

PROPUESTA DE DESHIDRATADOR SOLAR PARA SECADO DE ALIMENTOS

PAULA ANDREA ESCALANTE JOVEN, JUAN CAMILO GARCÍA BERNAL

Universidad Santo Tomas, Bogotá

Facultad de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C

2026

PROPUESTA DE DESHIDRATADOR SOLAR PARA SECADO DE ALIMENTOS

PAULA ANDREA ESCALANTE JOVEN, JUAN CAMILO GARCÍA BERNAL

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

ANDRÉS GERARDO CLAVIJO VARGAS

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS, BOGOTÁ

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C

2026

Contenido

RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
II. JUSTIFICACIÓN	9
III. OBJETIVOS	11
i. Objetivo general	11
ii. Objetivos específicos	11
IV. MARCO REFERENCIAL	12
i. Estado del arte	12
ii. Marco teórico	17
a) Antecedentes del secado solar.....	17
b) Principios del secado y la deshidratación de alimentos	18
c) Principios de transferencia de calor y masa aplicados al secado solar.....	19
d) Características de los productos a deshidratar	20
V. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES.....	22
VI. MATERIALES Y METODOS DEL DESARROLO DEL PROYECTO	24
i. Características del área	24
ii. Diseño del deshidratador.....	25
a) Matriz de Pugh	25
b) Análisis del producto: entero vs rodajas	28
c) Selección del tipo de bandeja.....	28
d) Cálculos de la estructura	30
e) Cálculos de transferencia de calor en el colector solar.....	36
f) Diseño del deshidratador.....	42
VII. RESULTADOS	47
VIII. ANÁLISIS DE COSTOS	59
i. Materiales utilizados.....	59
ii. Precios del mercado	62
iii. Resultados económicos.....	63
iv. Tomate	63

v.	Ají habanero.....	64
vi.	Recuperación de inversión	65
vii.	Equipos comerciales.....	66
IX.	CONCLUSIONES	70
X.	RECOMENDACIONES	73
XI.	REFERENCIAS	74

RESUMEN

El presente trabajo propone el diseño y evaluación de un deshidratador solar orientado al secado de alimentos mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica, con el objetivo de minimizar el consumo de energía convencional y reducir el impacto ambiental asociado a los procesos industriales de deshidratación. La investigación surge como respuesta a la necesidad de conservar alimentos de manera eficiente, segura y sostenible, evitando el uso excesivo de combustibles fósiles y reduciendo las pérdidas postcosecha.

El deshidratador se concibe bajo un esquema mixto, que combina un colector solar plano para el calentamiento del aire y una cámara de secado con bandejas dispuestas en torre, optimizando el flujo convectivo y la transferencia de calor. El diseño considera parámetros críticos como radiación solar disponible, condiciones climáticas locales, capacidad de carga, eficiencia térmica y tiempo de secado requerido para alcanzar una reducción de humedad del 90% en productos agrícolas seleccionados (ají habanero y tomate).

Los resultados indican que, bajo condiciones típicas de radiación en regiones de alta insolación, el sistema puede lograr un secado significativo con bajo costo operativo, contribuyendo a la sostenibilidad energética y ofreciendo una alternativa viable para pequeños productores y comunidades rurales. Finalmente, se presentan recomendaciones para la optimización del diseño y la escalabilidad del sistema hacia aplicaciones comerciales.

(Palabras claves: deshidratador solar, conservación de alimentos, colector solar)

ABSTRACT

This study proposes the design and evaluation of a solar dehydrator aimed at drying food products by harnessing solar thermal energy, with the objective of minimizing conventional energy consumption and reducing the environmental impact associated with industrial dehydration processes. The research addresses the need for efficient, safe, and sustainable food preservation methods, avoiding excessive fossil fuel use and reducing post-harvest losses.

The dehydrator is based on a mixed indirect configuration, combining a flat-plate solar air collector for heating and a vertical drying chamber with stacked trays, optimizing convective airflow and heat transfer. The design considers critical parameters such as available solar radiation, local climatic conditions, load capacity, thermal efficiency, and required drying time to achieve a 90% moisture reduction in selected agricultural products (habanero chili and tomato).

Results show that under typical solar radiation conditions in high-insolation regions, the system can achieve significant drying with low operating costs, contributing to energy sustainability and offering a practical alternative for small-scale producers and rural communities. Finally, recommendations are provided for design optimization and system scalability toward commercial applications.

(Keywords: solar dehydrator, food preservation, solar collector)

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desperdicio de alimentos representa uno de los principales desafíos para los sistemas alimentarios a nivel mundial. La creciente demanda de alimentos y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria han impulsado la búsqueda de métodos de conservación que sean eficientes, naturales y sostenibles. Sin embargo, muchos de los métodos de conservación utilizados actualmente dependen de fuentes de energía convencional y, en algunos casos, del uso de aditivos químicos para prolongar la vida útil de los alimentos, lo que genera impactos negativos tanto en el medio ambiente como en la salud humana.

En el contexto colombiano, esta problemática se agrava en el sector rural. Los pequeños productores y campesinos enfrentan pérdidas económicas significativas debido a la volatilidad de los precios agrícolas, que en ocasiones se sitúan por debajo de los costos de producción, y al exceso de oferta en temporadas de cosecha, lo que provoca desperdicio de alimentos altamente perecederos como frutas, hortalizas y tubérculos. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), en Colombia se pierden y desperdician 9,76 millones de toneladas de alimentos al año, lo que equivale al 34% de la oferta disponible. De esta cifra, 62% corresponde a frutas y verduras, siendo los productos más afectados por su alta perecibilidad (DNP, 2020). Estas pérdidas se distribuyen a lo largo de diferentes etapas de la cadena de suministro alimentaria, siendo la etapa de producción agropecuaria la que concentra el mayor porcentaje con un 40,5 %, seguida de distribución y comercialización con un 20,6 %, postcosecha y almacenamiento con un 19,8 %, consumo en hogares con un 15,6 %, y procesamiento industrial con un 3,5 %. (DNP, 2020).

Los principales afectados son los pequeños productores rurales, que son aquellos que producen al menos el 50% de los alimentos que se consumen en Colombia (Finagro, 2023). Estos, muchas veces no cuentan con tecnologías accesibles que les permitan conservar sus productos durante los periodos de alta producción o cuando los precios de mercado disminuyen. En consecuencia, una parte importante de la producción agrícola se deteriora antes de llegar al consumidor final, generando pérdidas económicas y afectando la sostenibilidad del sector agrícola.

Esta problemática también se presenta en el municipio de Yaguará, ubicado en el departamento de Huila, a aproximadamente 49 km de la ciudad de Neiva. Este municipio cuenta con una altitud promedio cercana a 650 m sobre el nivel del mar y un clima cálido seco con una temperatura promedio que oscila entre 22 °C y 32 °C (CMGRD,2021). Estas condiciones climáticas favorecen la producción agrícola, pero también aceleran los procesos de deterioro de alimentos frescos. En este contexto, los pequeños productores de Yaguará presentan dificultades para almacenar o procesar productos agrícolas altamente perecederos, lo que genera pérdidas durante las etapas de postcosecha y comercialización.

Uno de los métodos tradicionales utilizados en zonas rurales para conservar alimentos es el secado al sol. Este proceso consiste en eliminar la humedad de los productos mediante la exposición directa a la radiación solar. No obstante, este método presenta varias limitaciones, entre ellas la exposición de los alimentos a contaminantes ambientales, insectos y polvo. Por otro lado, existen sistemas industriales de deshidratación, utilizando hornos eléctricos o a gas los cuales rondan los 24 millones de pesos colombianos el modelo de gas más económico y que soporte grandes cantidades de alimentos, además de incluir el costo energético, lo cual

limita su implementación en pequeñas explotaciones agrícolas debido a sus elevados costos de operación.

En este escenario, Considerando que el municipio de Yaguará presenta altas temperaturas y una importante disponibilidad de radiación solar durante gran parte del año, el aprovechamiento de la energía solar térmica se presenta como una alternativa viable para el desarrollo de tecnologías accesibles, de bajo costo y bajo impacto ambiental, que permitan a los agricultores aprovechar los recursos naturales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mejorando la rentabilidad del sector rural. Un deshidratador solar eficiente representa una solución viable para disminuir pérdidas postcosecha, generar valor agregado y contribuir a la sostenibilidad en comunidades campesinas.

II. JUSTIFICACIÓN

La implementación de tecnologías apropiadas para la conservación de alimentos representa una estrategia fundamental para mejorar la eficiencia de los sistemas agroalimentarios y reducir las pérdidas que ocurren en las etapas posteriores a la cosecha. En contextos rurales, donde el acceso a infraestructura tecnológica y energética suele ser limitado, resulta necesario desarrollar soluciones que sean técnicamente viables, económicamente accesibles y ambientalmente sostenibles.

En este sentido, el aprovechamiento de la energía solar para la deshidratación de alimentos se presenta como una alternativa tecnológica adecuada para zonas con alta disponibilidad de radiación solar, como el departamento del Huila. El uso de deshidratadores solares permite transformar productos agrícolas altamente perecederos en alimentos con mayor vida útil,

facilitando su almacenamiento, transporte y comercialización sin depender de sistemas industriales de alto consumo energético.

El desarrollo de un deshidratador solar adaptado a las condiciones climáticas del municipio de Yaguará puede contribuir a mejorar los procesos de conservación de alimentos en el contexto rural, al ofrecer una solución de bajo costo que aprovecha un recurso energético disponible de manera abundante en la región. A diferencia del secado tradicional al sol, un sistema de deshidratación solar diseñado adecuadamente permite proteger los alimentos de contaminantes externos, mejorar la circulación del aire caliente y mantener condiciones más controladas de temperatura durante el proceso de secado, lo que favorece la calidad del producto final.

Desde el punto de vista económico, la posibilidad de deshidratar alimentos ofrece a los pequeños productores una alternativa para aprovechar excedentes de producción que de otra manera podrían perderse durante temporadas de alta cosecha o baja demanda en el mercado. La transformación de productos frescos en alimentos deshidratados puede generar valor agregado, ampliar las posibilidades de comercialización y mejorar la estabilidad de los ingresos en las economías rurales.

En términos ambientales, el uso de energía solar como fuente energética para procesos de deshidratación contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles y el consumo de energía eléctrica en sistemas de secado convencionales. Esto favorece la implementación de prácticas productivas más sostenibles y coherentes con los principios de aprovechamiento eficiente de los recursos naturales.

Finalmente, desde la perspectiva académica y tecnológica, aporta al desarrollo de soluciones ingenieriles orientadas al aprovechamiento de energías renovables en aplicaciones agroindustriales. El diseño y evaluación de un deshidratador solar permitirá integrar conocimientos relacionados con transferencia de calor, radiación solar y diseño de sistemas térmicos, generando un modelo que podría ser replicado o adaptado en otros contextos rurales con características climáticas similares.

En consecuencia, el desarrollo de este proyecto no solo busca proponer una alternativa tecnológica para la conservación de alimentos, sino también contribuir al fortalecimiento de procesos productivos sostenibles en comunidades rurales mediante el aprovechamiento de recursos energéticos renovables y tecnologías apropiadas.

III. OBJETIVOS

i. Objetivo general

Desarrollar y evaluar un deshidratador solar para la reducción de la humedad del ají habanero y el tomate, mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica, como alternativa tecnológica para la conservación de alimentos.

ii. Objetivos específicos

- Analizar las tecnologías existentes de deshidratación solar de alimentos y determinar las variables de diseño necesarias para el desarrollo de un deshidratador solar, considerando parámetros como condiciones climáticas, temperatura de secado, área de captación solar y capacidad de carga para el secado de ají habanero y tomate.

- Diseñar el deshidratador solar para el secado de ají habanero y tomate, con base en las variables de diseño.
- Construir e implementar el deshidratador solar, utilizando materiales y configuraciones adecuadas para su funcionamiento en condiciones rurales.
- Evaluar el desempeño del deshidratador solar mediante pruebas experimentales, analizando la reducción de humedad y el comportamiento térmico del sistema durante el proceso de secado.

IV. MARCO REFERENCIAL

i. Estado del arte

Tecnologías de deshidratación solar de alimentos.

En las últimas décadas, el secado solar ha resurgido como una alternativa sostenible y de bajo costo, especialmente en regiones con alta radiación solar. Este método aprovecha la energía solar térmica para calentar el aire y reducir la humedad de los alimentos, disminuyendo el consumo de energía convencional y las emisiones asociadas (Salvo & Franco, 2022). Existen diferentes configuraciones de deshidratadores solares: directos, donde el producto está expuesto a la radiación solar dentro de una cámara cubierta, e indirectos, que utilizan un colector solar para calentar el aire antes de introducirlo en la cámara de secado. Los sistemas indirectos presentan ventajas en términos de control de temperatura, higiene y calidad del producto (Ortiz-Rodríguez et al., 2024).

