

Optimización y Modelamiento del Proceso en la Extracción de Humedad de Plátano (*Musa paradisiaca* L.) en un Secador Solar Indirecto, en el Suroeste de la Amazonía Peruana¹

Elías Gutiérrez Paredes², Federico Kuaquirá Huallpa³, Edgar Rafael Julián Laime⁴, Joel Peña Valdeiglesias⁵

Resumen

Introducción: Actualmente se pierde aproximadamente entre 15 y 45% de los productos cosechados, existe diversidad de tecnologías postcosecha para la preservación de alimentos perecederos. El propósito de la investigación fue optimizar y modelar el proceso de deshidratado de *Musa paradisiaca* L. a través de un secador solar artesanal. Para el deshidratado se obtuvieron 10 kg de muestra de plátano verde en el mercado local por semana, se realizaron cortes en forma longitudinal de 0.45 ± 0.05 cm para colocar en cada una de las bandejas del deshidratador solar con peso promedio de 1178.03 g por día, durante 15 días, diariamente se tomó la masa inicial al producto fresco con una balanza analítica, se pesó en tres intervalos, entre las 8:30am – 5:00pm,

con la finalidad de determinar la variación de sus masas. El resultado indica que existe relación significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0 %. La variación explicada del modelo es 99.4683 % de la variabilidad en humedad pérdida en función de las variables independientes. La confiabilidad del modelo para describir el comportamiento del secador solar y el estado final del producto se restringe a ciertas variables tales como la humedad del producto, la temperatura, la humedad relativa del aire interior, sobre las cuales se puede tener certeza a partir del procedimiento de validación realizado.

Palabras Clave: arduino; deshidratador solar; plátano verde; sensor de humedad; sensor temperatura.

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación “Optimización del proceso de deshidratado de plátano verde (*Musa paradisiaca*) en un secador solar mediante simulación dinámica y control de flujo másico de aire en la ciudad de Puerto Maldonado” ejecutado en la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, durante el 16 de diciembre de 2016 al 31 de diciembre de 2017.

2 M.Sc Investigador, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Perú, ORCID: 0000-0001-9831-7150, correo: egutierrezp@unamad.edu.pe, Puerto Maldonado – Madre de Dios - 2019

3 M.Sc. Investigador, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Perú, ORCID: 0000-0001-7448-136X

4 Ing. Investigador, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Madre de Dios – Perú, ORCID: 0000-0003-2287-8837

5 Dr. Investigador, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Madre de Dios – Perú, ORCID: 0000-0002-6909-627X

Autor para Correspondencia: Elías Gutiérrez Paredes, correo: egutierrezp@unamad.edu.pe

Recibido: 16/11/2021

Aceptado: 30/11/2022

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

Optimization and Modeling of the process in the extraction of humidity from banana (*Musa paradisiaca* L.) in an indirect solar dryer, in the southwest of the Peruvian Amazon

Abstract

Introduction: Currently, between 15 and 45 % of the harvested products are lost, there is a diversity of post-harvest technologies for the preservation of perishable foods. The purpose of this research was to optimize and model the dehydration process of *Musa paradisiaca* through an artisanal solar dryer. For dehydration, 10 kg of green banana samples were obtained in the local market per week, longitudinal cuts of 0.45 ± 0.05 cm were made to place in each of the trays of the solar dehydrator with an average weight of 1178.03 g per day.

During 15 days, the initial mass of the fresh product was taken daily with an analytical balance, it was weighed in three intervals, between 8:30 am–5:00 pm, in order to determine the variation of its masses. The result indicates that there is a significant relationship between the variables with a confidence level of 95.0 %. The explained variation of the model is 99.4683 % of the variability in moisture loss as a function of the independent variables. The reliability of the model to describe the behavior of the solar dryer and the final state of the product is restricted to certain variables such as the humidity of the product, the temperature, the relative humidity of the indoor air, about which it is possible to be certain from the procedure. validation performed.

