

Tecnología solar en la agroindustria: impacto y resultados de la planta termosolar deshidratadora de Zacatecas

Néstor Manuel Ortiz-Rodríguez^{1*}, Efraín Alonso Puerto-Castellanos², Jesús Águila-León³, Octavio García-Valladares¹

¹ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México. Privada Xochicalco s/n, Temixco CP. 62580, Morelos, México.

² Dirección Técnica. DIPAC HEAT RECOVERY E.U., Bogotá, Colombia

³ Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá Universidad de Guadalajara, México.

*Autor de correspondencia: nmorr@ier.unam.mx

Resumen

En respuesta a los desafíos globales en la agroindustria, este trabajo presenta los resultados del fortalecimiento de la Planta Termosolar Deshidratadora de Productos Agrícolas de Zacatecas, México, la cual ha implementado tecnologías de energía solar combinadas con sistemas de respaldo de biomasa y gas LP, además de un secador con bomba de calor. Estos avances han incrementado en un 300% la capacidad de la planta, permitiendo la recuperación y valorización de más de 232 toneladas de productos agrícolas frescos entre 2022 y 2024, como ajo, nopal y manzana. Además, el proyecto ha impulsado el desarrollo regional a través de la creación y fortalecimiento de 16 emprendimientos y empresas, generando empleo y fortaleciendo la cadena de valor agroindustrial. Se han realizado más de 50 eventos de capacitación y difusión, así la formación de más de 20 profesionales especializados en secado solar. En términos ambientales, la planta evitó la emisión de 58.217 toneladas de CO₂ al sustituir energía proveniente de combustibles fósiles por energía solar. La experiencia adquirida en Zacatecas demuestra que la tecnología solar es una solución eficaz para promover la sostenibilidad en la agroindustria y la transición energética, integrando impactos tecnológicos, económicos, sociales y ambientales. Este modelo es replicable para otras regiones en busca de soluciones sostenibles en la preservación de alimentos.

Palabras clave: Secado solar, Energía solar, Desperdicio de alimentos, Agroindustria

Introducción

La Pérdida y Desperdicio de Alimentos (PDA), en especial de frutas y verduras, representa un desafío global que afecta la seguridad alimentaria y contribuye significativamente al desperdicio de recursos naturales, lo que genera un impacto negativo en el medio ambiente [1], [2]. A nivel global, se estima que alrededor de un tercio de los alimentos producidos se pierden o desperdician, lo que genera aproximadamente 8% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [3]. En México, se calcula que la PDA anual asciende a 20.4 millones de toneladas, suficientes para alimentar a 7.4 millones de personas, y genera 36 millones de toneladas de CO₂ [4].

El proceso de secado de alimentos puede jugar un papel crucial en la mitigación del desperdicio mundial, pero suele implicar un alto consumo de energía, especialmente en la conservación de productos perecederos. En la industria alimentaria, el secado es intensivo en energía, representando entre el 10% y el 25% del consumo energético del sector [5], y se realiza mayoritariamente con combustibles fósiles [6]. Desde una perspectiva medioambiental, las soluciones para reducir la PDA deben garantizar que los impactos negativos sean menores que los beneficios [7].

El secado solar se ha consolidado como una solución eficaz en la agroindustria, no solo mitigando problemas como la inseguridad alimentaria, la sostenibilidad del abasto energético y el deterioro ambiental [8], sino también por su habilidad para preservar la calidad nutricional de los alimentos durante su deshidratación. Esta tecnología ha sido implementada exitosamente en diversas regiones para conservar productos perecederos de alta demanda, como frutas, verduras y hierbas [9]. En este contexto, desde 2017, se construyó y puso en operación la planta termosolar deshidratadora de productos agrícolas en Zacatecas, México.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de esta planta desde un enfoque integral, que abarca aspectos tecnológicos, económicos, sociales, ambientales, científicos y educativos. Los resultados destacarán cómo la planta ha contribuido al desarrollo sostenible en la agroindustria de la región, presentando un modelo replicable en otras zonas con condiciones similares.

