de las fuentes de emisión tal y como se detallan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Factores y fuentes de emisión consideradas en la elaboración del inventario de GEI de la lechería del ITCR sede San Carlos con año base 2014.

	Fuente de emisión		Factor de Emisión			
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
LIMITES OPERATIVOS	Directas (Alcance 1)	Gasolina	2.26 kg/L	0.09765 g/L	0.01959 g/L	
		Diésel	2.69 kg/L	0.1089 g/L	0.02178 g/L	
		Gestión de estiércol	-	2 kg/cabeza al año	**	
		Pastos	Naturales	-	-	0.51 kg/ ha al año*
			Ratana	-	-	3.55 kg/ ha al año
			Brachiarias	-	-	0.53 kg/ ha al año
		Fertilizantes	-	-	1% del Nitrógeno aplicado-	
		Composteras	-	4 g/kg desecho sólido	0.3 g/kg de desecho sólido	
		Fermentación entérica	Terneros	-	20 kg/cabeza al año	-
			Hembra en crecimiento	-	48.69 kg/cabeza al año	-
	Hembra adulta		-	85 kg/cabeza al año	-	
	Macho adulto		-	111.70 kg/cabeza al año	-	
	Transporte de insumos	2.69 kg/L	0.1416 g/L (transporte terrestre)			
Total de emisiones directas del periodo (tCO₂e)						
Indirectas (Alcance 2)	Electricidad	0.117 kg/kWh	-	-		
Total de emisiones indirectas del periodo (tCO₂e)						

Fuente: *Minaet 2014. **Metodología IPCC 2006

Una vez determinadas y cuantificadas la totalidad de emisiones tanto directas como indirectas se utilizó como indicador productivo la relación entre los Kg de CO₂e emitidos y los litros de leche producidos; corregidos por su grasa y proteína (Kg de CO₂e / Litro de leche = \sum CO₂e (t) / FPCM). El contenido de grasa y proteína corregido por la producción total de leche cuyas siglas en inglés son FPCM es un indicador funcional dado que permite medir la cantidad de gases de efecto invernadero que se están emitiendo para producir un litro de leche, se considera que este es el indicador más apropiado para esta relación dado que pondera la calidad de la leche entre diferentes sistemas para este tipo de análisis. La ecuación para calcular FPCM es la siguiente:

$$\text{Kg GPCL} = (0.337 + 0.116 * G + 0.06 * P) * L \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde, **G** corresponde al porcentaje de grasa en leche, **P** al porcentaje de proteína en leche y **L** al total de leche producida por todas las vacas de la finca al año.

Paralelamente, como segunda parte del trabajo, se colocaron los equipos de colección y generación de energía eléctrica para la gestión/producción de energía/consumo en la lechería. Cada módulo instalado en la lechería para los sistemas de calentamiento de agua contó con las siguientes especificaciones, se instalaron dos en total:

- Colectores solares para calentamiento de agua hechos de vidrio templado bajo en hierro tipo difuso, con absorbedor de aluminio tipo selectivo soldados a láser con un aislamiento hecho con lana de roca de 2.5 cm de grosor. Cada colector con una superficie bruta de 2 m² (1.9 m² de superficie útil), una capacidad de flujo de 1.55 litros.
- Tanque acumulador de 150 L de agua (peso vacío de 35 kg, lleno 225 kg). Pipa en acero inoxidable soldado con TIG, aislamiento con espuma de poliuretano de 50 mm cubierto con lámina esmaltada.
- Termómetro de monitoreo de temperatura de salida de los paneles hacia el tanque.

- Base de montaje.
- Sistema de tuberías para agua caliente con sus respectivos dispositivos de paso de agua, “check” que no permita que agua caliente se devuelva.
- La eficiencia teórica de estos paneles es de hasta un 74% según datos del fabricante.

Además se colocó un medidor de agua a la entrada del sistema para poder cuantificar el volumen real de agua caliente consumida y un tanque colector con termostato, dicho tanque con la función de recibir el agua caliente de los dos sistemas de paneles individuales y regular la temperatura de entrega del agua al sistema que la demande mediante resistencias eléctricas, en este caso al sistema de lavado de equipo cuya temperatura requerida es de 70°C.

En caso del módulo instalado para el sistema fotovoltaico contó con las siguientes especificaciones:

- 8 paneles solares fotovoltaicos con células de sílice.
- Conexión a la red en generación distribuida. Destinado a autoconsumo.
- Regulador de carga.
- Inversor.
- Instalaciones varias de conexión.
- Base de montaje en suelo.

Una vez ensamblados los sistemas de captura de energía solar térmicos en la lechería se procedió a la toma de datos mediante el monitoreo de la variable temperatura de entrada del agua al sistema (termómetro 1), temperaturas de salida de los paneles (termómetros 2 y 3) y la de entrada al tanque colector con el termostato (termómetro 4). Estas mediciones se llevaron a cabo utilizando termómetros de mercurio insertados en las tuberías tal como se muestra en la figura 1. Así se midió esta variable tres veces al día, 8:00 am-12:00 pm-5:00 pm, consecutivamente desde el 04 de mayo hasta el 24 de julio del presente año.

Ambos paneles, tanto los fotovoltaicos como los térmicos, se colocaron con una inclinación de 10° respecto al suelo esto según recomendaciones técnicas para captar eficientemente la mayor proporción de energía solar posible, además de su orientación Norte-Sur para recibir radiación solar la mayor cantidad de horas posibles en el día.

Con los datos obtenidos se determinó el cambio de temperatura logrado y con ello se calculó mediante la ecuación 6 su equivalencia en Joules y a cuantos kW/h es equivalente ese mismo trabajo; así tratamos de uniformizar las unidades para tener cuantos kW/h se estuvieron captando en conjunto con los paneles fotovoltaicos y el equivalente energético logrado por los paneles térmicos. En caso del sistema fotovoltaico se descargó el registro de generación diario directamente de la página web <https://enlighten.enphaseenergy.com> y se procedió a su análisis.

La fórmula utilizada para la transformación de ganancia de temperatura fue la de cantidad de calor, a continuación descrita:

$$Q = C_{espc} * \gamma * V * \Delta T \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde **Q** corresponde a la energía requerida para que se dé el cambio de temperatura en Joules, **C_{espc}** es el calor específico del líquido en J/kg°C, **γ** corresponde a la densidad del líquido en kg/m³, **V** el volumen de líquido m³ y **ΔT** es el cambio de temperatura logrado en grados centígrados.

3.4 Definición de variables a evaluadas

Se evaluaron en total 20 variables. Dichas variables están determinadas en función del eje en el cual se trabajaron. Respecto al eje concerniente al análisis de las fuentes de emisión de GEI del sistema se cuantificaron 14 variables detalladas el siguiente cuadro 3. Para la determinación del potencial real de la captación y generación de energía calórica y eléctrica a partir de energía solar se evaluaron las variables descritas en el cuadro 4.

Cuadro 3. Descripción de las variables evaluadas en el levantamiento del inventario para las fuentes de emisión de GEI de la lechería del ITCR sede San Carlos.

Clasificación	Variable	
1. Fuentes de emisión de GEI	Directas	1.1. Gasolina
		1.2. Diesel
		1.3. GLP *
		1.4. Gestión del estiércol
		1.5. Pastos
		1.6. Fertilizantes
		1.7. Composteras
		1.8. Laguna de aguas *
		1.9. Hato
		1.10. Transporte de insumos
	Indirectas	1.11. Electricidad
2. Productivas	2.1. Producción de leche/día	
	2.2. % proteína en leche /día	
	2.3. % grasa en leche/día	

* Variables descartadas del inventario

Cuadro 4. Variables evaluadas en la determinación de la eficacia energética de los paneles térmicos y fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

Tipo	Variable	Método de obtención	Periodo de evaluación
1. Energéticas	1.1. Temperatura del agua a la entrada al sistema	Recolección manual utilizando termómetros	04 de mayo al 24 de julio de 2015
	1.2. Temperatura media de agua caliente		
	1.3. Temperatura máxima del agua		
	1.4. Temperatura mínima del agua		
	1.5. Volumen de agua consumida	Medidor de agua	
	1.6. kW/h producido día	Sensores electrónicos	



Figura 1. Equipo de colectores solares instalados en la lechería del ITCR sede San Carlos.



Figura 2. Distribución de los termómetros colocados en el sistema de colectores solares.

Dónde: 1 termómetro que registra la temperatura de entrada del agua al sistema, 2 y 3 termómetros que registran la temperatura de salida del agua caliente de los paneles y 4 termómetro en la entrada al tanque colector con termostato.



Figura 3. Equipo de paneles fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR sede San Carlos.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero en lechería del ITCR sede San Carlos

En el siguiente cuadro se presenta el inventario de las fuentes emisoras de GEI de la lechería del ITCR en la finca la Esmeralda, San Carlos. Las emisiones se presentan en toneladas de dióxido de carbono equivalentes por año (ton CO₂ e/año). En el caso de la variable Gestión del estiércol la categorización utilizada para el hato fue la misma que para la variable Fermentación entérica.

Cuadro 5. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la lechería del ITCR Sede San Carlos, 2014.

LIMITES OPERATIVOS	Fuente de emisión		Consumo/ año	Unidad	Emisión ton CO ₂ e/año		
	Directas (Alcance 1)	Gasolina		120	Litros	0.27	
		Gestión del estiércol		84	Cabeza	24.72	
		Pastos	Naturales	2	Hectárea	0.32	
			Ratana	10		12.10	
			Brachiarias	11		1.64	
		Fertilizantes		2208	Kilogramos	24.13	
		Composteras			Kilogramos	6.59	
		Fermentación entérica	Terneros		14	Cabeza	5.88
			Hembra en crecimiento		11		11.25
Hembra adulta			58	103.53			
Macho adulto			1	2.35			
Transporte de insumos		331	Litros	0.91			
Total de emisiones directas del periodo (ton CO₂e)					193.69		
Indirectas (Alcance 2)	Electricidad		46143	kWh	5.40		
Total de emisiones indirectas del periodo (ton CO₂e)					5.40		
TOTAL DE EMISIONES PARA EL PERIODO (ton CO₂e)					199.09		

Respecto a las variables productivas en la lechería, con un promedio de ordeño de 34 animales al día durante el periodo evaluado, se entregaron a “Dos Pinos” según registros 130 354 kilogramos de leche con un contenido medio de 4.35% de grasa y 3.24% de proteína. Basados en los datos presentados en el inventario de emisiones y las variables productivas analizadas esto equivale a 1.474 kg CO₂e/kg leche FPCM. En relación a esto se puede decir que es un valor aceptable según lo reportado por la literatura desarrollada en nuestro país dado que en el año 2011 estudios realizados indican que en promedio se emiten 2,3 KgCO₂e/Kg FPCM (contenido de grasa y proteína corregido por la producción total de leche) y 11,5 KgCO₂e/Kg carne en la puerta del sistema productivo tal como en este caso.