Keyword: arduino; solar dehydrator; green banana; humidity sensor; temperature sensor.

Otimização e modelagem do processo de extração de umidade de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) em secadora solar indireto, no sudoeste da Amazônia peruana

Resumo

Introdução: Atualmente, cerca de 15 a 45 % dos produtos colhidos são perdidos, existe uma diversidade de tecnologias de pós-colheita para a preservação de alimentos perecíveis. O objetivo da pesquisa foi otimizar e modelar o processo de desidratação de *Musa paradisiaca* por meio de um secador solar artesanal. Para

a desidratação, foram obtidos no mercado local 10 kg de amostra de banana verde por semana, foram feitos cortes longitudinais de $0,45 \pm 0,05$ cm para colocar em cada uma das bandejas do desidratador solar com peso médio de 1178,03 g por dia, durante 15 dias, a massa inicial do produto fresco foi retirada diariamente com balança analítica, sendo pesada em três intervalos, entre 8h30 e 17h00, a fim de determinar a variação de suas massas. O resultado indica que existe relação significativa entre as variáveis com nível de confiança de 95,0 %. A variação explicada do modelo é de 99,4683 % da variabilidade da perda de umidade em função das variáveis independentes. A confiabilidade do modelo

para describir el comportamiento del secador solar y el estado final del producto es restringida a ciertas variables como la humedad del producto, la temperatura, la humedad relativa del aire interior, sobre las cuales es posible certificar el procedimiento de validación realizado.

Palabra-clave: arduino; deshidratador solar; banana verde; sensor de humedad; sensor de temperatura.

Introducción

El plátano verde (*Musa paradisiaca* L.) especie alimenticia importante de la población amazónica, forma parte de su dieta diaria y de su sistema de producción tradicional (Cárdenas, (S/F), 9). Sus frutos son altamente perecibles, razón por la cual deben ser consumidos lo antes posible o ser procesados de alguna manera para evitar su deterioro, así (Reynoso, 2019, 69) encontró que los frutos cosechados 96-108 días después de la floración, maduran sin problemas, y pueden almacenarse entre 9 -15 días después de la cosecha. Para el año 2018 Madre de Dios tuvo una producción de plátano que fluctuó entre 2000-2779 Tn/mes (INEI, 2019,18), la misma que se pierde rápidamente en la postcosecha, debido a la perecibilidad del producto.

El deshidratado es la mejor estrategia que se puede usar para alargar el periodo de vida de los productos agrícolas, ya que la reducción de la humedad reduce también la presencia de microorganismos que podrían afectar al producto. Este proceso involucra la transferencia simultánea de calor y masa dentro del producto y su medio circundante (Elías et al. 2020, 3). Una solución apropiada, práctica, económica y ecológica es el uso del secado solar libre de contaminantes que evita

el uso de combustibles tradicionales (Roche et al. 2017, Hatami et al. 2020, 206-219).

Con un secador solar indirecto, (Hedge et al, 2015, 2) lograron reducir la humedad del banano hasta un 3.1 %, mientras que (Lingayat et al ,2017, 416) reportan una eficiencia térmica promedio de 31.50 % para el colector y 22.38 % para la cámara de secado en las mismas condiciones.

Con el presente estudio se coadyuva en solucionar la problemática del deterioro del plátano después de la postcosecha, dando valor agregado al producto a través del secador solar con el deshidratado del plátano verde, prolongando el tiempo de vida del fruto y reduciendo su pérdida postcosecha, mejorar el ingreso económico en la canasta familiar de los agricultores utilizando la energía solar.

Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la eficiencia térmica del secador solar indirecto en la extracción de la humedad del plátano verde (*Musa paradisiaca* L.) a las condiciones ambientales del suroeste de la Amazonía peruana (Madre de Dios) durante los meses de enero febrero y marzo del 2021.