El secado consiste en remover la humedad del producto hasta un nivel específico. Prácticamente estamos determinados a reducir a un orden de 15% a 5 % según el producto.

Entre las principales ventajas que ofrecen los alimentos deshidratados se encuentran (Juárez H.E, 2006):

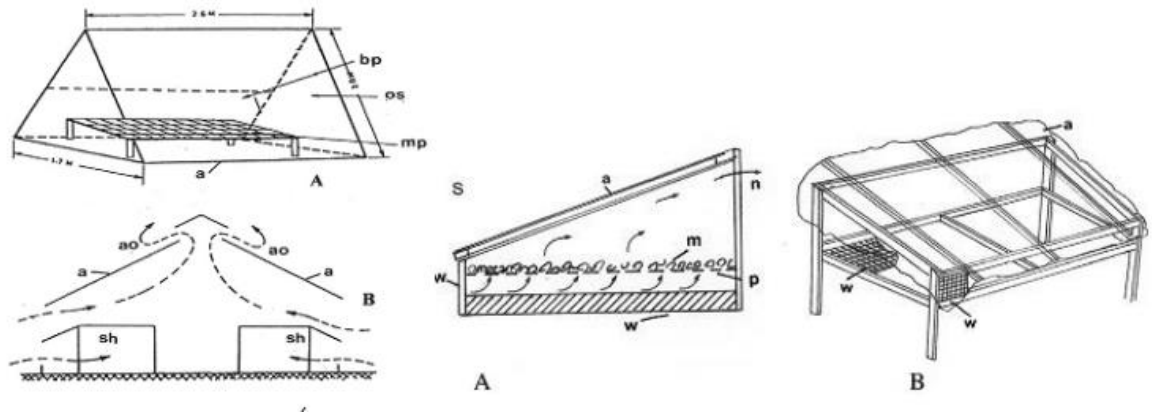
- Alimentos que conservan gran parte de su valor nutricional
- Preservan características como sabor, aroma y color
- Puede ser conservado un periodo de tiempo mucho mayor
- Permite una mejor comercialización y mayor facilidad de transporte

Los métodos más eficientes de deshidratación se llevan a cabo mediante mecanismos convectivos. En este, el aire calienta la superficie del producto provocando que el líquido sea removido, propiciando un gradiente de humedad que facilita la extracción. Además, se sabe que la velocidad de secado está en función de la temperatura, entre más alta sea la temperatura del aire mayor es la velocidad de secado y mejora si se puede mantener constante.

SISTEMA DE SECADO CON CONVECCION NATURAL

La Figura 1 ilustra el funcionamiento del secado mediante convección natural, donde el movimiento del aire se genera por diferencias de densidad debidas al calentamiento. El aire caliente asciende de manera espontánea (efecto chimenea), permitiendo la remoción de humedad sin necesidad de dispositivos mecánicos. Este método destaca por su bajo costo de construcción y operación, así como por su simplicidad, lo que lo hace especialmente adecuado para contextos rurales. Sin embargo, su principal limitación radica en el menor control sobre la velocidad del flujo de aire, lo que puede traducirse en tiempos de secado más prolongados y menor uniformidad en el proceso. En muchas ocasiones, se pueden evidenciar diseños que se complementan con una deshidratación por radiación.

Figura 1. Tipo cabina y efecto invernadero



Fuente: Belessiotis & Delyannis, Solar drying, 2011.

Ventajas:

- Existe una acción directa en la deshidratación debido al contacto directo del alimento con los rayos solares.
- Resulta ser altamente económico debido a que es una estructura básica y el resto puede ser en vidrio o plásticos.
- Facilidad al momento de aislar el producto del medio ambiente.

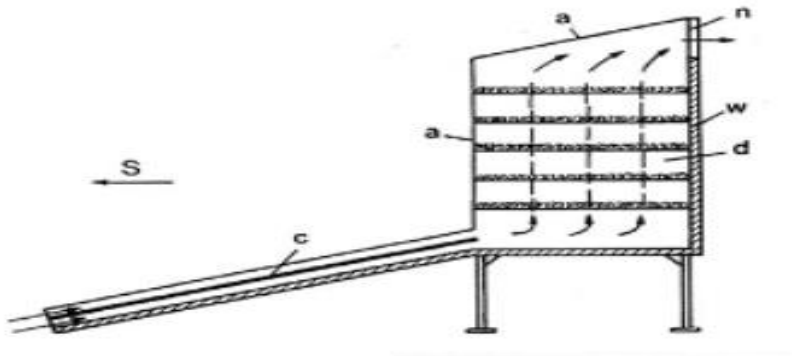
Desventajas:

- Tiempos prolongados de secados
- Dificultad en mantener la temperatura requerida para el deshidratado
- Utilización de mayor terreno para agrupar mayores productos.
- Tiempo de obtención de temperatura requerida
- Puede ocasionar daños al producto por radiación UV

SECADO POR CONVECCION FORZADA.

La Figura 2 muestra el sistema de secado por convección forzada, en el cual el flujo de aire es impulsado mediante dispositivos externos como ventiladores. Este mecanismo permite un mayor control sobre las condiciones de operación, incrementando la velocidad del aire y mejorando la transferencia de calor y masa, lo que se traduce en una reducción del tiempo de secado y mayor uniformidad del proceso. No obstante, estas ventajas implican un aumento en los costos de construcción y operación, así como una mayor dependencia energética, lo cual puede limitar su aplicabilidad en entornos donde se busca una solución autosostenible.

Figura 2. Sistema de efecto invernadero combinado



Fuente: Belessiotis & Delyannis, Solar drying, 2011.

Ventajas:

- Mayor velocidad de aumento de temperatura debido a la recolección previa de energía.
- Mayor capacidad de productos a almacenar
- Menor área plana de terreno para utilizar

- Menor tiempo de secado
- Se pueden adaptar mejoras para el secado (ventiladores)

Desventajas:

- Precio más elevado
- Sistema más complejo

SECADO POR EFECTO INVERNADERO.

La Figura 3 representa el secado por efecto invernadero, donde la radiación solar incide directamente sobre el producto dentro de una cámara cerrada con cubierta transparente. Este sistema permite alcanzar temperaturas elevadas al atrapar el calor en el interior, favoreciendo la evaporación de la humedad. Sin embargo, el control del proceso es más limitado, ya que puede generar sobrecalentamientos, gradientes térmicos y acumulación de humedad si la ventilación no es adecuada. Además, puede afectar la calidad del producto al exponerlo directamente a la radiación, lo que lo hace menos eficiente en comparación con configuraciones que optimizan simultáneamente la convección y la radiación.

Figura 3. Secado solar tipo túnel y efecto invernadero



Fuente: Oliveros. Ramírez. Tibaduiza. Sanz. 2017

Ventajas:

- Bajo costo de operación
- Fácil mantenimiento
- Bajo costo de la estructura
- Gran cantidad de producto a almacenar

Desventajas:

- Alto uso de terreno
- Mayor tiempo de secado
- Dificultad de alcanzar altas temperaturas
- Dificultad de aislamiento
- Sistema de ventiladores necesarios

ii. Marco teórico

a) Antecedentes del secado solar

En las últimas décadas, el secado solar ha resurgido como una alternativa sostenible y de bajo costo para la conservación de alimentos, especialmente en regiones con alta disponibilidad de radiación solar. Este método aprovecha la energía solar térmica para elevar la temperatura del aire de secado y reducir el contenido de humedad de productos agrícolas, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles y las emisiones asociadas a procesos industriales convencionales (Juárez, 2006; Salvo & Franco, 2022).

Los deshidratadores solares pueden clasificarse principalmente en sistemas directos e indirectos. En los sistemas directos, el producto se encuentra expuesto a la radiación solar

dentro de una cámara cerrada, mientras que en los sistemas indirectos el aire es calentado previamente en un colector solar y luego conducido hacia la cámara de secado. Diversos estudios reportan que los secadores solares indirectos ofrecen ventajas significativas en términos de control de temperatura, calidad del producto final e inocuidad, al reducir la exposición directa a la radiación ultravioleta y a contaminantes ambientales (Ortiz-Rodríguez et al., 2024; Quintanar & Aguilar, 2021).

En este contexto, el secado solar indirecto se posiciona como una tecnología apropiada para pequeños productores rurales, ya que combina bajo costo de operación, simplicidad constructiva y capacidad para generar valor agregado a productos agrícolas altamente perecederos.

b) Principios del secado y la deshidratación de alimentos

El secado de alimentos consiste en la remoción controlada de una parte significativa del contenido de agua presente en el producto, hasta alcanzar niveles que inhiban el crecimiento microbiano y reduzcan la actividad de agua. Para productos hortícolas, el contenido de humedad final suele encontrarse entre el 5 % y el 15 %, dependiendo del tipo de alimento, su composición y el uso final previsto (Juárez, 2006).

Desde el punto de vista fisicoquímico, el secado implica la transferencia simultánea de calor y masa. El calor suministrado al alimento permite la evaporación del agua superficial, mientras que la humedad interna migra hacia la superficie del producto debido a gradientes de concentración. La eficiencia del proceso de secado depende de múltiples variables, entre las cuales se destacan la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del flujo de aire, el espesor del producto y su estructura interna (Salvo & Franco, 2022).

En sistemas de secado solar, los rangos de temperatura del aire de proceso usualmente se sitúan entre 50 °C y 70 °C, valores que resultan adecuados para minimizar el deterioro térmico del alimento y preservar sus propiedades organolépticas, al mismo tiempo que se logra una velocidad de secado eficiente (Practical Action, 2020).

c) Principios de transferencia de calor y masa aplicados al secado solar

El secado solar es un proceso termo-físico gobernado por mecanismos de transferencia de calor y transferencia de masa que actúan de manera simultánea. La transferencia de calor ocurre principalmente por convección entre el aire caliente y la superficie del producto, y por radiación cuando existe incidencia directa de la energía solar sobre el alimento o las superficies internas del sistema. Este calor suministrado proporciona la energía necesaria para el cambio de fase del agua líquida presente en el producto hacia vapor (Juárez, 2006).

Desde el punto de vista de la transferencia de masa, el proceso se rige por el movimiento de la humedad desde el interior del alimento hacia su superficie, impulsado por gradientes de concentración. Una vez en la superficie, el vapor de agua es removido por el aire de secado. La velocidad de este proceso está condicionada por la estructura del alimento, su porosidad, el área superficial expuesta y el espesor de corte. Por esta razón, el secado en rodajas delgadas presenta un desempeño significativamente superior al secado de productos enteros, al reducir la resistencia interna a la difusión de la humedad (Juárez, 2006; Mercer, 2014).

En deshidratadores solares, el flujo de aire puede generarse por convección natural o forzada. En la convección natural, el movimiento del aire se produce debido a diferencias de densidad generadas por el calentamiento del aire en el colector solar, lo que origina un efecto chimenea. Este tipo de flujo es característico de sistemas de bajo costo y bajo consumo

energético, aunque presenta limitaciones en el control de la velocidad del aire (Belessiotis & Delyannis, 2011).

Por su parte, la eficiencia térmica del sistema depende de la capacidad del colector solar para convertir la radiación incidente en calor útil. Superficies absorbentes de alta absorptividad, recubrimientos oscuros y cubiertas transparentes con alta transmitancia solar contribuyen a elevar la temperatura del aire de proceso y a reducir las pérdidas térmicas por convección y radiación hacia el ambiente (Albarracín-Álvarez et al., 2022).

La cámara de secado cumple la función de facilitar el contacto eficiente entre el aire caliente y el producto. Una adecuada distribución del flujo de aire es fundamental para evitar zonas muertas, gradientes térmicos y acumulación de humedad. En este sentido, el uso de bandejas tipo malla permite el paso del aire a través del producto, mejorando la transferencia de calor y masa, reduciendo el tiempo de secado y favoreciendo la uniformidad del proceso (Salhi et al., 2025; Practical Action, 2020).

Estos principios sustentan el diseño de deshidratadores solares indirectos mixtos, en los cuales el calentamiento del aire mediante un colector solar se complementa con la incidencia parcial de radiación solar en la cámara de secado, mejorando el desempeño térmico global del sistema.

d) Características de los productos a deshidratar

Ají habanero

El ají habanero es un cultivo hortícola ampliamente utilizado en la gastronomía latinoamericana y de creciente interés comercial debido a su alta pungencia y valor agregado

en forma deshidratada. Su contenido de humedad fresco se encuentra generalmente entre el 80 % y el 90 %, lo que lo convierte en un producto altamente perecedero y susceptible al deterioro acelerado durante la postcosecha (Juárez, 2006).

Durante esta etapa, el ají habanero puede sufrir pérdidas significativas ocasionadas por daño mecánico, ataque de microorganismos, deshidratación natural y cambios fisiológicos asociados a la respiración del fruto. Estas pérdidas tienden a incrementarse en periodos de alta producción agrícola, cuando la oferta supera la demanda del mercado. En este contexto, la deshidratación permite extender la vida útil del producto, reducir el desperdicio y facilitar su almacenamiento y comercialización como producto seco de alto valor agregado.

