

# Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte, Costa Rica

## Evaluation of solar thermal and photovoltaic systems in three milk processing plants in the Northern Huetar Region, Costa Rica

Tomás J. Guzmán-Hernández<sup>1</sup>, Javier M. Obando-Ulloa<sup>2</sup>,  
Xabier Álvarez de Eulate<sup>3</sup>, Raúl Ilundain-López<sup>4</sup>,  
Paola Juan-Pérez<sup>5</sup>, Guillermo Castro-Badilla<sup>6</sup>

Guzmán-Hernández, T; Obando-Ulloa, J; Álvarez de Eulate, X; Ilundain-López, R; Juan-Pérez, P; Castro-Badilla, G. Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 37-46.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4191>

*Fecha de recepción: 21 de mayo de 2019*  
*Fecha de aprobación: 29 de agosto de 2019*

1 Doctor en Ciencias Agronómicas; coordinador del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tjguzman@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-2719-8550>

2 Doctor en Tecnología Agraria y Alimentaria; docente e investigador del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jaobando@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-8857-904X>

3 Master en Biología y Conservación de la Biodiversidad; pasante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: xalvarezeulate@gmail.com.

4 Máster en Profesorado de Educación Secundaria, pasante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rilundain22@gmail.com.

5 Máster en Biodiversidad, Paisajes y Gestión Sostenible; pasante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: paolix1291@gmail.com

6 Ingeniero en Electrónica; docente e investigador de la Escuela de Ingeniería Electrónica, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gucastro@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-7159-9845>



## Palabras clave

Costa Rica; energía solar; ganadería; gases de efecto invernadero; tecnología térmica solar.

## Resumen

Los combustibles fósiles, que actualmente aportan cerca del 85% de la energía primaria consumida, seguirán siendo la principal fuente para cubrir la demanda energética de los próximos años. Ante esta perspectiva, y dentro de un marco de cambio climático global, las energías renovables deben tomar un mayor protagonismo como fuentes de energía limpia. Costa Rica, como la mayoría de los países desarrollados, presenta una alta dependencia de los combustibles fósiles, principalmente del petróleo. Sin embargo, a diferencia de otras zonas del planeta, la energía solar potencial en este país está cuantificada en 10 000 MW, aunque su uso es mínimo.

Dado que el sector agroindustrial produce una alta emisión de gases de efecto invernadero, responsables de la problemática del cambio climático, se decidió realizar una investigación con el objetivo de evaluar la aplicación de la tecnología térmica solar y fotovoltaica en este sector.

La tecnología térmica solar y fotovoltaica se instaló en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte de Costa Rica. El análisis de los resultados obtenidos permitió observar la reducción del consumo de energía y, de una forma muy notable, de las emisiones de gases de efecto invernadero, gracias al aprovechamiento de una fuente totalmente limpia y renovable como la energía solar. Además, se ha generado una mayor independencia en las empresas en el nivel energético y sus productos podrían adquirir la categoría de ecológicos, lo que representaría una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional.

## Keywords

Costa Rica; solar energy; cattle; green house gases; thermal solar technology.

## Abstract

Fossil fuels, which currently contribute close to 85% of the primary energy consumed, will continue to be the main source to cover the energy demand of the coming years. Given this perspective, and within a framework of global climate change, renewable energy should take a greater role as sources of clean energy. Costa Rica, like most developed countries, is highly dependent on fossil fuels, mainly oil. However, unlike other areas of the planet, the potential solar energy in this country is quantified as 10 000 MW, enough energy for use in different production systems. Therefore, this work has evaluated a new application of solar thermal collector technologies and photovoltaic panels in the agricultural sector, as it is one of the most important sectors in terms of emission of greenhouse gases, which aggravates the problem of climate change.

Five solar thermal and photovoltaic systems (hybrid thermosiphons, hybrid forced and PV) were designed and built in two dairies and two milk-processing plants in the Huetar Norte region of Costa Rica in 2015. In all of them, computerized data logging systems were located and variables were measured; measurements of three years were evaluated, namely: time in hours, days, months; inlet and outlet temperatures; kWh; carbon equivalence, and economic savings. The results showed that energy consumption was reduced and, notably, greenhouse gas and carbon equivalent emissions, thanks to the use of solar energy. In addition, environmental pollution was lessened by the reduction of smoke due to the burning of firewood; greater independence was generated at the energetic level in associations and companies, and their products could eventually be certified as organic products.

