



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Secado Solar de Pera a Cielo
Abierto y su Comparación Usando
un Deshidratador Solar Mixto Tipo
Gabinete**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

Jennifer Daniela Cruz Vázquez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Octavio García Valladares

Temixco, Mor., a 10 de febrero de 2023



IER
Instituto de Energías
Renovables



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**



**ENES
JURIQUILLA**

OF/IER/LIER/009/2023
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente.

Por medio de la presente le informo que el día viernes 10 de febrero de 2023, a las 12:30 h, en el Instituto de Energías Renovables, la C. JENNIFER DANIELA CRUZ VÁZQUEZ, con número de cuenta 316092641 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

**“Secado Solar de Pera a Cielo Abierto y su Comparación Usando
un Deshidratador Solar Mixto Tipo Gabinete”**

Debido a que la alumna ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE: DR. VÍCTOR HUGO GÓMEZ ESPINOZA
VOCAL: DRA. BEATRIZ CASTILLO TÉLLEZ
SECRETARIO: DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES
SUPLENTE: DR. ALFREDO DOMÍNGUEZ NIÑO
SUPLENTE: DR. JOSÉ RODOLFO PÉREZ ESPINOSA

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 3 de febrero de 2023



Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a Dios, por permitirme conocer a personas maravillosas que me han apoyado tanto en este trabajo como en mi carrera y por la fortaleza que me ha otorgado para llegar hasta el día de hoy y poder escribir este trabajo; así como su guía para hallar mi camino y propósito en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de primera mano a mi Director de Tesis, el Dr. Octavio García, por su gran apoyo y comprensión; por hacerme partícipe de este trabajo y ayudarme en todo momento mediante su experiencia y conocimientos.

Igualmente, agradezco al proyecto CONACyT 319188 “Centro comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan, Morelos” y al proyecto PAPIIT IN103021 “Secado solar de productos agropecuarios”, por su apoyo tanto en recursos como económico.

Doy gracias al Dr. Alfredo Domínguez por su apoyo académico.

Asimismo, agradezco a mi familia, mis padres Janet Vázquez y Erik Cruz, y mis hermanos Paola y Diego, por su infinita paciencia y soporte en todo lo que he necesitado, tanto de manera económica como emocional; no sólo en la realización de este trabajo sino en toda mi vida académica.

RESUMEN

Dada la existencia del desperdicio de alimentos, aunado a los altos costos de procesos de secado convencionales, ha sido necesario el avance en medidas alternativas como el secado solar. El avance en esta área aún es limitado dentro de nuestro país, de esto surge la importancia de ahondar en su estudio. El objetivo de este trabajo es analizar el proceso de secado de un nuevo modelo de deshidratador solar mixto tipo gabinete tomando como referente su comparación con el proceso de secado solar a cielo abierto para la pera (*Pyrus Communis*). Para este objeto se consideran la obtención de cinéticas de secado, la eficiencia general de los procesos, su modelo de ajuste teórico respecto al experimental y el tiempo de secado. Con ello se pretende conocer si el secado mediante el deshidratador solar consigue porcentajes de humedad óptimos en un tiempo igual o inferior a las 8 h, así como determinar la eficiencia térmica del sistema. El procedimiento de obtención de datos constó de tres pruebas en días soleados, tomando datos de temperatura (ambiental, dentro del deshidratador, a la salida y entrada del colector solar), irradiancia en el plano inclinado del colector y gabinete e irradiancia en el plano vertical, las áreas de transferencia de calor, velocidad del aire, humedad y registro del peso del producto a lo largo de la prueba.

Las pruebas a cielo abierto como en el deshidratador solar alcanzaron humedades finales de la pera de 6.45% y 5.85%, respectivamente; con actividad de agua de 0.33 y 0.32 para cada caso en promedio. La eficiencia general alcanzada fue de 11.4% en el deshidratador solar y de 7.4% a cielo abierto. En la cinética de secado y el tiempo, se observa que el proceso a cielo abierto es más veloz, sin embargo, dentro del deshidratador se mantienen velocidades superiores de secado aún en periodos de menor irradiancia, sin mencionar que tiene una carga de producto 5 veces superior a la prueba a cielo abierto. Finalmente, el modelo de mejor ajuste en ambos procesos fue el de Midilli-Kuçük.