Tomate

El tomate es una de las hortalizas más producidas y consumidas a nivel mundial, caracterizada por un contenido de humedad cercano al 94 %, lo que lo hace altamente vulnerable al deterioro microbiológico y enzimático. Esta elevada proporción de agua limita su vida útil en estado fresco y exige condiciones controladas de temperatura y humedad relativa durante la postcosecha (FAO, 2022).

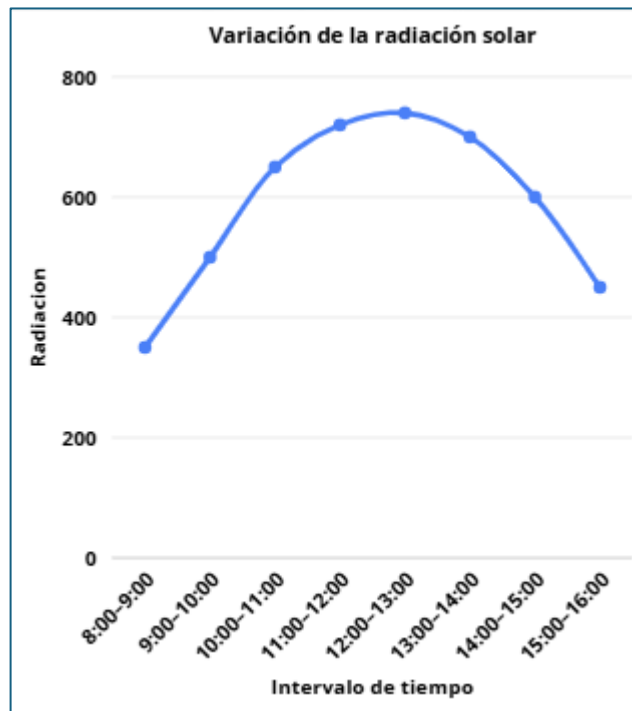
Se recomiendan temperaturas entre 10 °C y 15 °C para reducir la velocidad de respiración y retrasar los procesos de maduración; sin embargo, en muchas zonas rurales estas condiciones no están disponibles. Como resultado, se presentan pérdidas significativas durante el transporte, almacenamiento y comercialización. La deshidratación del tomate permite obtener productos como tomate seco o polvo de tomate, ampliamente utilizados en la

industria alimentaria, y constituye una alternativa tecnológica viable para reducir pérdidas postcosecha y agregar valor utilizando energía solar térmica.

V. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

Los requerimientos funcionales del sistema se definieron a partir de los objetivos del proyecto, la revisión bibliográfica y las condiciones técnicas necesarias para garantizar un secado eficiente y seguro. Sin embargo, parámetros críticos como el tiempo de secado no se establecieron únicamente desde la teoría, sino que fueron validados experimentalmente mediante las curvas de secado obtenidas durante las pruebas del prototipo.

Grafica 1. Variación de la radiación solar en función del tiempo.



Fuente: Autores del proyecto

El tiempo de operación del sistema se estableció en 8 horas diarias con base en el comportamiento de la radiación solar mostrado en la Figura 1, donde se evidencia que los valores más altos de radiación se concentran entre las 8:00 y las 16:00. Durante este intervalo se dispone de la mayor cantidad de energía térmica útil para el proceso de secado, lo que permite alcanzar temperaturas adecuadas y garantizar una remoción eficiente de la humedad del producto. Por fuera de este rango, la radiación disminuye significativamente, reduciendo la eficiencia del sistema, por lo que no se considera viable extender el proceso más allá de este periodo.

Rango de temperatura de operación (55–70 °C) se establecieron según estudios previos sobre deshidratación solar de alimentos, que indican estos valores como óptimos para inhibir el crecimiento microbiano y preservar la calidad del producto (Juárez, 2006; Salvo & Franco, 2022).

Asimismo, la capacidad por ciclo se determinó considerando la viabilidad económica del sistema, ya que otro requerimiento clave es mantener un costo de construcción bajo para facilitar su adopción por pequeños productores rurales. Estos criterios permiten equilibrar eficiencia técnica, inocuidad alimentaria y accesibilidad económica, alineando el diseño con los principios de sostenibilidad y transferencia tecnológica.

- Sistema aislado.
- El tiempo de secado: correspondiente a 8 hora aproximadas de sol al día.
- Capacidad por ciclo: 30 kg de producto fresco (según densidad y corte).
- Reducción de humedad objetivo:

Opción A (contenido final): $\leq 10\text{--}15\%$ humedad.

Opción B (remoción relativa): $\geq 80\%$ del agua inicial

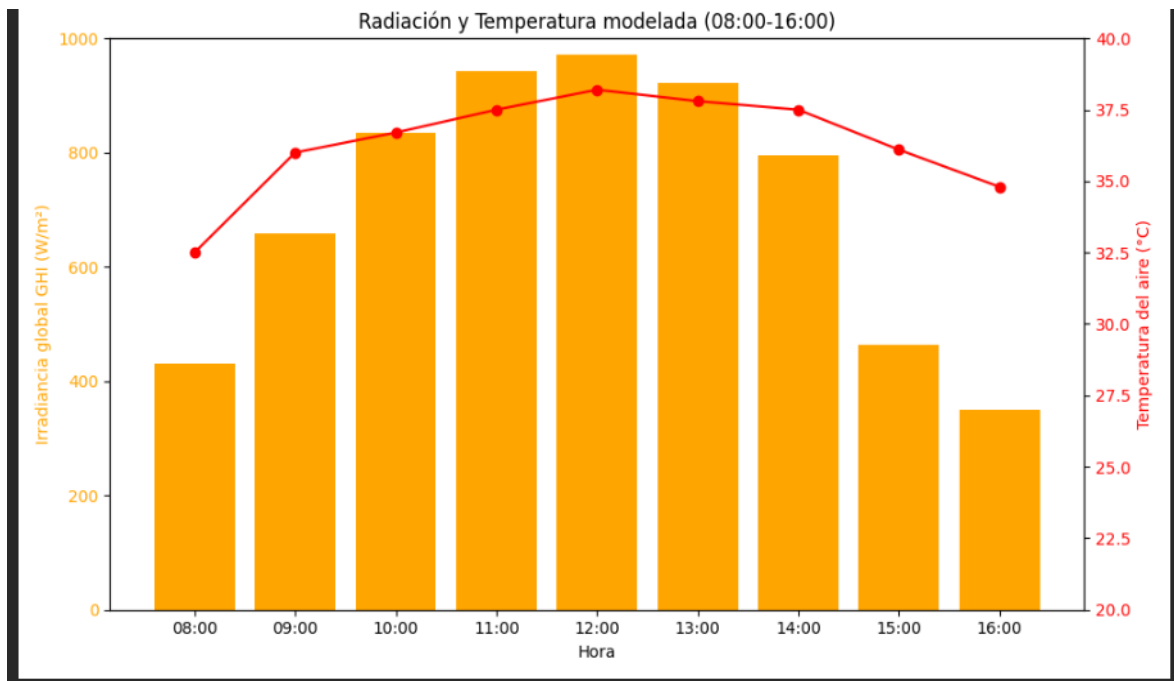
- Rango de operación térmica: 55–70 °C de aire de proceso dentro de la cámara.
- Calidad e inocuidad: reducción de actividad de agua compatible con almacenamiento a T ambiente; protección frente a polvo e insectos; superficies lavables.
- Energía: operación principalmente solar térmica; sin uso de combustibles fósiles y energías comunes.

VI. MATERIALES Y METODOS DEL DESARROLO DEL PROYECTO

i. Características del área

El proyecto se realizó en el mes de septiembre del 2024 en la propiedad de la finca “El conejo” ubicado en Yaguará – Huila. Para este mes se reportó en promedio una radiación solar y temperatura como se muestra en la siguiente figura:

Grafica 2. Radiación y temperatura de un día con mayor temperatura en Yaguará para el 2024



Fuente: Toma de datos realizada por medio de las aplicaciones móvil Weather y Nasa Power (NASA,2025)

Tal como se evidencia en la Grafica 2, la radiación llega a su pico sobre las 12:00 pm, mientras que su mayor descenso es sobre las 4 pm. Aun así, se puede evidenciar que la temperatura ambiente continúa siendo superior a 30°C y la radiación a 600 W/m². Se descarta la radiación y temperatura luego de las 4 pm debido a que empieza a descender rápidamente.

ii. Diseño del deshidratador

a) Matriz de Pugh

La selección del diseño del deshidratador solar se realizó mediante la aplicación de la matriz de Pugh, una herramienta de evaluación comparativa que permite analizar diferentes alternativas en función de criterios previamente establecidos. Este método facilita la toma de decisiones al contrastar cada opción frente a un diseño de referencia, considerando aspectos

técnicos, funcionales y constructivos. De esta manera, se identificó la configuración más adecuada para el desarrollo del sistema, garantizando un equilibrio entre eficiencia térmica, viabilidad constructiva y costo.

Tabla 1. Matriz de Pugh para los tipos de sistemas de secado

		Sistema de secado con convección natural	Secado por convección forzada.	Secado por efecto invernadero.
Criterios	Peso	Puntaje base	Puntaje base	Puntaje base
Costo de construcción	3	+3	-2	+1
Costo de operación	2	+2	-1	+1
Tiempo de secado	3	-1	+2	-2
Capacidad para mantener calidad de los productos	4	-1	+2	0

Capacidad de almacenamiento de producto	3	+1	+3	+1
Espacio o terreno utilizado	2	0	+1	-1
Mantenimiento del equipo	1	+1	+1	+1
Puntuación ponderada		5	6	1

Fuente: Autores del proyecto

La selección de un deshidratador solar de tipo mixto, que combina convección natural y radiación, se fundamenta en el análisis comparativo realizado mediante la matriz de Pugh, donde esta configuración logra el mejor equilibrio entre los criterios evaluados. En términos de costo de construcción y operación, la convección natural presenta ventajas significativas al no requerir equipos adicionales como ventiladores, lo que se traduce en una mayor puntuación frente a la convección forzada. Aunque el tiempo de secado puede ser ligeramente mayor en comparación con sistemas forzados, la incorporación de radiación directa en la cámara compensa esta limitación al incrementar la energía disponible y acelerar el proceso. Asimismo, este modelo mantiene una adecuada calidad del producto al permitir un secado más uniforme y menos agresivo, evitando degradaciones térmicas. En cuanto a capacidad de almacenamiento y requerimientos de espacio, el sistema mixto conserva un desempeño favorable, sin las desventajas de ocupación extensiva asociadas al efecto invernadero. En

conjunto, la mayor puntuación ponderada obtenida en la matriz confirma que esta alternativa ofrece el mejor balance entre eficiencia térmica, viabilidad constructiva y costos.

b) Análisis del producto: entero vs rodajas

Diversos estudios han demostrado que el secado en rodajas mejora significativamente la eficiencia del proceso en comparación con el secado del producto entero. Las rodajas permiten una mayor superficie de exposición, facilitan la transferencia de humedad y reducen el riesgo de endurecimiento superficial. Juárez (2006) y Mercer (2014) concluyen que cortar en rodajas de 1–3 mm puede reducir el tiempo de secado hasta en un 60–70% respecto al producto entero. Por este motivo, para este proyecto se recomienda cortar el ají habanero en rodajas de 2 mm de espesor.

c) Selección del tipo de bandeja

La elección del tipo de bandeja en un sistema de secado solar es un factor determinante en la eficiencia del proceso de transferencia de calor y masa. Dependiendo del diseño, las bandejas pueden facilitar o dificultar el flujo de aire caliente a través del producto, afectando directamente el tiempo de secado, la uniformidad del proceso y la calidad final del alimento. Las bandejas de malla, generalmente fabricadas en acero inoxidable o polímeros alimentarios resistentes a altas temperaturas, permiten el paso del aire caliente a través del producto desde la parte inferior, generando un flujo convectivo más uniforme. Esto mejora la transferencia de calor y masa, reduce los gradientes térmicos y disminuye el tiempo de secado. Por el contrario, las bandejas sólidas impiden el paso del aire por su base, lo que genera zonas muertas y acumulación de humedad, especialmente en las capas inferiores del producto. Las

bandejas con perforaciones parciales representan una solución intermedia, permitiendo cierto grado de circulación, aunque no tan eficiente como las bandejas de malla.

Tabla 2. ventajas y desventajas según tipo de bandeja.