Descripción de la Planta

La planta de deshidratación de productos agrícolas de Zacatecas está ubicada en el municipio de Morelos, Zacatecas (22°53'N, 102°39'W), a 2207 m sobre el nivel del mar. El clima es semi-desértico, con una temperatura media anual de 14.8°C, precipitaciones de 407.7 mm concentradas entre junio y septiembre, y una velocidad de viento promedio de 4 m/s. Con una irradiancia solar anual promedio de 520 W/m², la ubicación es ideal para el uso de tecnologías de secado solar [10]. La planta está equipada con tres sistemas de secado diseñados para maximizar el uso de energía renovable y minimizar el uso de combustibles fósiles en el procesamiento de productos agrícolas (ver Figura 1):

1. Sistema de Secado Solar Distribuido Híbrido (Solar-Biomasa-Gas LP): Este sistema utiliza convección forzada de aire caliente en una cámara tipo túnel que opera por lotes o de manera semi-continua. El calentamiento del aire se realiza mediante dos sistemas solares térmicos: uno directo, compuesto por 48 calentadores solares para calentamiento de aire que cubren una superficie de 111.1 m², y otro indirecto, con 40 calentadores solares para calentamiento de agua y una capacidad de almacenamiento térmico de 6 m³. Para garantizar la operación continua, cuenta con un respaldo de energía mediante un generador de aire caliente indirecto, alimentado por pellets de biomasa, y un quemador directo de gas LP. La cámara de secado puede operar en tres modos: convencional, utilizando exclusivamente gas LP; solar, aprovechando la energía solar directa o indirecta, de manera independiente o simultánea; e híbrido, que combina energía solar con respaldo de biomasa o gas LP.

2. Sistema de Secado Solar Integral Tipo Invernadero: Este sistema consiste en una cámara de secado con estructura de acero galvanizado y cubierta de policarbonato alveolar de doble pared de 6 mm de espesor. El piso de concreto tiene dimensiones de 9 m de ancho por 8 m de largo, proporcionando una superficie interna de 72 m². La altura máxima del invernadero es de 3.4 m, generando un volumen total de 163.2 m³. El secador puede funcionar en modo pasivo, utilizando la radiación solar directa, o en modo activo, con circulación forzada de aire.

3. Sistema de Secado Tipo Bomba de Calor: Este sistema utiliza una cámara de secado en forma de "U", donde el aire convectivo se calienta mediante la condensadora de una bomba de calor, alimentada por electricidad generada por un sistema fotovoltaico de 11 kW. Este sistema es eficiente y permite operar a bajas temperaturas (35-50 °C), preservando la calidad de los productos agrícolas.

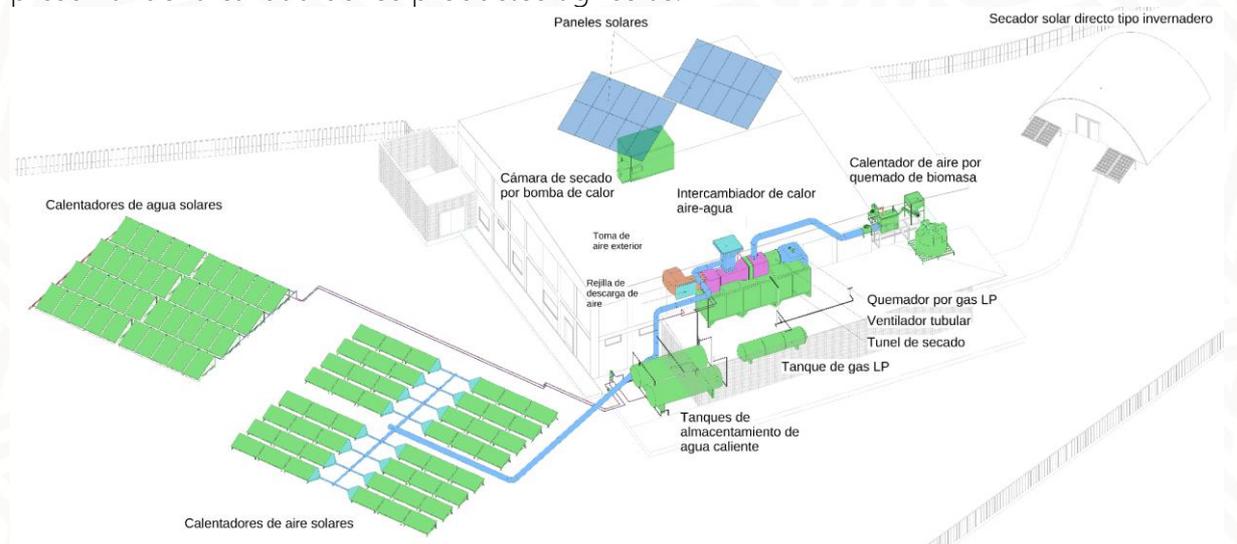


Figura 1. Representación esquemática de la distribución de las tecnologías de la planta de deshidratación