## Introducción

En la actualidad, el consumo de energía en el globo está en aumento y se proyecta que esta tendencia continúe en los próximos años. Dentro de la demanda global de energía actual, los combustibles fósiles aportan cerca del 85% de la energía primaria consumida [6] y seguirán siendo la principal fuente de energía [13]. Ante esta perspectiva, y dentro de un marco de cambio climático mundial, las energías renovables deben tomar un mayor peso como energía limpia, con bajos o incluso nulos niveles de emisiones y con la característica de la sostenibilidad en el tiempo.

Aunque desde el siglo XVIII, el desarrollo tecnológico apuntaba a la utilización del sol para fines productivos, fue hasta en el siglo XX que se desarrollaron las tecnologías de uso de la energía del sol para varios fines, entre los que destacan el calentamiento de fluidos, la producción de vapor y la generación de corriente eléctrica [5].

En el caso de Costa Rica, la producción energética está centrada fundamentalmente en tres fuentes renovables: hidroeléctrica (76%), eólica (4%) y geotérmica (12%) [9]. Sin embargo, Costa Rica depende altamente de los combustibles fósiles, principalmente el petróleo, puesto que suponen un 52% de la energía consumida en el país, principalmente dentro del sector transporte [9]. En cuanto a la energía solar, Costa Rica presenta un potencial cuantificado en aproximadamente 10 000 MW, pero su grado de desarrollo es muy bajo.

En Costa Rica, como en el resto del mundo, los sectores agrícola y agroindustrial son responsables de alrededor del 12% de las emisiones de gases de efecto invernadero, relacionadas principalmente con las fermentaciones entéricas, generadoras de metano, y la producción de estiércol [8]. En el caso de Costa Rica, el sector agropecuario es de gran importancia económica, especialmente en el cantón de San Carlos, donde se encuentran el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L., quienes producen más del 50% del volumen nacional. Es primordial lograr una mejora en el uso de la energía tanto en el sector agropecuario como en el agroindustrial para reducir los niveles de emisión de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental de las actividades de estos dos sectores.

La radiación solar que se recibe en la superficie terrestre puede ser captada y aprovechada mediante diferentes sistemas: captadores solares térmicos o módulos fotovoltaicos, principalmente, aunque hay otros sistemas como secadores solares pasivos, cuya utilización no se ha evaluado en este trabajo, pero que ha sido implementada y evaluada por el grupo de investigación del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) [5].

Los módulos fotovoltaicos están formados por celdas organizadas en paneles en las que se genera electricidad a partir de la radiación solar. Para ello, se deben mantener unas condiciones estandarizadas de radiación ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) y de temperatura ( $25^\circ \text{ C}$ ). Los paneles fotovoltaicos pueden ser monocristalinos (con secciones de un único cristal de silicio), policristalinos (formados por pequeñas partículas cristalizadas) o amorfos (con el silicio no cristalizado). Su eficiencia es mayor cuanto mayores son los cristales, aunque también aumenta su peso, grosor y costo. El rendimiento de los paneles monocristalinos puede alcanzar el 20%, mientras que en los paneles amorfos no llega al 10%, aunque su costo es mucho menor [5] y [2].

Por su parte, los colectores solares térmicos normalmente se emplean para uso doméstico y pueden ser de circuito abierto o cerrado. En los sistemas de circuito abierto, el agua circula a través de los propios colectores solares, mientras que en los sistemas cerrados, el agua se almacena en un depósito para su posterior uso, después de pasar por los colectores. El sistema cerrado tiene mayor eficiencia y supone un mayor ahorro energético, pero presenta problemas en zonas con bajas temperaturas. En los equipos de circuito cerrado se distinguen dos tipos

de flujo: termosifónico, en el que el agua circula únicamente por diferencias de densidad, y forzado, en el que se emplean bombas para la circulación del agua [7], [12] y [5]. En los sistemas solares térmicos se recomienda incorporar un sistema auxiliar de calentamiento (gas o resistencias eléctricas, por ejemplo) para evitar problemas de abastecimiento de agua caliente debido a la variación de la radiación solar [11] y [5].