Palabras clave: Energía solar, desperdicio de alimentos, secado de pera, porcentaje de humedad, actividad de agua, cinética de secado, eficiencia, tiempo de secado, modelo de ajuste, deshidratador solar, secado a cielo abierto

ABSTRACT

Given the existence of food waste, coupled with the high costs of conventional drying processes, it has been necessary to advance in alternative measures such as solar drying. Progress in this area is still limited within our country, from this arises the importance to pay more attention to this study. The objective of this work is to analyze the drying process of a new model of cabinet-type mixed solar dehydrator, taking its comparison with the open-air solar drying process as a reference for pear (*Pyrus Communis*). For this purpose, the obtaining of drying kinetics, the general efficiency of the processes, its theoretical adjustment model with respect to the experimental one and the drying time are considered. With this, it is intended to know if the drying by means of the solar dehydrator achieves optimal humidity percentages in a time equal to or less than 8 h, as well as to determine the thermal efficiency of it. The data collection procedure consisted of three tests on sunny days, taking temperature data (environmental, inside the dehydrator, at the exit and entrance of the solar collector), at the collector plane and vertical irradiance, the heat transfer areas, air speed, humidity, and weight of the product during the tests.

The tests in the open sky and in the solar dehydrator reached final moisture content of the product of 6.45% and 5.85%, respectively; with water activity of 0.33 and 0.32 for each case on average. The general efficiency achieved was 11.4% in the solar dehydrator and 7.4% in the open sky. In the drying kinetics and time, it is observed that the open-air process is faster, however, inside the dehydrator higher drying speeds are maintained even in periods of lower irradiance, not to mention that it has a product load 5 times superior to the open pit test. Finally, the model with the best fit in both processes was the Midilli-Kuuk model.

Keywords: Solar energy, food waste, drying pear, moisture percentage, water activity, drying kinetics, efficiency, drying time, fit model, solar dehydrator, open air drying

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se compararon los métodos de secado solar a cielo abierto y en un deshidratador solar mixto tipo gabinete para la pera (*Pyrus Communis*), un alimento de importancia económica para los productores mexicanos y con pérdidas de hasta 31.23% en desperdicio a nivel nacional [1, p. 17]. Considerando además que a nivel industrial del 10 al 25% del consumo energético se destina a procesos de secado [2, p. 4], resulta fundamental encontrar alternativas que permitan la conservación de alimentos de una manera segura y reduciendo los costos, tanto a pequeña como a gran escala.

Así, el secado solar se presenta como una alternativa a secadores convencionales; sobre este punto, el secado a cielo abierto se utiliza como proceso de conservación desde tiempos remotos, no obstante, las condiciones de salubridad de los productos y la variación de las condiciones climáticas denotaron la necesidad de avances tecnológicos para aprovechamiento de la energía solar para una deshidratación solar más eficiente. Es de esta forma que se han diseñado diversos modelos de deshidratadores solares acorde a las necesidades de los productos; en el modelo del presente trabajo se estudia entonces el comportamiento del proceso de secado para el fruto seleccionado con el fin de obtener sus cinéticas de secado, conocer su eficiencia, el tiempo de secado y comprobar la posibilidad de alcanzar un porcentaje de humedad óptimo que evite la proliferación de microorganismos; para ello se toma como referente de comparación el proceso de secado a cielo abierto. Todo esto como parte del avance en innovación tecnológica sumamente necesaria en nuestro país, aunado al combate contra el desperdicio de alimentos.

Para la obtención de resultados se realizaron tres pruebas en días soleados durante el mes de noviembre en el año de 2022, temporada del fruto seleccionado; dichos experimentos se llevaron a cabo en la plataforma solar del Instituto de Energías Renovables en Temixco, Morelos.

El trabajo entonces incluye una parte introductoria en el Capítulo 1, donde se destaca el planteamiento del problema, los objetivos, justificación e hipótesis del proyecto; para después encontrar los fundamentos teóricos en los que se basa la experimentación en el Capítulo 2; luego, el Capítulo 3 describe la metodología que se realizó para obtención de los resultados presentados en el Capítulo 4, así como su discusión; finalizando en el Capítulo 5 se encuentran las conclusiones, referencias y anexos.