Por su parte, (Weirich Neto, Bergamini, Eurich, De Souza, & Rocha, 2016, 01-11)

sostienen que la búsqueda constante de reducción de pérdidas que obstaculizan la sostenibilidad de los procesos agrícolas estimula la investigación y construcción de herramientas y métodos que apuntan a superarlos, aumentando la rentabilidad de los pequeños, grandes o medianos productores, así como la variedad del producto. ofrecido al consumidor.

Tal como sostiene (Roche et al., 2017, 206–219) una opción práctica, económica y ecológica es el uso de sistemas solares térmicos para preservar verduras, productos percederos y mejorar la calidad del producto, así como reduciendo los residuos y el uso de combustibles tradicionales. Así mismo, (Vásquez Baca & Gamio Aita, 2018, 195–224) sostienen que “Perú es un lugar ideal para llevar a cabo proyectos de energía renovable, ya que cuenta con más recursos y fuentes de energía renovable como el sol, el agua, la energía geotérmica, eólica o biomasa”.

En ese contexto, (Eze, Ali, Iloani, & Onyeneho, 2019, 224–230) compararon diferentes técnicas de secado de aire forzado, secado solar y secado al sol, y encontraron que hubo una rápida caída en el contenido de humedad en el método de secado forzado al aire (secado por convección) a 50 °C, 70 °C y 90 °C. Finalmente, reportaron que a 90 °C se obtuvo la velocidad de secado más alta con una reducción más rápida en el contenido de humedad. Por su parte, (Sivalakshmi & Karthi, 2018, 83–89) presentaron resultados de la evaluación del rendimiento de un secador solar de convección forzada integrado con la unidad de almacenamiento de calor latente, reportaron que la tasa de secado más alta

(1,87 g/min) se alcanzó antes del mediodía y 53,29 °C para el caso de la temperatura.

Materiales y Métodos

El trabajo se desarrolló en el campus universitario de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD), distrito y provincia de Tambopata de la región Madre de Dios, cuyas coordenadas geográficas son: 12°35'18.75" 69°12'29.07" con una altitud de 210 msnm.

El diseño del deshidratador solar tiene las siguientes características: El nivel de inclinación del colector es de 24.2 %, las medidas del colector son 15x100x175 cm, mientras que las dimensiones del deshidratador son 125x100x25 cm con 04 bandejas dispuestas verticalmente.

Para la construcción del secador solar indirecto, se utilizó el diseño propuesto por (Silveira, 2012, 33), el mismo que tiene las siguientes características: La parte incidente que es una cubierta de vidrio que tiene la función de transmitir la radiación al secador para incidir sobre el producto a secar, donde parte de esta radiación es transmitida y reflejada sobre superficie del producto, por la cámara y la placa absorbente. La radiación de onda corta inicial incidente se convierte en radiación de onda larga que queda atrapada por el vidrio en el secador y provoca el aumento de la temperatura en el interior. Las pérdidas convectivas y la deshidratación del producto ocurren dentro de la cabina. El vapor de agua es retirado fuera del secador por una corriente de aire, que después de pasar por el colector, entra por el extremo inferior de la cabina y escapa

por otra abertura en la parte superior como se muestra en la Figura 1 (Dos Reis et al., 2010; Sharma et al., 2009, 33).

Se instaló 03 sensores de humedad y temperatura, al inicio y al final del colector, y el último en la parte superior del deshidratador, se instaló también un anemómetro para medir el flujo de aire, toda la información generada se almacenó en una base de datos.

Para el presente estudio se utilizó 20kg de plátano adquiridos en el mercado local, la muestra fue pelado y cortada en forma longitudinal (8-12cm) con espesor de 0.45 ± 0.05 cm. En el experimento se procesó en promedio 1178.03 g por día, durante 15 días.

Se evaluó la masa inicial y la masa final de la muestra con una balanza analítica, de la misma forma se tuvo una lectura intermedia para determinar la variación de sus masas entre las 8:30am – 5:00pm.