Tipo de bandeja	Ventajas	Desventajas	Recomendación
Malla (porosa)	Mejor circulación de aire, secado uniforme, menor tiempo de secado	Mayor costo, requiere limpieza cuidadosa	Altamente recomendada
Sólida (sin perforaciones)	Fácil de fabricar y limpiar	Zonas muertas, secado lento y desigual	No recomendada
Sólida Perforada (parcial)	Mejora respecto a bandeja sólida, permite algo de circulación	Menor eficiencia que la malla	Aceptable si no se dispone de malla

Fuente: Salhi, M., Chaatouf, D., Raillani, B., Bria, A., Amraqui, S., & Mezrhah, A. (2025)

Debido a esto, las bandejas de malla son la opción más eficiente para el secado solar indirecto de productos como el ají habanero. Estas bandejas permiten una mejor distribución del flujo de aire, reducen el tiempo de secado y mejoran la uniformidad del proceso

d) Cálculos de la estructura

ANGULO DE INCLINACION DEL COLECTOR

La inclinación del colector solar es un parámetro crítico para maximizar la captación de radiación solar. En regiones cercanas al ecuador, como Yaguará (Huila), se recomienda una inclinación entre 10° y 15° hacia el sur para optimizar el rendimiento durante todo el año. Por esto, se utiliza una inclinación fija de 15° como valor óptimo.

CONDICIONES INICIALES

Tabla 3. Condiciones iniciales.

Parámetro	Valor
Producto	alimento en rodajas de 2 mm
Masa inicial (kg)	30
Humedad inicial (Xi)	85%
Humedad final (Xf)	15%
Temperatura ambiente (°C)	35
Temperatura de secado (°C)	60
Humedad relativa ambiente (%)	60
Tiempo estimado de secado (h)	8
Eficiencia del colector (η_{col})	65%
Presión atmosférica (P)	101.325 kPa
Radiación solar diaria (G)	600W/m ²

Fuente: Autores del proyecto

AREA DEL COLECTOR

Para determinar el área de la cabina y del colector solar, se parte de criterios termodinámicos y parámetros experimentales reportados en la literatura. El cálculo considera la masa de agua que debe evaporarse del producto, la energía necesaria para la vaporización y el calentamiento del alimento, así como la energía solar útil disponible en la superficie del colector. Estos valores se obtienen a partir de propiedades físicas del agua y de los alimentos (entalpía de vaporización, calor específico) y de la radiación solar promedio en la zona de estudio, según datos experimentales y referencias técnicas (Juárez, 2006; Salvo & Franco, 2022). Este enfoque permite dimensionar el sistema de manera que garantice la eficiencia térmica y la viabilidad económica del deshidratador:

Masa de agua a evaporar.

$$m_w = \frac{m_{inicial} (X_i - X_f)}{(100 - X_f)}$$

Donde, m_w es la cantidad de humedad que se va a retirar

Siendo $m_w = 24.705 \text{ kg}$

Para saber la energía requerida.

$$E_{req} = m_w \cdot h_{fg}$$

- Entalpía de vaporización del agua a $\sim 60^\circ\text{C}$ (h_{fg}): 2358.3kJ/kg (valor aproximado; tablas de propiedades)

Siendo $E_{req} = 65,336.7 \text{ kJ}$

Ahora se debe determinar la energía útil disponible por unidad de área en el tiempo

$$E_u = G \cdot \eta_{col} \cdot t$$

Se sabe que $600W/m^2 = 2160kJ/m^2 \cdot h$

Por ende: $E_u = 11,232 kJ/m^2$

Área del colector:

$$A_{col} = \frac{E_{req}}{E_u}$$

Por ende, $A_{col} = 5.76 m^2$

AREA DE CAMARA DE SECADO

El cálculo del área de la cámara de secado no se limita a una simple estimación geométrica, sino que responde a criterios termodinámicos y operativos que aseguran la eficiencia del proceso. Este dimensionamiento considera la masa total de producto fresco, la densidad de carga por bandeja y la distribución del flujo de aire caliente, factores que determinan la uniformidad del secado, el tiempo requerido y la calidad final del alimento. Además, se busca optimizar el uso del espacio para garantizar un equilibrio entre capacidad de carga y compacidad del sistema, evitando pérdidas térmicas y asegurando la viabilidad económica del deshidratador:

La relación fundamental es:

$$A_{sec} = \frac{m_i}{d}$$

donde:

- A_{sec} = área de secado requerida (m^2)
- m_i = masa total de producto fresco (kg)
- d = densidad de carga (kg/m^2), masa de producto por unidad de área de bandeja

Por otro lado, se debe considerar la energía que se va a utilizar por metro cuadrado, con la relación:

$$E_{m^2} = \frac{E_{req}}{A_{sec}}$$

Se consideran 3 escenarios de densidad de carga superficial (kg/m^2).

Tabla 4. Escenarios de área de secado.

Escenario	Densidad w (kg/m^2)	Área de secado (m^2)	Energía por m^2 (kJ/m^2)
A	2.0	15.00	4,355.78
B	5.0	6.00	10,889.45
C	10.0	3.00	21.778.9

Fuente: Autores del proyecto.

Con estos escenarios podemos determinar que, entre menor cantidad de producto por metro cuadrado, menor energía se necesitara.

Se proponen dos tamaños de bandeja como referencia práctica:

- Bandeja A: $1.0\text{ m} \times 0.6\text{ m} \rightarrow 0.60\text{ m}^2$

- Bandeja B: $0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \rightarrow 0.48 \text{ m}^2$

Número de bandejas = $A_{\text{secado}} / A_{\text{bandeja}}$.

Tabla 5. Escenarios de numero de bandejas.

Escenario	Área secada (m^2)	Nº bandejas (A)	Nº bandejas (B)
A	15.00	25	32
B	6.00	10	12
C	3.00	5	7

Fuente: Autores del proyecto

Se evalúan dos huellas de cámara:

- Huella 1: $1.2 \times 1.0 \text{ m} = 1.20 \text{ m}^2$

- Huella 2: $1.0 \times 0.8 \text{ m} = 0.80 \text{ m}^2$

Altura aproximada se estima con:

$\text{Altura} \approx (\text{niveles} \times \text{separación}) + \text{despejes}$

La separación entre bandejas en un deshidratador solar es un parámetro crítico porque determina la calidad del flujo de aire caliente dentro de la cámara. Si la distancia es demasiado pequeña, se generan zonas muertas donde el aire no circula adecuadamente, lo que provoca acumulación de humedad y un secado desigual. Por el contrario, una separación excesiva aumenta el volumen de la cámara, disminuye la velocidad del aire y reduce la eficiencia térmica, prolongando el tiempo de secado.

Estudios como los publicados en Drying Technology Journal recomiendan un rango de 5 a 10 cm para optimizar la transferencia de calor y masa, ya que este intervalo permite:

- Flujo convectivo uniforme: El aire caliente puede rodear las bandejas y entrar en contacto con toda la superficie del producto.
- Reducción de gradientes térmicos: Se evita que las bandejas superiores queden más frías que las inferiores.
- Eficiencia energética: Se mantiene un volumen compacto que reduce pérdidas térmicas sin sacrificar la circulación de aire.

Por estas razones, se adopta una separación de 0,05 m (5 cm) por bandeja, complementada con 0,30 m adicionales para despejes superiores e inferiores, garantizando espacio para la entrada y salida de aire y evitando interferencias con la estructura de la máquina. Esta decisión equilibra la eficiencia técnica, la uniformidad del secado y la viabilidad constructiva del sistema.

Tabla 6. Escenarios de altura sugerida aproximada.

Escenario	Área secada (m²)	Huellas (m²)	Niveles	Altura aprox (m)
A	15.00	1.2x1.0	13	0.95
A	15.00	1.0x0.8	25	1.55
B	6.00	1.2x1.0	5	0.55

B	6.00	1.0x0.8	10	0.80
C	3.00	1.2x1.0	3	0.45
C	3.00	1.0x0.8	5	0.55

Fuente: Autores del proyecto

- El Escenario B ($w = 5 \text{ kg/m}^2$, $A_{\text{secado}} \approx 6 \text{ m}^2$) ofrece equilibrio entre área, energía y número de bandejas.
- Con huella de $1.2 \times 1.0 \text{ m}$ y bandeja $1.0 \times 0.6 \text{ m}$, se requieren 10 bandejas
- Se recomienda diseñar con factor de seguridad (1.2–1.5) en el área de colector para cubrir pérdidas térmicas.
- Escenarios con área demasiado grande (A, $w=2 \text{ kg/m}^2$) implican cámara alta y mayor complejidad. Escenarios con área muy pequeña (C, $w=10 \text{ kg/m}^2$) concentran demasiada masa por bandeja y reducen eficiencia de secado.
- Recomendado: trabajar entre $4\text{--}6 \text{ kg/m}^2$ como rango práctico para productos en rodajas finas (2 mm).

e) Cálculos de transferencia de calor en el colector solar

Transferencia de calor por radiación a través del vidrio templado

El colector solar cuenta con una cubierta de vidrio templado cuya función es permitir el paso de la radiación solar hacia la superficie absorbente.

$$Q_{\text{inc}} = G \cdot A_{\text{col}}$$

donde:

Q_{inc} es la potencia incidente [W]

$G = 600 \text{ W/m}^2$ es la radiación solar promedio.

$$Q_{inc} = 3456 \text{ W}$$

La radiación transmitida a través del vidrio se determina como:

$$Q_{trans} = Q_{inc} \cdot \tau$$

donde $\tau = 0.85$ es la transmisividad del vidrio:

$$Q_{trans} = 2937.6 \text{ W}$$

Energía absorbida por la bandeja

$$Q_{abs} = Q_{trans} \cdot \alpha_s$$

Variables

- $\alpha_s = 0.95$

$$Q_{abs} = 2790.72 \text{ W}$$

Temperatura de la bandeja

Se determina la temperatura superficial real resolviendo el balance:

$$Q_{abs} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

Ecuaciones empleadas

Convección:

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A_{\text{col}} \cdot (T_s - T_{\infty})$$

Radiación:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{col}} \cdot (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4)$$

Donde:

- $Q_{\text{abs}} = 2790.72 \text{ W}$
- $h = 4.05 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ajustado por inclinación 15°)
- $\varepsilon = 0.90$
- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
- $T_{\infty} = 35^\circ\text{C} = 308 \text{ K}$
- $T_{\text{sur}} = T_{\infty} - 10^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$

Resolución iterativa

$$Q_{\text{Loss}} = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}}$$

Prueba 1: $T_s = 340\text{K}$ (67°C)

$$Q_{\text{conv}} = 751 \text{ W}$$

$$Q_{\text{rad}} = 1670 \text{ W}$$

$$Q_{\text{loss}} = 2421 \text{ W}$$

La temperatura es muy baja por ende Q_{loss} es menor a Q_{abs} .

Prueba 2: $T_s = 345 = 72^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{conv}} = 869 \text{ W}$$

$$Q_{\text{rad}} = 1920$$

$$Q_{\text{loss}} = 2789 \text{ W}$$

El equilibrio es casi perfecto, podemos tomar $T_s = 72^\circ\text{C}$

Determinación de la temperatura del aire

El aire se calienta al pasar sobre la bandeja por convección.

La energía transferida al aire es:

$$Q_{\text{conv}} = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{aire}} - T_{\text{in}})$$

Ecuación de transferencia por convección

$$Q_{\text{conv}} = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{aire}} - T_{\text{in}})$$

Relación con la superficie

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A_{\text{col}} \cdot (T_s - T_{\text{aire}})$$

Igualando ambas ecuaciones

$$h \cdot A_{\text{col}} \cdot (T_s - T_{\text{aire}}) = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{aire}} - T_{\text{in}})$$

Despejamos T_{aire}

$$T_{\text{aire}} = \frac{hA_{\text{col}}T_s + \dot{m}c_pT_{\infty}}{hA_{\text{col}} + \dot{m}c_p}$$

Donde:

- $C_p = 1005 \text{ J/kgK}$
- $\dot{m} = 20 \text{ kg/h} = 0.00556 \text{ kg/s}$

$$T_{\text{aire}} = 64.9^\circ\text{C}$$

Humedad específica del aire

La humedad específica del aire se determina mediante:

$$\omega = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v}$$

Variables

- ω : humedad específica [kg vapor/kg aire seco]
- P_v : presión parcial del vapor [kPa]
- $P = 101.325 \text{ kPa}$: presión atmosférica

Condiciones de entrada

- Temperatura: $T_{\text{in}} = 35^\circ\text{C}$
- Humedad relativa: $\phi = 60\%$

Presión de saturación

$$P_{\text{sat},35} = 5.62 \text{ kPa}$$

Presión parcial del vapor

$$P_v = 0.60 \cdot 5.62 = 3.37 \text{ kPa}$$

Humedad específica de entrada

$$\omega_{in} = 0.622 \cdot \frac{3.37}{101.325 - 3.37} = 0.0214 \text{ kg/kg}$$

Condición del aire caliente (65°C)

Se asume saturación para máxima capacidad:

Presión de saturación a 65°C

$$P_{sat,65} = 25.0 \text{ kPa}$$

Humedad máxima

$$\omega_{max} = 0.622 \cdot \frac{25}{101.325 - 25} = 0.204 \text{ kg/kg}$$

Capacidad de secado del aire

$$\Delta\omega = \omega_{max} - \omega_{in}$$

$$\Delta\omega = 0.204 - 0.0214 = 0.1826 \text{ kg/kg}$$

Aire requerido

$$m_{aire} = \frac{m_w}{\Delta\omega}$$

$$m_{aire} = \frac{24.71}{0.1826} = 135.3 \text{ kg}$$

Tiempo de secado

$$t = \frac{m_{aire}}{\dot{m}_{aire}}$$

Flujo de aire

$$\dot{m}_{\text{aire}} = 20 \text{ kg/h}$$

Tiempo de secado:

$$t = \frac{135.3}{20} = 6.77 \text{ horas}$$

Para 30 kg de producto, se calcula que la Temperatura superficial de la bandeja del colector es de aproximadamente 72°C, por ende, el aire en el interior del colector debe alcanzar temperaturas de 65°C, dándonos un tiempo aproximado de secado de 6.77 horas.

f) Diseño del deshidratador

Cubierta del colector:

Se adopta vidrio templado como material de cubierta debido a su alta transmitancia en el rango solar (τ hemisférica típica ~0,85–0,90 a incidencia normal) y su función como barrera térmica que reduce pérdidas por convección y radiación al ambiente, elevando la temperatura del aire de proceso y la eficiencia instantánea del colector. Además, su resistencia mecánica y térmica lo convierte en una opción adecuada para soportar variaciones de temperatura y condiciones ambientales extremas, evitando fracturas y garantizando la durabilidad del sistema (Albarracín-Álvarez et al., 2022; Herrera Zamora, 2020).