Otros estudios realizados en sistemas lecheros de la zona de Santa Cruz de Turrialba determinaron, en promedio, emisiones de 1,2 KgCO₂e/kg FPCM. Se debe de tener en cuenta que estas emanaciones varían con las condiciones climáticas, sistemas productivos y en menor grado por los factores de emisión utilizados en la construcción de la huella de carbono. Por otro lado a nivel global Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) estima las emanaciones de dióxido de carbono, en nuestras condiciones tanto climáticas como productivas, en 2,4 KgCO₂e/Kg FPCM [+/- 26%] a la puerta de la finca (at farm gate) encontrándose las mayores intensidades en zonas de África, Sur Asia y Medio Oriente, con un promedio de 7,5; 4,6 y 3,7 KgCO₂e/Kg FPCM respectivamente (Guerra 2013).

Retomando los datos presentados en el cuadro 1 se observa que el total de emisiones indirectas, electricidad, es un pequeño porcentaje del total de emisiones (3%) sin embargo es necesario aclarar que la cuantificación de esta fuente se hizo mediante el monitoreo del consumo de las instalaciones realizado por Coopelesca R.L., dichas instalaciones también comprenden un laboratorio (Laboratorio Nacional de Carnes) y una sala de frío con dos congeladores industriales. Por lo anteriormente citado podemos inferir que en instalaciones en las cuales solo se emplee equipo de ordeño, tanques de frío y la iluminación

necesaria esta proporción sería evidentemente menor. En este caso hubo una sobreestimación de la fuente, según consultas a productores lecheros de la zona en lecherías convencionales que trabajan con el mismo sistema de ordeño y con equipos como los que están presentes en esta lechería el consumo promedio es de 20 400 kWh al año. Si tomamos este dato como referencia y realizamos una comparación entre la cuota de emisiones provenientes solamente de las fuentes energéticas utilizadas en el sistema, la electricidad sería responsable del 70% de las emisiones en contraste con los combustibles fósiles con un 30%. Esto nos indica que la matriz energética de sistema evaluado en este espacio está basada fundamentalmente en corriente eléctrica.

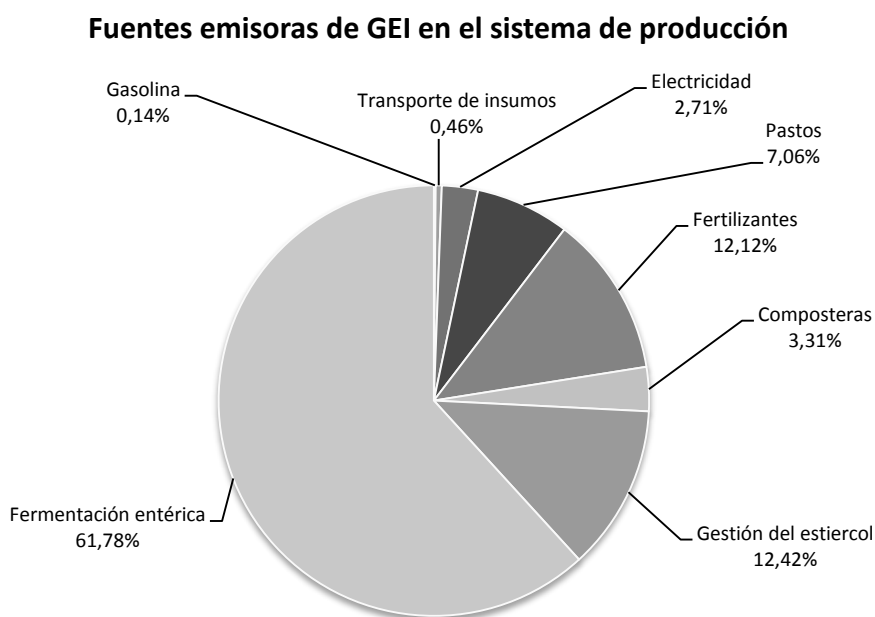


Figura 4. Distribución porcentual de las fuentes de emisión cuantificadas en el inventario de GEI de la lechería del ITCR Sede San Carlos para el año, 2014.

En este sistema se podría atribuir el bajo porcentaje de emisión por combustibles fósiles (emisión directa de alcance 1) al poco uso que se le da al equipo motriz con el que se cuenta, por ejemplo el combustible consumido para el transporte de insumos es mínimo con un 0.46% del total de emisiones (331 litros para el periodo evaluado según registros administrativos). La poca demanda de

transporte se debe a que en el caso de los insumos externos que son necesitados en el sistema están a menos de 2 kilómetros de las instalaciones de la lechería, tanto los concentrados como los fertilizantes y agroquímicos están disponibles en las bodegas del Programa de Producción Animal dentro de las instalaciones del TEC lo que facilita de sobremanera su acceso. En otros sistemas productivos de igual naturaleza sería previsible que esta fuente de emisión tenga una mayor cuota de participación sobre el total de emisiones debido a un mayor consumo de combustibles demandada para el acceso a insumos básicamente.

En la figura 4 también podemos ver como el grueso de emisiones corresponde al componente animal con un 77% del total para el periodo, compuesto por la fermentación entérica, gestión del estiércol y el composteo de bostas, en la literatura se reportan emisiones provenientes de procesos fisiológicos del componente animal que representan hasta un 87% de las emisiones totales, esto en estudios realizados en ganadería tanto de carne, leche como doble propósito en la Región Chorotega (MAG 2009). Esta diferencia en los porcentajes se puede deber a la variación en las condiciones ambientales entre las zonas lo que va a afectar factores como la calidad de los pastos influyendo directamente en las emisiones de CH₄ por fermentación entérica, las dinámicas productivas del sistema, la demanda de insumos en relación a la producción y el componente animal como tal dado que animales alimentados solamente con pasturas como los de engorde o lecherías de bajos insumos van a presentar mayores porcentajes de emisión proveniente de fermentación entérica que animales alimentados parcialmente con granos.

También se reporta según la literatura que animales con acceso a pasturas de mejores calidades van a disminuir sus emisiones por fermentación entérica respecto a animales alimentados con pastos de menor calidad esto debido a la concentración de carbohidratos de mayor digestibilidad por tanto menor pérdida energética durante su digestión. Realizando variaciones en las dietas aumentando paulatinamente tanto la digestibilidad como la proteína cruda se ha demostrado que la mayor reducción marginal de emisiones de gases de efecto

invernadero por fermentación entérica y manejo de residuos se obtiene en un intervalo de 47% DIVMS<X<52% DIVMS y aumentando el %PC de un 7% a un 9%. Sobre estos intervalos, para condiciones como las estudiadas las reducciones marginales decrecen respecto al aumento porcentual de la digestibilidad de materia seca (MAG 2009).

Fuentes emisoras de metano CH₄ en el sistema de producción

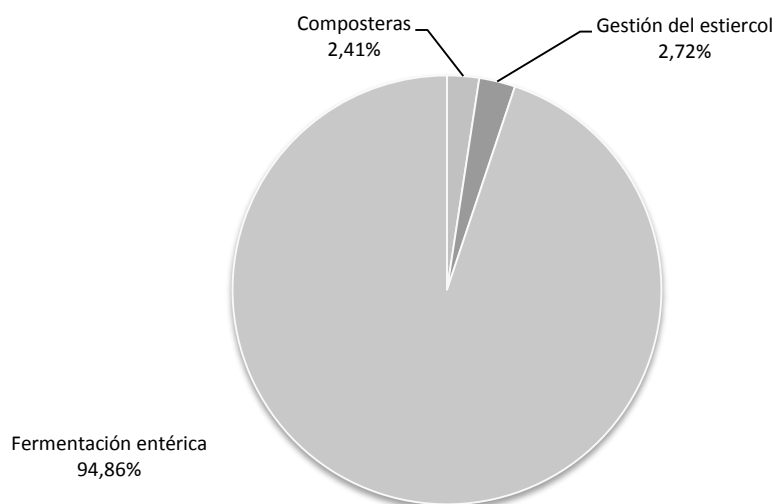


Figura 5. Distribución porcentual de las fuentes emisoras de metano CH₄ cuantificadas en el inventario de GEI de la lechería del ITCR Sede San Carlos para el año base 2014.

En la figura 5 se observa cómo el 95% de la emisión de metano en el sistema se debe a la fermentación entérica, esto es más que previsible dado que las demás fuentes generadoras de CH₄ como los son la gestión de estiércol y el proceso de compostaje por su dinámica e interacción con el ambiente producen poco metano en el proceso de descomposición de la boñiga, básicamente la presencia de oxígeno es el factor determinante para que esto sea así. Las condiciones más favorables para la metanogénesis en el sistema están dentro del animal, en su rumen, las condiciones de ausencia de oxígeno, ausencia de luz y presencia de NO₃, S y SO₄ que caracterizan la fermentación de materia orgánica en el rumen conducen a la biogénesis de CH₄. Así las bacterias del género

Archaea convierten carbohidratos, proteínas y lípidos en fragmentos de menor peso molecular y estos son utilizados para formar acetato, H₂ y CO₂ los cuales se utilizan en la metanogénesis (Bonilla y Lemus 2012) (Carmona *et al.*, 2005).

En este sentido el manejo de la alimentación es fundamental para disminuir estas emisiones como medida de mitigación, por ejemplo la estimulación de fermentación propiónica en el rumen, la disminución de carbohidratos estructurales y aumento de carbohidratos de fácil fermentación, la utilización de aditivos no nutricionales como inhibidores de los microorganismos ruminales pueden ser alternativas viables, ionoforos, aceptores de electrones, compuestos bioactivos de plantas, lípidos dietéticos, enzimas exógenas (Bonilla y Lemus 2012) (FAO 2013).