En el Cuadro 1 se detalla las capacidades operativas de los tres sistemas de secado implementados en la Planta Termosolar de Zacatecas. El sistema híbrido Solar-Biomasa-Gas LP se distingue por su versatilidad y capacidad para procesar grandes volúmenes de productos agrícolas, además permite más control en los parámetros de secado. Por otro lado, el sistema tipo invernadero, aunque de menor capacidad, es adecuado para

productos que no requieren un secado continuo y que pueden exponerse a la radiación solar sin perder sus propiedades, lo que lo convierte en una opción eficaz para procesos graduales. Finalmente, el sistema de bomba de calor, a pesar de su menor capacidad, destaca por su alta eficiencia energética (COP>2) y su capacidad para operar a temperaturas bajas, lo que es fundamental para el secado de productos delicados que requieren condiciones precisas y homogéneas, asegurando un secado uniforme y conservando la calidad del producto final.

Cuadro 1 Capacidad de los sistemas de secado

Sistema de secado	Área de secado máxima (m ²)	Capacidad de carga máxima (kg)
Sistema de secado solar distribuido híbrido (Solar-Biomasa-Gas LP)	310	1500-2500
Sistema de secado solar integral tipo invernadero	72	750-1000
Sistema de secado tipo bomba de calor	35	250-650

El Cuadro 2 muestra la diversidad de soluciones de generación de calor que ofrece la planta para maximizar la eficiencia energética en función de las necesidades del proceso de secado y las condiciones ambientales. Los sistemas solares para calentamiento de aire y agua destacan por su eficiencia en condiciones de alta irradiación, siendo el sistema de calentadores de agua el más adecuado para secados rápidos y estables. La bomba de calor, con su alto COP, es ideal para productos delicados que requieren un control preciso de la temperatura y una operación continua, mientras que el quemador de biomasa proporciona un respaldo fiable, asegurando la operación continua durante periodos de baja irradiación. Esta combinación de tecnologías permite un uso eficiente de la energía y asegura flexibilidad en el secado de distintos productos agrícolas.

Cuadro 2 Parámetros operativos de los sistemas de generación de energía térmica

Sistema de generación de calor	Temperatura máxima (°C)	Potencia (kW)	Rendimiento	Tiempo de operación
Campo de calentadores solares de aire	71	44.23	41.71%	6.53 h
Campo de calentadores solares de agua	95	41.63	51.12%	6.82 h
Bomba de calor	75	10.5	COP: 2.05	Continuo
Quemador de biomasa	80	75	70%	Continuo

Metodología

El presente estudio abarca el análisis de datos recopilados entre julio de 2022 y julio de 2024 para evaluar los impactos económicos, educativos, sociales, científicos y ambientales derivados del uso de la Planta Termosolar Deshidratadora de Zacatecas. La evaluación económica se realizó mediante la cuantificación del número de emprendimientos y empresas que han utilizado la planta termosolar para la generación de valor agregado en sus productos agropecuarios mediante el secado solar. Además, se estimó el número de empleos generados tanto en las actividades productivas como en las

comerciales asociadas. Para evaluar la productividad de la planta, se utilizaron los registros de la bitácora de producción, cuantificando los productos que han sido rescatados o revalorizados a través del proceso de secado.

El impacto educativo y social se midió a través de los registros de participación en cursos y talleres impartidos para la capacitación y transferencia de tecnología a los productores de la región. Se evaluó la cantidad de personas capacitadas y la temática abordada en los talleres.