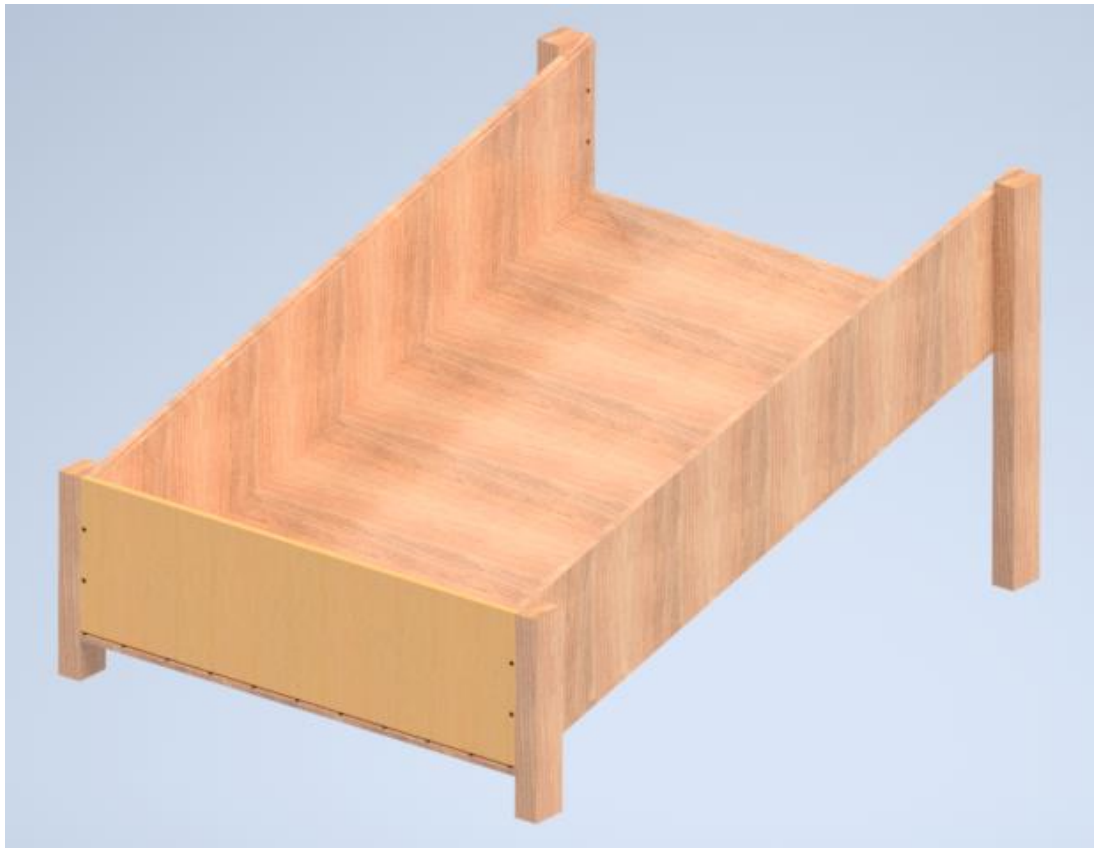
Colector

EL colector se diseña en color negro debido a su elevada absorptividad, característica que maximiza la conversión de energía solar en calor al minimizar la reflexión de la radiación incidente. Este principio es ampliamente reconocido en la literatura sobre colectores solares

térmicos, donde se recomienda el uso de recubrimientos oscuros, preferiblemente mate o selectivos, para optimizar la transferencia energética (Juárez, 2006; Salvo & Franco, 2022). La combinación de vidrio templado y superficie absorbente negra asegura un rendimiento térmico superior, contribuyendo a alcanzar las temperaturas requeridas para el proceso de deshidratación de alimentos de manera eficiente y sostenible.

- Tiene alta absorptividad (absorbe la mayor parte de la radiación solar incidente).
- Reduce la reflexión y maximiza la conversión de energía solar en calor.
- Pinturas negras mate o recubrimientos selectivos (como cobalto negro) son estándar en colectores solares térmicos

Figura 4. Renderizado del colector.



Fuente: Autores del proyecto

Cámara de deshidratación

La cámara de deshidratación cumple la función de permitir el ingreso del aire caliente proveniente del colector y facilitar la salida de la humedad del producto mediante un proceso de intercambio de masa, expulsándola por la parte superior de la estructura. Este principio operativo se ilustra en la Figura 2 del apartado Antecedentes. Para que el sistema funcione como un deshidratador solar mixto, es necesario que las paredes de la cámara permitan el ingreso directo de radiación solar; por esta razón, se emplea vidrio templado de 6 mm de espesor, el cual asegura una adecuada transmisión de energía solar y aporta resistencia mecánica frente a condiciones ambientales externas.

Figura 5. Renderizado de cámara de deshidratación.



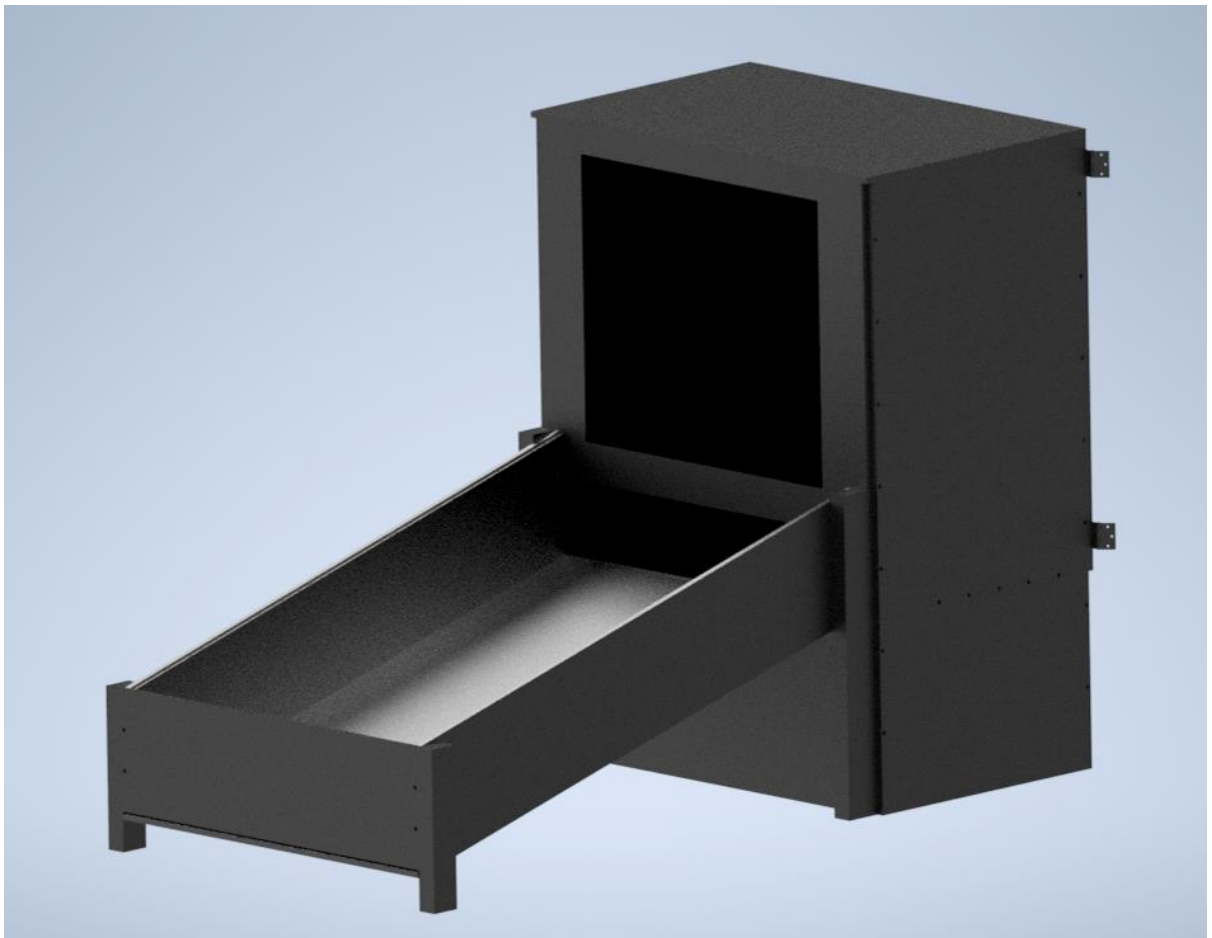
Fuente: Autores del proyecto

Las medidas totales que tiene este horno son:

- Dimensión bandejas: 100cm * 60cm
- Capacidad de cada bandeja: 4 kilogramos de ají habanero aproximadamente.
- Cantidad de bandejas: 13
- Separación entre bandejas: 5 cm
- Longitud desde la primera bandeja hasta la última: 65cm
- Longitud desde la primera bandeja hasta la base de la cabina de deshidratación: 20 cm
- Longitud desde la última bandeja hasta el techo: 20 cm

- Longitud total de la cabina de deshidratación: 104.5 alto x 110 ancho x 70cm profundidad + 48 cm de la altura desde la base de la cabina hasta el suelo
- Longitud aproximada del colector solar: 100cm ancho, alto 30cm, profundidad 150cm

Figura 6. Renderizado de máquina de deshidratación.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 7. Deshidratador construido.



Fuente: Autores del proyecto

VII. RESULTADOS

Para las tomas de todas las pruebas, se realizaron una deshidratación con el peso solicitado en los requerimientos funcionales, siendo el peso de producto fresco solicitado de 30kg. Para ello, cada bandeja conto con 3 kg de producto distribuido en rodajas, esto con el fin de poder tener una medición más precisa en cada una de las tomas. Con respecto a la toma de temperatura y radiación, se utilizó la aplicación de la NASA, NASA POWER | DAV junto a las aplicaciones climáticas WEATHER del sistema IOS, para poder determinar en el momento de la medición del peso del producto, cuál era la radiación y temperatura.

En la primera toma de datos, se utilizó el ají habanero en rodajas de 2 mm repartido en 12 bandejas y para mantener los mejores parámetros en este ejercicio, se decidió que por cada hora se tomara aleatoriamente una bandeja y se pesara para poder determinar la pérdida de

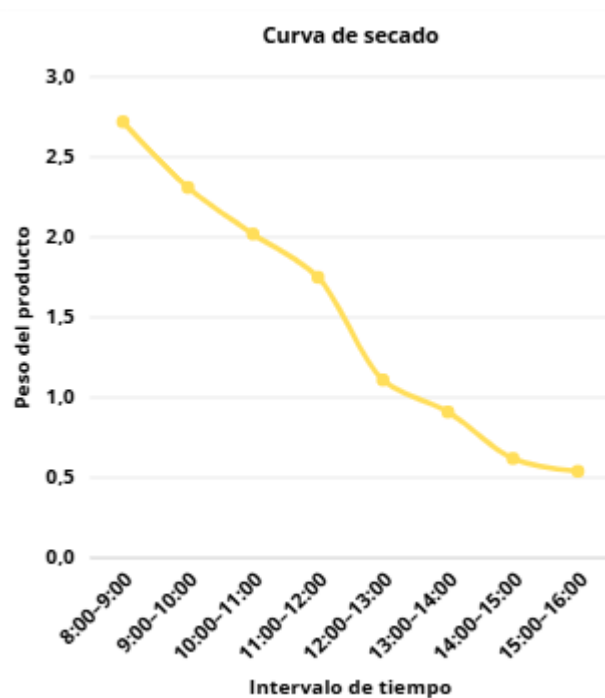
humedad. Este enfoque contribuye a la validez interna del estudio, disminuye el riesgo de sesgos sistemáticos y permite aplicar métodos estadísticos confiables para inferir conclusiones generales. Además, al reflejar la variabilidad natural del sistema, se mejora la precisión y la capacidad de generalización de los hallazgos, lo que fortalece la calidad científica del análisis (ATLAS. Ti Research Hub, 2025; Economipedia, 2024).