En Costa Rica el 42% de las emisiones de GEI anuales corresponden al gas metano proveniente de la actividad ganadera, esto equivale a 1 920 030 toneladas de CO₂ equivalente al año provenientes del proceso de fermentación entérica del total del hato bovino de las cuales el 24% las emite la ganadería de leche por otro lado por gestión de estiércol se emiten 1 493 toneladas de CO₂ equivalente al año, aproximadamente, de las cuales la ganadería de leche es responsable del 22% (MINAET y IMN 2014). Si realizamos una relación entre estas dos fuentes, vemos la importancia de gestionar la disminución de las emisiones provenientes de la fermentación entérica como mayor fuente de emisión.

Respecto a las emisiones de N₂O, la fuente que más emite este gas al ambiente son los fertilizantes respecto a las fuentes gestión de estiércol, pastos y composteras. En este sentido se observa que el 60% de las emisiones de N₂O (Pastos y Fertilizantes) son fuentes que se pueden gestionar para optimizar su manejo y disminuir las emisiones, al ser emisiones de alcance 1. Es fundamental tratar de reducir el consumo del insumo fertilizante, y a su vez tener en cuenta los factores que influyen en la emisión de N₂O al ambiente, por ejemplo la relación de materia orgánica influye en la tasa de mineralización, a menores contenidos de materia orgánica los procesos de lixiviación de nitratos son más lentos debido a

las bajas población de bacterias desnitrificantes, caso contrario ocurre en suelos de textura arcillosa dado que poseen mayores niveles de materia orgánica o carbono lábil por ende mayor actividad microbiana. El nivel de oxigenación del suelo, también juega un papel importante en la gestión de este gas, las bajas concentraciones de oxígeno, fundamentalmente en suelos muy compactados o con niveles de humedad mayores a 80% durante periodos prolongados, propician la reducción de NO_3^- a NO_2^- (Mora *et al.*, 2007).

En este caso el suelo juega un papel fundamental dado que la dinámica de liberación de este gas se da en este medio. Respecto a la gestión del estiércol y el composteo de desechos es relativamente poco lo que podemos plantear como alternativas para optimizar su gestión, esto dado que el grueso del boñiguo se da en campo y lo que se logra recoger en corrales se está gestionando de forma aceptable, quizás intermitentemente pero al menos se trabaja de alguna manera quizás un proceso de composteo planificado de mejor manera pueda reducir el 6% correspondiente a esta fuente de emisión.

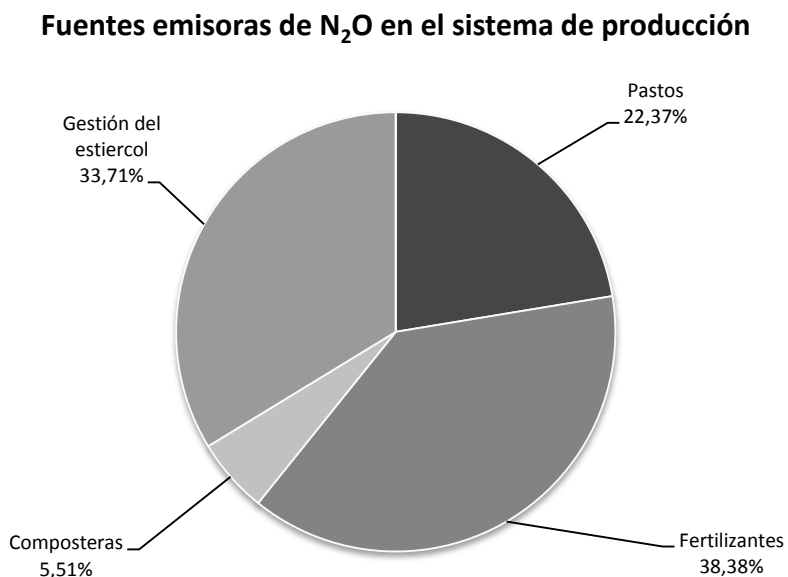


Figura 6. Distribución porcentual de las fuentes emisoras de óxidos nitrosos N_2O cuantificadas en el inventario de GEI de la lechería del ITCR Sede San Carlos para el año base 2014.

Abordando nuevamente el segmento de emisiones pertenecientes a pasturas y fertilizantes, en este tipo de sistemas donde el principal recurso alimenticio para el animal es el forraje es fundamental gestionar un sistema de pastoreo eficiente, que sea capaz de suplir el alimento al animal y retornar al sistema la proporción de materia orgánica asimilable adecuada. Es de esta forma que se dará una disminución en el insumo nitrogenado como fuente nutricional de la pastura. Por tanto se plantea, para esta lechería, como primera opción en las alternativas para mitigar esta fuente de emisión, el establecer un sistema de pastoreo racional y a partir de ahí empezar a gestionar otras alternativas como la alimentación, suelo, componente animal, etcétera.

4.2 Sistemas de captación de energía solar térmicos y fotovoltaicos

En el siguiente cuadro se resumen las variables evaluadas día a día, tanto para los paneles fotovoltaicos como los colectores solares.

Cuadro 6. Medidas de resumen para las variables evaluadas en los paneles térmicos y fotovoltaicos ubicados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de Mayo a Julio del 2015.

Sistema	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Térmico	Temp_entrada	242	27.01	1.76	6.53	23.00	34.00
	Temp_final	242	49.06	10.34	21.08	26.00	75.00
	Δ Temp (C)	242	22.41	9.28	41.40	6.00	47.00
Fotovoltaico	kWh/Día	242	5.49	2.02	36.74	1.24	10.03

Se observa que para la variable temperatura de entrada del agua a los paneles (Temp_entrada) al haber un coeficiente de variación bajo, el menor de todos (6.53), el comportamiento de su media respecto al tiempo u observaciones fue el más homogéneo respecto a las otras variables, esto se debe a que la temperatura ambiente del agua dentro de la tubería está condicionada siempre los mismos factores. Dichos factores pueden ser el material de la tubería, su aislamiento de ambiente (subterránea), volumen de agua en tubería (homogenización de temperatura por conducción) y normalmente no se somete a

condiciones de forma adrede para que responda a fluctuaciones abruptas como las que presenta el ambiente.

En el caso de las otras tres variables evaluadas, Temperatura final (temperatura lograda al salir de los paneles), cambio de temperatura lograda (ΔC) y kWh/Día (kilowatt hora generado al día). Las dos primeras evaluadas en los paneles térmicos y la última en los paneles fotovoltaicos. Se puede observar como los coeficientes de variación son notablemente más elevados y además si se relacionan con sus rangos de mínimos y máximos se infiere la gran heterogeneidad que se podría tener para cada una de ellas en función del tiempo, esto se debe a la relación directa que hay entre las medias obtenidas y las condiciones ambientales presentes durante el proceso de generación, principalmente nubosidad y radiación solar.

Con lo anterior se infiere que el rendimiento en cuestión de ganancia de energía que logrado con este tipo de equipos es complementario a las fuentes energéticas convencionales que se utilizan en un sistema productivo. Queda más que claro el porqué de ello, la gran heterogeneidad observada en este corto periodo de tiempo en el que se realizaron las observaciones fundamenta dicha premisa, sin embargo no se debe descartar el apoyo tanto económico como ambiental que supone la implementación de este tipo de alternativas.

El comportamiento de los coeficientes de variación en el tiempo, sinónimo de la heterogeneidad de los datos, se observa de forma más clara en la siguiente figura. Las diferentes tendencias que presenta son un fenómeno previsible en este tipo de sistemas de captación energética dado que como lo reporta la literatura la optimización del aprovechamiento de la energía solar depende de la cantidad y tipo de radiación recibida que varía según la época del año, así como de los materiales utilizados para su captación y de las formas de almacenamiento (EVE sf).

Coefficientes de Variación (%) en función de las semanas evaluadas

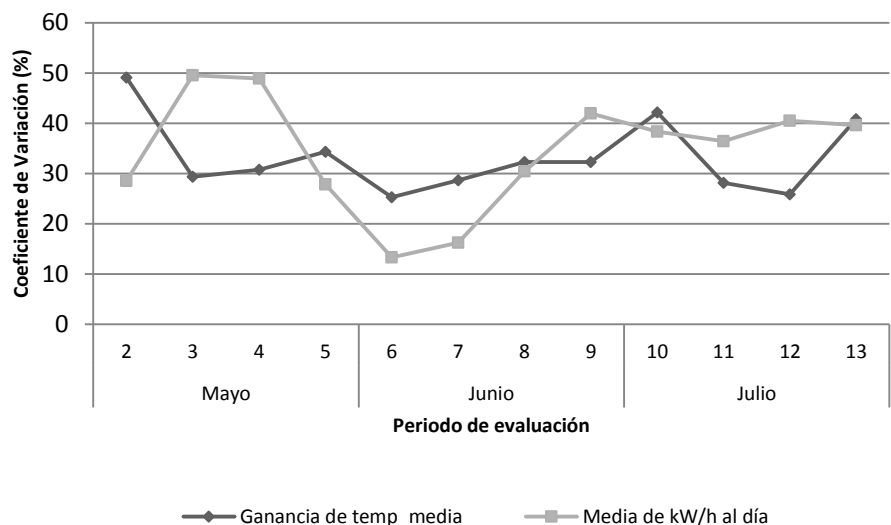


Figura 7. Coeficientes de variación en función del tiempo para las variables evaluadas en la producción energética de los paneles térmicos y fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

En la figura 8 se puede observar el comportamiento de las temperaturas de entrada del agua al sistema de colectores solares y las temperaturas finales logradas al salir de los paneles en función del tiempo. En contraste se presenta la temperatura demanda para el lavado del equipo de ordeño, esto con la idea de observar la relación entre la ganancia de temperatura proveniente de la energía solar captada y el restante que se debe suplir mediante un sistema externo, en este caso con resistencias eléctricas (detalle mensual en anexos 1,2 y 3).

Como se mencionaba anteriormente la gran variabilidad que se observa gráficamente se debe a la fluctuación en el potencial de aprovechamiento energético condicionado por la intensidad de radiación solar recibida directamente, los ciclos diarios y las condiciones climatológicas como la nubosidad (Coordinación de Energías Renovables 2008).

