



Comparación de los efectos técnico-económicos del secado del arroz con secadoras de recirculación frente a métodos tradicionales

Comparison of the technical and economic effects of drying rice with recirculation dryers versus traditional methods

Mohseni Mohammad Hossein¹; Elsa Beatriz Fonseca Santanilla²

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Salle. dirección postal, Bogotá, Colombia.

² Escuela de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad de La Salle. dirección postal, Bogotá, Colombia.

ORCID de los autores:

M. M. Hossein: <https://orcid.org/0009-0007-6661-0230>

E. B. Fonseca Santillana: <https://orcid.org/0000-0002-7214-7613>

RESUMEN

El secado del arroz es una etapa crucial en la producción agrícola, afectando directamente la calidad del grano y la rentabilidad del productor. Los métodos tradicionales, como las torres estáticas y albercas de secado, a pesar de ser de bajo costo inicial, presentan desafíos significativos debido a su dependencia de las condiciones climáticas, lo que compromete la eficiencia y calidad del arroz. El objetivo de este estudio es comparar los efectos técnicos y económicos de los métodos tradicionales de secado del arroz frente a las secadoras de recirculación, evaluando sus ventajas y desventajas en términos de eficiencia, calidad del producto final y sostenibilidad económica. La investigación se basa en una revisión documental y estudios de campo en diversas regiones productoras de arroz, donde se analiza el desempeño de los métodos tradicionales frente a las secadoras de recirculación, considerando tanto aspectos técnicos como económicos. Las secadoras de recirculación representan una solución más eficiente y sostenible para el secado del arroz, mejorando la calidad del grano y reduciendo los costos operativos. Sin embargo, la alta inversión inicial y la falta de capacitación técnica representan barreras para los pequeños y medianos productores. Se concluye que las políticas públicas que proporcionen subsidios, financiamiento accesible y capacitación son esenciales para facilitar la adopción de estas tecnologías y contribuir a una agricultura más competitiva y sostenible.

Palabras clave: secado del arroz; secadoras de recirculación; eficiencia energética; métodos tradicionales; sostenibilidad agrícola.

ABSTRACT

Rice drying is a crucial stage in agricultural production, directly affecting grain quality and producer profitability. Traditional methods, such as static towers and drying pools, despite being initially low-cost, present significant challenges due to their dependence on weather conditions, which compromises rice efficiency and quality. The objective of this study is to compare the technical and economic effects of traditional rice drying methods versus recirculating dryers, evaluating their advantages and disadvantages in terms of efficiency, final product quality, and economic sustainability. The research is based on a documentary review and field studies in various rice-producing regions, where the performance of traditional methods versus recirculating dryers is analyzed, considering both technical and economic aspects. Recirculating dryers represent a more efficient and sustainable solution for rice drying, improving grain quality and reducing operating costs. However, the high initial investment and lack of technical training represent barriers for small and medium-sized producers. It is concluded that public policies that provide subsidies, accessible financing, and training are essential to facilitate the adoption of these technologies and contribute to a more competitive and sustainable agriculture.

Keywords: rice drying; recirculating dryers; energy efficiency; traditional methods; agricultural sustainability.

1. Introducción

El proceso de secado del arroz constituye una de las etapas más críticas dentro de la cadena de producción agrícola, pues incide directamente en la calidad final del grano y, por tanto, en la rentabilidad de los productores. La calidad del arroz está estrechamente relacionada con el método de secado empleado, dado que un proceso inadecuado puede comprometer tanto el valor comercial como las características fisico-químicas del grano, reduciendo su competitividad en los mercados nacionales e internacionales (FAO, 2023; Nguyen et al., 2022).

En diversas regiones rurales de los principales países productores de arroz, los métodos tradicionales de secado, como las torres estáticas y las albercas o patios de secado, continúan siendo los más utilizados debido a sus bajos costos iniciales y facilidad de implementación. No obstante, estos métodos presentan limitaciones técnicas que afectan la calidad del producto final. La falta de control preciso sobre variables críticas como la temperatura y la humedad del aire genera una alta variabilidad en los resultados, reduciendo la uniformidad del secado. Según Silva et al. (2021), esta inestabilidad conduce a pérdidas económicas significativas, afectando principalmente a los pequeños y medianos productores, quienes enfrentan dificultades para mantener su competitividad en un mercado global cada vez más exigente.

El secado del arroz depende de múltiples factores interrelacionados, entre ellos las condiciones climáticas, la disponibilidad tecnológica y la infraestructura poscosecha existente. En muchos contextos tropicales, las fluctuaciones de humedad y temperatura ambiental influyen directamente en la eficiencia del secado, lo que incrementa la probabilidad de deterioro o contaminación del grano (Rasul et al., 2022). Estas limitaciones evidencian la necesidad de modernizar los sistemas de poscosecha mediante la adopción de tecnologías más controladas y sostenibles.

En este sentido, el uso de secadoras de recirculación y sistemas automatizados ha cobrado relevancia como una alternativa viable para mejorar la eficiencia técnica y energética del proceso. Aunque requieren una inversión inicial más alta, su capacidad para mantener condiciones estables y uniformes durante el secado permite reducir pérdidas de calidad y optimizar el consumo energético (González et al., 2022; Singh & Sharma, 2023). Como señalan Morales et al. (2020), un secado eficiente no solo

garantiza la viabilidad comercial del producto, sino que también incide directamente en la rentabilidad a largo plazo del productor, al reducir los márgenes de pérdida y mejorar la estabilidad del mercado.

La transición hacia tecnologías más modernas y controladas representa, por tanto, una oportunidad estratégica para el fortalecimiento de la cadena de valor del arroz. El control preciso del proceso de secado puede mejorar la uniformidad del producto, incrementar la eficiencia energética y asegurar una mayor rentabilidad para los agricultores, contribuyendo a un sistema productivo más competitivo y sostenible en el tiempo (FAO, 2023; González et al., 2022).

En última instancia, la adopción de tecnologías de secado más eficientes no solo optimiza la calidad del arroz, sino que también puede transformar la competitividad del sector agrícola frente a un mercado global cada vez más exigente. Al ofrecer nuevas oportunidades de crecimiento y desarrollo para los agricultores contribuyendo a la creación de una agricultura más sostenible, resiliente y económicamente viable.

Este artículo tiene como objetivo comparar los efectos técnicos y económicos de los métodos tradicionales frente a las secadoras de recirculación, evaluando sus ventajas y desventajas en términos de eficiencia, calidad del producto final y sostenibilidad económica. Mediante este análisis, se expondrán las repercusiones de cada uno de estos métodos en la rentabilidad del productor, considerando tanto los beneficios inmediatos como los a largo plazo. Además, se abordarán los retos económicos y logísticos que enfrentan los pequeños productores en regiones rurales para acceder a tecnologías avanzadas.

2. Descripción general (técnico) de los sistemas tradicionales de secado del arroz

En el mundo agrícola, el secado del arroz es un proceso fundamental que ha evolucionado a lo largo de los siglos, pero muchos de los métodos tradicionales (Tabla 1) siguen siendo ampliamente utilizados debido a su simplicidad y efectividad. El secado adecuado del arroz es crucial para prevenir que el grano se deteriore debido a la humedad residual, que podría generar hongos, plagas o pérdida de calidad (García et al., 2020; Chupawa et al., 2021). Tradicionalmente, dos métodos básicos, las torres estáticas y las albercas de secado, son empleados para este fin, aprovechando las condiciones climáticas naturales para regular la humedad del grano.