La evaluación del impacto ambiental se puede realizar mediante tres enfoques:

1. Sustitución Energética, que estima las emisiones de CO₂ evitadas al sustituir la energía proveniente de combustibles fósiles con energía solar.
2. Mitigación de la PDA, que se enfoca en cuantificar la reducción de emisiones de CO₂ y el ahorro de recursos naturales (agua, tierra) al evitar la pérdida de alimentos.
3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que evalúa los impactos ambientales totales del sistema de secado a lo largo de su ciclo de vida, desde la fabricación y operación hasta el desecho o reciclaje de los equipos.

En este trabajo, el impacto ambiental se evaluó desde el enfoque de sustitución energética, que determinó las emisiones de CO₂ evitadas mediante el uso de energía solar en lugar de gas LP en el proceso de secado. Para simplificar el análisis, la composición anual de los productos procesados se redujo a cuatro productos representativos: nopal (41.13%), ajo (51.69%), manzana (4.16%) y chile guajillo (3.02%). El cálculo del calor necesario para la evaporación del agua contenida en estos productos se realizó utilizando el calor latente de vaporización, con un valor de 2400 kJ/kg, y considerando los contenidos de humedad inicial y final de cada producto. A esta energía requerida se le aplicó un factor de pérdidas del 1.5 para reflejar las ineficiencias del proceso de transferencia de calor inherente al secado. Adicionalmente, se consideró la ineficiencia del quemador de gas LP, asumiendo una eficiencia del 80%. Esto permitió ajustar el consumo de gas LP que se habría utilizado en ausencia de los sistemas solares. Finalmente, se determinó la cantidad de emisiones evitadas aplicando un factor de emisión de 2.94 kg de CO₂ por cada kilogramo de gas LP no consumido. De esta manera, se cuantificaron las emisiones de CO₂ evitadas anualmente durante el periodo de estudio.

Resultados

Impactos de productividad y económicos

A lo largo del periodo de julio de 2022 a julio de 2024, la planta termosolar de Zacatecas ha mostrado una evolución notable en términos de productividad, como se evidencia en la Figura 2. En 2022, la planta procesó 39.05 toneladas de producto fresco, con 15 diferentes productores agrícolas beneficiados. En 2023, la capacidad productiva se incrementó significativamente, alcanzando 137.60 toneladas y beneficiando a 13

productores diferentes. Aunque en 2024 (hasta julio) se registra una producción menor (59.58 toneladas), esto es coherente con los ciclos de cosecha de los productos más susceptibles de ser deshidratados, como el nopal y el ajo, cuyos periodos productivos coinciden en los meses de agosto a octubre, lo que sugiere un incremento hacia el cierre del presente año.

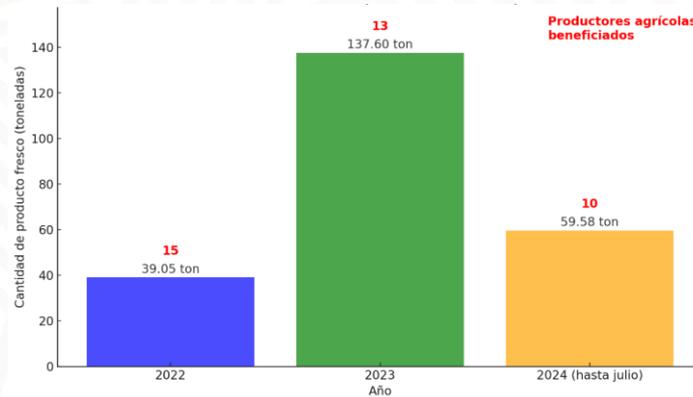


Figura 2 Producción total de la planta termosolar por año y número de productores agrícolas beneficiados (2022-2024)

Los productos procesados varían ampliamente, siendo el ajo y el nopal los que dominan en volumen. Tal como se muestra en la Figura 3 A, estos productos representan más del 85% del total de productos procesados en los tres años evaluados. La tendencia al alza en la deshidratación de nopal refleja tanto una mayor disponibilidad de este producto como el esfuerzo de los productores en la búsqueda de nuevos mercados. Por otro lado, productos como el chile guajillo, manzana y otros productos agropecuarios diversifican la operación de la planta, aunque en volúmenes menores. A su vez, la distribución de "Otros productos agropecuarios" en la Figura 3 B revela que la planta tiene la capacidad de procesar una amplia gama de productos, incluyendo piña, jitomate y betabel, lo que subraya su versatilidad. Esta flexibilidad se debe, en parte, a que algunos usuarios de la planta termosolar son emprendedores que han apostado por realizar pruebas con diferentes productos, buscando diversificar su oferta y abrir nuevos mercados. Esto no solo amplía las posibilidades de uso de la planta, sino que también fomenta la innovación en la agroindustria regional.