Temperatura del agua en paneles térmicos

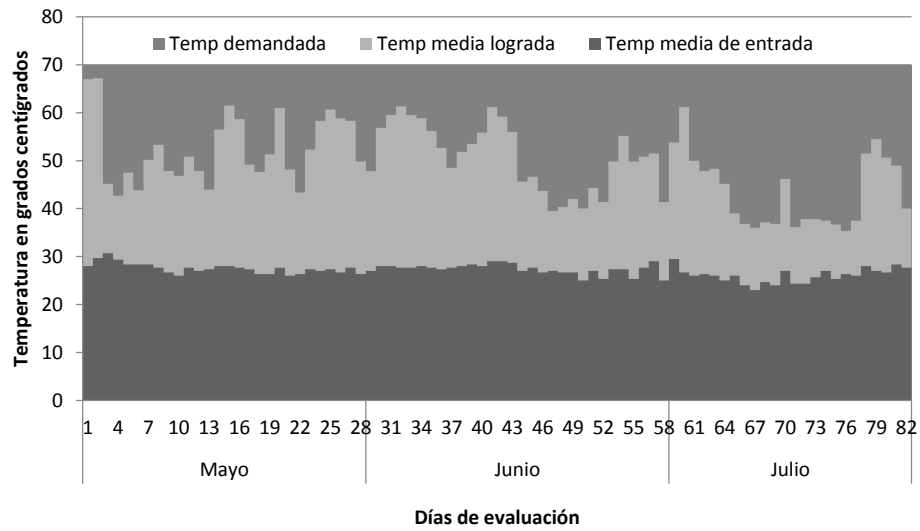


Figura 8. Temperaturas diarias registradas en el sistema de paneles térmicos instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

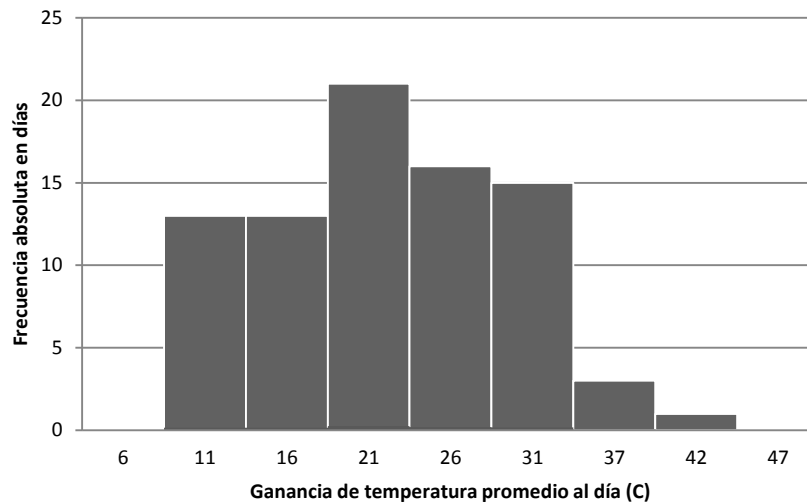


Figura 9. Distribución de las frecuencias absolutas y porcentuales para la variable Ganancia de temperatura promedio al día utilizando los colectores solares instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de mayo a julio del 2015.

En la figura anterior se observa la distribución de las ganancias de temperatura diarias por medio de la implementación de los colectores. Se puede

ver como en 95% de los días evaluados el rango de temperatura ganada oscila entre los 11 y 31°C, analizando un poco más profundo queda claro como en el 68% de los días evaluados el rango de ganancia de temperatura del agua va de los 21 a 37°C.

En el 68% de los días evaluados se logró captar del Sol más o al menos la mitad de energía necesaria para lograr el cambio de temperatura necesario entre la temperatura media de entrada del agua al sistema y la temperatura demandada, este comportamiento se observa en las medias para cada variable con una temperatura de entrada del agua de 27.01°C en promedio y una temperatura final de 49.06°C; supliendo en promedio 22.08°C lo que equivale a un 51% del diferencial necesitado para llegar a los 70°C que necesita el equipo de limpieza de la lechería. En el restante tercio de los días evaluados se registran porcentajes que oscilan entre el 35 y 49% de abastecimiento del diferencial de temperatura promedio necesitado.

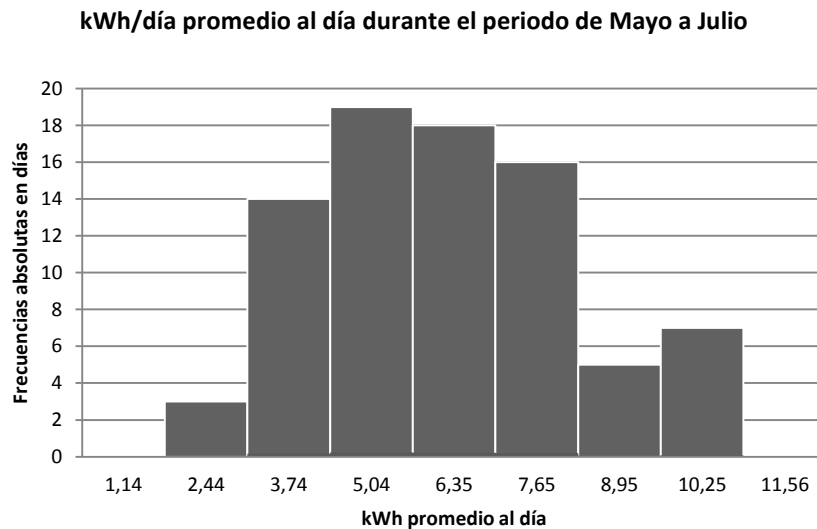


Figura 10. Distribución de las frecuencias absolutas y porcentuales para la variable kWh/día generados por los paneles fotovoltaicos ubicados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de Mayo a Julio del 2015.

En la figura anterior se observa como en el 96% de los días evaluados se produjeron al menos 3 kWh/día, en el 79% de los días se produjo al menos 5 kWh/día y en el 67% de los días evaluados más de 6 kWh/día. Estas cantidades de energía no son nada despreciables en relación a la capacidad de abastecimiento que tendrían en los sistemas de iluminación o ventilación dentro de las instalaciones del sistema productivo. La principal generación de energía eléctrica lograda está entre los 5 y 8 kWh al día, tendencia que se presentó el 65% de los días evaluados.

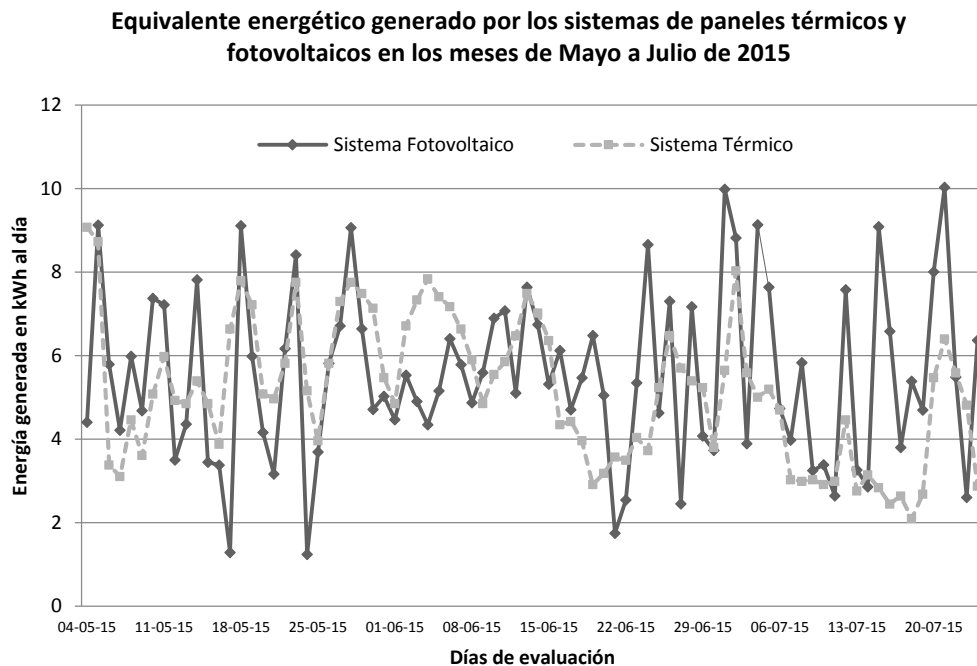


Figura 11. Comportamiento del equivalente energético generado (kW/h) en función del tiempo por cada sistema de captación solar instalado en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de mayo a julio del 2015.

En la figura anterior se observa la acumulación de energía lograda por cada sistema de paneles en kWh al día, una forma indirecta de comparar la eficacia de los paneles entre ellos. Se puede notar que las tendencias en ambos casos son muy similares, esto obedece a que los dos reciben exactamente la

misma radiación solar al estar colocados a la misma inclinación (10 grados respecto a la superficie terrestre) y orientación (Norte-Sur).

Las tendencias son muy similares así como las magnitudes energéticas equivalentes; el cálculo de los kW/h día de los paneles térmicos fue hecho mediante la conversión del diferencial de temperatura logrado a Joules en un volumen de agua igual al promedio del demandado por la lechería durante el periodo de evaluación, 220 L/día (ver anexo 4), y así se pasaron a su equivalente en kWh. Una vez hecho esto se pudo transpolar a CO₂e y tener un dato que nos diera razón de las emisiones indirectas por energía eléctrica que se podrían disminuir en un sistema productivo que implemente este tipo de tecnologías.