Tabla 1

Sistemas tradicionales de secado del arroz y sus características principales

| Sistema | Descripción | Principales características |
|-----------------------------|--|---|
| Secado en patios o albercas | El arroz se extiende sobre superficies planas y se seca con la radiación solar, volteándolo manualmente. | Bajo costo y fácil operación, pero alta dependencia del clima y riesgo de contaminación. |
| Torres estáticas | El grano se introduce en una estructura vertical donde circula aire caliente desde la base. | Secado más uniforme que el solar, aunque con riesgo de sobrecalentamiento y consumo energético elevado. |
| Lecho fijo | El arroz se coloca sobre una cámara con aire caliente ascendente y flujo controlado. | Mayor control del proceso, pero limitada capacidad y tiempos largos de secado. |

Las torres estáticas son estructuras verticales en las que el arroz se organiza en capas sucesivas. Estas torres operan bajo el principio de circulación natural del aire, permitiendo que el aire fluya a través de las capas de arroz. Según un estudio realizado por Martínez & Sánchez (2022), este método depende en gran medida de la temperatura ambiental y la humedad relativa, lo que puede influir directamente en el tiempo necesario para completar el secado (Das et al., 2023). La construcción de estas torres es relativamente simple, lo que las convierte en una opción accesible para los pequeños agricultores. Sin embargo, la eficiencia del proceso está estrechamente vinculada a las condiciones meteorológicas, como la velocidad del viento y la temperatura, las cuales determinan cuán rápido se realiza el secado (Martínez & Sánchez, 2022; Damayanti et al., 2021). El proceso de secado se ve, por lo tanto, condicionado por las variaciones climáticas, siendo más rápido en días soleados y secos, y más lento cuando hay mayor humedad o nublados.

No obstante, el uso de las torres estáticas es complejo a pesar de su aparente simplicidad, ya que se requiere de una gestión cuidadosa para garantizar la calidad del arroz. Los agricultores deben monitorizar las condiciones del clima para maximizar el aprovechamiento del aire y el sol. En términos generales, el tiempo necesario para el secado del arroz puede variar dependiendo de estos factores, por lo que el proceso puede extenderse varios días, a veces incluso semanas. A pesar de esta variabilidad, las torres estáticas siguen siendo populares por la capacidad de procesar grandes volúmenes de arroz sin la necesidad de una infraestructura costosa (González & López, 2021; Cui et al., 2023).

Por otro lado, las albercas de secado son estructuras clave en la agricultura, especialmente en el secado de arroz, ya que permiten exponer el

grano a la radiación solar directa y al aire caliente para su deshidratación. Estas albercas, de longitud promedio entre 10 y 50 metros y ancho de 5 a 15 metros, están construidas con materiales altamente resistentes, como concreto o bloques de cemento, que aseguran la durabilidad y resistencia al agua. A diferencia de las torres estáticas, las albercas permiten colocar el arroz en capas finas de aproximadamente 10 a 20 cm, lo que facilita una circulación óptima del aire y una exposición máxima al calor, optimizando el proceso de secado (Figura 1 y 2).

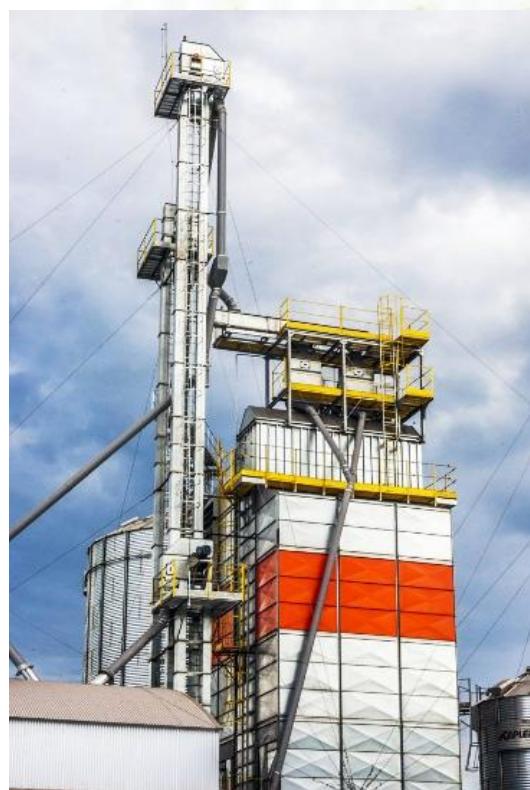


Figura 1. Torre estática de secado. Fuente. Imagen ilustrativa de torre estática de secado utilizada en la industria arrocera. © Asociación Internacional de Procesamiento de Arroz 2022.

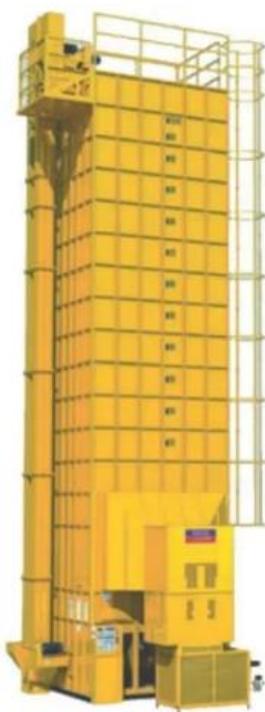


Figura 2. Torre de recirculación de secado Fuente: Imagen cortesía del Consorcio de Tecnología Agroindustrial (CTA). Fotografía de torre de secado continuo de última generación instalada en 2023. © CTA 2023.

Según García et al. (2020), el proceso de secado en albercas es altamente interactivo, ya que depende en gran medida de las condiciones climáticas. Los agricultores deben manipular el arroz constantemente, asegurando una distribución uniforme del aire. Esta constante interacción entre el ambiente y las prácticas agrícolas contribuye a un secado más eficiente y flexible, ajustándose a las variaciones de temperatura y humedad (Dalbhagat & Mishra, 2021). El uso de materiales como geotextiles o membranas plásticas también es común para mejorar la impermeabilidad y permitir el drenaje adecuado. Este tipo de secado es no solo más accesible, sino que también optimiza el uso de los recursos naturales, permitiendo un secado controlado en función de las condiciones locales, lo cual es fundamental para la calidad del arroz y la eficiencia en su procesamiento. Aunque ambos sistemas, torres estáticas y albercas de secado, comparten una característica común, que es el control manual y el uso de métodos naturales, la diferencia fundamental entre ellos radica en su forma de interactuar con el ambiente. Las torres estáticas ofrecen una circulación más eficiente del aire, mientras que las albercas se centran más en la exposición directa al sol y en la manipulación

activa del arroz para evitar la acumulación de humedad. Si bien ambos sistemas son sencillos y eficientes, carecen de tecnologías avanzadas como controlado-res automáticos de temperatura o sistemas que regulen la humedad interna del grano, lo que podría resultar en un secado menos uniforme (Chavez & Romero, 2020; Ding et al., 2018).

El control del proceso de secado, aunque básico, sigue siendo vital para la calidad final del arroz. Sin la capacidad de monitorear con precisión factores como la humedad interna del grano, existe el riesgo de que el arroz no se seque de manera homogénea, lo que podría generar problemas de calidad a largo plazo, como la proliferación de hongos o una textura deficiente (Smith et al., 2019; Ding et al., 2023). La falta de tecnología avanzada en estos métodos hace que el proceso dependa en gran medida de la experiencia del agricultor, lo que puede ser tanto una ventaja como una limitación. A pesar de esto, los agricultores han desarrollado una gran habilidad para determinar el momento exacto en que el arroz está seco, lo cual es crucial para garantizar la mejor calidad posible del grano (Delfiya et al., 2021).

En términos de dimensiones, las torres estáticas suelen contar con varios niveles apilados donde el arroz se distribuye en capas delgadas de entre 5 y 10 cm. Esta disposición permite una circulación eficiente del aire, pero al mismo tiempo hace que el tiempo de secado sea más largo en comparación con los métodos modernos. Las albercas de secado, por su parte, ofrecen un área más amplia, donde el arroz se extiende uniformemente. Si bien este método depende en gran medida de la radiación solar y el aire caliente, es menos eficiente cuando las condiciones climáticas no son favorables (Chavez & Romero, 2020; Dong et al., 2023).