Tabla 7. Toma de datos de la primera prueba, utilizando el principio de aleatoriedad.

Bandeja	Intervalo	G (W/m²)	T_amb (°C)	Peso_fin (kg)	% Remanente
3	8:00–9:00	350	27.0	2,72	90,67%
11	9:00–10:00	500	30.0	2,31	77,00%
4	10:00–11:00	650	33.0	2,02	67,33%
6	11:00–12:00	720	35.0	1,75	58,33%
2	12:00–13:00	740	36.0	1,11	37,00%
8	13:00–14:00	700	35.0	0,91	30,33%
6	14:00–15:00	600	34.0	0,62	20,67%
1	15:00–16:00	450	32.0	0,54	18,00%

Fuente: Autores del proyecto

Grafica 3. Curva de secado peso final con respecto al tiempo para el ají habanero.



Fuente: Autores del proyecto

La Grafica 2 presenta la curva de secado correspondiente a la primera prueba experimental, donde se observa la disminución progresiva del peso del producto en función del tiempo. Este comportamiento es consistente con los datos reportados en la Tabla 7, en la cual se evidencia una reducción continua del porcentaje remanente de humedad a lo largo de la jornada. Durante las primeras horas (8:00–12:00), la pendiente de la curva es más pronunciada, lo que indica una mayor velocidad de secado asociada a las condiciones de mayor radiación solar y temperatura. Posteriormente, a partir del mediodía, la tasa de pérdida de humedad disminuye, reflejando la transición hacia una etapa controlada por la difusión interna del agua en el producto. Aunque las temperaturas y la radiación solar alcanzadas el día de la prueba no fueron las máximas, se evidencia que el porcentaje remanente final a las 4 pm es de 18.00% para la bandeja 1 que se encuentra en la parte inferior de la cabina de

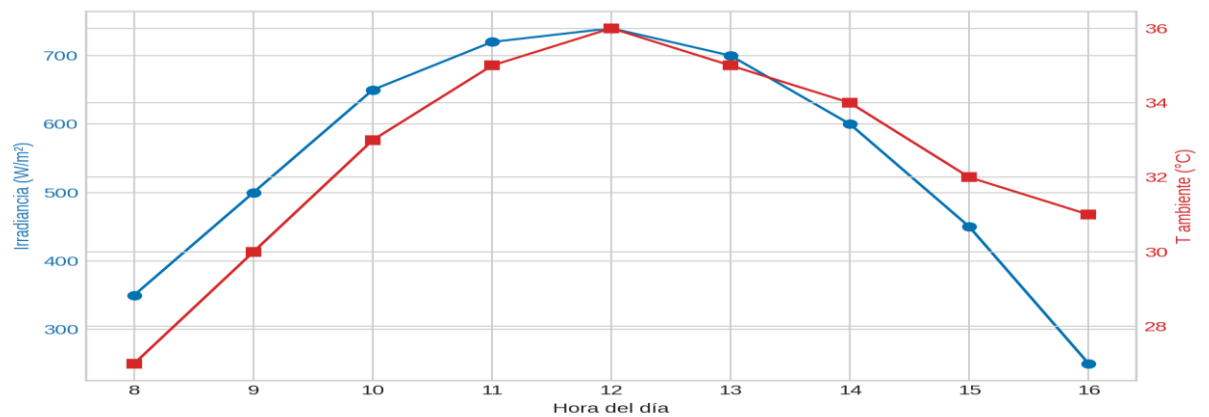
deshidratación. El éxito de la prueba se puede evidenciar en la gráfica 8, donde se presenta el producto con una pérdida del 82% de su masa inicial.

Figura 8. Aji habanero deshidratado luego de 8 horas.



Fuente: Autores del proyecto

Grafica 4. Grafica del cambio de la radiación y la temperatura con respecto al tiempo tomados en el momento de la prueba utilizando la aplicación NASA POWER | DAV



Fuente: (NASA,2025)

La temperatura y la irradiancia del día no fue constante, pero mantuvo valores elevados durante el mayor tiempo posible. Aun así, en la tabla 6, se evidencia una disminución de peso menor con respecto al tiempo en las bandejas que se encuentran en las ubicaciones más altas. Para poder determinar si esto fue un fenómeno externo o si entre más a alto este el producto más lento es su proceso de deshidratación, se realizó una segunda prueba.

Para la segunda prueba, se replicó el mismo método que se hizo con el ají habanero pero esta vez se utilizara el tomate como materia prima, cortado en rebanadas de 2 mm de grosor, se colocarán 3 kilos de tomate por cada bandeja, como se puede evidenciar en la figura 9, además, se utilizarán 10 bandejas.

Figura 9. Ubicación rodajas de tomate en bandeja.



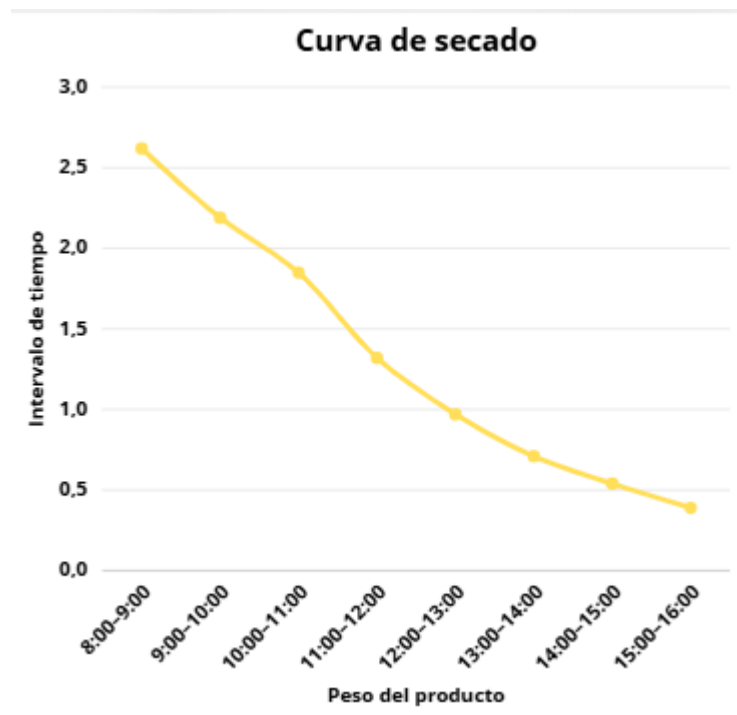
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Toma de datos de bandejas aleatorias con tomates, cada hora para determinar el peso final.

Bandeja	Intervalo	G (W/m²)	T_amb (°C)	Peso_fin (kg)	% Remanente
3	8:00–9:00	490	29.0	2,62	87,33%
8	9:00–10:00	580	32.0	2,19	73,00%
2	10:00–11:00	645	34.0	1,85	61,67%
6	11:00–12:00	720	35.0	1,32	44,00%
1	12:00–13:00	790	36.0	0,97	32,33%
8	13:00–14:00	847	37.0	0,71	23,67%
4	14:00–15:00	803	36.0	0,54	18,00%
10	15:00–16:00	690	33.0	0,39	13,00%

Fuente: Autores del proyecto

Grafica 5. Curva de secado peso final con respecto al tiempo para el tomate.



Fuente: Autores del proyecto

La Grafica 5 presenta la curva de secado correspondiente a la prueba experimental con tomate, donde se evidencia la disminución progresiva del peso del producto en función del tiempo. Este comportamiento es coherente con los datos reportados en la Tabla 8, en la cual se observa una reducción continua del porcentaje remanente de humedad a lo largo de la jornada de secado. Aunque las temperaturas alcanzadas el día de la prueba no fueron las máximas, se evidencia que fueron más favorables que en anteriores pruebas. El porcentaje remanente final a las 4 pm es de 13.00% para la bandeja 10 que se encuentra en la parte superior de la cabina de deshidratación, este valor supera el esperado del 15% y aunque los resultados muestran que, a mayor altura de la bandeja, el producto se va a deshidratar más lentamente, el resultado termina siendo favorecedor para la aplicación, tal como se evidencia en la figura 10.

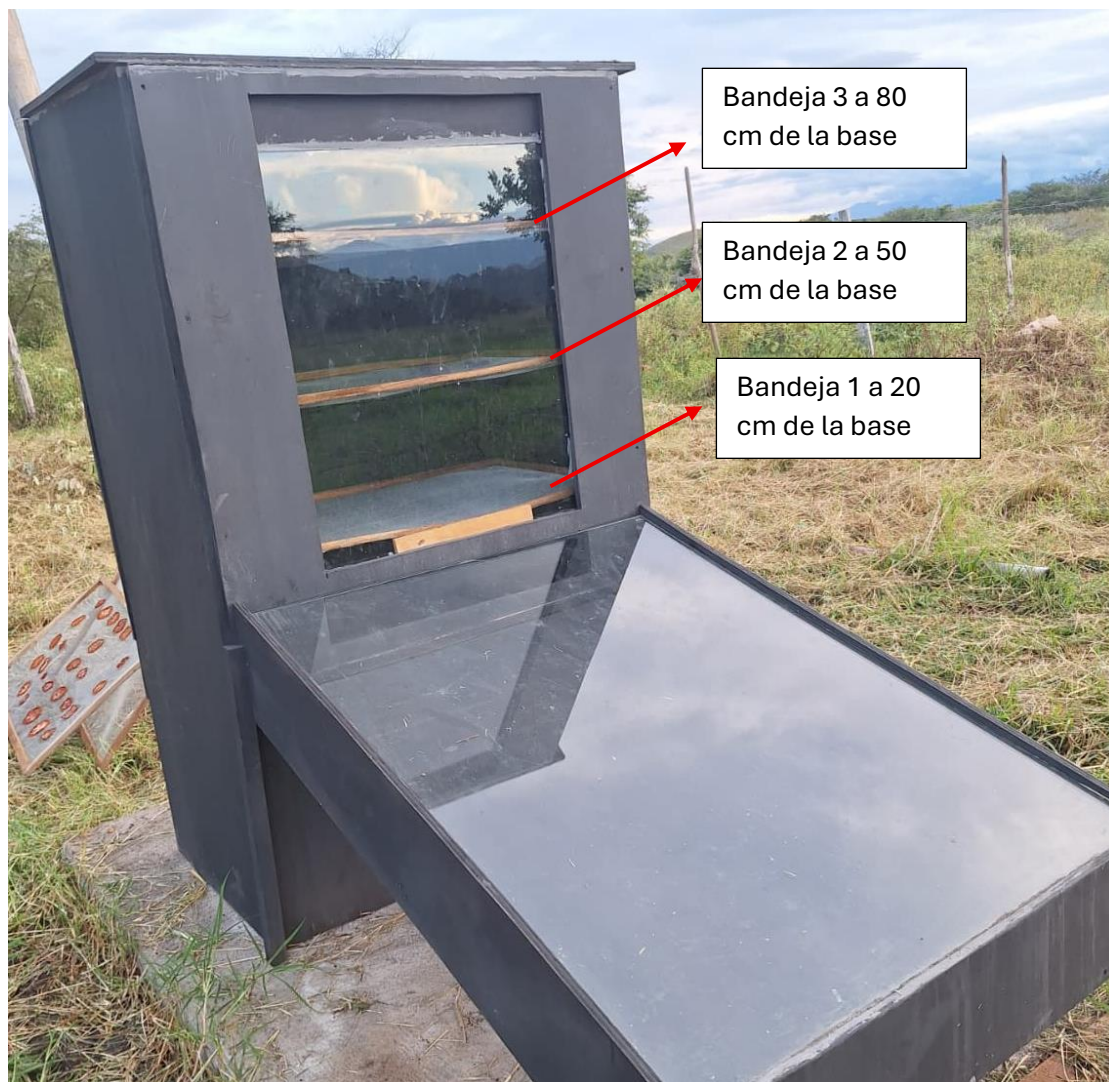
Figura 10. Resultado final luego de 8 horas de deshidratado de tomate.



Fuente: Autores del proyecto

Para la última prueba, consta de entender porque fue importante tomar los datos aleatorios de las pruebas 1 y 2. Para ello, se utilizaron 3 bandejas con 3 kg de ají habanero cortado en rodajas de 2mm, la primera bandeja se encuentra en la posición inicial a 20 cm de la base, la segunda bandeja se encuentra a 30 cm de la primera y la última se encuentra a otros 30 cm de la segunda. Tal como se puede evidenciar en la figura 11.

Figura 11. Configuración de la prueba numero 3



Fuente: Autores del proyecto

Los resultados fueron:

Bandeja 1.