La temperatura y humedad se monitoreo a través de un sistema automatizado de datos el mismo que está constituido por cuatro sensores digitales de temperatura – humedad modelo DHT22 que ofrece una precisión de ± 0.5 °C y ± 2 % de HR, con un rango de -40 a 80 °C y 0 a 100 % de HR respectivamente; para la medición del flujo de aire se utilizó un anemómetro modelo GM89.08 que ofrece una resolución de 0.1m/s y opera en un rango de velocidad de 0.3 a 30m/s; los sensores envían la información en tiempo real a la tarjeta de adquisición de datos ARDUINO UNO R3, la cual utiliza el protocolo de comunicaciones RS232 que comunica con la aplicación del software desarrollada en LabVIEW versión 15.0 que se encargó de almacenar la información en una base de datos (Microsoft Access) para su análisis y procesamiento.

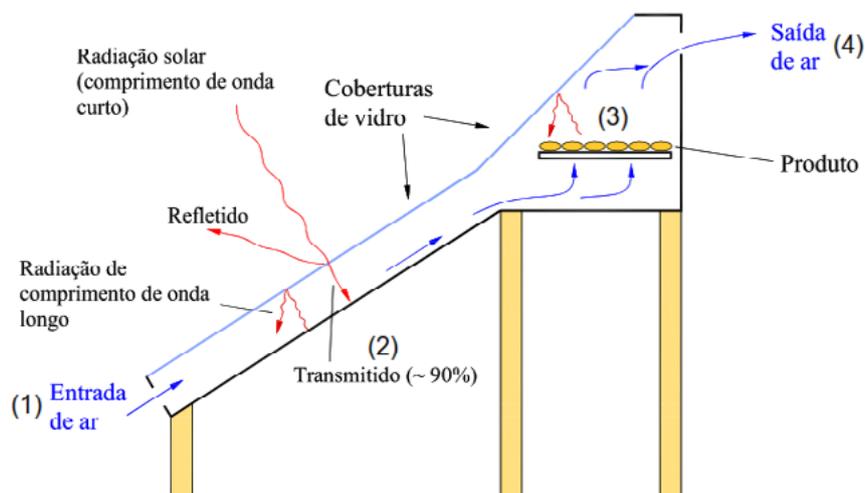


Figura 1. Secador solar indirecto (1). Ingreso de aire seco (2). Porcentaje de radiación transmitida para cámara de secado (3). Cámara de secado con bandejas, (4). Salida de aire húmedo.

Fuente: Silveira (2012, p.33)

Resultados

La temperatura promedio registrada por el sensor 2 del deshidratador durante el periodo de evaluación fue 42.40°C, fluctuando estos valores entre 56.74°C (temperatura máxima) y 23.73°C (temperatura mínima).

La humedad relativa promedio registrada por el sensor 2 del deshidratador durante el periodo de evaluación fue 29.65 %, fluctuando estos valores entre 90.13

(humedad relativa máxima) y 13.88 % (humedad relativa mínima).

Las temperaturas y la humedad relativa registradas durante los días de evaluación por el sensor 2 del deshidratador nos muestra que existe diferencias altamente significativas entre los días evaluados, observándose que mientras más alta es la temperatura registrada menor es la humedad relativa y mientras más baja es la temperatura la humedad relativa es mayor (ver día 6 y día 10 de la figura 2).