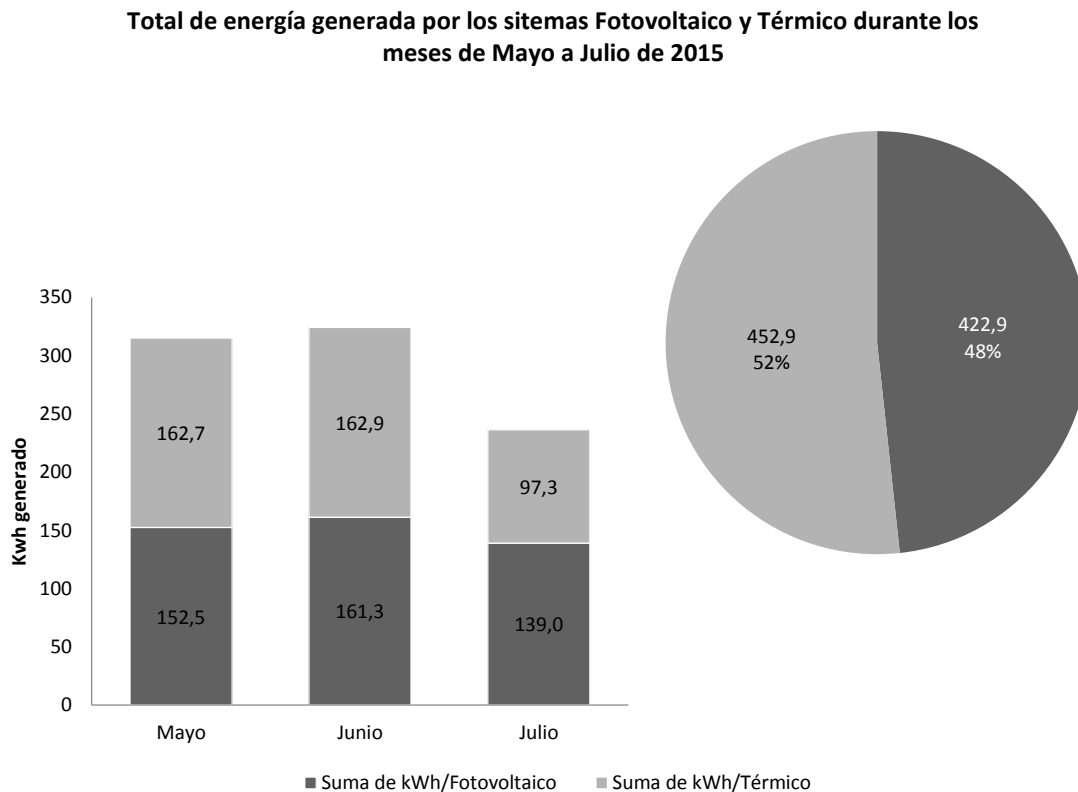


Figura 12. Equivalente energético (kW/h) generado por los sistemas fotovoltaico y térmico instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

En la figura anterior se observa la energía captada por ambos sistemas, en total se estimó la energía generada en 875.80 kWh de los cuales el 52% corresponde a la energía capturada por los paneles térmicos y el restante 48% por los fotovoltaicos. Este total de energía captada, si fuese a sustituir energía eléctrica dentro de un sistema productivo, equivaldría a una disminución de 0.103 ton CO_{2e}. En términos económicos podríamos estar hablando de un monto total de ₡103 332.60 a un precio de ₡118 kWh. Con los datos que se poseen por el momento, realizando la estimación a un año se podría disminuir una cantidad de 0.412 ton CO_{2e} de las emisiones provenientes de la matriz energética de un sistema productivo, en el caso de este sistema productivo esto equivaldría al 4.5% de la electricidad demandada, en sistemas convencionales con consumos registrados de 20 000 kWh al año esto equivaldría a poco más de un 18% de la energía eléctrica demanda.

Cuadro 7. Generación energética, potencial disminución de factura económica y disminución en las emisiones de GEI logrados por los sistemas de captación de energía solar ubicados en el sistema lechero del ITCR Sede San Carlos.

Sistema	Mes evaluado	Equivalente energético generado (kWh)	Disminución potencial de la factura (₡)	Disminución potencial de emisiones de GEI (ton CO _{2e})
Térmico	Mayo	162.7	19 198.60	0.019
	Junio	162.9	19 222.20	0.019
	Julio	97.3	11 481.40	0.012
Fotovoltaico	Mayo	152.5	17 995.00	0.018
	Junio	161.3	19 033.40	0.019
	Julio	139.0	16 402.00	0.016
Total del periodo		875.80	103 332.60	0.103

En términos económicos correspondería a un equivalente de ₡413 330 anuales a un precio de ₡118 el kWh. Es necesario aclarar que esta estimación está sujeta a la gran variabilidad que presenta este tipo de equipos, por lo que el dato entregado podría estar sobre o sub estimando las magnitudes reales de la

utilización de estas tecnologías, sin embargo los sistemas son alternativas tecnológicas eficaces y viables.

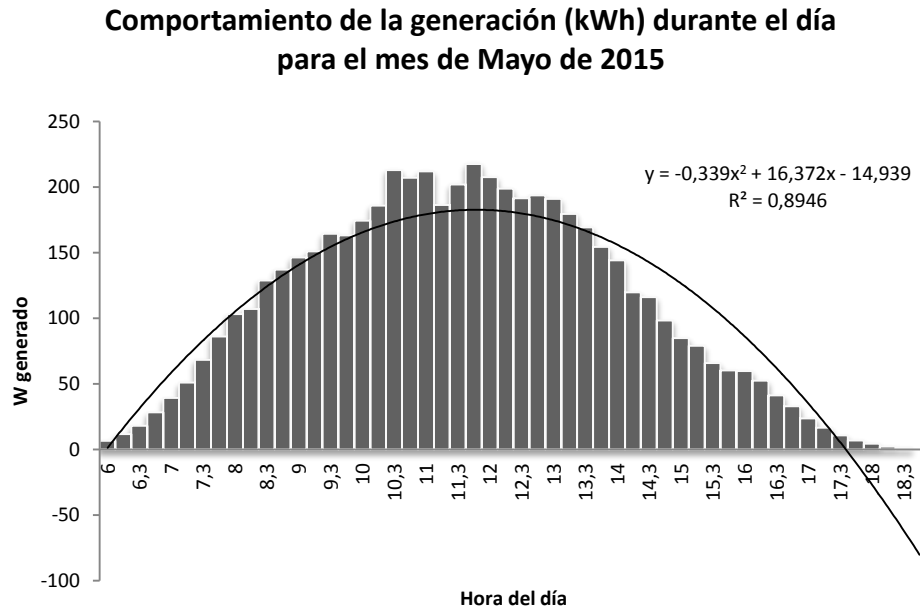


Figura 13. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de mayo del 2015.

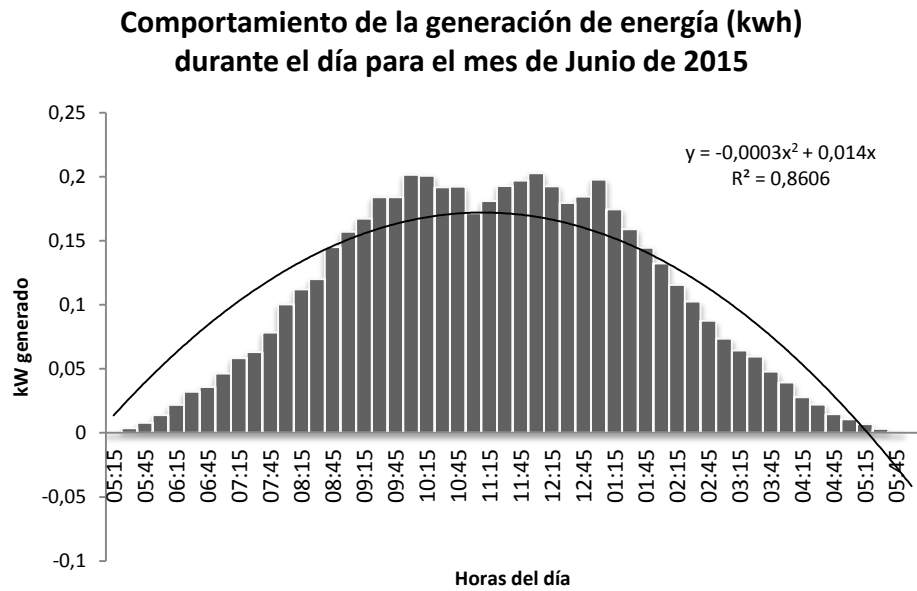


Figura 14. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de junio del 2015.

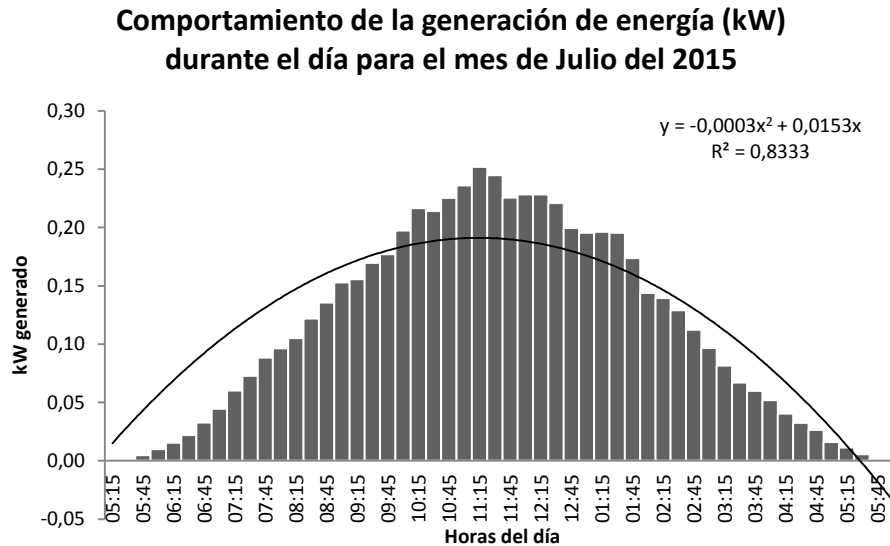


Figura 15. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de julio del 2015.

En las figuras anteriores se observa como el grueso de generación de energía eléctrica proveniente de los paneles fotovoltaicos se da en horas cercanas al medio día tanto en la mañana como en la tarde, esto es previsible dado que para nuestras condiciones es en este momento cuando recibimos la mayor cantidad de radiación solar. Con esto podemos inferir que para poder articular el uso de estas tecnologías con el sistema productivo debemos idear la forma de almacenar energía en caso de una producción mayor a la demandada en estas horas, para así poder disponer de energía a las horas de menor generación.

Respecto al consumo de agua caliente proveniente de los colectores solares se registró una demanda diaria de 220 litros (ver anexo 4), con base a este volumen se hicieron los cálculos de generación equivalente de energía del sistema, sin embargo para poder relacionar el beneficio real en una lechería

estándar es necesario que se cuantifique el volumen demandado para el lavado, esto para poder determinar el aprovechamiento energético. En este caso según recomendaciones técnicas del equipo utilizado en esta lechería se necesitan 35 litros para cada lavado, por tanto dos lavados al día corresponden a 70 litros de agua caliente, a esto debemos adicionar un pre-enjuague o enjuague de leche que se hace también con agua caliente por lo que podríamos estar hablando de un consumo diario cercano a los 140 litros solamente para el lavado de equipo de ordeño.

Existen numerosos controles que deben realizarse en el tambo para lograr una mejor calidad de leche. Entre ellos se encuentran aquellos directamente relacionados con la limpieza de la máquina de ordeñar apuntando a aquellos parámetros a tener en cuenta para evitar el desarrollo de microorganismos y el depósito de residuos. Hay que recordar la forma de estratificación de los residuos en los caños. Estos se depositan en capas de grasa, proteínas y minerales sucesivamente hasta formar una "costra". Un correcto lavado de la máquina de ordeñar se hace para evitar esto, por lo que es vital el lavado con agua caliente para garantizar tanto el buen mantenimiento del equipo como la inocuidad del producto obtenido (Berti 2008).