A través del presente trabajo se observaron las ventajas y desventajas de ambos procesos, consiguiendo el secado de la pera en el tiempo estimado, eficiencias generales de secado superiores dentro del deshidratador, una cinética que muestra una velocidad superior a cielo abierto, pero un aprovechamiento de energía considerable en el deshidratador pasado el mediodía solar. El modelo de mejor ajuste resultó el de Midilli-Kuçük.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 . PROYECTO DE TESIS.....	12
1.1. LA NECESIDAD DE AVANCE TECNOLÓGICO EN LA DESHIDRATACIÓN SOLAR DE ALIMENTOS EN MÉXICO	12
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3. HIPÓTESIS.....	16
1.4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES	16
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	16
Capítulo 2 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	17
2.1. EL SOL Y LA TIERRA	17
2.1.1. Posición del Sol en coordenadas horarias.....	18
2.1.2. Posición del Sol en coordenadas angulares.....	19
2.2. RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE	20
2.3. RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE	21
2.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR.....	22
2.4.1. Piranómetro o solarímetro	22
2.4.2. Pirheliómetro o actinómetro.....	22
2.4.3. Heliógrafo	22
2.5. SECADO DE ALIMENTOS	22
2.5.1. Secado Artificial.....	23
2.5.2. Secado solar.....	23
Secado a Cielo Abierto	24
Secado Mediante un Deshidratador solar	24
2.6. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SECADO	25

2.6.1. Actividad de agua	26
2.6.2. Propiedades del aire de secado	27
Temperatura de bulbo seco y húmedo.....	27
Temperatura de punto de rocío.....	27
Humedad específica y relativa	28
Carta psicrométrica	28
2.6.3. Propiedades del producto húmedo	28
Contenido de humedad.....	28
Contenido de humedad en equilibrio.....	29
2.6.4. Cinética de secado	29
Curvas de secado	30
2.6.5. Secado de capa delgada	31
Modelos en base a la segunda Ley de Fick de difusión.....	32
Modelos en base a la Ley de enfriamiento de Newton.....	33
2.6.6. Eficiencia del secador	34
2.6.7. Colorimetría	35
2.7. PERA	37
2.7.1. Producción de pera en el Mundo	39
2.7.2. Producción de pera en México	40
Desperdicio a nivel nacional	40
Capítulo 3 . METODOLOGÍA	41
3.1. MATERIA PRIMA	41
3.2. MÉTODOS DE SECADO.....	41
3.2.1. Secado a cielo abierto	41
3.2.2. Secado en el deshidratador solar tipo gabinete.....	41