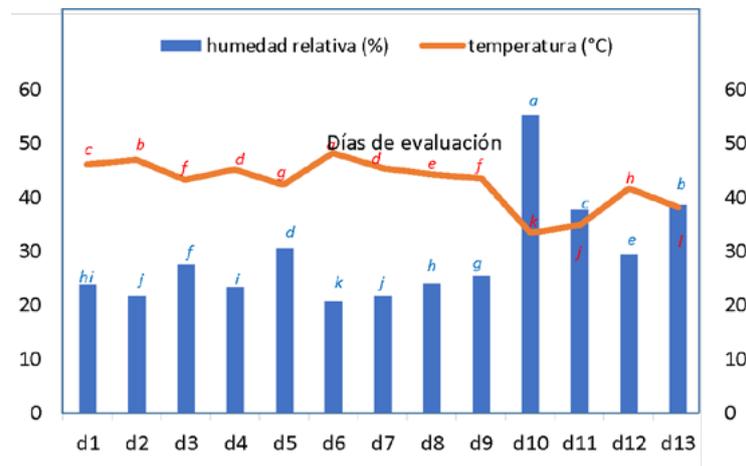


Figura 2. Registros de la evaluación de la humedad relativa y temperatura internas del deshidratador solar durante 13 días. Medias con letras iguales no difieren significativamente para $p \leq 0.05$ según prueba de Tukey, $n = 6200$.

Fuente: Elaborado por autores

Las temperaturas más altas registradas durante el día se encuentran entre las 11:00 y 12:00 horas, mientras que los registros más bajos se presentaron a las 8:30 y 17:00 horas.

Por otro lado, las temperaturas y la humedad relativa registradas por hora, durante el día de evaluación, por el sensor

2 del deshidratador nos muestra que existe diferencias altamente significativas entre las horas evaluadas durante el día, observándose que mientras más alta es la temperatura registrada menor es la humedad relativa y mientras más baja es la temperatura la humedad relativa es mayor (ver entre las 11 y 12 del día en la figura 3).

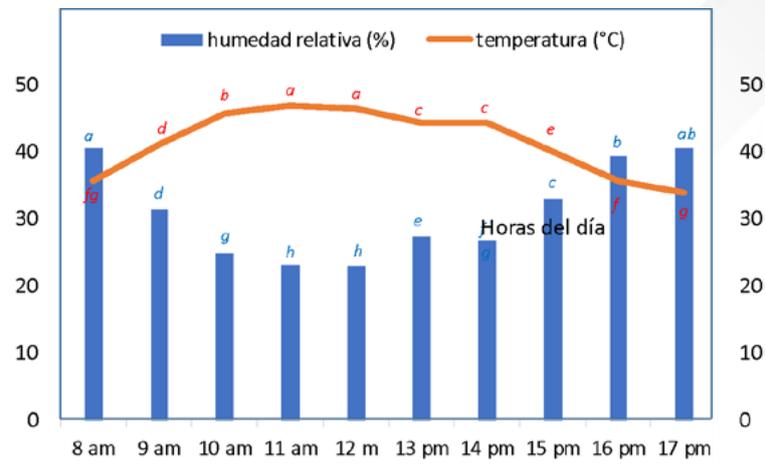


Figura 3. Registros de la evaluación de la humedad relativa y temperatura internas del deshidratador solar durante 10 horas al día. Medias con letras iguales no difieren significativamente para $p \leq 0.05$ según prueba de Tukey, $n = 6200$.

Fuente: Elaborado por autores

En la figura N° 03 se observa que existe una correlación negativa entre la humedad relativa y la temperatura dentro del deshidratador, de tal manera que cuanto mayor es la temperatura la humedad relativa es menor, mientras que a menor temperatura mayor es la humedad relativa.

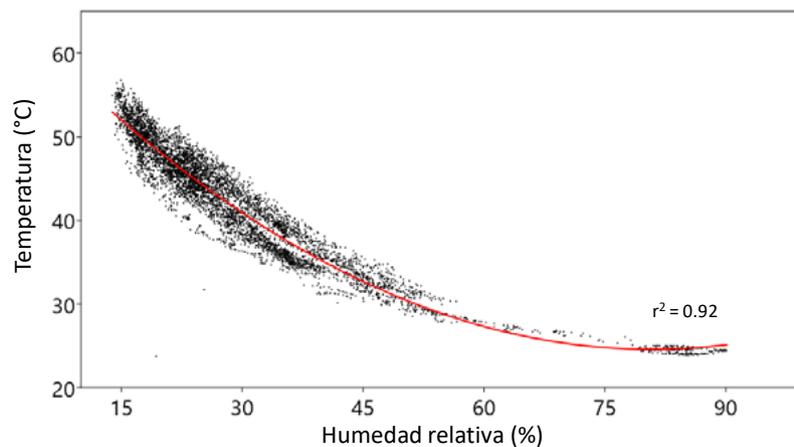


Figura 4. Correlación entre la humedad relativa y temperaturas internas del deshidratador mostrando un ajuste cuadrático con $r = 0.95$, $n = 6200$.