Ambos métodos siguen siendo de gran relevancia debido a su bajo costo y la accesibilidad para los agricultores en áreas rurales. No obstante, con el aumento de la demanda de arroz de alta calidad y la creciente competencia en los mercados internacionales, los productores están buscando maneras de modernizar estos métodos, implementando tecnologías que ofrezcan mayor control sobre el proceso de secado.

3. Descripción general de los sistemas modernos de secado del arroz

En la agricultura moderna, el secado del arroz juega un papel crucial en la preservación de la calidad del grano, no solo para asegurar su

conservación sino también para optimizar su posterior comercialización. Los avances tecnológicos en este campo han permitido la creación de secadoras de recirculación, que son sistemas avanzados y eficientes destinados a mejorar el proceso de secado (Figura 3). Estos secadores operan bajo un principio cerrado, recirculando el aire caliente dentro de la unidad, lo que optimiza el proceso al mantener un ambiente controlado durante todo el ciclo de secado del arroz (Tabla 2). Este enfoque cerrado no solo asegura un secado más homogéneo, sino también un ahorro significativo de energía y un aumento en la eficiencia global del proceso (Mao & Wang, 2023).

Una de las especificaciones técnicas clave de los sistemas de secado de recirculación es su capacidad para mantener una temperatura constante a lo largo de todo el proceso. En lugar de depender de factores climáticos externos como la variabilidad en la temperatura ambiente y la humedad relativa, estos sistemas permiten que la temperatura y la humedad dentro de la secadora se ajusten y mantengan a niveles óptimos de manera automática. Este control preciso no solo mejora la eficiencia del proceso de secado, sino que también asegura que cada grano de arroz se trate de manera uniforme. El aire caliente se distribuye de manera controlada a través del grano, lo que facilita una deshidratación más rápida y eficiente, sin generar puntos calientes o fríos que puedan afectar negativamente la calidad del arroz (Naveed et al., 2022).

El control de la humedad es otra especificación fundamental. Las secadoras de recirculación permiten regular de forma continua la humedad en el aire que circula a través de la carga de arroz, adaptándose a las variaciones del entorno interno y asegurando que los granos sean secados bajo condiciones constantes. Según Ramírez et al. (2023), este control preciso no solo optimiza la

distribución del aire, sino que también reduce las variaciones en el tiempo de secado, lo que reduce considerablemente los costos operativos y mejora la calidad del grano al evitar un secado desigual. Además, los sistemas modernos permiten ajustar la velocidad del flujo de aire y su dirección, lo que facilita un secado más eficiente y uniforme.

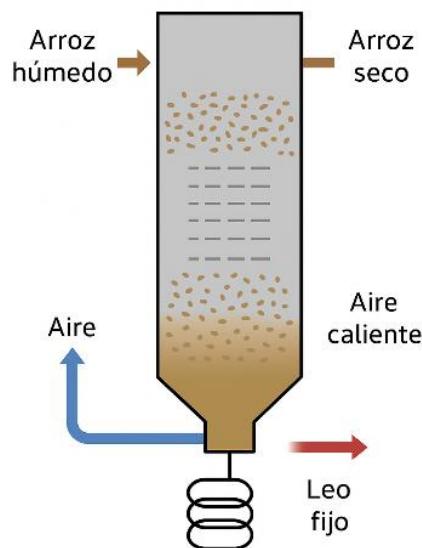


Figura 3. Secador de recirculación continua. Elaborado con programa de diseño SolidWorks.

3.1. Automatización en el proceso de secado

Una de las características destacadas de las secadoras modernas es su integración con sistemas automatizados que permiten monitorear y ajustar continuamente las condiciones de secado en tiempo real. Este proceso es posible gracias a los sensores de temperatura y humedad que se instalan dentro de la secadora. Los sensores miden de manera constante el estado del arroz y ajustan los parámetros del proceso en tiempo real para garantizar que las condiciones de secado se mantengan dentro de los rangos ideales.

Tabla 2

Sistemas modernos de secado del arroz y sus características principales

| Sistema | Descripción | Principales características |
|-------------------------------------|---|--|
| Secadoras de recirculación continua | El arroz circula de forma constante dentro del secador mientras el aire caliente se distribuye uniformemente. | Alta eficiencia energética, secado uniforme y menor daño al grano. |
| Secadoras de flujo mixto | Combinan flujo de aire cruzado y contracorriente para optimizar la transferencia de calor. | Mayor uniformidad y reducción del consumo energético. |
| Secadoras de lecho fluidizado | El aire caliente fluye a alta velocidad suspendiendo los granos durante el secado. | Proceso rápido, homogéneo y con bajo riesgo de fisuras. |

Fuente: Elaborado con base en FAO (2023), González et al. (2022) y Singh & Sharma (2023).

La retroalimentación continúa proporcionada por estos sensores garantiza que el sistema pueda hacer ajustes inmediatos para evitar situaciones como el sobrecalentamiento o el secado insuficiente, condiciones que podrían dañar el arroz o favorecer la proliferación de hongos (Nanvakenari et al., 2022).

El sistema automatizado no solo mejora la precisión en el secado, sino que también minimiza los riesgos derivados de errores humanos. La automatización asegura que el arroz se seque de manera consistente y confiable en cada ciclo de secado, sin la necesidad de intervención manual constante. Además, esta retroalimentación en tiempo real contribuye a una mayor estabilidad en el proceso, lo que permite que las secadoras mantengan condiciones óptimas para la producción en grandes volúmenes. Esto es especialmente relevante en instalaciones a gran escala donde la eficiencia y la consistencia son claves para la competitividad en mercados globales (Fernández et al., 2022).

La integración de estos sistemas automatizados no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también optimiza la calidad del arroz final, asegurando que cada lote sea procesado bajo las mismas condiciones. Este nivel de control es fundamental, sobre todo en países con grandes volúmenes de producción de arroz, donde la consistencia y la alta calidad del producto son esenciales para satisfacer las expectativas de los consumidores y los estándares internacionales (Nanvakenari et al., 2021).

3.2. Eficiencia energética y sostenibilidad

Otra ventaja importante de los sistemas modernos de secado es su capacidad para optimizar el consumo energético. Al operar en un ciclo cerrado y recircular el aire caliente, estos sistemas maximizan el uso de la energía, lo que resulta en una mayor eficiencia energética en comparación con los métodos de secado tradicionales. La reducción del consumo energético es un aspecto fundamental, ya que no solo reduce los costos operativos, sino que también contribuye a la sostenibilidad del proceso. Esto se logra mediante un control preciso de la temperatura y la humedad, lo que garantiza que la energía se utilice de manera eficiente, sin desperdicios innecesarios.

El uso eficiente de la energía no solo tiene beneficios económicos, sino que también ayuda a reducir el impacto ambiental de la industria. A medida que la demanda de productos agrícolas

sostenibles aumenta a nivel global, las tecnologías de secado que emplean menos recursos y que producen menos residuos son cada vez más valoradas (Mella et al., 2022).

3.3. Diversidad en capacidades y configuraciones

Las secadoras de recirculación están disponibles en una amplia gama de tamaños y capacidades, adaptándose a las necesidades específicas de cada operación. Existen modelos más pequeños diseñados para instalaciones de tamaño medio, así como sistemas de mayor capacidad para plantas industriales que requieren secar grandes cantidades de arroz de manera continua. El diseño modular de estas secadoras permite que se adapten a diferentes configuraciones y que se integren de manera eficiente en líneas de producción ya existentes. Según Chaves et al. (2020), las dimensiones compactas de estas máquinas permiten su instalación en espacios reducidos, sin sacrificar la capacidad de secado, lo que las convierte en una opción ideal tanto para pequeños productores como para grandes empresas del sector arrocero.

El tamaño y la capacidad de los secadores de recirculación están diseñados para optimizar la espacialidad y eficiencia operativa en instalaciones de producción de arroz, desde fábricas locales hasta grandes plantas industriales. Este enfoque permite que los productores adapten sus operaciones a las demandas del mercado y al volumen de arroz que deben procesar, sin comprometer la calidad del producto final ni la eficiencia del proceso (Mujumdar, 2015; Odek et al., 2018).