Tomando en cuenta las posibilidades anteriormente mencionadas, con las que cuenta el sector de la energía solar y su bajo grado de desarrollo, se plantea la alternativa de emplear esa fuente de energía en diferentes procesos productivos del sector agropecuario, considerando el potencial que presenta la región Huetar Norte de Costa Rica para ello. De esta forma, se abriría un camino que pueda favorecer la producción limpia, reducir los niveles de emisiones y mejorar las condiciones de trabajo de los pequeños productores agropecuarios.

## Objetivo general

El objetivo general de este trabajo fue evaluar la eficiencia de los sistemas solares térmicos o fotovoltaicos instalados en la región Huetar Norte por medio del análisis de la generación de energía, así como del ahorro energético, el económico y el impacto ambiental (descenso en las emisiones de dióxido de carbono) relacionados con el uso de estos equipos.

## Metodología

La ubicación del proyecto respondió a la necesidad del uso de los sistemas solares en la región Huetar Norte de Costa Rica, dado el consumo de agua caliente (160 y 215 L/día) para las operaciones de esterilización y pasteurización a 70 °C, en las plantas procesadoras de leche. Durante el tiempo de ejecución de este trabajo se evaluó:

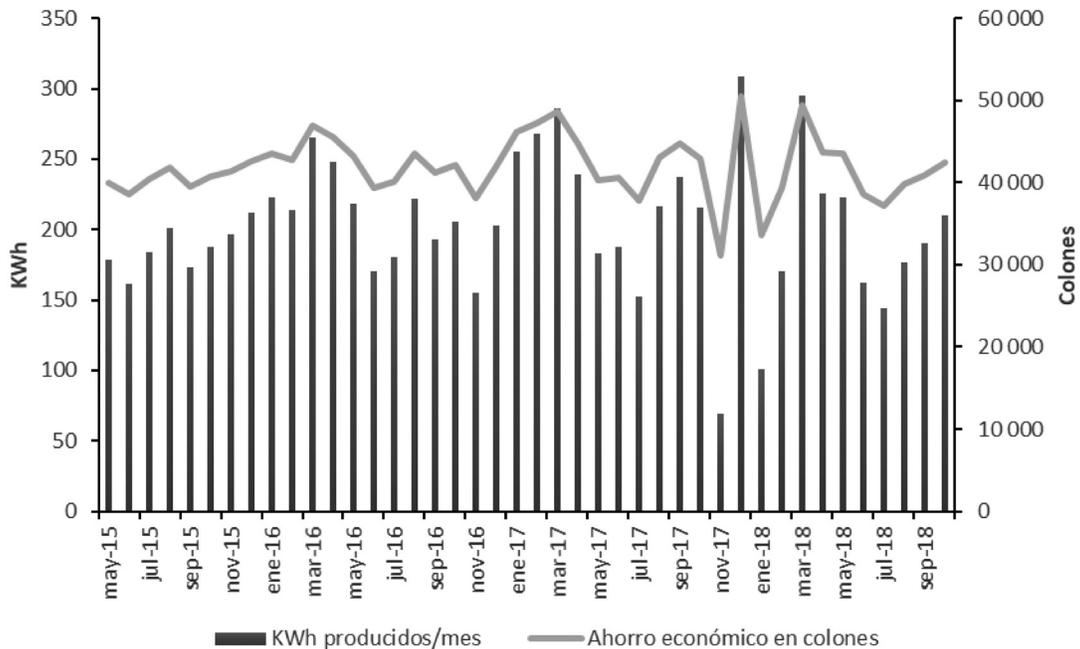
- La eficiencia de producción eléctrica de un sistema fotovoltaico compuesto por ocho paneles de 2 kW de potencia con 8 convertidores, el cual se instaló en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-SSC).
- La eficiencia de calentamiento de agua de un sistema solar termosifónico híbrido de ocho colectores, con sistema auxiliar eléctrico también instalado en la lechería del ITCR-SSC.
- La eficiencia de calentamiento de agua de dos sistemas térmicos forzados híbridos, con sistema auxiliar de gas LP compuesto por colectores solares planos de calentamiento de agua y un tanque acumulador de agua con capacidad para 302,4 L. Este tanque cuenta con termopares conectados a un sistema informático para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua caliente. Estos sistemas se instalaron en las plantas de procesamiento de los productores de lácteos LLAFFRAK y “San Bosco” respectivamente, ambos en Santa Rosa de Pocosol, San Carlos. Estas dos plantas procesadoras de leche se seleccionaron por ser una zona dedicada a la agricultura y la ganadería, con un índice de Desarrollo Social Distrital bajo [10].