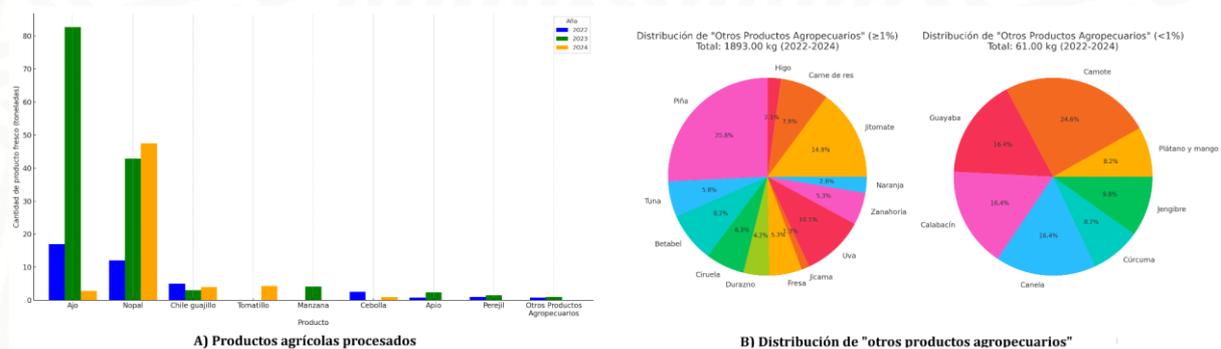


Figura 3 Distribución del secado de productos agrícolas procesados en la planta termosolar (2022-2024)

De acuerdo con los resultados mostrados de la productividad de la planta, las mejoras en infraestructura implementadas lograron incrementar la capacidad de producción, además de mostrar una gran flexibilidad para procesar variedad de productos regionales. Los cambios realizados para mejorar la planta termosolar no solo aumentaron su capacidad y flexibilidad, sino que también actúa como motor la impulsar y diversificar la agroindustria local con efectos positivos para toda la cadena de valor.

En el ámbito económico, la Planta Termosolar ha logrado impulsar y fomentar la colaboración con 16 empresas y emprendimientos, con una generación de más de 250 empleos directos en la región Zacatecana. Los productos que las empresas han procesado en la planta van desde opciones tradicionales del mercado como el chile y el ajo, hasta opciones menos comunes como betabel, piña adobada con picante e incluso nopal en polvo, abriendo a los productos la posibilidad de innovar y explorar nuevos mercados nacionales e internacionales. Con este ecosistema, ha fortalecido el tejido empresarial en los municipios de Fresnillo, Calera y Guadalupe implementando un modelo de negocio versátil y sostenible en la región.

En la Figura 4 se muestran los logotipos de las empresas y marcas que constituyen este ecosistema de emprendimiento. El hecho de que los productores utilicen la planta termosolar promueve un intercambio constante donde cada actor aporta su experiencia y contribuye de manera activa al crecimiento de la agroindustria Zacatecana y de otros Estados de México. Un ejemplo de la colaboración y alianzas entre los usuarios de la planta termosolar es la formación de la asociación SOLDEZAC, que se enfoca en la comercialización de productos deshidratados mediante secado solar, impulsando la integración de pequeños y medianos productores en mercados más competitivos y diversificados.



Figura 4 Empresas y emprendimientos asociados a la Planta Termosolar, agrupadas bajo la asociación "SOLDEZAC" y su distribución geográfica en México.

Impacto Social y Educativo

En el ámbito social, la planta termosolar ha generado un impacto social importante al apoyar a más de 40 productores y emprendedores locales en Zacatecas. El ecosistema de productores que ha consolidado la planta termosolar no solo ha logrado que diferentes empresas utilicen un mismo espacio, sino que se integren como una comunidad de productores con un significativo impacto social y de sostenibilidad ambiental.