Tabla 9. Toma de datos de bandeja a 20 cm de la base.

Intervalo	G (W/m²)	T_amb (°C)	Peso_fin (kg)	% Remanente
8:00–9:00	435	31.0	2.51	83,67%
9:00–10:00	594	32.0	2.02	67,33%
10:00–11:00	720	36.0	1.74	58,00%
11:00–12:00	805	38.0	1.11	37,00%
12:00–13:00	894	38.0	0.72	24,00%
13:00–14:00	854	38.0	0.61	20,33%
14:00–15:00	734	37.0	0.53	17,67%
15:00–16:00	584	32.0	0.49	16,33%

Fuente: Autores del proyecto

Bandeja 2

Tabla 10. Toma de datos de bandeja a 50 cm de la base.

Intervalo	G (W/m²)	T_amb (°C)	Peso_fin (kg)	% Remanente
8:00–9:00	435	31.0	2,51	83,67%
9:00–10:00	594	32.0	2,01	67,00%
10:00–11:00	720	36.0	1,71	57,00%
11:00–12:00	805	38.0	1,08	36,00%
12:00–13:00	894	38.0	0,7	23,33%

13:00–14:00	854	38.0	0,6	20,00%
14:00–15:00	734	37.0	0,51	17,00%
15:00–16:00	584	32.0	0,46	15,33%

Fuente: Autores del proyecto

Bandeja 3

Tabla 11. Toma de los datos para la bandeja a 80 cm de la base.

Intervalo	G (W/m²)	T_amb (°C)	Peso_fin (kg)	% Remanente
8:00–9:00	435	31.0	2,51	83,67%
9:00–10:00	594	32.0	2,02	67,33%
10:00–11:00	720	36.0	1,74	58,00%
11:00–12:00	805	38.0	1,1	36,67%
12:00–13:00	894	38.0	0,72	24,00%
13:00–14:00	854	38.0	0,62	20,67%
14:00–15:00	734	37.0	0,55	18,33%
15:00–16:00	584	32.0	0,51	17,00%

Fuente: Autores del proyecto

Grafica 6. Curva de secado humedad remanente con respecto al tiempo para el ají habanero.



Fuente: Autores del proyecto

En las Tablas 9,10 y 11 se evidencia que existe una variación en la pérdida de humedad en función de la ubicación de las bandejas dentro de la cámara de secado. Este comportamiento se complementa con la gráfica 6, donde se presenta la curva de secado para las tres alturas evaluadas (20 cm, 50 cm y 80 cm), permitiendo visualizar de manera comparativa la evolución del porcentaje de humedad remanente a lo largo del tiempo.

Se observa que la bandeja ubicada a 20 cm presenta un remanente final de 16,33 %, valor cercano al objetivo planteado en el proyecto. Por su parte, la bandeja a 50 cm, a pesar de encontrarse en una posición más elevada, alcanza un valor ligeramente menor de 15,33 %, lo que indica un comportamiento similar e incluso más eficiente en términos de secado. En contraste, la bandeja ubicada a 80 cm presenta un remanente final de aproximadamente 17 %, mostrando una leve disminución en la eficiencia del proceso a mayor altura.

La grafica 6 permite evidenciar que, aunque las tres curvas siguen una tendencia similar de disminución de humedad, existen pequeñas diferencias en la tasa de secado que pueden

atribuirse a la distribución del flujo de aire y la radiación dentro de la cámara. Este comportamiento puede explicarse por el diseño del deshidratador, ya que, como se observa en la Figura 11, la cámara permite un secado mixto: por un lado, el aire caliente proveniente del colector favorece la convección, y por otro, la incidencia directa de la radiación solar sobre el producto incrementa la transferencia de calor. Esta combinación contribuye a mejorar la eficiencia global del sistema, aunque también genera ligeras variaciones según la posición de las bandejas.

Finalmente, estos resultados permiten evidenciar la importancia de la ubicación del producto dentro del sistema y cómo esta puede influir en la velocidad de secado. En este sentido, la variabilidad observada justifica el uso del método de aleatoriedad aplicado en la primera prueba tanto para el ají como para el tomate, ya que este enfoque permite obtener resultados más representativos del comportamiento global del sistema, evitando sesgos asociados a posiciones específicas dentro de la cámara y fortaleciendo la validez de los datos experimentales.

VIII. ANÁLISIS DE COSTOS

i. Materiales utilizados

La selección de materiales para la construcción del deshidratador solar se realizó considerando criterios de eficiencia térmica, durabilidad, inocuidad alimentaria y viabilidad económica. Cada componente cumple una función específica en el sistema: desde la estructura principal, que debe garantizar estabilidad y resistencia, hasta los elementos que optimizan la transferencia de calor, como el vidrio templado y las superficies absorbentes.

Asimismo, se priorizó el uso de materiales disponibles en el mercado local para reducir costos y facilitar la replicabilidad del diseño por pequeños productores. Esta elección responde a los objetivos del proyecto, orientados a desarrollar una tecnología accesible, segura y sostenible para la conservación de alimentos en zonas rurales. A continuación, se realiza una estimación de costos en base a los materiales utilizados y componentes comprados:

Tabla 12. Costos del desarrollo del deshidratador

Ítem	Cantidad	Precio unitario (COP)	Subtotal (COP)
Triplex 18mm 1.22x2.44 m Araucoply	3	144,000	432,000
Triplex Refopanel Blanco 15mm 1.22x2.44 m	2	127,900	255,800
Pintura Exterior Esmalte Tipo 1 Negro Pintulux 1 gal	1	100,900	100,900

Inmunizante/Fungicida madera 3.5 kg (transparente)	1	99,900	99,900
Tornillo Lámina Avellanado Negro 8X1-1/2 100 Und Fixser	1	12,900	12,900
Sellador Sikaflex 1A Plus Purform Negro 300 ml	1	59,900	59,900
Bandeja en malla tejida	13	57,000	741,000
Vidrio templado 6 mm (pieza 1)	1	180,000	180,000
Vidrio templado 6 mm (pieza 2)	1	137,000	137,000
Triplex 9mm 1.22x2.44cm	2	106,900	213,800

Abrazadera palanca cierre pestillo (con seguro)	2	66,403	66,403
Pino 2x3 Pulgadas 3.2 Mts Cepillado 4.1x6.5cm	3	28,900	86,700
Bisagra Nudo Cabeza Redonda 2- 1/2Pg 2Und	2	15.9000	31.800
TOTAL			2,418,103

Fuente: Autores del proyecto

ii. Precios del mercado

El análisis de precios del mercado es fundamental para evaluar la viabilidad económica del deshidratador solar. Conocer el costo de los productos frescos y su valor agregado tras el proceso de deshidratación permite estimar márgenes de ganancia y proyectar la recuperación de la inversión. Esta información también facilita la comparación con alternativas comerciales y ayuda a definir estrategias de comercialización orientadas a pequeños productores. En este apartado se presentan los precios promedio de los productos seleccionados (tomate y ají habanero) en su estado fresco y deshidratado, con base en datos del mercado local y referencias comerciales.

- Tomate: \$3,500 por kg
- Ají habanero fresco: \$11.000 por kilo
- Tomate deshidratado: precio de mercado $\approx$ \$110,000 COP/kg.
- Ají habanero deshidratado: \$180,000 COP/kg.

iii. Resultados económicos

El análisis económico constituye un componente esencial en la evaluación integral del deshidratador, ya que permite determinar su viabilidad financiera y su potencial impacto en la generación de valor agregado para pequeños productores. Esta sección se orienta a cuantificar los márgenes de rentabilidad derivados del proceso de deshidratación solar, considerando variables críticas como el costo de adquisición del producto fresco, la reducción de peso tras el secado y el precio de comercialización del producto deshidratado.

iv. Tomate

Tabla 13. Consolidación resultados económicos obtenidos luego de una jornada de operación.

Métrica (por ciclo)	Valor (COP / kg)
Entrada fresca (kg)	30.0
Salida seca (kg)	4.5
Costo producto fresco (COP)	\$105,000
Ingresos por venta (COP)	\$495,000

Margen bruto (COP)	\$390,000
--------------------	-----------

Fuente: Autores del proyecto

La Tabla 13 presenta los resultados económicos obtenidos en un ciclo de deshidratación de tomate utilizando el deshidratador

solar diseñado. En ella se detallan métricas fundamentales como la masa inicial y final del producto, el costo de adquisición en estado fresco y los ingresos proyectados tras el proceso de secado. Estos datos permiten calcular el margen bruto por ciclo, constituyendo un indicador clave para evaluar la rentabilidad del sistema en condiciones reales de operación

v. Ají habanero

Tabla 14. Toma de datos de bandejas aleatorias con ají a 3kg, cada hora para determinar el peso final.

Métrica (por ciclo)	Valor (COP / kg)
Entrada fresca (kg)	30.0
Salida seca (kg)	4.5
Costo producto fresco (COP)	\$330,000
Ingresos por venta (COP)	\$810,000
Margen bruto (COP)	\$480,000

Fuente: Autores del proyecto

La Tabla 14 expone los resultados económicos correspondientes a un ciclo de deshidratación de ají habanero, procesado en el deshidratador solar bajo las condiciones experimentales establecidas. Se incluyen métricas esenciales como la masa inicial y final del producto, el costo de adquisición en estado fresco y los ingresos proyectados tras el secado, lo que permite calcular el margen bruto por ciclo

vi. Recuperación de inversión

La evaluación del tiempo requerido para recuperar la inversión inicial constituye un elemento crítico en el análisis de viabilidad económica del equipo. Este apartado presenta escenarios comparativos basados en la frecuencia de operación, el margen bruto por ciclo y proyectar la recuperación de la inversión. Para ello, El Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son métodos dinámicos de evaluación financiera ampliamente utilizados en gerencia de proyectos, ya que consideran el valor del dinero en el tiempo y permiten evaluar la rentabilidad del proyecto a lo largo de su vida útil.

- Inversión inicial: \$2,418,103 COP

- Ciclos por semana: 3

- Ciclos por año: 156

- Tasa de descuento: 10%

Para el cálculo del VAN por un año, se utiliza:

$$VAN = -I_0 + \frac{Ganancia * Ciclos por año}{1 + Tasa de descuento}$$

Para el cálculo del TIR por un año, se utiliza:

$$TIR = \frac{Ganancia * Ciclos por año}{inversion inicial} - 1$$

Para el cálculo del tiempo de la inversión, se utiliza:

$$Ciclos de recuperacion = \frac{Inversion inicial}{Ganancia por ciclo}$$

Tabla 15. Valores del VAN, TIR y Ciclos de recuperación de inversión

Escenario	VAN	TIR	Ciclos de recuperación
Solo Tomate	\$52,890,987.91	24.16	6.2
Solo Habanero	\$65,654,624.27	29.96	5

Fuente: Autores del proyecto

Al adoptar un escenario conservador de tres ciclos de operación por semana, la evaluación financiera mediante VAN y TIR continúa mostrando resultados altamente favorables. Los valores positivos de VAN y las tasas internas de retorno ampliamente superiores a la tasa de descuento confirman que el deshidratador solar es financieramente viable incluso bajo condiciones de operación moderada.

vii. Equipos comerciales

La comparación con equipos comerciales constituye un elemento clave para dimensionar la competitividad del deshidratador frente a soluciones convencionales disponibles en el

mercado. Este análisis permite evaluar diferencias significativas en términos de inversión inicial, capacidad de carga, consumo energético y costos operativos por ciclo. Los equipos industriales, generalmente eléctricos o a gas, presentan altos requerimientos de energía y precios que superan ampliamente el costo del diseño propuesto, lo que limita su adopción por pequeños productores rurales. Al contrastar estas variables, se busca evidenciar las ventajas económicas y ambientales del deshidratador solar, destacando su potencial como alternativa sostenible y de bajo costo para la conservación de alimentos en contextos agroindustriales y comunitarios

Las opciones cercanas a 30 kg por tanda (bandejas 32 $\approx$ 30–45 kg; 20 bandejas $\approx$ 20–30 kg).

Se incluyen precios de lista, consumos y tiempos típicos para frutas/hortalizas.

Equipos – precios y consumo

Tabla 16. Equipos comerciales.

Equipo	Energía	Capacidad aprox.	Precio (COP)	Potencia/Consumo	Referencia
Horno deshidratador 32 bandejas (Exhibir Equipos)	Eléctrico	30–40 kg	\$24,318,000	9 kW	Exhibir Equipos

Horno deshidratad or 32 bandejas (Exhibir Equipos)	Gas GN/GLP	30–40 kg	\$29,178,000	40.000 BTU/h	Exhibir Equipos
Horno deshidratad or 32 bandejas (Makfrio)	Gas GN/GLP	30–45 kg	\$29,170,000	40.000 BTU/h	Makfrio
Horno deshidratad or 20 bandejas (Grupo Zingal)	Gas GN/GLP	20–30 kg	\$24,000,000	70.000 BTU/h	Grupo Zingal

Fuente: Autores del proyecto

Costo operativo estimado por tanda (8 h base). Rango 6–10 h y sensibilidad de tarifas:

Tabla 17. Costo operativo por maquina comercial.