## Resultados y Discusión

### Sistema fotovoltaico instalado en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Desde la instalación del sistema solar fotovoltaico en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-SSC) en mayo de 2015 y hasta

octubre de 2018, se ha generado un total de 8296,86 kWh, con una media anual de 2428,35 kWh. Esta producción eléctrica ha supuesto un ahorro económico de  $\text{¢}1\,717\,442$  desde mayo de 2015 (aprox.  $\text{¢}500\,000$  anuales), junto con un ahorro en la factura eléctrica inicial de un 28% (figura 1). Con este ahorro anual, la recuperación de la inversión inicial ( $\text{¢}3\,630\,000$ ) se establecería en 7,2 años, lo cual es un tiempo de recuperación corto para una instalación de estas características [4] y [5].



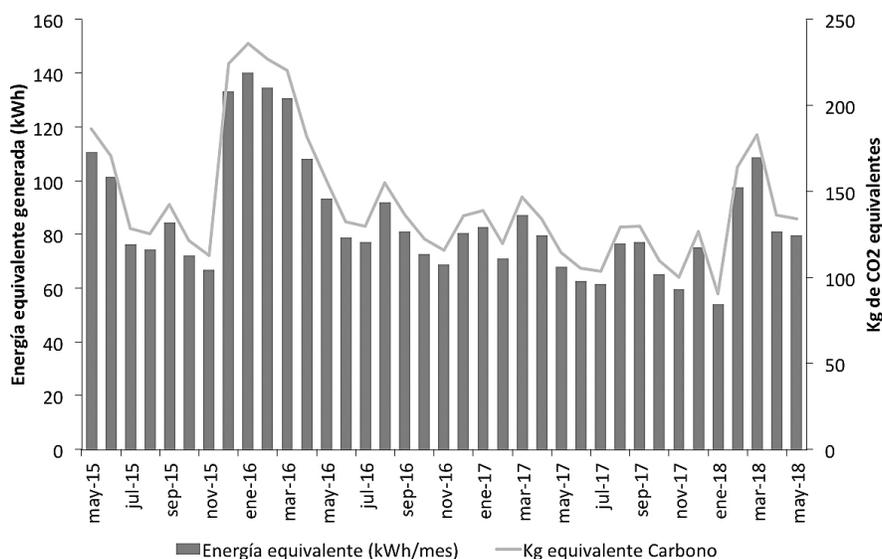
**Figura 1.** Producción eléctrica mensual y ahorro económico mensual en la factura eléctrica debido a la instalación del sistema fotovoltaico en la lechería del ITCR-SSC

Por otro lado, la instalación de este sistema ha supuesto una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de 1642,86 kg de  $\text{CO}_2$  anuales, de acuerdo con los datos registrados en el sistema Enlighten [5].

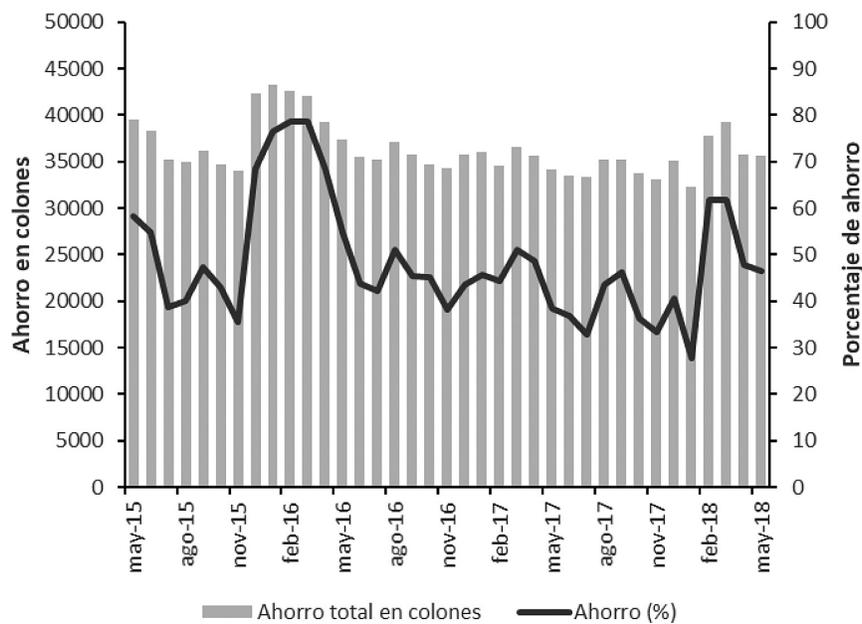
### Sistema termosifónico híbrido instalado en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica

El sistema termosifónico híbrido instalado en la lechería del ITCR-SSC permite el empleo de la energía solar para el calentamiento de agua destinada a la esterilización de los equipos de ordeño. Desde su instalación en mayo de 2015 hasta mayo de 2018, este equipo ha generado una media anual de 1603,16 kWh de energía equivalente. Esta producción energética ha supuesto un ahorro económico de  $\text{¢}436\,000$  anuales, y ha evitado la emisión de 1106 kg de  $\text{CO}_2$  anuales (figura 2).

En este caso, la recuperación de la inversión inicial ( $\text{¢}5\,000\,000$ ) se lograría en 11,5 años, lo cual supone un ahorro económico importante, aunque la inversión inicial es más cuantiosa [5]. En los meses más soleados del año, principalmente entre enero y marzo, el ahorro económico puede alcanzar cotas cercanas al 80%, superando ampliamente la barrera del 50% de ahorro; durante el resto del año se mantiene cercano al 40% (figura 3).



**Figura 2.** Producción eléctrica equivalente y emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por el sistema termosifónico instalado en el ITCR-SSC

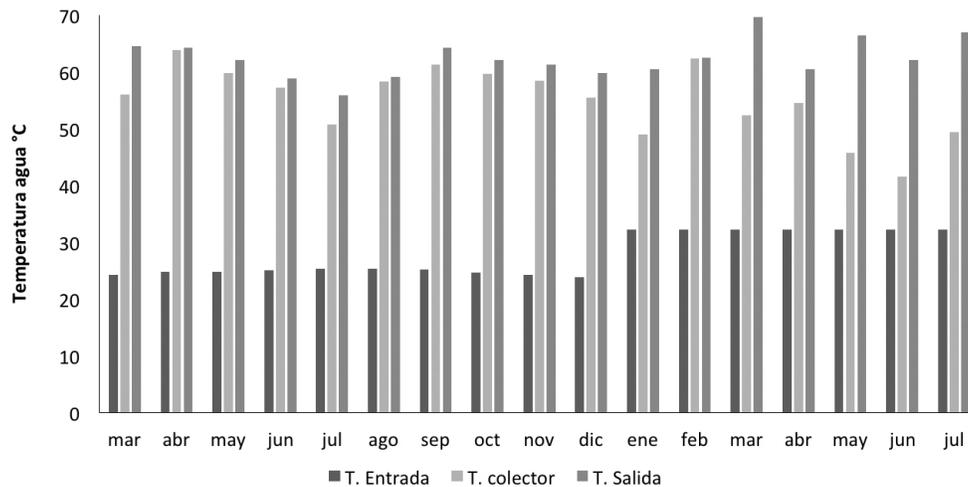


**Figura 3.** Ahorro económico mensual y porcentaje de ahorro sobre la factura eléctrica previa debidos al sistema solar térmico en la lechería del ITCR-SSC