3.4. Beneficios de las secadoras de recirculación sobre la calidad del arroz y la sostenibilidad

Uno de los aspectos más destacados de los secadores de recirculación es su capacidad para garantizar un secado consistente y de alta calidad. El control detallado de las condiciones de secado es fundamental para obtener arroz de primera calidad.

Gracias al sistema automatizado y los sensores inteligentes, el proceso se lleva a cabo de manera precisa y controlada, lo que reduce las variaciones y mejora la calidad del arroz, evitando defectos como los granos quemados o mal secados. Además, la optimización de los tiempos de secado y la eficiencia energética también contribuye a reducir los costos operativos y aumentar la

sostenibilidad del proceso (Ramírez et al., 2023; Meengern et al., 2014).

El futuro del secado del arroz parece estar marcado por el uso de tecnologías inteligentes que combinan eficiencia, sostenibilidad y precisión. A medida que las industrias agrícolas continúan adaptándose a las exigencias de los mercados globales y a las preocupaciones ambientales (Chaves et al., 2020; Mella et al., 2022).

4. Comparación entre los sistemas - Ventajas y desventajas a nivel técnico

Cuando comparamos los métodos tradicionales de secado con los sistemas modernos, como los secadores de recirculación, emergen diferencias notables que no solo afectan la eficiencia técnica, sino también el control de variables y la homogeneidad del secado (Tabla 3). En este escenario, los secadores de recirculación destacan como una solución avanzada y eficiente, operando bajo un principio cerrado que recircula continuamente el aire caliente. Este diseño innovador permite que el aire fluya de manera constante a través del arroz, lo que garantiza un secado uniforme y controlado, un factor clave que marca la diferencia con los métodos tradicionales (Rattanadecho & Makul, 2016).

A diferencia de los métodos convencionales, donde el secado depende de factores climáticos impredecibles como la temperatura ambiente o la velocidad del viento, los secadores de recirculación logran mantener una distribución homogénea de la temperatura, lo que optimiza la eficiencia del proceso. Este control preciso asegura que cada grano de arroz reciba el mismo tratamiento durante el proceso de secado, mejorando no solo el rendimiento, sino también la calidad del producto final. Según Gómez y Rodríguez (2021), la circulación constante del aire dentro de la secadora mantiene la temperatura ideal, lo que reduce los tiempos de secado y mejora la calidad constante del grano (Shen et al., 2020).

Tabla 3
Comparación técnica entre métodos tradicionales y secadoras de recirculación

| Método de Secado → Característica | Albercas de Secado | Torres Estáticas | Secadoras de Recirculación |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Tiempo de secado (días) | 3 - 4 | 2 | 1 |
| Dependencia climática | Alta | Alta | Baja |
| Variabilidad del Tiempo de Secado | Alta | Moderada | Baja |
| Homogeneidad del Secado | Moderada | Baja | Alta |
| Calidad del Producto Final | Aceptable | Inferior | Alta |
| Riesgo de Sobrecalentamiento | Moderado | Alta | Bajo |

Uno de los mayores avances de los secadores de recirculación es la incorporación de tecnologías avanzadas de sensores que permiten monitorear la humedad y la temperatura en tiempo real. Estos sensores actúan como guardianes del proceso, ajustando automáticamente las condiciones internas de la secadora según sea necesario. Como explican Fernández et al. (2022), esta precisión tecnológica no solo asegura un secado uniforme, sino que también minimiza las variaciones en la calidad del arroz, un problema comúnmente asociado con los métodos tradicionales. Al monitorear continuamente el estado del arroz, se reduce significativamente el riesgo de daños por sobrecalentamiento o secado incompleto, lo que a menudo ocurre cuando los sistemas no tienen un control automático (Shen et al., 2021).

En contraste, los métodos tradicionales, como las torres estáticas y las albercas de secado, dependen en gran medida de las condiciones climáticas, lo que limita su capacidad para garantizar un secado consistente y homogéneo. Estos métodos, aunque sencillos, están sujetos a las variaciones naturales de la temperatura ambiente y la humedad, lo que genera inconsistencias en el proceso. En las torres estáticas, la circulación del aire no es tan eficiente como en los sistemas modernos, lo que puede resultar en la formación de puntos calientes o áreas mal secadas dentro de la torre. Este fenómeno afecta negativamente la homogeneidad del secado, lo que puede dar lugar a un producto final de calidad inferior (Rumruaytum et al., 2014). Por ejemplo, en las albercas de secado, el arroz se extiende en una capa delgada y se expone al aire y al sol. Sin embargo, este método está profundamente influenciado por las condiciones meteorológicas, lo que puede prolongar los tiempos de secado o retrasar el proceso en días nublados o lluviosos.

A pesar de ser una opción económica, los métodos tradicionales no ofrecen el mismo nivel de control y precisión que los sistemas modernos, lo que afecta directamente a la consistencia y la calidad del arroz (Salvatierra-Rojas et al., 2020; Ratseewo et al., 2022).

Para comprender mejor las diferencias entre los métodos tradicionales y los secadores de recirculación, es esencial analizar los datos estadísticos obtenidos de estudios de campo y la investigación técnica realizada en diversas regiones productoras de arroz. Estos estudios destacan cómo la implementación de secadoras de recirculación ha transformado la eficiencia del proceso de secado, reduciendo considerablemente las variaciones de calidad y aumentando los rendimientos. A continuación, se presentan dos tablas que resumen los resultados clave de esta comparación.

Para concluir, la comparación técnica entre los sistemas tradicionales y los secadores de recirculación (Tabla 3) muestra que, aunque ambas tecnologías tienen su lugar en la producción agrícola, los secadores de recirculación ofrecen ventajas claras en términos de eficiencia y calidad del producto final. Esto posiciona a los sistemas de secado de recirculación como una opción

viable tanto para los agricultores como para los responsables de la industria, al ofrecer una alternativa más limpia y menos costosa. Los secadores de recirculación se posicionan como una solución clave para satisfacer estas demandas. Su capacidad para ofrecer un proceso de secado eficiente y respetuoso con el medio ambiente, a la vez que mantiene la calidad del producto, las convierte en una inversión crucial para los productores de arroz de todo el mundo.

5. Aspectos económicos de los sistemas de secado (tradicionales - modernos)

El análisis económico de los sistemas de secado del arroz es esencial para comprender las implicaciones financieras de la adopción de nuevas tecnologías en la producción agrícola (Tabla 4). En este contexto, los costos iniciales y operativos, así como los beneficios a largo plazo, son factores determinantes que pueden influir en el éxito o fracaso de una operación agrícola, dependiendo de la tecnología elegida. Si bien las tecnologías de secado modernas, como los secadores de recirculación, representan una inversión inicial considerablemente más alta, su impacto a largo plazo en la eficiencia y la calidad del arroz puede justificar estos costos.

Tabla 4
Comparación general de los métodos de secado del arroz

| Características | Sistemas tradicionales (patios, torres estáticas, lecho fijo) | Secadoras de recirculación continua | Secadoras de flujo mixto y lecho fluidizado |
|----------------------------------|--|--|---|
| Costo de inversión | Bajo, accesible para pequeños productores. | Medio a alto, requiere infraestructura y energía. | Alto, requiere tecnología avanzada. |
| Control de temperatura y humedad | Limitado; depende del clima y la supervisión manual. | Alto; sistemas automatizados con control continuo. | Muy alto; control preciso y homogéneo. |
| Uniformidad del secado | Irregular; variaciones significativas en humedad. | Buena uniformidad por recirculación constante. | Excelente uniformidad; mínima variación. |
| Tiempo de secado | Prolongado (8–24 h según clima). | Medio (4–8 h, depende del flujo). | Corto (2–4 h aprox.). |
| Eficiencia energética | Baja; alto consumo o pérdida por radiación. | Alta; recuperación parcial del aire caliente. | Muy alta; optimiza transferencia de calor. |
| Daños al grano (fisuras, color) | Frecuentes por sobreexposición o secado desigual. | Reducidos; temperatura más estable. | Mínimos; secado uniforme y rápido. |
| Dependencia climática | Muy alta. | Baja. | Nula o mínima. |
| Capacidad operativa | Limitada, adecuada para volúmenes pequeños. | Media a alta, adaptable a mediana escala. | Alta, ideal para producción industrial. |
| Requerimientos técnicos | Mantenimiento sencillo, mano de obra manual. | Requiere personal capacitado y control automatizado. | Requiere operación técnica y monitoreo constante. |
| Impacto en la calidad comercial | Variable; afecta apariencia y almacenamiento. | Consistente; buena calidad de grano final. | Óptima; alta calidad y mayor valor comercial. |

Fuente: Elaboración con base en FAO (2023), González et al. (2022), Singh & Sharma (2023) y Morales et al. (2020).