3.3. INSTRUMENTACIÓN	42
3.4. PUESTA A PUNTO DE LA PRUEBA.....	42
3.5. CINÉTICAS DE SECADO DE DESHIDRATACIÓN DE PERA A CIELO ABIERTO Y EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE	43
3.5.1. Preparación del alimento	43
3.5.2. Registro del Peso y Determinación de Humedad	43
3.5.3. Obtención de las Cinéticas de Secado	44
3.6. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL DESHIDRATADOR SOLAR MIXTO TIPO GABINETE	45
3.7. AJUSTE DEL MODELO ANALÍTICO A LA CURVA DE SECADO	46
3.7.1. Análisis estadístico	47
3.8. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE SECADO	47
3.9. CAMBIO DE COLORACIÓN.....	47
Capítulo 4 . DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4.1. CINÉTICAS DE SECADO.....	52
4.2. EFICIENCIA DEL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE	56
4.3. AJUSTE DE MODELOS ANALÍTICOS	57
4.4. TIEMPO DE SECADO	60
4.5. CAMBIO DE COLORACIÓN.....	61
Capítulo 5 . CONCLUSIONES	62
Capítulo 6 . REFERENCIAS.....	64
ANEXO 1.....	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR. FUENTE: [13, P. 19].....	20
ILUSTRACIÓN 2. DIAGRAMA DE ESTABILIDAD ACORDE A LA ACTIVIDAD DE AGUA. FUENTE: [2, P. 8].....	27
ILUSTRACIÓN 3. CURVAS DE SECADO. CONTENIDO DE HUMEDAD RESPECTO AL TIEMPO (IZQUIERDA), VELOCIDAD DE SECADO FRENTE AL TIEMPO (CENTRO) Y VELOCIDAD DE SECADO FRENTE CONTENIDO DE HUMEDAD (DERECHA). FUENTE:[2, P. 24]	30
ILUSTRACIÓN 4. ÁRBOL DEL PERAL Y SU FRUTO, LA PERA. FUENTE: [12]	37
ILUSTRACIÓN 5. GRÁFICA DE PROPORCIÓN DE PRODUCCIÓN DE PERAS POR REGIÓN. FUENTE: [29]	39
ILUSTRACIÓN 6. GRÁFICA DE PRODUCCIÓN BRUTA DE PERAS DE 1991 A 2020 EN MILES DE US\$. FUENTE: [29]	39
ILUSTRACIÓN 7. DESHIDRATADOR SOLAR MIXTO TIPO GABINETE Y SUS PARTES	42
ILUSTRACIÓN 8. DISTRIBUCIÓN DE MALLAS. A) SECADOR LADO ESTE, B) SECADOR LADO OESTE, C) CIELO ABIERTO.....	48
ILUSTRACIÓN 9. NUMERACIÓN DE MALLAS Y NIVELES.....	48
ILUSTRACIÓN 10. GRÁFICAS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD PROMEDIO EN CADA PRUEBA	49
ILUSTRACIÓN 11. GRÁFICAS DE IRRADIANCIA Y TEMPERATURA PARA CADA PRUEBA	50
ILUSTRACIÓN 12. GRÁFICAS PESO RESPECTO AL TIEMPO POR CADA MALLA	51
ILUSTRACIÓN 13. GRÁFICAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA Y SECA EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO EN CADA UNO DE LOS DÍAS DE PRUEBA	52
ILUSTRACIÓN 14. GRÁFICAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA Y SECA POR NIVEL EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO EN LA PRUEBA 1	53
ILUSTRACIÓN 15. GRÁFICAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA Y SECA POR NIVEL EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO EN LA PRUEBA 2	53
ILUSTRACIÓN 16. GRÁFICAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA Y SECA POR NIVEL EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO EN LA PRUEBA 3	53
ILUSTRACIÓN 17. GRÁFICAS DE VELOCIDAD DE SECADO RESPECTO AL TIEMPO Y AL CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA	54
ILUSTRACIÓN 18. GRÁFICAS DE LOS MODELOS ANALÍTICOS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES	57
ILUSTRACIÓN 19. GRÁFICA DEL MODELO MIDILLI-KUÇUK EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO	58
ILUSTRACIÓN 20. TEMPERATURA Y HUMEDAD, EN EL DESHIDRATADOR Y AMBIENTE, POR NIVEL EN CADA PRUEBA.....	69
ILUSTRACIÓN 21. GRÁFICAS DE LOS MODELOS ANALÍTICOS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES (PRUEBA 1)	71
ILUSTRACIÓN 22. GRÁFICAS DE LOS MODELOS ANALÍTICOS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES (PRUEBA 2)	73
ILUSTRACIÓN 23. GRÁFICAS DE LOS MODELOS ANALÍTICOS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES (PRUEBA 3)	75
ILUSTRACIÓN 24. GRÁFICAS DE PROPORCIÓN DE HUMEDAD EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE POR NIVEL (IZQUIERDA) Y DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE GENERAL EN COMPARACIÓN CON CIELO ABIERTO (DERECHA) (PRUEBA 1)	76
ILUSTRACIÓN 25. GRÁFICAS DE PROPORCIÓN DE HUMEDAD EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE POR NIVEL (IZQUIERDA) Y DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE GENERAL EN COMPARACIÓN CON CIELO ABIERTO (DERECHA) (PRUEBA 2).	76
ILUSTRACIÓN 26. GRÁFICAS DE PROPORCIÓN DE HUMEDAD EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE POR NIVEL (IZQUIERDA) Y DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE GENERAL EN COMPARACIÓN CON CIELO ABIERTO (DERECHA) (PRUEBA 3).	76

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE DESHIDRATADORES SOLARES	24
TABLA 2. CONTENIDO NUTRICIONAL DE LA PERA	38
TABLA 3. MODELOS DE AJUSTE DE DATOS.....	46
TABLA 4. HUMEDAD INICIAL Y FINAL DE CADA PRUEBA	52
TABLA 5. EFICIENCIA DE COLECTOR, SECADOR Y DE SECADO PARA CADA PRUEBA Y PROMEDIO	56
TABLA 6. COEFICIENTES DE MODELOS ANALÍTICOS Y SU ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO	58
TABLA 7. TIEMPOS DE SECADO EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE POR NIVEL Y A CIELO ABIERTO.....	60
TABLA 8. TIEMPOS DE SECADO CUANDO LAS MUESTRAS ALCANZAN VALORES INFERIORES AL 10% DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA	60
TABLA 9. DIFERENCIAS DE COLOR EN LAS PRUEBAS	61
TABLA 10. COEFICIENTES DE MODELOS ANALÍTICOS DENTRO DEL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO (PRUEBA 1)	70
TABLA 11. COEFICIENTES DE MODELOS ANALÍTICOS DENTRO DEL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO (PRUEBA 2)	72
TABLA 12. COEFICIENTES DE MODELOS ANALÍTICOS DENTRO DEL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE Y A CIELO ABIERTO (PRUEBA 3)	74