Desde el año 2022, y como parte de las estrategias de fortalecimiento de la Planta Termosolar, se ha implementado un programa de capacitación, difusión y transferencia tecnológica con un total de 37 eventos realizados hasta julio de 2024, con una participación de 2,100 personas. Como puede apreciarse en la Figura 5, en el año 2023 se organizaron el mayor número de eventos con 18 capacitaciones y 712 participantes en total. Durante el primer semestre de 2024, la participación era superior a los 970 asistentes a través de 12 eventos, demostrando esto la eficacia e impacto positivo de las estrategias de promoción y adopción de tecnologías de secado solar por la comunidad. Los curso y talleres que se han impartido abordan temáticas como las tecnologías de secado solar, transferencia tecnológica y aplicaciones de agroindustria, con la finalidad de capacitar a estudiantes y productores de la región. Además de talleres y cursos, se han realizado eventos de divulgación que han tenido un importante papel para promover la transferencia tecnológica y adopción de energías renovables para el sector agrícola, impactando positivamente el ámbito educativo, y consolidando y reparando el tejido social y productivo de la región.

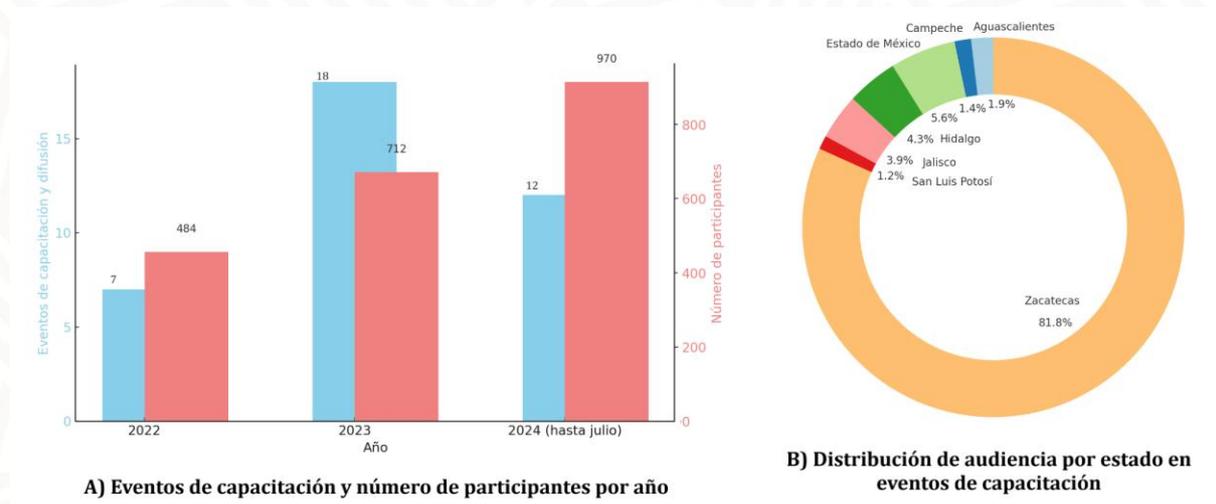


Figura 5 Crecimiento de eventos de capacitación y distribución geográfica de la audiencia en el periodo 2022-2024

Así mismo, desde el año 2022, se ha contribuido activamente a la formación de recursos humanos especializados. Se han acogido a más de 30 estudiantes de diversas instituciones, principalmente la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) y la Universidad Tecnológica del Estado de Zacatecas (UTZAC), así como de la Universidad de Guadalajara (UdeG). Los estudiantes recibidos han participado en actividades como lo es servicio social, prácticas profesionales, investigaciones y visitas industriales relacionadas con tecnologías de

secado solar. Con este enfoque se ha permitido que los estudiantes desarrollen competencias específicas y transversales en ingeniería química, mecánica y energías renovables, coadyuvando tanto a su formación académica como al desarrollo de soluciones innovadoras en el sector agroindustrial Zacatecano.