5.1. Costos y rentabilidad de los métodos tradicionales

Los métodos tradicionales de secado, tales como las torres estáticas y las albercas de secado, tienen la ventaja de una baja inversión inicial, lo que los hace atractivos para los pequeños agricultores, especialmente en áreas rurales con recursos limitados. De acuerdo con Pérez et al. (2020), la inversión inicial en tecnologías tradicionales puede ser hasta un 50% más baja en comparación con los secadores de recirculación. Sin embargo, esta accesibilidad económica viene acompañada de altos costos operativos a largo plazo debido a su ineficiencia térmica. Estos sistemas requieren más energía y tiempo para completar el proceso de secado, lo que incrementa significativamente los costos de operación.

Según Silva et al. (2021), el secado irregular en métodos tradicionales puede resultar en pérdidas de hasta un 15% en la producción debido a granos mal secados o de calidad inferior, que no cumplen con los estándares de los mercados internacionales. Esto obliga a los productores a vender su arroz a precios más bajos o incluso a enfrentar rechazos de lotes enteros. Sin embargo, los desafíos económicos, especialmente para los pequeños y medianos productores, siguen siendo un obstáculo importante que debe ser superado mediante subsidios, capacitaciones técnicas y apoyos gubernamentales.

5.2. Impacto económico de la variabilidad climática

En sistemas como las torres estáticas, la circulación del aire es menos eficiente que en las tecnologías modernas, lo que puede generar zonas de secado desigual dentro de la estructura. Este secado inconsistente no solo compromete la calidad del arroz, sino que también aumenta el riesgo de daño al grano durante el procesamiento. Esto tiene un impacto directo en el valor comercial del arroz, afectando negativamente la rentabilidad de los productores (Silva et al., 2021). Además, la variabilidad en los tiempos de secado hace que los productores tradicionales no puedan acceder fácilmente a mercados internacionales con estándares estrictos de calidad, lo que limita sus oportunidades de venta y la competitividad en el mercado global.

5.3. Costos y beneficios de los secadores de recirculación

Por otro lado, los secadores de recirculación, que representan una solución tecnológica avanzada,

requieren una inversión inicial mucho mayor. Según estimaciones recientes, la inversión inicial en una secadora de recirculación es aproximadamente 2 a 3 veces mayor que la de los sistemas tradicionales, lo que representa un 100% a 200% de incremento en el costo inicial (Ramírez et al., 2020). Sin embargo, el análisis económico a largo plazo revela que los beneficios financieros de estas tecnologías superan con creces los costos iniciales.

Una de las principales ventajas de los secadores de recirculación es su eficiencia energética. Estos sistemas recirculan el aire caliente de manera continua, lo que asegura una distribución homogénea de la temperatura y reduce significativamente el consumo de energía. Según el artículo *"Influences of emerging drying technologies on rice quality"* (2021), los secadores de recirculación pueden reducir los costos energéticos en un 20% a 30% en comparación con los métodos tradicionales. Además, el tiempo de secado se reduce considerablemente, lo que no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también permite un mayor volumen de producción en el mismo período de tiempo.

El control automatizado de temperatura y humedad en los secadores de recirculación también tiene un impacto positivo en la calidad del arroz. Al asegurar un secado uniforme y evitar problemas de sobrecalentamiento o secado incompleto, estas tecnologías permiten a los productores obtener un arroz de mayor calidad, lo que facilita el acceso a mercados internacionales exigentes y mejora el precio de venta del producto. Según García-Sánchez et al. (2022), los productores que utilizan secadoras de recirculación pueden obtener un 20% a 25% más por cada tonelada de arroz debido a la mejora en la calidad del producto final.

5.4. Rentabilidad a largo plazo y competitividad

El análisis financiero a largo plazo sugiere que, aunque los costos iniciales de los secadores de recirculación sean altos, los ahorros operativos y la mejora en la calidad del arroz compensan rápidamente esta inversión. El tiempo de secado reducido, junto con el bajo consumo energético y la mejora en la calidad del arroz, aumenta significativamente la rentabilidad de los productores. Además, la capacidad para acceder a mercados internacionales y vender arroz de alta calidad proporciona una ventaja competitiva significativa, especialmente en un entorno global donde la calidad es un factor determinante para la demanda del producto.

Como señalan García-Sánchez et al. (2022), la mejora en la competitividad es uno de los principales beneficios a largo plazo de los secaderos de recirculación. La reducción de los costos operativos y la capacidad de ofrecer un producto de mejor calidad permiten a los productores mantenerse competitivos en mercados globales, donde los márgenes de beneficio son estrechos y la calidad es esencial para destacar entre la competencia.

6. Impacto ambiental de los sistemas de secado

En un contexto global donde la sostenibilidad se ha convertido en un objetivo central para diversas industrias, incluida la agricultura, el impacto ambiental de las tecnologías agrícolas juega un papel crucial en la adopción y viabilidad de nuevas soluciones. En este sentido, los sistemas de secado del arroz no son una excepción. Si bien los métodos tradicionales de secado, como las torres estáticas y las albercas de secado, han sido una opción accesible para muchos productores debido a su baja inversión inicial, el creciente énfasis en la sostenibilidad y la eficiencia energética hace que su uso prolongado resulte insostenible, especialmente en un escenario donde las normativas ambientales son cada vez más estrictas.

Los métodos tradicionales de secado del arroz dependen en gran medida de los combustibles fósiles para generar el calor necesario en el proceso de secado. Esta dependencia de fuentes no renovables contribuye significativamente a la huella de carbono de la agricultura. La emisión de gases de efecto invernadero, en particular dióxido de carbono (CO₂), es un factor clave que exacerba el cambio climático. Según Silva et al. (2021), el proceso de secado en los métodos tradicionales es altamente ineficiente desde el punto de vista energético, lo que obliga a los agricultores a utilizar grandes cantidades de energía para completar el proceso de secado. Esto genera no solo altos costos operativos, sino también un desperdicio de recursos que contribuye a la degradación ambiental.

Desafíos medioambientales: Además de la ineficiencia energética, los métodos tradicionales de secado del arroz tienen un impacto directo en la calidad del aire. El uso de combustibles fósiles para generar calor no solo contribuye a las emisiones de gases contaminantes, sino que también afecta la salud de las comunidades cercanas a los lugares de producción. Estos métodos carecen de un control adecuado de las

emisiones durante el proceso de secado, lo que genera gases tóxicos que afectan tanto el medio ambiente como la salud pública. Como destaca Silva et al. (2021), este problema se ve amplificado en áreas rurales donde la infraestructura para controlar las emisiones es limitada, resultando en condiciones insalubres y una baja calidad de vida para las comunidades cercanas.

El impacto negativo de estos métodos en la biodiversidad local también es preocupante. Los residuos y las emisiones de estos procesos de secado pueden contaminar los cuerpos de agua cercanos y alterar el equilibrio de los ecosistemas. Esta falta de eficiencia energética y la contaminación ambiental generada por las tecnologías tradicionales son factores que perpetúan un ciclo de insostenibilidad, lo que amenaza tanto la salud de los ecosistemas como la rentabilidad a largo plazo de los productores agrícolas. Hernández & Rodríguez (2018) señalan que el desperdicio de energía y la emisión de gases contaminantes en los métodos tradicionales contribuyen significativamente a la degradación de los recursos naturales y al deterioro del aire, afectando negativamente el ambiente.