Capítulo 1 . PROYECTO DE TESIS

1.1. LA NECESIDAD DE AVANCE TECNOLÓGICO EN LA DESHIDRATACIÓN SOLAR DE ALIMENTOS EN MÉXICO

Dentro del área de la energía solar térmica, se encuentra la deshidratación solar de alimentos para diversas aplicaciones. Esta técnica data de tiempos remotos, pero en la actualidad se lleva a cabo mediante el calentamiento de aire con energía eléctrica o con la combustión de gas licuado de petróleo, de esto surge la búsqueda de alternativas más sustentables, en donde se encuentra el aprovechamiento de la energía solar para dicho proceso [3].

Para conseguir un ahorro energético y económico, mitigación del cambio climático, y sobre todo, la reducción en las pérdidas de diversos alimentos a causa del deterioro, diversos investigadores han realizado estudios sobre el diseño, evaluación y optimización de deshidratadores solares mixtos.

Algunos trabajos, de Ecuador en la ciudad de Riobamba en la Provincia de Chimborazo, destacan la necesidad del diseño de deshidratadores solares mixtos indirectos que ofrezcan un valor agregado a las frutas cosechadas del sector agrícola que reduzca además las pérdidas, ya sea por la baja en precios o en la demanda, y que sea escalable hacia la exportación de los productos secados; en el caso descrito, se consideraron las características térmicas, físicas y del secado de producto para realizar el diseño y, con apoyo del programa de SolidWorks, se construyó para ser simulado con parámetros propios del secado de frutas, haciendo uso adicional de resistencias para mantener el calor del aire constante, así como materiales adecuados a las condiciones sometidas; obteniendo con lo anterior, resultados de calores específicos y temperaturas que demuestran la homogeneidad del producto secado sin pérdidas de características alimenticias [4].

Proyectos similares, enfocados en la deshidratación de frutas y legumbres para evitar pérdidas económicas, situados en Nicaragua, plantearon como alternativa viable el diseño y evaluación de un deshidratador solar térmico, con 4 pruebas de 6 días basados en la cebolla; fue bajo esas pruebas que se alcanzaron tiempos de

secado aceptables, manteniendo las propiedades naturales del producto, y la observación de la relación del tiempo de secado en función de la radiación, velocidad del viento y temperatura en la cámara [5]. En estrecha relación con los antes mencionados, en Michoacán se estimaron pérdidas de un 40% en la producción hortofrutícola por factores climatológicos, malas prácticas postcosecha sanitarias, de almacén y transporte; dados los altos costos de tecnologías solares de alta eficiencia se procedió a la fabricación de un deshidratador solar de alta eficiencia y bajo costo, evaluado con guayaba, plátano, mango y nopal (por su alta producción en el estado), en base al deshidratador mixto de referencia propiedad de la Facultad Químico Farmacobiología de la U.M.S.N.H. con cálculos de las diversas pérdidas para su optimización; llegando así a la optimización del sistema, con tiempos de secado competitivos menores a 10 h para los productos seleccionados, además de que no favorece la contaminación microbiológica [6].

Otros trabajos se concentraron en el tomate, con pérdidas, dentro de la cadena de suministro, de un 7% en la cosecha, 8% en empaque y almacenamiento y un 12% en la distribución; de ahí que el uso de deshidratadores solares resulte una alternativa gracias a su bajo coste de operación y el hecho de que no emite gases de efecto invernadero (GEI), procediendo al diseño de un deshidratador solar mixto con capacidad de 10 kg de tomate, abastecido de aire por dos ventiladores solares y con pruebas que incluyeron la rotación de bandejas para garantizar la homogeneidad del secado en los diferentes niveles; de manera que se obtuvieron eficiencias de 40.57%, con secados en 4 días y humedad final de 11.72%, con áreas de optimización en almacenamiento del calor para disminuir tiempos de secado y garantizar su suministro [7].