Impacto ambiental

El impacto ambiental de la Planta Termosolar ha sido significativo. Durante el periodo de evaluación, la planta termosolar ha evitado un total de 58,217.14 kg de CO₂, siendo una significativa contribución a la reducción de gases de efecto invernadero. Este cálculo se basa en la sustitución del uso de gas LP por energía solar para el proceso de secado, logrando así una importante reducción de la emisión de estos gases. Sin embargo, una estimación integral del impacto ambiental no solo debería cuantificar la reducción en las emisiones evitadas por la sustitución de combustibles fósiles y sino también considerar otros aspectos como el consumo de recursos naturales tales como el agua y la ocupación de tierra, o el desperdicio alimentario evitado, que son evaluados en el enfoque de mitigación de la pérdida de alimentos (PDA), y el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), sin embargo, para efectos del presente trabajo no se realiza un análisis integral, quedando para trabajo futuro.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron los resultados en materia de impactos de productividad y económicos, social y educativo, y ambiental que la Planta Termosolar Deshidratadora de Zacatecas ha tenido en la región. En ámbito de productividad y economía se ha logrado aumentar la capacidad de producción y promover la diversificación de productos procesados en la planta conformando un ecosistema de productores activo. En la dimensión social y educativa el impacto ha ido de la mano del ecosistema conformado por los productores usuarios de la planta, habiéndose implementado estrategias como talleres y cursos para los productores y usuarios de la planta para promover el uso de ecotecnología en la agroindustria, así como actividades de vinculación con diferentes universidades como la UAZ, UTZAC y UdeG habiéndose recibido estudiantes para servicio social, prácticas profesionales, investigación y visitas industriales. Hablando del impacto ambiental, si bien es necesario aún un análisis más integral que considere no solo la reducción de gases de efecto invernadero sino también el uso de agua, suelo, PDA y análisis de ciclo de vida, se ha evitado la emisión de más de 58 toneladas de CO₂. La integración de tecnologías híbridas, que combinan el uso de energía solar con respaldo de biomasa y gas LP, así como la implementación de un sistema de bomba de calor, ha permitido a la planta operar de manera flexible y eficiente, respondiendo a las necesidades de diferentes tipos de productos agrícolas. Como trabajo futuro, es importante continuar optimizando el proceso de secado solar y ampliar la adopción de estas tecnologías en otras regiones para maximizar su impacto tanto en la sostenibilidad ambiental como en la economía rural.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías que financió el proyecto a través de los PRONAI 315108, 315324 y 319195.

Referencias

- [1] C. Chen, A. Chaudhary, y A. Mathys, «Nutritional and environmental losses embedded in global food waste», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 160, p. 104912, sep. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104912.
- [2] M. Kuiper y H. D. Cui, «Using food loss reduction to reach food security and environmental objectives – A search for promising leverage points», *Food Policy*, p. 101915, jun. 2020, doi: 10.1016/j.foodpol.2020.101915.
- [3] FAO, «La pérdida y el desperdicio de alimentos deben reducirse a fin de aumentar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del medio ambiente». Consultado: 14 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/1310444/icode/>
- [4] SEMARNAT, «Estrategia Nacional para Evitar Desperdicio de Alimentos», 2017. Consultado: 14 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.gob.mx/semarnat/prensa/impulsa-semarnat-estrategia-nacional-para-evitar-desperdicio-de-alimentos>
- [5] A. Ladha-Sabur, S. Bakalis, P. J. Fryer, y E. Lopez-Quiroga, «Mapping energy consumption in food manufacturing», *Trends in Food Science & Technology*, vol. 86, pp. 270-280, abr. 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.034.
- [6] A. Lingayat, R. Balijepalli, y V. P. Chandramohan, «Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review», *Solar Energy*, may 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.05.058.
- [7] FAO, «Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4068s.pdf>
- [8] N. M. Ortiz-Rodríguez, M. Condorí, G. Durán, y O. García-Valladares, «Solar drying Technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale», *Applied Thermal Engineering*, vol. 215, p. 118993, oct. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118993.
- [9] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2015.
- [10] O. García-Valladares, N. M. Ortiz, I. Pilatowsky, y A. C. Menchaca, «Solar thermal drying plant for agricultural products. Part 1: Direct air heating system», *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 1302-1320, abr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.069.