### Sistema termosifónico híbrido forzado instalado en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK

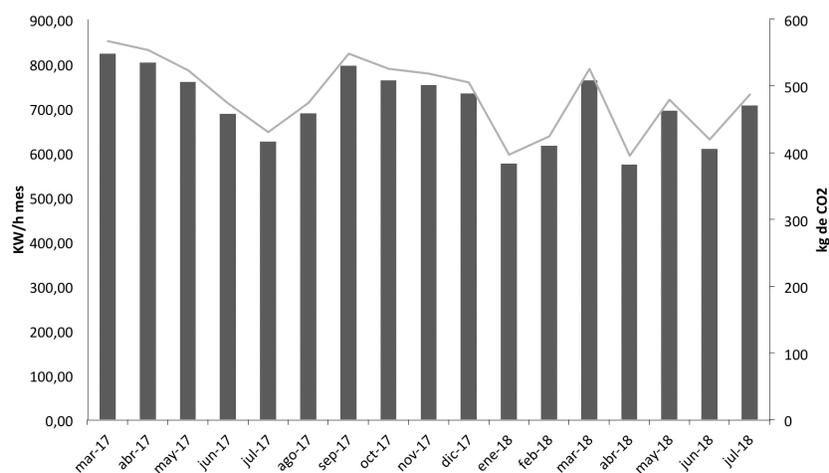
Antes de la instalación de este sistema, la lechería se valía de una caldera de leña de fabricación casera para calentar el agua hasta la temperatura necesaria para el proceso de pasteurización, la cual consumía aprox. 2,5 toneladas de leña al mes [4]. El costo de la leña y la mano de obra necesaria para su manejo era de ¢202 250 mensuales. Actualmente, el consumo de gas LP implica un gasto mensual de ¢36 000 menos. Esto se traduce en un ahorro total de ¢166 250 al mes [4].

Los datos recogidos entre marzo de 2017 y julio de 2018 demuestran que, tras el paso por el sistema, el agua incrementaba su temperatura de aprox. 24,67 °C hasta 60,95 °C, por lo que el sistema ha sido capaz de suministrar cerca del 87,20% de la energía total necesaria para la producción en esta planta (figura 4).



**Figura 4.** Comparación entre la temperatura de entrada, temperatura en colectores y temperatura de salida del agua a través del sistema solar térmico forzado híbrido de LLAFRACK, en el periodo comprendido entre marzo de 2017 y julio de 2018.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que, desde marzo de 2017 hasta julio de 2018, el sistema térmico de LLAFRACK generó un total de 11962,24 kWh, lo que se corresponde con 8254 kg equivalentes de carbono (figura 5).



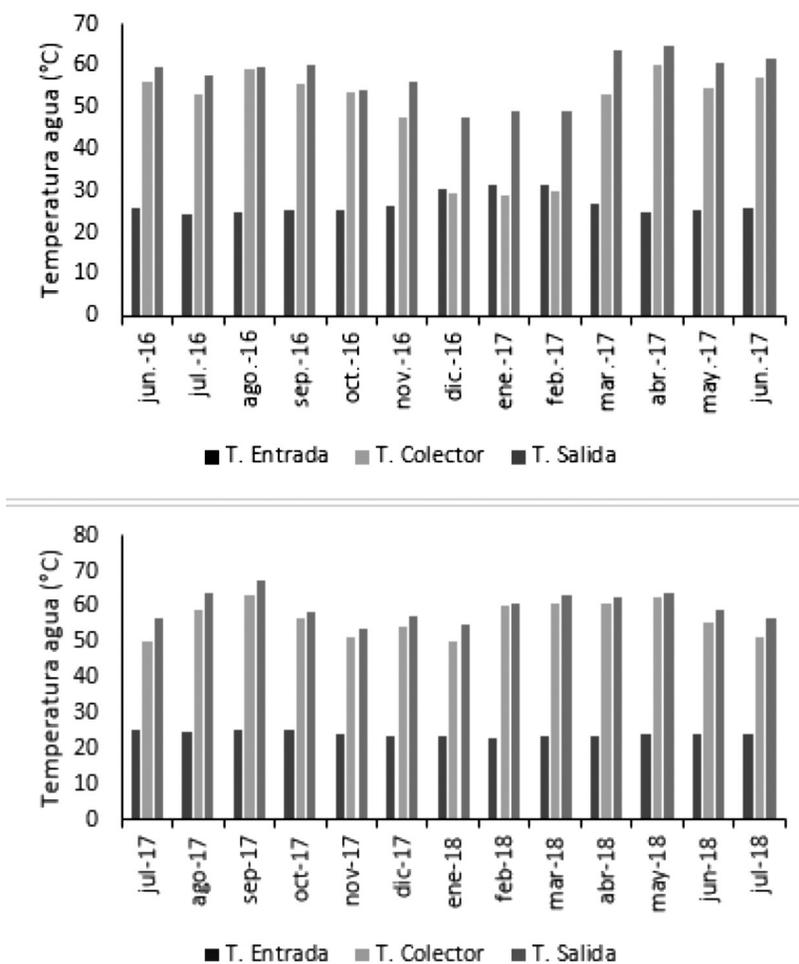
**Figura 5.** Producción de energía equivalente, expresada en kWh/mes, por el sistema solar térmico forzado híbrido, y emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por cada mes entre marzo de 2017 y julio de 2018