Fuente: Elaborado por autores

Tabla 1. Registro de pérdida de humedad del plátano durante 15 días de evaluación en el deshidratador.

Humedad perdida del plátano (%)	Registros del deshidratador	
	H°R (%)	T°(°C)
54.32	33.59	41.84
55.72	23.52	46.49
55.61	22.15	46.62
54.19	27.91	43.19
55.27	23.00	45.47
51.02	21.71	45.48
51.23	23.99	44.25
51.05	25.10	43.82
51.10	54.70	33.50
56.05	29.84	41.47
53.52	37.52	38.53
55.61	45.79	34.38
55.78	29.96	41.66
54.62	26.93	35.00
55.63	20.46	44.57

Fuente: Elaborado por autores

La alta variabilidad de pérdida de humedad del plátano podría deberse a la variabilidad de temperatura y humedades relativas encontrado en los días que se evaluaron en el deshidratador,

El mejor modelo para la pérdida de humedad del producto se ajusta a la ecuación N° 01:

$$BoxCox(Y) = 27.5848 + 0.0048X_1 - 0.2108X_2 + 0.0511X_3$$

donde

$$BoxCox(Y) = 1 + \frac{Y^{30.2421} - 1}{30.2421(54.3719^{29.2421})}$$

- Y es humedad perdida
- X_1 es el Peso 01
- X_2 es la Variación de Temperatura
- X_3 es el tiempo

El modelo tiene una correlación de 77.1763% entre las variables de estudio, por otro lado, la humedad perdida del producto es explicado por las variables independientes (peso del producto, variación de temperatura, tiempo) en un 59.5618%, con un valor de probabilidad de 0.0359.

Discusión

De acuerdo con Carrillo *et al* (2011), mediante la Deshidratación de plátano (*Musa paradisiaca*) por medio de radiación solar en un secador directo obtuvo una temperatura promedio 38.89 por convección natural, Partida (2017) en el trabajo Diseño de un control de temperatura con técnicas de control clásico, para optimizar el proceso de deshidratado en un deshidratador solar la temperatura que obtuvo fue de 38.8 °C dentro del colector solar. En la presente investigación se encontró una temperatura promedio de 41.75°C por convección natural el cual es relativamente superior a los autores en mención, esto influye en el secado del producto en un menor tiempo.

Conclusiones

La temperatura máxima registrada en el deshidratador fue de 46.62 °C y la mínima 31.82 °C, las mismas que fueron superiores a la temperatura ambiental, y provocaron la pérdida de hasta 54.05 % de la humedad del plátano en un tiempo de 8 horas y 30 minutos. El deshidratador solar resultó ser eficiente en el secado del plátano en comparación al secado convencional que se utiliza para preservar el producto. Así mismo, bajo las condiciones del deshidratador se obtuvo un producto final libre de contaminantes ambientales.

Por otro lado, el modelo multivariado tiene la ventaja de describir detalladamente las variables representativas del secado, especialmente el campo de flujo del aire interior y demás componentes, garantizando una correcta solución del modelo sobre el dominio del secador.

Agradecimiento

Agradecer a la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, por permitir desarrollar la investigación, y al Departamento Académico de Ciencias Básicas por permitir el uso de sus laboratorios.