Por su parte, en Perú, el mercado de langostino presentó una gran área de oportunidad al efectuar el secado solar directo, técnica que carece de condiciones higiénicas, requiere periodos largos de secado y se enfrenta a pérdidas nutricionales; es así que se procedió al diseño y prueba de un deshidratador solar mixto considerando un porcentaje de humedad deseado menor al 10%, reducción del tiempo de secado, las horas de luz solar, la velocidad del flujo de aire y variables

de transferencia de masa y energía, todo ello en dos etapas de 5 pruebas cada una; hallando como resultado porcentajes de humedad menores al 10% en casi todos los niveles, eficiencias del 50% y alcanzando temperaturas de aire de 42°C a 75°C [8].

En estas investigaciones, aquellos trabajos basados en simulaciones tienen el inconveniente de desestimar las condiciones ambientales, si bien, algunos modelos pueden brindar información bastante precisa del comportamiento bajo condiciones reales, no está sometido a los imprevistos que pueden conllevar y el nivel de precisión de los datos de referencia siempre resultará menor a los datos experimentales medidos (dependiendo desde luego de la precisión de los instrumentos de medición utilizados). Por su parte, los estudios en condiciones ambientales presentaron resultados más confiables, con un mejor análisis de los mismos acordes a las condiciones climáticas en los días de prueba, resultando entonces más realistas en cuanto al funcionamiento de la tecnología.

De forma más particular, en el caso de la deshidratación de pera, en Turquía se diseñó un secador solar indirecto conectado a un colector solar con una entrada de flujo de aire constante para la obtención del contenido de humedad en base húmeda y seca, la relación de humedad ajustable, la tasa de secado y el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c), lo anterior comparado con resultados a cielo abierto; se determinó entonces una humedad inicial de 83.1%, para rodajas de 10 mm de grosor se consiguió el secado hasta un 21.4% de humedad en 10 h en el deshidratador y 19.5 h a cielo abierto, mientras el h_c resulta mayor en el secador, dados los resultados se concluye que el secador solar es más eficiente [9].

Otro trabajo fue el realizado en China, con un deshidratador híbrido a convección forzada haciendo pruebas de secado con el fruto pretratado y al natural, así se estudió su eficiencia de secado y la calidad de la pera deshidratada; en este trabajo, las rodajas fueron de 3 mm de grosor, los pretratamientos utilizados fueron una solución de ácido ascórbico y una solución de cloruro de sodio, los tiempos de secado alcanzados fueron de 6 h con una eficiencia máxima de 48.6% y mínima de

8.92%, finalmente se encontró un aumento de fibra y reducción de grasas en el alimento cuando no recibe pretratamiento, también se notó un aumento en el porcentaje de cenizas al ser pretratado [10].

Por su parte, en la Universidad de Zacatecas, se realizó el secado de pera con un deshidratador solar directo, a convección natural y forzada, iniciando con una humedad de 79.98% reducida hasta un 5.91 % y 7.63%, respectivamente. Dichos resultados obtenidos tras 13.5 h de Sol para rodajas de 0.078 ± 0.001 m de diámetro y 3 ± 1 mm de espesor. En cuanto al color, se observó una mayor conservación a convección forzada [11].

Es así como, con el fin de conocer la eficiencia de secado en el deshidratador solar mixto tipo gabinete, así como las propiedades térmicas y cinéticas de un alimento de importancia económica para productores mexicanos, como lo es la pera cuyo principal productor es Puebla, se realizará la comparación de la técnica de secado a cielo abierto y con el deshidratador, destacando las ventajas y desventajas de dichos procesos en el caso particular de la pera.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El alimento estudiado en el presente trabajo es la pera, un producto que aporta estabilidad económica a los productores, el cual se ha visto afectado por el desperdicio de alimentos en las diferentes cadenas de su producción hasta el consumo. Los estudios sobre el mismo en el área de deshidratación solar son pocos, sin embargo mediante su análisis será posible vislumbrar la viabilidad de este proceso de secado aplicado en las comunidades rurales donde es cultivada y cosechada, mayoritariamente a traspatio [12].

De esta forma, no sólo será posible evitar el desperdicio de dicho fruto, sino que además sería posible añadirle valor comercial. Esto contribuiría a la economía, ahorrando millones de pesos que se pierden anualmente, evitando además emisiones de gases de efecto invernadero y el alto consumo energético de los procesos convencionales de secado. Sin mencionar las toneladas de CO₂ equivalente que se emiten sin propósito al perder el producto [1, p. 17].