En el caso de la leña, por cada kg de leña quemada se emitían a la atmósfera 1,7 kg de CO<sub>2</sub>. Teniendo en cuenta el uso de entre 2 y 2,5 toneladas de leña mensuales, anualmente esa

cantidad se correspondía con 46,3 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera; las emisiones se han reducido en 38 toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalentes al 82,2% de las emisiones totales por año. Esta reducción en emisiones se traduce en una importante reducción del impacto ambiental generado por los productores de LLAFRAK y una mejora significativa en las condiciones de trabajo y salud de sus empleados [4].

### Sistema termosifónico híbrido forzado instalado en la planta procesadora de lácteos “San Bosco”

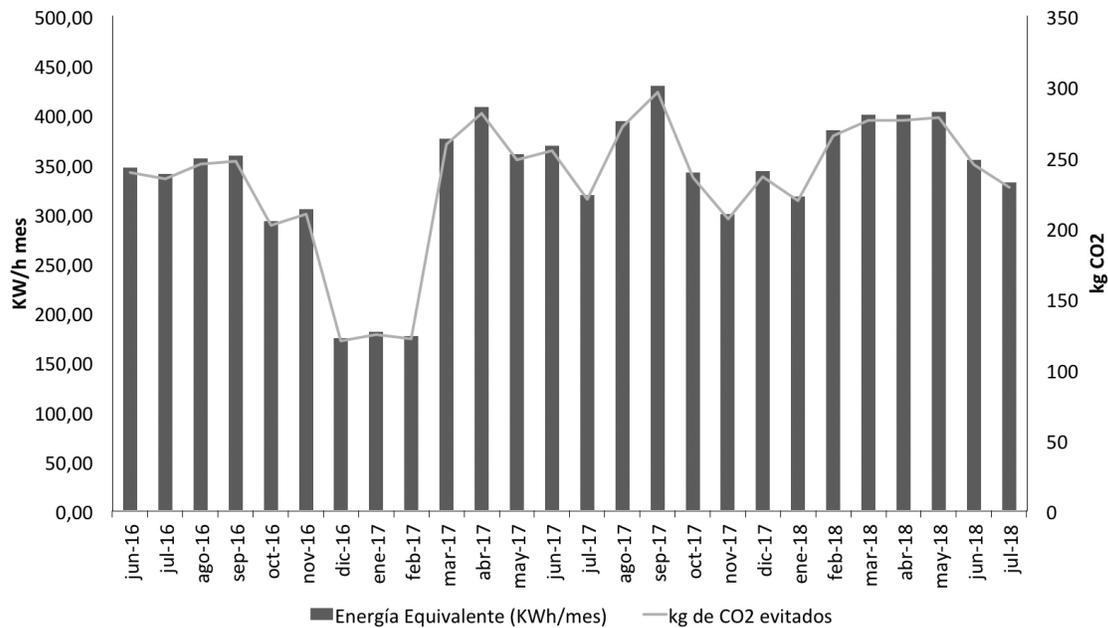
Entre junio de 2016 y mayo de 2018 mediante el sistema solar térmico instalado se consiguió elevar la temperatura del agua desde 24,72 °C hasta 59,46 °C, lo que supuso un 83% de la energía requerida por los procesos productivos en la planta procesadora de lácteos “San Bosco” (figura 6).



**Figura 6.** Gráfica comparativa de las temperaturas de entrada, temperatura en colectores y temperatura de salida del agua a través del sistema solar térmico forzado híbrido de “San Bosco”, en los periodos junio 2016 – junio 2017 (superior) y julio 2017 – agosto 2018 (inferior)

Como se puede comprobar, desde que “San Bosco” cuenta con el sistema solar se ha generado un total de 8749,92 kWh, con un promedio de 336 kWh/mes (figura 7). Esto se corresponde con una reducción total de 6037,44 kg de CO<sub>2</sub> totales.