Sostenibilidad en secadoras de recirculación: En contraste, los secaderos de recirculación, aunque inicialmente más costosas, ofrecen claras ventajas en términos de sostenibilidad. Estas secadoras operan bajo un sistema cerrado que recicla el aire caliente, lo que optimiza el uso de los recursos y reduce significativamente las emisiones de gases contaminantes. Este sistema cerrado minimiza la necesidad de combustibles fósiles y reduce las emisiones de CO₂, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible. El reciclaje del aire caliente dentro del sistema no solo reduce las emisiones, sino que también mejora la eficiencia energética, lo que permite a los productores reducir sus costos operativos y hacer un uso más racional de la energía (Pomares Fiallo et al., 2023).

A través de la optimización del consumo energético y la reducción de las necesidades de combustibles fósiles, los secaderos de recirculación ofrecen una solución más sostenible para el secado del arroz. Según el estudio de Pomares Fiallo et al. (2023), estas secadoras no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también contribuyen a la reducción de la huella de carbono en la agricultura. Al operar en un sistema cerrado y recircular el aire, se minimiza el

desperdicio energético, lo que hace que el proceso de secado sea mucho más eficiente en términos de uso de recursos y emisiones.

Beneficios a largo plazo: Además de mejorar la sostenibilidad ambiental, los secadores de recirculación permiten que los productores cumplan con normativas ambientales más estrictas respecto a las emisiones y el uso de recursos. A medida que las políticas medioambientales se vuelven más rigurosas en muchas partes del mundo, los secadores de recirculación representan una opción clave para adaptarse a las regulaciones y reducir el impacto de las actividades agrícolas en el medio ambiente. Este enfoque eficiente no solo permite a los productores cumplir con las normativas, sino que también les brinda una ventaja competitiva en un mercado global donde la sostenibilidad es cada vez más un factor determinante en las decisiones de compra (García-Sánchez et al., 2022).

Además, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación contribuyen a una producción agrícola más verde. Esto se traduce en beneficios tanto económicos como ambientales a largo plazo, lo que convierte a los secadores de recirculación en una opción no solo más rentable, sino también más alineada con los objetivos globales de sostenibilidad.

Aunque los métodos tradicionales de secado del arroz siguen siendo una opción popular debido a su baja inversión inicial, su ineficiencia energética y el impacto ambiental que generan no pueden ser ignorados en un mundo que cada vez demanda más sostenibilidad. Los secadores de recirculación, aunque con una mayor inversión inicial, ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia energética, reducción de emisiones y cumplimiento de normativas ambientales. Estas tecnologías representan una solución más sostenible para el secado del arroz, contribuyendo tanto a la rentabilidad de los productores como a la salud del planeta.

7. Impactos económicos en los pequeños y medianos productores

Los pequeños y medianos productores de arroz desempeñan un papel crucial en la producción agrícola de muchas regiones rurales, siendo pilares fundamentales para la seguridad alimentaria y la economía local. Sin embargo, a menudo enfrentan desafíos económicos significativos que limitan su capacidad para adoptar tecnologías avanzadas, como los secadores de recirculación, que podrían mejorar

considerablemente tanto su rentabilidad como la sostenibilidad de sus operaciones.

Aunque estas tecnologías ofrecen beneficios a largo plazo, la alta inversión inicial en su adquisición e instalación representa una barrera económica considerable para los productores que cuentan con recursos limitados. Según García-Sánchez et al. (2022), el costo inicial de los secadores de recirculación puede ser un obstáculo crucial para los pequeños agricultores, especialmente cuando carecen de acceso a crédito o a fuentes de financiamiento adecuado. Este desbalance económico entre los costos iniciales elevados y los beneficios a largo plazo es uno de los principales obstáculos que enfrentan los pequeños y medianos productores. Además, la falta de infraestructura adecuada y la carencia de capacitación técnica en el uso de estas tecnologías avanzadas dificultan la adopción de sistemas de secado más eficientes. Como señalan Pomares Fiallo et al. (2023), la capacitación es un factor clave para que los agricultores comprendan el funcionamiento y los beneficios de las nuevas tecnologías, lo que es esencial para asegurar una implementación exitosa que permita maximizar el retorno de inversión (ROI).

Esta formación, unida a la infraestructura adecuada, podría ser el punto de inflexión necesario para superar las barreras económicas y garantizar que los productores no solo adopten las nuevas tecnologías, sino que las utilicen de manera óptima.

A pesar de estos desafíos, estudios recientes muestran que la adopción de secadoras de recirculación podría mejorar significativamente la rentabilidad de los pequeños y medianos productores de arroz. Según Silva et al. (2021), la implementación de secadoras de recirculación puede llevar a una reducción de hasta el 30% en los costos operativos asociados al proceso de secado.

Este ahorro energético considerable no solo reduce los costos operativos, sino que también mejora la eficiencia del proceso de secado. Esta mayor eficiencia se traduce en una mejora en la calidad del arroz, lo que permite a los productores obtener precios más altos por su producto en mercados más competitivos. La mejora de la calidad del arroz genera un incremento directo en los ingresos, lo que fortalece la sostenibilidad económica de los agricultores a largo plazo.

Además de la mejora en la eficiencia energética y la reducción de costos, los secadores de recirculación proporcionan un control más preciso

del proceso de secado. Esta precisión permite una reducción significativa de las pérdidas por sobrecalentamiento o secado desigual, lo que optimiza los recursos y mejora el rendimiento del arroz. Según el análisis de Ramírez et al. (2020), los agricultores que adoptan estas tecnologías pueden experimentar una reducción significativa de hasta un 30% en los costos operativos, lo que no solo les permite recuperar rápidamente la inversión inicial, sino también obtener una rentabilidad superior a largo plazo.

Es fundamental destacar que, para que los pequeños y medianos productores puedan superar las barreras económicas y adoptar tecnologías más sostenibles, se deben implementar políticas públicas eficaces que proporcionen subsidios, financiamiento accesible y programas de capacitación. Estas políticas son esenciales para garantizar que los productores puedan acceder a tecnologías más eficientes y sostenibles, lo que no solo mejoraría la competitividad de los agricultores, sino que también contribuiría a la creación de una agricultura más sostenible y resiliente a nivel global.

En resumen, a pesar de los desafíos económicos asociados con los secadores de recirculación, la adopción de estas tecnologías tiene un potencial significativo para revolucionar la producción de arroz en las regiones rurales. Si se superan las barreras económicas mediante políticas de apoyo financiero y capacitación técnica, los pequeños y medianos productores podrán no solo mejorar su rentabilidad sino también reducir el impacto ambiental y contribuir a una agricultura más sostenible y competitiva.

8. Retos actuales y futuros

A pesar de la importancia del secado, los pequeños y medianos productores de arroz enfrentan una serie de desafíos económicos que dificultan la adopción de tecnologías avanzadas, como los secadores de recirculación. Aunque estas tecnologías prometen mejoras sustanciales en la eficiencia energética, la reducción de costos operativos y el aumento de la calidad del arroz, el alto costo inicial para adquirir e instalar estas tecnologías sigue siendo el principal obstáculo para su adopción, especialmente en regiones rurales donde los productores enfrentan limitaciones financieras. Según Silva et al. (2021), la inversión inicial necesaria para implementar secadoras de recirculación es considerablemente más alta que la de los métodos tradicionales, lo que deja a muchos productores de pequeña

escala excluidos de los beneficios de esta tecnología avanzada.