5 CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en las que se realizó este estudio se proponen las siguientes conclusiones:

- Para el año 2014 el sistema lechero ubicado en la finca La Esmeralda del ITCR sede San Carlos emitió aproximadamente 199.10 ton CO₂e lo que equivale a 1.474 kg CO₂e/kg leche FPCM.
- Del total de emisiones del periodo (199.1 ton CO₂e) el componente animal es responsable del 77.51%; de los cuales la fermentación entérica fue la responsable del 61.78%, la gestión del estiércol de un 12.42% y el composteo de desechos del 3.31%.
- Del total de emisiones del periodo (199.1 ton CO₂e) la matriz energética del sistema productivo fue la responsable del 3.31%, un 2.71% corresponde a la utilización de electricidad y un 0.58% por el consumo de combustibles fósiles.
- La utilización de fertilizantes sintéticos representa el 12.12% del total de emisiones cuantificadas para el sistema en estudio, además el restante 7.06% fue emitido por las coberturas forrajeras o pastos.
- Los colectores solares durante el periodo de evaluación del 04 de mayo al 24 de julio del 2015 lograron en promedio una ganancia diaria de temperatura de 22.41 ± 9.28 °C; en el caso de los paneles fotovoltaicos se registró en promedio una producción diaria de 5.49 ± 2.02 kWh.
- En el trimestre evaluado (mayo a julio) los sistemas de captación y generación de energía solar produjeron el equivalente energético de 875.90 kWh lo que equivale a 0.103 ton CO₂e (¢103 332.60 según las tarifas vigentes en Coopelesca).

6 RECOMENDACIONES

- Crear protocolos para el registro de los datos correspondientes a las fuentes de emisión de GEI dentro del sistema esto para poder emplear metodologías de cuantificación de medición continua.
- Para poder concluir sobre el rendimiento productivo de las tecnologías de captación solar empleadas con mayor rigurosidad científica registrar las variables de interés evaluadas en los sistemas de captación de energía solar tanto térmicos como fotovoltaicos durante al menos un año natural.
- Registrar el consumo energético real de la lechería para poder establecer de forma correcta la relación entre la generación y el abastecimiento del sistema mediante la implementación de los paneles solares.
- Separar el abastecimiento de agua caliente hacia la lechería de las demás instalaciones para así poder seguir cuantificando cuanto se está consumiendo solamente por el lavado del equipo de ordeño.

7 BIBLIOGRAFIA

- Abarca, S. 1997. Ganadería de carne amiga del ambiente y los bosques: una alternativa de producción sostenible (en línea). Consultado el 15 de julio de 2015. Disponible en: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v21n02_285.pdf
- Alonso, M; Ramírez, R; Taylor, J. 2012. El Cambio Climático y su impacto en la producción de alimentos de origen animal (en línea). Consultado el 12 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n111112.html>
- Baver, G; Beguet, H. 2003. Termorregulación corporal y ambientación (en línea). Consultado el 10 de junio de 2015. Disponible en: www.produccion-animal.com.ar
- Berti, K. 2008. Calidad de leche: siempre limpia (en línea). Consultado el 12 de agosto de 2015. Disponible en: http://www.avicultura.com.mx/uploads/temp/Articulo_Calidad_de_leche_siempre_limpia%282%29.pdf
- Bonilla, J; Lemus, C. 2010. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático (en línea). Consultado el 02 de julio de 2015. Disponible en: http://www.uco.es/zootecniaygestion/img/pictorex/21_17_03_Gases_invernadero_y_rumiantes.pdf
- Botero, J. sf. Los sistemas silvopastoriles como sumideros de CO₂ (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: http://www.agronet.gov.co/www/docs_si2/20061127115639_Sistemas%20silvopastoriles%20sumidero%20CO2.pdf
- Carmona, J; Bolívar, D; Giraldo, L. 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativa para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: <http://rccp.udea.edu.co/index.php/ojs/article/viewFile/6/6>

- Cerón-Muñoz, M; Nápolis, C. 2001. Interacción genotipo-ambiente en ganado Holstein colombiano (en línea). Consultado el 10 de junio de 2015. Disponible en: http://www.researchgate.net/profile/Mario_Ceron-Munoz3/publication/273140687_Interaccion_genotipo-ambiente_en_ganado_Holstein_colombiano* Genotype_and_environment_interaction_in_Colombian_Holstein_cattle/links/54f9cdca0cf21ee4fdedf922.pdf
- Conde, C; Saldaña, S. 2007. Cambio Climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación (en línea). Consultado el 06 de junio de 2015. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262014000100009
- Coordinación de Energías Renovables. 2008. Energías Renovables 2008 (en línea). Consultado el 03 de enero de 2015. Disponible en: http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidosdidacticos/publicaciones/libro_energia_solar.pdf
- Echaverri, A; Miazzo, R. 2002. El ambiente en la producción animal (en línea). Consultado el 10 de junio de 2015. Disponible en: www.produccion-animal.com.ar
- Espíndola, C; Valderrama, J. 2012. Huella de Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas (en línea). Consultado el 11 de julio de 2015. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci_arttext
- Estrada, M. 2001. Cambio climático global causas y consecuencias (en línea). Consultado el 06 de junio de 2015. Disponible en: http://www.academia.edu/6789690/Cambio_clim%C3%A1tico_global_causas_y_consecuencias

Eubank, R; Davis, A. 1993. Pasteurización de la leche. Controles y exámenes (en línea). Consultado el 20 de noviembre de 2014. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CDsQFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.salud.gob.mx%2Funidades%2Fcdi%2Fdocumentos%2FDOCSAL4935.doc&ei=BMRuVPbNO4egNrfRgsAE&usq=AFQjCNHLpzbQt35C54xiIMz_PnP4t-MQZA&sig2=C5R_w9ZP5juFEy9k6nz0A&bvm=bv.80185997,d.eXY&cad=rja

EVE (Ente Vasco de la Energía). sf. La Energía Solar (en línea). Consultado el 03 de enero de 2015. Disponible en: <http://www.eve.es/CMSPages/GetFile.aspx?guid=62739949-bde7-4cdc-bcb4-04145ba9b511>

FAO. 2002. Captura de carbono en suelos para un mejor manejo de la tierra (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsrr96s.pdf>

FAO. 2009. El estado mundial de la Agricultura y la Alimentación (en línea). Consultado el 12 de mayo de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/i0680s/i0680s.pdf>

FAO. 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera (en línea). Consultado el 14 de junio de 2015. Disponible en: www.fao.org/3/a-i3288s.pdf

FAO. 2015. Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4260s.pdf>

FAO. sf. Ganadería y deforestación (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0262s.pdf>

- FAO; IFA. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y N₂O provenientes de las tierras agrícolas (en línea). Consultado el 10 de julio de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-y2780s.pdf>
- Guerra, L. 2013. Metodología para el análisis de la huella de carbono a través del análisis de ciclo de vida de sistemas lecheros de Costa Rica (en línea). Consultado el 20 de diciembre de 2015. Disponible en: <http://gamma.catie.ac.cr/ecleds/wp-content/uploads/2013/04/Metodologia-de-HC-LCA140420131.pdf>
- Hernández, A. 2010. Tratado de nutrición: Composición y calidad nutritiva de los alimentos. 2 ed. Madrid, España. Medica Panamericana. 812 pag.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; 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 (en línea). Consultado el 10 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.cipav.org.co/pdf/red%20de%20agroforesteria/Articulos/almacenamiento%20de%20carbono%20en%20el%20suelo%20y%20la%20biomasa%20arborea.pdf>
- IMN. 2015. Factores de emisión GEI, quinta edición (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/factores-de-emision-gei-quinta-edicion>
- INTA (Instituto nacional de Tecnologías Agropecuarias). 2011. Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación. Consultado 11 marzo del 2013. INTA Informa. <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=6579>
- INTECO. 2006. INTE-ISO 14064-1. Gases de efecto invernadero – Parte 1: especificación con orientación, a nivel de organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. Primera Edición. San José, Costa Rica. 34p

- IPCC. 2006. Base de datos de factores de emisión (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>
- ITC (Centro de Comercio Internacional). 2012. Normas de la huella de carbono de productos agrícolas (en línea). Consultado el 06 de enero de 2015. Disponible en: <http://www.intracen.org/uploadedFiles/intracenorg/Content/Publications/Product%20Carbon%20Footprinting%20Spanish%20for%20web.pdf>
- Jiménez, A; Reyes, J; Silveira, M. 2015. Secuestro y Distribución de Carbono Orgánico del Suelo Bajo Diferentes Sistemas de Manejo de Pasturas (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/SS/SS56400.pdf>
- Keating, P. 1999. Introducción a la lactología. 2 ed. México. LIMUSA. 313 pag.
- Khan, M; Abdul Malek, A; Mithu, M; Das, D. 2010. Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. International Journal of Sustainable Energy. Vol 2, No 3, sep 164-177.
- López, M. 2006. Energía solar térmica (en línea). Consultado el 03 de enero de 2015. Disponible en: http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Energia_Solar_Termica.pdf
- Lorente, A. 2010. Ganadería y Cambio Climático: Una influencia recíproca (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: <http://web.ua.es/es/revista-geographos-giecryal/documentos/articulos/no-3-2010-art-lorente-saiz.pdf>
- Madrid, A. 1996. Curso de industrias lácteas. 1 ed. Madrid, España. Mundi-Prensa. 604 pag.

- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2009. Determinación del balance de gases de efecto invernadero en fincas ganaderas de la Región Chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad (en línea). Consultado el 05 de enero de 2015. Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00202.pdf
- MAG. 2013. Procedimiento para el balance de GEI del Piloto Nacional. Programa Nacional de Ganadería Baja en Carbono, Ministerio de Agricultura y Ganadería. 9p
- Martínez, E; Fuentes, J; Acevedo, E. 2008. Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-27912008000100006&script=sci_arttext
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Consultado 12 marzo del 2013. FAO Sala de Prensa. <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- Melendez, sf. Buenas prácticas de manufactura en la industria láctea (en línea). Consultado el 21 de noviembre de 2014. Disponible en: <http://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/agroalimentaria/020.pdf>
- MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones). (2011). VI Plan Nacional de energía 2012-2013 (en línea). Consultado 12 de marzo del 2013. Disponible en: http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- MINAET y IMN. 2014. Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono para el 2010 (en línea). Consultado el 14 de junio de 2015. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/inventario-nacional-de-gases-de-efecto-invernadero-y-absorcion-de-carbono-2010>

- MINAET. 2011. VI Plan Nacional de energía 2012-2013 (en línea). Consultado 12 de marzo del 2013. Disponible en: http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf
- Montenegro, J; Abarca, S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones (en línea). Consultado el 12 de julio de 2015. Disponible en: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v26n01_017.pdf
- Mora, S; Gavi, F; Peña, J; Pérez, J; Tijerina, L; Vaquera, H. 2007. Desnitrificación de un fertilizante de lenta liberación y urea+fósforo monoamónico aplicados al trigo irrigado con agua residual o de pozo (en línea). Consultado el 14 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023103>
- Mujika, I. 2005. El estrés calórico. Efectos en las vacas lecheras (en línea). Consultado el 05 de junio de 2015. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/clima_y_ambientacion/76-estrescalorico.pdf
- Nelson, G; Rosegrant, M; Koo, J; Robertson, R; Sulser, T; Zhu, T; Ringler, C; Msangi, S; Palazzo, A; Batka, M; Magalhaes, M; Valmonte, R; Ewing, M; Lee, D. 2009. Cambio climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaption.pdf
- Paniagua, W; Muñoz, G; Ramírez, C; Campos, J; Guzmán, T. 2005. Manejo Alternativo de Lecherías integradas en Sistemas Agropecuarios de bajos insumos externos. 53 p
- Papendieck, S. 2010. La Huella de Carbono como nuevo estándar ambiental en el comercio internacional de agroalimentos (en línea). Consultado el 10 de julio de 2015. Disponible en:

http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Documents/2011/Novedades/Huella_Carbono/Panpendieck.pdf

Quirós, L. 2011. Calentando el agua y cuidando el ambiente (en línea). Consultado el 10 de febrero de 2013 Disponible en: <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>

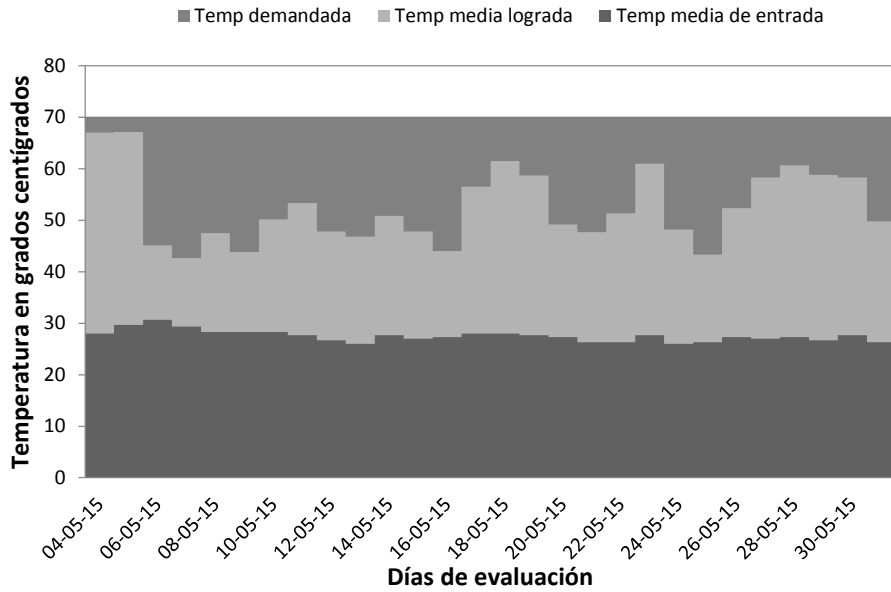
Ravelo, S; Gavi, F; Peña, J; Pérez, J; Tijerina, L; Vaquera, H. 2007. Desnitrificación de un fertilizante de lenta liberación y Urea+Fosfato Monoamonónico aplicados a trigo irrigado con agua residual de pozo (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023103>

RES & RUE DISEMINATION. 2005. Energía solar térmica. Proyecto de circulación natural y forzada (en línea). Consultado el 10 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.cesu.es/temas>

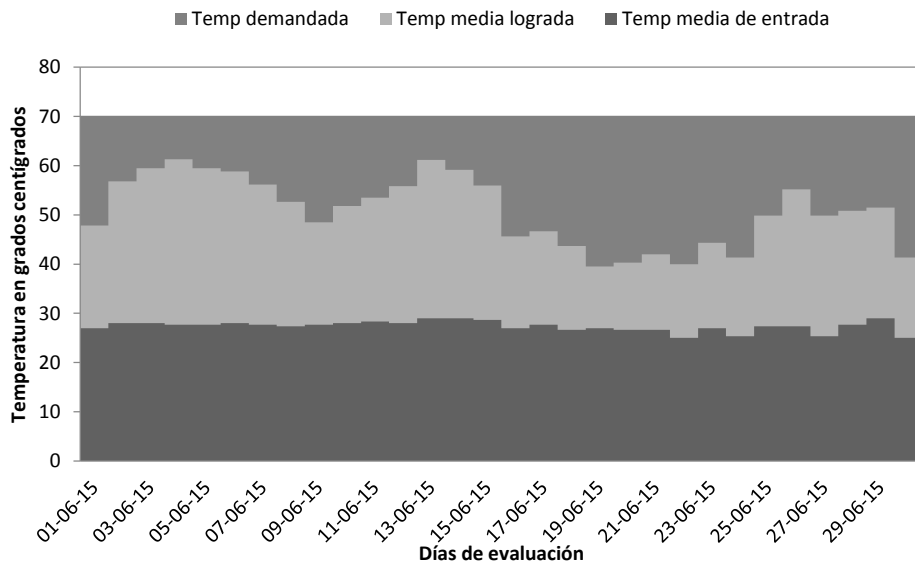
Veisseyre, R. 1972. Lactología técnica. Trads. J Burgos; JS Teresa. 2 ed. Zaragoza, España. ACRIBIA. 643 pag.

8 ANEXOS

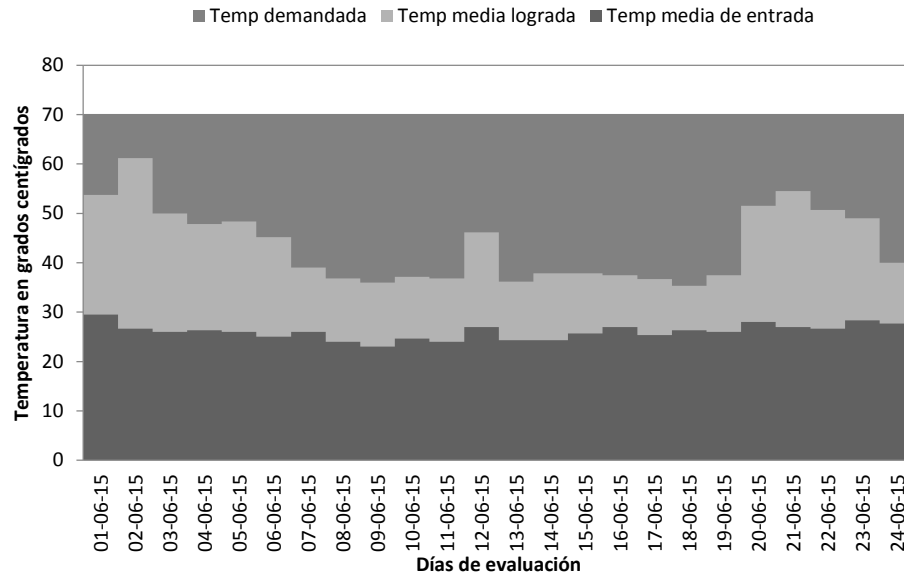
Anexo 1. Comportamiento diario del cambio de temperatura del agua logrado por el sistema de paneles térmicos para el mes de mayo de 2015.



Anexo 2. Comportamiento diario del cambio de temperatura del agua logrado por el sistema de paneles térmicos para el mes de junio de 2015.

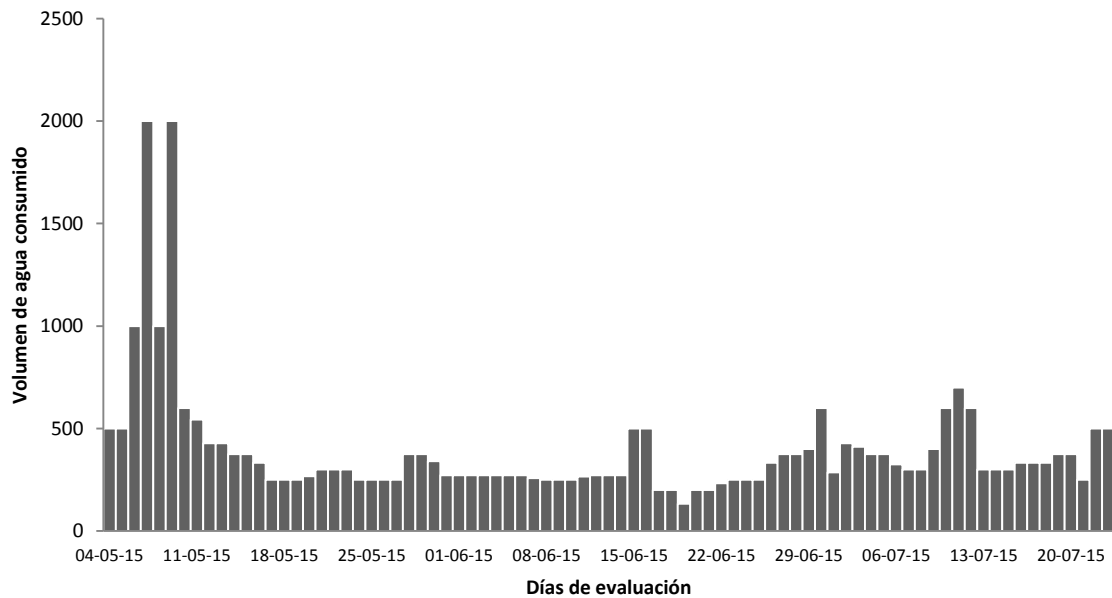


Anexo 3. Comportamiento diario del cambio de temperatura del agua logrado por el sistema de paneles térmicos para el mes de julio de 2015.