Referencias

- Camayo, B., Quispe, M., Massipe, J. R., Galarza, J., & Mucha, E. (2021). Autonomous solar thermal system design for indirect dehydration of Aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*), Junín. *La Granja*, 33(1), 114–123. <https://doi.org/10.17163/lgr.n33.2021.10>
- Cárdenas, f. (s/f). Estudio de mercado de la cadena de plátano. Informe final de consultoría. Ministerio de agricultura. Peru.
- Carrillo-Carrillo, Manuela, Juan Daniel Castorena-Alemán, Fátima de los Ángeles García-Jimenéz, y Juan Manuel García-González. 2020. “Deshidratación de plátano (*Musa paradisiaca*) por medio de radiación solar en un secador directo”. *Revista de Sistemas Experimentales* 6(19): 19–23.
- Chitarra, M. I. F., & Chitarra, A. B. (2005). *Pós-colheita de frutas e hortaliças*. Universidade Federal de Lavras-UFLA. https://www.researchgate.net/publication/314266176_Tecnologias_Pos-Colheita_em_Frutas_e_Hortalicas
- Cornejo, F. E. P., Nogueira, R. I., & Wilberg, V. C. (2003). Secagem como Métodos de Conservação de Frutas. In *Embrapa*. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65529/1/2003-DOC-0054.pdf>
- Elías, F., Ocaña, A. y Ortiz, I. (2020). Modelado del proceso de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de frutas (Trabajo de investigación de bachiller en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú. 68pp. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4994/T_IME_2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Eze, U. E., Ali, A. I., Iloani, I. C., & Onyeneho, K. C. (2019). Effect of Temperature Variation by Forced Air Dryer on Solar Drying of Okra. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 20(2), 224–230. <http://www.akamaiuniversity.us/PJST.htm>
- Gava, A. J. (2000). *Principios de tecnología de alimentos*. Nobel. https://books.google.com.pe/books?id=I%5C_uUfoKEYOYC
- Hegde, V. N., Hosur, V. S., Rathod, S. K., Harsoor, P. A., & Narayana, K. B. (2015). Design, fabrication, and performance evaluation of solar dryer for banana. *Energy, Sustainability and Society*, 5(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0052-x>
- INEI. 2019. Perú: Panorama económico departamental. Informe técnico. Instituto Nacional de Estadística e Informática. disponible en: https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/boletines/02-informe-tecnico-n02_panorama-economico-departamental-dic2018.pdf
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2017). Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. *Energy Procedia*, 109(November 2016), 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.041>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777–1790. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.018>
- Neto, F. F. (2015). *Estudo de um secador híbrido (solar-elétrico) para desidratação de frutas* [Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/19775>
- Partida Castañeda, Alejandro. 2017. “Diseño de un control de temperatura con técnicas de control clásico, para optimizar el proceso de deshidratado en un deshidratador solar”. Reniecyt.
- Reynoso, M. 2019. Influencia del momento de cosecha en la calidad de banana (Musa sp.) variedad Gros Michel. Tesis de maestría Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. UNALM. 112pp. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4009/reynoso-magui%c3%b1a-martha-benigna.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Roche, L., Hernández, J., & Garcóa, A. (2017). Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. *Tecnología Química*, XXXVII (2), 206–219.
- Silveira, L. R. da. (2012). *Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação em secador solar de produtos agrícolas* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2012.tde-07022012-145453>
- Sivalakshmi, S., & Karthi, S. (2018). Performance of a Forced Convection Solar Dryer Integrated with Latent

Heat Storage Unit. *International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 6(2), 83–89. <https://www.irjet.net/>

Vásquez Baca, U., & Gamio Aita, P. (2018). Transición energética con energías renovables para la seguridad energética en el Perú: una propuesta de política pública resiliente al clima. *Espacio y Desarrollo*, 222(31), 195–224. <https://doi.org/10.18800/espaciodydesarrollo.201801.008>

Weirich Neto, P. H., Bergamini, Y. A. L., Eurich, J., De Souza, N. M., & Rocha, C. H. (2016). Desidratador de frutas com uso de energia solar direta. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 5(1), 01–11. <https://doi.org/10.5380/rber.v5i1.38402>