Equipo	Energía 8 h (kWh eq.)	Costo/tanda (base)	Rango 6–10 h	Sensibilidad tarifa/combustible	Notas
Eléctrico 32 bandejas	72.0 kWh	\$68,400 (a \$950/kWh)	\$51,300– \$85,500	a \$830/kWh: \$59,760; a \$1050/kWh: \$75,600	Potencia nominal 9 kW
Gas 32 bandejas (40.000 BTU/h)	93.8 kWh eq. (7.34 kg GLP)	\$37,425 (GLP a \$5100/kg) \$88,059 (GLP a \$12000/kg)	Proporciona 1 a horas	Ver GLP mayorista vs PVP	Makfrio/Exhibir mismo consumo
Gas 20 bandejas (70.000 BTU/h)	164.1 kWh eq. (12.84 kg GLP)	\$65,494 (GLP a \$5100/kg) \$154,103 (GLP a \$12000/kg)	Proporciona 1 a horas	Ver GLP mayorista vs PVP	Zingal H40

Fuente: Autores del proyecto

Supuestos de tiempo por tanda: 6–10 h para frutas y hortalizas con cortes delgados (control de 50–70 °C según producto).

Análisis gas vs eléctrico:

- Inversión: Horno de gas 32 bandejas suele costar +20% vs eléctrico equivalente.
- Operación: con GLP a granel (~\$5.100/kg), el costo por tanda de gas 32 puede ser inferior al eléctrico con tarifa de \$950/kWh; con GLP PVP (~\$12.000/kg) puede ser similar o superior.
- Desempeño: gas ofrece mayor potencia térmica disponible (40.000 BTU/h $\approx$ 11,7 kW), útil en climas fríos/húmedos; eléctrico simplifica acometidas y control.
- Seguridad: ambos requieren ventilación/extracción; gas exige cumplimiento de combustión y ventilación.

IX. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales del deshidratador solar evidencian una alta eficiencia en la reducción de humedad de productos agrícolas como el ají habanero y el tomate. En condiciones climáticas favorables, se logró alcanzar niveles de pérdida de peso cercanos al 15% en un periodo de 8 horas. Si comparamos estos datos con el tiempo teórico de aproximadamente 6.7 horas, que se calculó en el apartado “Cálculos de transferencia de calor en el colector solar” podemos determinar que sabiendo que el porcentaje de masa sólida de un tomate ronda en el 5% y el 95% es agua, para la 7ma hora de la prueba ya llevaba una pérdida de peso de 81.77%, dejando un remanente de 18.33%, si a este valor se le resta el 5% sólido que no se merma, quiere decir que a las 3 de la tarde, el

tomate ya había mermado hasta un 13.33% su porcentaje de humedad. Cumpliendo con los requerimientos funcionales establecidos para garantizar la conservación segura de los alimentos.

El comportamiento térmico dentro de la cámara de secado mostró variaciones según la ubicación de las bandejas, siendo más eficiente el secado en las posiciones intermedias e inferiores. Este fenómeno puede atribuirse a la dinámica del flujo convectivo y a la incidencia directa de radiación solar en las bandejas más cercanas a la base, donde se concentra el aire caliente proveniente del colector. No obstante, las diferencias observadas fueron mínimas, lo que indica una buena distribución térmica general en el sistema.

La configuración de la máquina, que combina un colector solar con una cámara de secado parcialmente expuesta a la radiación solar, demostró ser efectiva para mejorar la transferencia de calor y acelerar el proceso de deshidratación. El uso de bandejas de malla contribuyó significativamente a la uniformidad del secado, reduciendo los gradientes de humedad y mejorando la calidad final del producto.

En concordancia con los tiempos de secado alcanzados y las ligeras variaciones por posición de bandejas observadas en las pruebas, se concluye que el rendimiento del equipo permanece altamente dependiente de la disponibilidad de radiación solar: en días con nubosidad o radiación reducida se registrará una prolongación en la duración del ciclo de deshidratación e incluso puede impedir alcanzar la humedad objetivo en una sola jornada. Esta sensibilidad a la radiación y a la humedad relativa reportada de forma consistente en revisiones de secado solar respalda la necesidad de considerar intervalos operativos adicionales y estrategias de estabilización térmica cuando el clima es adverso.

El análisis financiero realizado mediante los métodos del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) permite concluir que el deshidratador solar diseñado es altamente rentable desde el punto de vista gerencial. Aun bajo un escenario conservador de operación de tres ciclos por semana, los valores de VAN obtenidos resultan ampliamente positivos y las tasas internas de retorno superan de forma significativa la tasa esperada del 10 %, lo que indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que genera un rendimiento muy superior al costo de oportunidad del capital. Este comportamiento financiero se explica por la baja inversión requerida, la ausencia de costos energéticos convencionales y la alta capacidad de generación de valor por ciclo productivo, confirmando que el deshidratador solar constituye una alternativa económicamente viable y atractiva para aplicaciones productivas rurales y de pequeña escala.

La recuperación de la inversión se estima en entre 5 a 7 ciclos o días, dependiendo del producto procesado y teniendo en cuenta que el cálculo se hace en base al margen bruto. Aun así, representa una tasa de retorno altamente favorable para pequeños productores rurales. En contraste, los equipos comerciales con capacidades similares presentan costos de adquisición entre \$24 y \$29 millones COP, además de requerir energía eléctrica o gas, lo que incrementa significativamente los costos operativos por tanda.

El deshidratador solar, al operar exclusivamente con energía térmica renovable, elimina la dependencia de combustibles fósiles y reduce los costos de operación a prácticamente cero. Esta característica no solo mejora la rentabilidad del sistema, sino que también lo posiciona como una solución sostenible alineada con las políticas de transición energética y desarrollo rural.

En conjunto, los resultados técnicos y económicos validan la hipótesis del proyecto, demostrando que es posible diseñar y construir un deshidratador solar eficiente, seguro y económicamente viable, con potencial de escalabilidad hacia aplicaciones comerciales y comunitarias en zonas rurales de Colombia.

X. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y del análisis integral del deshidratador solar mixto, se proponen las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras y desarrollos tecnológicos relacionados:

1. **Optimización del flujo de aire:** Se sugiere incorporar sistemas de ventilación asistida mediante energía fotovoltaica para mejorar la distribución del aire caliente dentro de la cámara de secado, especialmente en niveles superiores, donde se evidenció una ligera disminución en la eficiencia de deshidratación.
2. **Ampliación de la gama de productos:** Realizar pruebas con otros productos agrícolas de alta perecibilidad, como frutas tropicales, tubérculos y hierbas aromáticas, permitirá validar la versatilidad del sistema y ajustar parámetros específicos de secado según las características fisicoquímicas de cada alimento.
3. **Monitoreo automatizado:** Integrar sensores de temperatura, humedad relativa y radiación solar conectados a sistemas de adquisición de datos podría facilitar el control del proceso, mejorar la trazabilidad y permitir ajustes dinámicos en tiempo real para optimizar la eficiencia energética.

4. **Evaluación en diferentes regiones climáticas:** Replicar el estudio en zonas con condiciones climáticas distintas (mayor altitud, humedad relativa elevada o menor radiación solar) permitirá establecer límites operativos del sistema y adaptar el diseño a contextos diversos.
5. **Análisis de ciclo de vida (ACV):** Incluir estudios de impacto ambiental mediante metodologías de ACV contribuiría a cuantificar los beneficios ecológicos del sistema frente a alternativas convencionales, fortaleciendo su posicionamiento como tecnología sostenible.
6. **Escalabilidad y modelos de negocio:** Desarrollar versiones modulares del deshidratador para diferentes capacidades de carga, así como explorar esquemas de producción comunitaria o cooperativa, facilitaría su adopción por parte de asociaciones rurales y pequeños emprendimientos agroindustriales.
7. **Certificación y normativas sanitarias:** Evaluar el cumplimiento del deshidratador frente a normativas de inocuidad alimentaria y calidad permitirá su integración en cadenas de valor más exigentes, como mercados orgánicos, gourmet o de exportación.
8. **Operación bajo nubosidad y baja radiación solar:** Se recomienda considerar estrategias que permitan mantener la operación del sistema bajo climas adversos, especialmente en días nublados o con radiación variable. Entre las medidas sugeridas se encuentran el uso de ventilación asistida, la incorporación de almacenamiento térmico o la hibridación con fuentes complementarias de calor.

XI. REFERENCIAS

- Agronegocios. (2023). En el sector agrícola se pierden 6 millones de toneladas de alimentos al año. <https://www.agronegocios.co>

- Albarracín-Álvarez, M. D., Torres-Tamayo, E., & Laurencio-Alfonso, H. L. (2022). Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta. *Minería y Geología*, 38(3), 1–12. http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122022000300288
- ATLAS. Ti Research Hub. (2025). ¿Qué es el muestreo aleatorio y por qué es importante en investigación? <https://atlasti.com>
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2010). Solar drying. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002333>
- Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD). (2021). Estrategia municipal de respuesta a emergencias. <https://www.yaguara-huila.gov.co/Transparencia/BancoDocumentos/Consejo%20municipal%20de%20gesti%C3%B3n%20del%20riesgo%20desastres%20CMGRD.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). Estudio de pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/sinergia/documentos/estudio_perdidas_desperdicios_alimentos_ficha.pdf
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2020). Política para la prevención y reducción de las pérdidas y desperdicios de alimentos. (“Presentación de PowerPoint”) https://www.dnp.gov.co/LaEntidad_/misiones/mision-crecimiento-verde/Documents/Comite%20Sostenibilidad/Presentaciones/Sesi%C3%B3n%205/1_Avances_Politica_para_preencion_reduccion_de_perdidas_desperdicios_alimentos.pdf
- Economipedia. (2024). Muestreo aleatorio: definición, ventajas y aplicaciones. <https://economipedia.com>

- FAO. (2022). Prevención de pérdidas de alimentos poscosecha: Manual de capacitación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (“Inicio | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la ...”)
- FAO. (2025). Pruebas de campo para la recopilación de datos de pérdidas de alimentos y la compilación del índice de pérdidas de alimentos en Colombia, Costa Rica, México y Uruguay. (“Pruebas de campo para la recopilación de datos de pérdidas de alimentos ...”) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (“Inicio | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la ...”)
- FINAGRO. (2023). Gobierno define las líneas de crédito para pequeños productores agrícolas en 2023. (“Gobierno define las líneas de crédito para pequeños ... - Finagro”) <https://www.finagro.com.co/noticias/articulos/gobierno-define-las-lineas-credito-pequenos-productores-agricolas-2023>
- Herrera Zamora, D. M. (2020). Estudio y caracterización de recubrimientos selectivos basados en películas de cobalto negro para conversión de energía solar a térmica (Tesis doctoral). CINVESTAV-IPN. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/3412/ssit0016640.pdf>
- Juárez, E. H. (2006). Uso de la energía solar en deshidratación de frutas y verduras (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Puebla.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2025). NASA POWER Data Access Viewer (Version 2.5.22). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Oliveiros, C., & Ramírez, C. (2020). Construcción de secadores solares tipo túnel con nuevos materiales.

<https://caldas.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/11/2020/08/AVT0482->

[Construcci%C3%B3n-de-secadores-solares-tipo-t%C3%BAnel-con-nuevos-materiales.pdf](#)

- Ortiz-Rodríguez, N. M., Águila-León, J., & de los Ríos Ibarra, E. (2024). Escenarios favorables para la adopción de sistemas de secado solar con mirada al desarrollo territorial. Instituto de Energías Renovables, UNAM.
- Practical Action. (2020). Tray dryer design principles for small-scale food processing.
- Quintanar, J., & Aguilar, P. (2021). Selección del secado solar como tecnología apropiada para el secado de productos agrícolas. *Pistas Educativas*, 43(142), 1–15.
- Salhi, M., Chaatouf, D., Raillani, B., Bria, A., Amraqui, S., & Mezrhab, A. (2025a). (“Performance analysis of a forced indirect cabinet solar dryer for ...”) Modeling the drying trays of an indirect solar dryer: Porous medium versus solid zone. En *Advances in Sustainable Building Materials, Design and Energy Systems* (pp. 125–130). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-71914-1_15
- Salhi, M., Chaatouf, D., Raillani, B., Bria, A., Amraqui, S., & Mezrhab, A. (2025b). (“Performance analysis of a forced indirect cabinet solar dryer for ...”) Artificial intelligence application for optimal solar dryer design for agricultural produce. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2544254>
- Salvo, A., & Franco, J. (2022). Actualización del estado de arte del secado solar de alimentos a partir de una revisión bibliográfica latinoamericana. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(2), 45–60.
- Universidad Libre. (2019). Análisis de viabilidad y diseño de un deshidratador solar para el secado de citronela. <https://repository.unilibre.edu.co>