En la lechería de “San Bosco” el total energético producido es menor que en LLAFRAK, ya que la temperatura alcanzada por el sistema térmico de LLAFRAK es 3,8 °C mayor que en “San Bosco”. Esto puede ser debido a unas condiciones climatológicas de mayor nubosidad, que disminuyen el rendimiento del sistema, pero que no impiden, con ayuda del sistema auxiliar de Gas LP, alcanzar un óptimo rendimiento, generando la temperatura requerida para la realización correcta del proceso productivo.



**Figura 7.** Producción de energía equivalente expresada en kWh/mes por el sistema solar térmico forzado híbrido de “San Bosco”, y emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por cada mes, entre junio de 2016 y julio de 2018

## Conclusiones

Con la aplicación de las tecnologías térmicas solares se ha reducido el consumo de energía y se ha obtenido mayor independencia en el aprovisionamiento energético en las plantas procesadoras analizadas. Por otro lado, se ha reducido las emisiones de gases de efecto invernadero, gracias al aprovechamiento de una fuente de energía totalmente limpia y renovable como la energía solar.

Por lo tanto, estas tecnologías resultan ser una alternativa de gran interés y con potencial para beneficiar las actividades agropecuarias, que han mostrado ser viables técnica y económicamente. Además, su impacto tanto en el medio ambiente como en las condiciones de vida de los productores es positivo, mejorando incluso la percepción del producto por parte del consumidor. Por todo ello, y teniendo en cuenta el escenario del cambio climático actual, parece imprescindible apostar por la energía solar en los diferentes ámbitos en los que se requiere el consumo de energía.

El uso de tecnologías solares también permitiría diferenciar el producto final como ecológicamente sostenible, mediante una etiqueta distintiva que lo identificaría en los mercados nacional e internacional.

## Referencias

- [1] O. V. Ekechukwu & B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy conversion and management*, 40(6), 615-655, 1999.
- [2] C. Espejo-Marín, "La energía solar fotovoltaica en España", *Nimbus*, 13-14, 2004.
- [3] T.J. Guzmán-Hernández, F. Araya-Rodríguez, J.M. Obando-Ulloa, M. Rivero-Marcos, G. Castro-Badilla & J.M. Ortega-Castillo, *Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica*. Santa Clara de San Carlos: Unidad de Publicaciones TEC, 2016. ISBN Obra Independiente: 978-9968-641-99-9.
- [4] T.J. Guzmán-Hernández, F. Araya-Rodríguez, J.M. Obando-Ulloa, M. Rivero-Marcos & G. Castro-Badilla, "Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica", *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 535-548, 2016.
- [5] T.J. Guzmán-Hernández, J.M. Obando-Ulloa, G. Castro-Badilla, D.A. Rodríguez-Rojas, N. Arce-Hernández, J.M. Ortega-Castillo y F. Araya-Rodríguez, "Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica", *Ventana* 11 (1): 21-25, 2017.
- [6] M. I. Hoffert, K. Caldeira, G. Benford, D. R. Criswell, C. Green, H. Herzog, A.K. Jain, H.S. Kheshgi, K.S. Lackner, J.S. Lewis, H. D. Lightfoot, W. Manheimer, J.C. Mankins, M.E. Mauel, L.J. Perkins, M.E. Schlesinger, T. Volk, & T.M.L. Wigley, "Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet," *Science*, 298(5595), 981-987, 2002.
- [7] M. Khan, A. Abdul-Malek., M. Mithu, & D. Das, "Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system," *IJRER*, 2, 164-177, 2010.
- [8] T. Kristensen, L. Mogensen, M. T. Knudsen., & J. E. Hermansen, "Effect of production system and farming strategy on greenhouse gas emissions from commercial dairy farms in a life cycle approach," *Livestock Science*, 140(1-3), 136-148, 2011.
- [9] Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, MINAET, *VI Plan Nacional de Energía*. Dirección Sectorial de Energía, 2011.
- [10] Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, MIDEPLAN, *Costa Rica. Índice de Desarrollo Social 2017*. Área de Análisis del Desarrollo, 2017.
- [11] S. Nandwani, *Energía solar. Conceptos básicos y su utilización*. Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2005.
- [12] L. Quirós, "Calentando el agua y cuidando el ambiente", *Construir*, 2011.
- [13] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, & H. Fayaz, "A review on global solar energy policy," *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(4), 2149-2163, 2011.