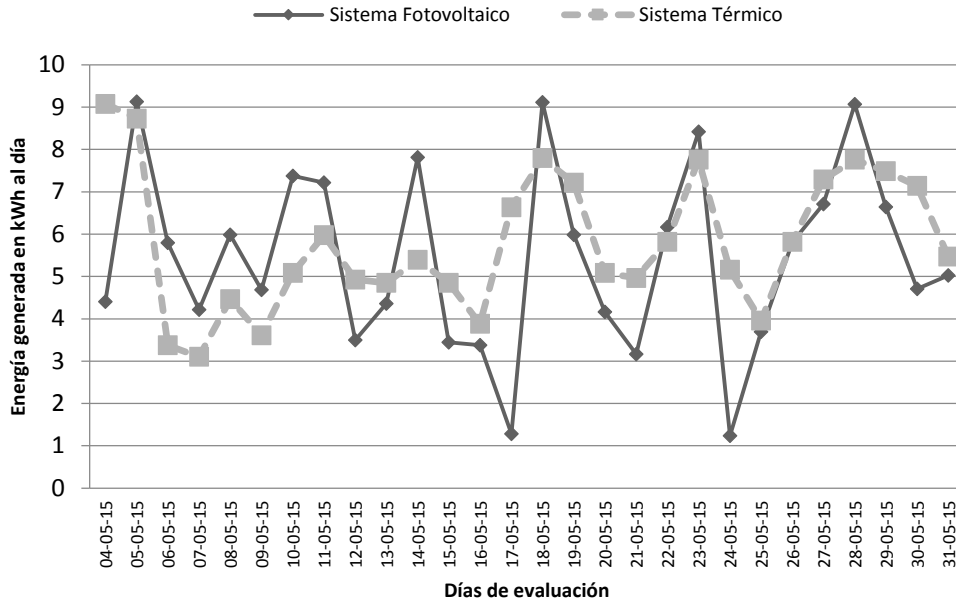


Anexo 4. Comportamiento del consumo de agua destinada al lavado de equipo dentro de la lechería y laboratorios abastecidos por los colectores solares.

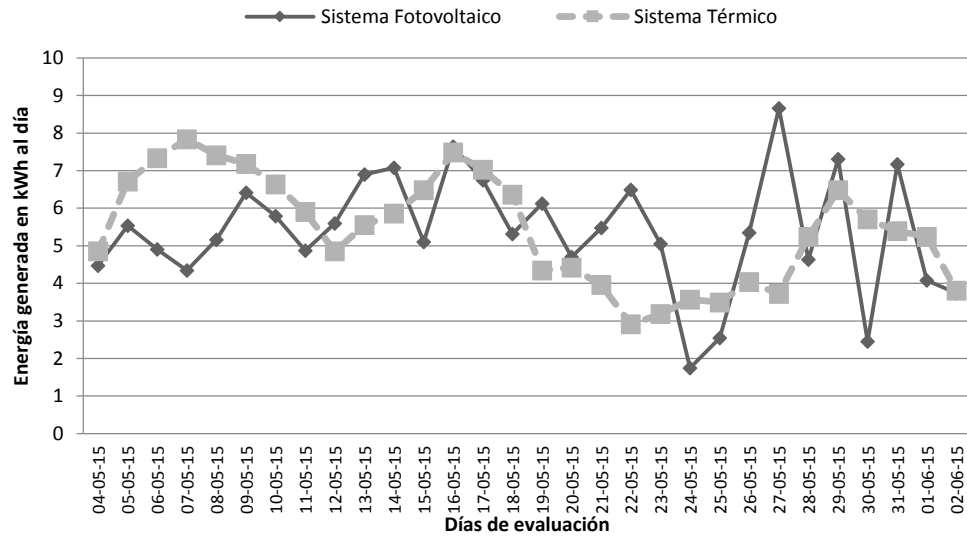
Consumo de agua para el lavado diario



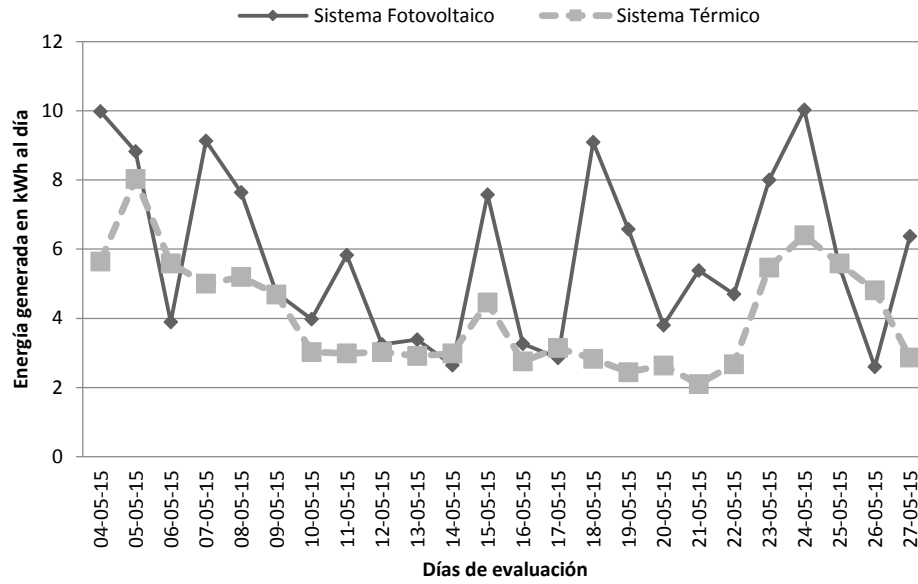
Anexo 5. Comportamiento del equivalente energético generado por los paneles térmicos y fotovoltaicos para el mes de mayo de 2015.



Anexo 6. Comportamiento del equivalente energético generado por los paneles térmicos y fotovoltaicos para el mes de junio de 2015.



Anexo 7. Comportamiento del equivalente energético generado por los paneles térmicos y fotovoltaicos para el mes de julio de 2015.



Anexo 8. Medidas de resumen para las variables estudiadas en los sistemas de captación de energía solar.

Mes	Semana	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Mayo	2	Termometro_1 (C)	21	28.95	1.56	5.4	27	34
Mayo	2	Temp_final colectores	21	52.14	11.53	22.11	35	73
Mayo	2	Δ Temp (C)	21	23.19	11.39	49.1	6	44
Mayo	2	kWh/Día	21	5.94	1.7	28.57	4.21	9.13
Mayo	3	Termometro_1 (C)	21	27.19	1.12	4.13	25	29
Mayo	3	Temp_final colectores	21	49.81	7	14.05	41	73
Mayo	3	Δ Temp (C)	21	22.62	6.64	29.34	14	46
Mayo	3	kWh/Día	21	4.43	2.19	49.52	1.28	7.81
Mayo	4	Termometro_1 (C)	21	27.05	0.97	3.6	25	28
Mayo	4	Temp_final colectores	21	54.19	8.93	16.47	43	72
Mayo	4	Δ Temp (C)	21	27.14	8.34	30.74	18	44
Mayo	4	kWh/Día	21	5.47	2.67	48.93	1.24	9.12
Mayo	5	Termometro_1 (C)	21	26.95	0.67	2.48	26	28
Mayo	5	Temp_final colectores	21	54.81	9.96	18.17	39	70
Mayo	5	Δ Temp (C)	21	27.86	9.57	34.34	12	43
Mayo	5	kWh/Día	21	5.95	1.66	27.86	3.69	9.07
Junio	6	Termometro_1 (C)	21	27.71	0.85	3.05	26	29
Junio	6	Temp_final colectores	21	57.48	8	13.91	45	75
Junio	6	Δ Temp (C)	21	29.76	7.52	25.28	17	47
Junio	6	kWh/Día	21	5.24	0.7	13.35	4.34	6.41
Junio	7	Termometro_1 (C)	21	28.19	0.98	3.48	27	30
Junio	7	Temp_final colectores	21	55.1	8.48	15.39	40	70
Junio	7	Δ Temp (C)	21	26.9	7.71	28.67	13	41
Junio	7	kWh/Día	21	6.27	1.02	16.23	4.87	7.64
Junio	8	Termometro_1 (C)	20	27.2	1.15	4.23	25	29
Junio	8	Temp_final colectores	20	45.25	6.61	14.6	37	61
Junio	8	Δ Temp (C)	20	18.05	5.83	32.28	10	32
Junio	8	kWh/Día	20	4.96	1.51	30.45	1.74	6.49
Junio	9	Termometro_1 (C)	21	26.43	1.57	5.93	25	30
Junio	9	Temp_final colectores	21	47.48	7.81	16.46	38	65
Junio	9	Δ Temp (C)	21	21.05	6.8	32.31	13	37
Junio	9	kWh/Día	21	5.44	2.28	41.95	2.45	8.66
Julio	10	Termometro_1 (C)	14	26.71	2.02	7.55	25	33
Julio	10	Temp_final colectores	14	52.5	10.81	20.59	39	73
Julio	10	Δ Temp (C)	14	25.79	11.23	43.54	8	45
Julio	10	kWh/Día	14	7.75	2.22	28.64	3.89	9.99
Junio	10	Termometro_1 (C)	5	26.6	2.3	8.65	25	30
Junio	10	Temp_final colectores	5	45.8	5.81	12.68	40	53
Junio	10	Δ Temp (C)	5	19.2	3.63	18.92	15	23
Junio	10	kWh/Día	5	3.87	0.19	4.95	3.73	4.08
Julio	11	Termometro_1 (C)	21	24.81	1.86	7.5	23	30
Julio	11	Temp_final colectores	21	39.76	5.28	13.28	36	54
Julio	11	Δ Temp (C)	21	14.95	4.21	28.17	12	27
Julio	11	kWh/Día	21	4.49	1.64	36.46	2.64	7.58
Julio	12	Termometro_1 (C)	21	25.57	1.29	5.03	23	28
Julio	12	Temp_final colectores	21	37.14	2.48	6.67	34	42
Julio	12	Δ Temp (C)	21	11.57	2.99	25.86	7	16
Julio	12	kWh/Día	21	5.1	2.07	40.53	2.86	9.09
Julio	13	Termometro_1 (C)	14	27.57	2.53	9.19	24	31
Julio	13	Temp_final colectores	14	42.64	11.8	27.68	26	67
Julio	13	Δ Temp (C)	14	21.43	8.74	40.79	9	37
Julio	13	kWh/Día	14	6.25	2.47	39.61	2.6	10.03