Este desafío económico está lejos de ser el único. Además de los altos costos iniciales, la falta de capacitación técnica adecuada es otro factor que dificulta la adopción de secadoras de recirculación. Muchos agricultores carecen del conocimiento necesario para operar estas tecnologías de manera eficiente. Según Figueroa et al. (2019), la falta de conocimiento sobre el funcionamiento y los beneficios de estas tecnologías, junto con la insuficiente formación en su operación y mantenimiento, genera resistencia al cambio.

En muchos casos, los productores prefieren seguir utilizando los métodos tradicionales, que, aunque menos eficientes, son más familiares y requieren menos especialización técnica. Esta resistencia al cambio refleja una barrera psicológica que impide la adopción de tecnologías innovadoras, a pesar de sus claros beneficios a largo plazo.

Transformación hacia la sostenibilidad y la eficiencia: Para superar estos desafíos y facilitar la transición hacia tecnologías más sostenibles y eficientes, es fundamental que los gobiernos implementen políticas públicas que fomenten no solo la capacitación de los agricultores, sino también el acceso a financiamiento y la construcción de infraestructura adecuada. Este enfoque debe ir más allá de la simple subvención de tecnologías, promoviendo incentivos financieros y subsidios que ayuden a los pequeños y medianos productores a cubrir los costos iniciales de los secadores de recirculación. Estas políticas también deben fomentar la colaboración entre el sector público, privado y las instituciones financieras, para garantizar que los agricultores no solo tengan acceso a las tecnologías más avanzadas, sino también a formación técnica adecuada para operar y mantener estas tecnologías de manera eficaz y rentable.

Como argumentan Ramírez et al. (2020), los subsidios gubernamentales y las facilidades de crédito juegan un papel crucial en la implementación de tecnologías sostenibles, ya que permiten que incluso los productores con menor capacidad económica puedan acceder a tecnologías avanzadas que, a largo plazo, ofrecerán beneficios sustanciales en términos de reducción de costos operativos y mejora en la calidad del arroz. Esta cooperación entre los sectores público y privado es esencial para crear un ecosistema de apoyo que brinde oportunidades para la adopción de tecnologías innovadoras y sostenibles.

nidades de crecimiento para los agricultores y contribuya al desarrollo de una agricultura más competitiva y sostenible.

Beneficios a largo plazo de la adopción de secadoras de recirculación: Los secadores de recirculación representan una solución eficiente y sostenible para el secado del arroz. Estas tecnologías no solo mejoran la calidad del arroz al garantizar un secado uniforme y controlado, sino que también optimizan el uso de los recursos energéticos. Según González et al. (2022), la adopción de secadoras de recirculación puede reducir hasta un 30% los costos operativos asociados al proceso de secado, lo que se traduce en ahorros significativos en energía y recursos.

Además, la mejora en la calidad del arroz permite a los agricultores obtener precios más altos por su producto, lo que mejora la rentabilidad y la competitividad en el mercado global. Esta reducción de costos y mejora de calidad facilita la entrada de los productores a mercados más exigentes, donde los estándares de calidad son más altos y los precios son más competitivos.

El control preciso sobre el proceso de secado que ofrecen los secadores de recirculación reduce significativamente el riesgo de pérdidas por sobrecalentamiento o secado desigual, los cuales son factores comunes en los métodos tradicionales. Este control optimiza los recursos aumentando el rendimiento del arroz permitiendo a los productores maximizar su producción y minimizar las pérdidas. Sin embargo, para que los pequeños y medianos productores puedan acceder a estas tecnologías avanzadas y aprovechar sus beneficios, es crucial la implementación de políticas públicas que faciliten la adopción de estas soluciones.

La colaboración entre actores gubernamentales, instituciones financieras y organizaciones del sector agrícola es fundamental para superar las barreras económicas y logísticas que limitan el acceso a estas tecnologías. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad económica de los agricultores, sino que también mejora su capacidad para adaptarse a un mercado global cada vez más competitivo, promoviendo un desarrollo agrícola más equitativo y resiliente.

Por lo anterior un reto importante es lograr unir los esfuerzos de diversos actores para superar los obstáculos económicos y técnicos que hasta ahora han impedido la adopción de secadoras de recirculación que ofrecen una solución sostenible y eficiente para el secado del arroz, que puede transformar la competitividad de los pequeños y medianos productores.

Superar las barreras económicas requerirá políticas públicas efectivas, que proporcionen subsidios, financiamiento accesible y capacitación técnica, permitiendo que los agricultores adopten estas tecnologías avanzadas. Esta transformación tecnológica no solo mejorará la rentabilidad de los productores, sino que también contribuirá a una agricultura más competitiva, eficiente y sostenible en el largo plazo.

9. Conclusiones

Aunque los métodos tradicionales de secado del arroz siguen siendo ampliamente utilizados debido a su bajo costo inicial, presentan limitaciones significativas que afectan tanto la eficiencia como la sostenibilidad del proceso. Tecnologías como las torres estáticas y las albercas de secado dependen en gran medida de factores climáticos, lo que no solo introduce variabilidad en los tiempos de secado, sino que también compromete la calidad del grano final.

La exposición al sol, la temperatura ambiental y la velocidad del viento determinan el tiempo y la uniformidad del secado, lo que puede dar lugar a productos de calidad inconsistente (Figueroa et al., 2019). Además, la baja eficiencia energética y la dependencia de combustibles fósiles para generar calor no solo incrementan los costos operativos, sino que también tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente, aumentando la huella de carbono de la actividad agrícola (Silva et al., 2021).

Referencias bibliográficas

- Chaves, M., Rodríguez, E., & Díaz, S. (2020). Homogeneidad en el secado del arroz: Estudio comparativo de sistemas tradicionales y modernos. *Journal of Food Engineering*, 29(6), 556-564.
- Chavez, M., & Romero, E. (2020). Innovación en el secado de arroz: hacia la mejora de la eficiencia energética en los sistemas tradicionales. *Journal of Agricultural Technology*, 29(6), 890-897.
- Chupawa, P., Gaewsondee, T., & Duangkhamchan, W. (2021). Drying characteristics and quality attributes affected by a fluidized-bed drying assisted with swirling compressed-air for preparing instant red jasmine rice. *Processes*, 9(10), 1738.
- Cui, Y., Wang, X., Jiang, S., Wang, S., & Hou, L. (2023). Improving radio frequency heating uniformity in milled rice with different packaging shapes by changing temperature of forced air. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 84, Article 103280.
- Dalbhagat, C. G., & Mishra, H. N. (2021). Effect of the drying process on the color change, fissure development, and morphology of fortified rice kernels. *Journal of Food Process Engineering*, e13719.
- Damayanti, W., Liao, M., Xu, Y., Jing, P., & Jiao, S. (2021). Pre-drying effect and quality change of rough rice under hot air-assisted radio frequency disinestation treatment. *Applied Engineering in Agriculture*, 37(6), 1045-1054.
- Das, H. J., Saikia, R., & Mahanta, P. (2022). Effects of spiral and cone angles on drying characteristics and energy consumption of fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*, 40(5), 852-863.
- Das, H. J., Saikia, R., & Mahanta, P. (2023). Thermo-economic assessment of bubbling fluidized bed paddy dryers. *Energy*, 263, Article 125668.

- Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (2021). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, e13810.
- Ding, C., Chang, L., Luo, Y., Tao, T., Atungulu, G. G., Ding, H., Huang, L., Simelane, M. B., Zhao, S., & Liu, Q. (2023). Influence of cooking and texture attributes of far infrared radiated Japonica rice during storage. *Journal of Cereal Science*, 112, Article 103710.
- Ding, C., Khir, R., Pan, Z., Wood, D. F., Venkitasamy, C., Tu, K., El-Mashad, H., & Berrios, J. (2018). Influence of infrared drying on storage characteristics of brown rice. *Food Chemistry*, 264, 149-156.
- Dong, Y., Cui, Y., Xuan, X., Zhang, L., Shen, J., Ling, J., & Li, S. (2023). Improvement of protein structural and functional properties of indica-japonica hybrid rice by radio frequency treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 90, Art. 103516.
- Du, Y., Yan, J., Wei, H., Xie, H., Wu, Y., & Zhou, J. (2023). Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiation-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities. *Case Studies in Thermal Engineering*, 43, Article 102780.
- Fernández, R., López, A., & Martín, J. (2022). Control automatizado en procesos de secado: Implicaciones para la calidad del arroz. *International Journal of Food Science*, 58(5), 462-475.
- Figueroa, A., López, M., & Díaz, J. (2019). Training and adoption of emerging drying technologies in rice production. *Agricultural Economics Review*, 42(1), 28-35.
- García, F., Ramírez, J., & López, A. (2022). Modern drying techniques for rice production: Economic and quality improvements. *Rice Science*, 29(4), 431-440.
- García, R., Martínez, M., & Pérez, J. (2020). Impacto del secado tradicional en la calidad del arroz en zonas rurales. *Revista de Agricultura Sostenible*, 45(3), 203-214.
- Gómez, F., & Rodríguez, P. (2021). Optimización de sistemas de secado mediante recirculación del aire en la industria arrocera. *Agricultural Engineering Journal*, 36(4), 234-245.
- González, A., Pomares, F., & Hernández, E. (2022). Energy efficiency in rice drying: Technological advances and economic impacts. *Journal of Agricultural Technology*, 44(1), 78-88.
- González, F., & López, P. (2021). Albercas de secado: un enfoque accesible para agricultores en desarrollo. *Journal of Sustainable Agriculture*, 20(2), 234-242.
- Hernández, J., & Rodríguez, M. (2018). Energy efficiency and environmental impact of traditional and modern drying technologies for rice. *Environmental Impact Review*, 56(4), 125-135.
- Mao, Y., & Wang, S. (2023). Recent developments in radio frequency drying for food and agricultural products using a multi-stage strategy: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(16), 2654-2671.
- Martínez, R., & Sánchez, L. (2022). Eficiencia de las torres de secado en la agricultura tradicional. *Journal of Agricultural Engineering*, 35(1), 56-65.
- Mee-ngern, B., Lee, S. J., Choachamnan, J., & Boonsupthip, W. (2014). Penetration of juice into rice through vacuum drying. *LWT - Food Science and Technology*, 57(2), 640-647.
- Mella, C., Vega-Gálvez, A., Uribe, E., Pasten, A., Mejias, N., & Quispe-Fuentes, I. (2022). Impact of vacuum drying on drying characteristics and functional properties of beetroot (*Beta vulgaris*). *Applied Food Research*, 2, Article 100120.
- Mingotte, F. L. C., Hanashiro, R. K., & Filho, D. F. (2012). Características fisicoquímicas do grão de cultivações de arroz em função da adubação nitrogenada. *Semina: Ciencias Agrarias*, 33(SUPPL.1), 2605-2618.
- Morales, J., González, F., & Pérez, A. (2020). The importance of efficient rice drying: Quality and profitability. *Agricultural Review*, 39(2), 215-224.
- Mujumdar, A. S. (2015). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press.
- Müller, A., Nunes, M. T., Maldaner, V., Coradi, P. C., de Moraes, R. S., Martens, S., Leal, A. F., Pereira, V. F., & Marin, C. K. (2022). Rice drying, storage and processing: Effects of post-Harvest operations on grain quality. *Rice Science*, 29(1), 16-30.
- Nanvakenari, S., Movaghfarnejad, K., & Latifi, A. (2021). Evaluating the fluidized-bed drying of rice using response surface methodology and artificial neural network. *LWT*, 147, Article 111589.
- Nanvakenari, S., Movaghfarnejad, K., & Latifi, A. (2022). Modelling and experimental analysis of rice drying in new fluidized bed assisted hybrid infrared-microwave dryer. *Food Research International*, 159, Article 111617.
- Naveed, M., Yue, Z., Jun, Y., Yanhong, L., Naveed, M., Yue, Z., Jun, Y., & Yanhong, L. (2022). Effects of hot air assisted radio frequency intermittent drying with tempering on the physicochemical properties of rough rice. *LWT*, 158, 113131.
- Nevame, A. Y. M., Emon, R. M., Malek, M. A., Hasan, M. M., Amirul Alam, M., Muhamar, F., Aslani, F., Rafai, M. Y., & Ismail, M. R. (2018). Relationship between high temperature and formation of chalkiness and their effects on quality of rice. *BioMed Research International*, 2018.
- Odek, Z. R., Siebenmorgen, T. J., & Mauromoustakos, A. (2018). Relative impact of kernel thickness and moisture content on rice fissuring during drying. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(1), 239-246.
- Ojediran, J., Adewumi, A., Oladele, S., Moses, O., Olayanju, A., & Okonkwo, C. (2021). Evaluating the drying characteristics of paddy rice using superheated steam dryer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107(1), Article 012044.
- Pérez, J., Sánchez, L., & Ramírez, M. (2020). A review of solar drying technologies. *Agricultural Engineering Journal*, 37(2), 189-202.
- Pomares Fiallo, F., García, S., & Hernández, E. (2023). Energy optimization in rice drying: Benefits of recirculation systems. *Journal of Agricultural Technology*, 44(1), 55-67.
- Ramírez, J., Sánchez, L., & Torres, M. (2020). Innovations in rice drying: efficiency and sustainability. *Journal of Agricultural Technology*, 41(2), 188-198.
- Ratseewo, J., Warren, F. J., Meeso, N., Siriamornpun, S. (2022). Effects of Far-Infrared Radiation Drying on Starch Digestibility and the Content of Bioactive Compounds in Differently Pigmented Rice Varieties. *Foods*, 11, 4079.
- Rattanadecho, P., & Makul, N. (2016). Microwave-Assisted Drying: A Review of the State-of-the-Art. *Drying Technology*, 34, 1-38.
- Riadh, M. H., Ahmad, S. A. B., Marhaban, M. H., & Soh, A. C. (2015). Infrared heating in food drying: An overview. *Drying Technology*, 33(3), 322-335.
- Rumruaytum, P., Borompichaichartkul, C., & Kongpensook, V. (2014). Effect of drying involving fluidisation in superheated steam on physicochemical and antioxidant properties of Thai native rice cultivars. *Journal of Food Engineering*, 123, 143-147.
- Salvatierra-Rojas, A., Torres-Toledo, V., & Müller, J. (2020). Influence of Surface Reflection (Albedo) in Simulating the Sun Drying of Paddy Rice. *Applied Sciences*, 10(15), 5092.
- Saniso, E., Prachayawarakorn, S., Swasdisevi, T., & Soponronnarit, S. (2020). Parboiled rice production without steaming by microwave-assisted hot air fluidized bed drying. *Food and Bioproducts Processing*, 120, 8-20.
- Scariot, M. A., Lirlinski, L., Dionello, R. G., Radünz, A. L., & Radünz, L. L. (2020). Effect of drying air temperature and storage on industrial and chemical quality of rice grains. *Journal of Stored Products Research*, 89, Article 101717.
- Semwal, J., & Meera, M. S. (2021). Infrared radiation: Impact on physicochemical and functional Characteristics of grain Starch. *Starch/Stärke*, 73(3-4).
- Shen, L., Gao, M., Zhu, Y., Liu, C., Wang, L., Kamruzzaman, M., Liu, C., & Zheng, X. (2021). Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innov Food Science & Emerging Technologies*, 70, Article 102673.
- Shen, L., Zhu, Y., Liu, C., Wang, L., Liu, H., Kamruzzaman, M., Liu, C., Zhang, Y., & Zheng, X. (2020). Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *Biosystems Engineering*, 195, 64-88.
- Silva, R., González, J., & Martínez, L. (2021). Influences of emerging drying technologies on rice quality. *Journal of Food Science and Technology*, 45(3), 375-384.
- Smith, J., Chen, Y., & Foster, D. (2019). Traditional drying methods in the rice industry: a review. *International Journal of Food Technology*, 12(4), 345-352.