Aunado a lo anterior, mediante este trabajo se sentarán precedentes del estudio del modelo de deshidratador solar evaluado. Esto aportará conocimientos que impulsarán el avance tecnológico en México, al ofrecer elementos que permitan observar las oportunidades de desarrollo de la tecnología actual (como en los materiales y estrategias para mejorar el proceso de secado) así como los puntos a favor con los que ya cuenta el deshidratador para su aplicación. Denotando estos aspectos mediante la comparación con el proceso de secado a cielo abierto como referente.

1.3.HIPÓTESIS

El secado de pera en rebanadas con el deshidratador solar mixto tipo gabinete puede alcanzar eficiencias térmicas superiores al 10% y porcentajes de humedad menores al 10% en un tiempo de secado de 8 h.

1.4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el secado solar de pera en el deshidratador solar tipo gabinete y a cielo abierto para comparar ambos procesos, así como los tiempos de secado y el porcentaje de humedad alcanzado en cada uno.

1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Obtener las cinéticas de secado para la observación de las diferencias entre ambas técnicas y los porcentajes de humedad teóricos alcanzados respecto a los experimentales.
2. Calcular la eficiencia térmica del deshidratador solar mixto tipo gabinete en el caso de la pera para su comparativa con la eficiencia del proceso de secado a cielo abierto.
3. Ajustar un modelo analítico a la curva de secado para realizar un análisis y comparación del comportamiento de ambos procesos.
4. Comparar el tiempo de secado de la pera sometido a deshidratación a cielo abierto y en el deshidratador solar mixto tipo gabinete.
5. Medir las diferencias de color para las muestras deshidratadas respecto a las frescas de ambos procesos para su comparación.

Capítulo 2 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. EL SOL Y LA TIERRA

La estrella que recibe el nombre común de Sol está conformada en mayor medida por hidrógeno y en menor proporción de helio. Su energía procede de reacciones nucleares de fusión dadas las altas temperaturas y presiones a las que está sometido [13, p. 9].

Según [13], para casos de estudio, conviene considerarlo como una esfera de 695,000 km de radio, masa de 2×10^{30} kg, una densidad de $1.41 \frac{kg}{m^3}$ y a una distancia media de $1,495 \times 10^8$ km de nuestro planeta Tierra. Su diámetro aparente se ve a 0.53° de ángulo. Ahora bien, para aplicaciones prácticas se considera que su temperatura es de 5,800 K, considerada la temperatura de un cuerpo negro ideal.

Aunado a lo anterior, acorde con [13, p. 11], el movimiento de la Tierra respecto al Sol se divide principalmente en tres:

- Traslación: Movimiento alrededor del Sol de trayectoria aproximadamente elíptica, alcanzando una distancia máxima de 1.017 veces la media y mínima de 0.983 veces la media. El plano de esta trayectoria se nombra plano de la eclíptica.
- Rotación: Movimiento sobre sí misma, sobre un eje imaginario que pasa por los polos, formando un ángulo medio de 23.27° con la normal del plano de la eclíptica. Es esta inclinación la razón por la que los rayos solares tienen distintos ángulos de incidencia sobre la superficie, permaneciendo mayores en verano que en invierno. En el hemisferio norte, el mayor ángulo de incidencia es el 22 de junio (máxima distancia) y el menor ocurre el 23 de diciembre (mínima distancia), estos son los solsticios de verano e invierno.
- Nutación: Referido a la posición del eje de giro que cambia alrededor de su posición media. Así, la declinación es el ángulo entre el Ecuador y la dirección del Sol, con un ángulo de 0° en los equinoccios, máximo y mínimo en los solsticios de verano e invierno, respectivamente; esta declinación se puede calcular de manera aproximada, dos ecuaciones conocidas son las de

Lokmanhekim y la de Cooper (menos aproximada pero más sencilla), que serían las ecuaciones (1) y (2) [13, p. 12].

$$\delta = 0.302 - 22.93 \cos x - 0.229 \cos 2x - 0.243 \cos 3x + 3.851 \sin x + 0.002 \sin 2x - 0.055 \sin 3x, \quad x = \frac{(2\pi)(\#Día)}{365} \quad (1)$$

Donde la declinación está en radianes.

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \left(\frac{284 + \#Día}{365} \right) \right) \quad (2)$$

Con la declinación en grados.

2.1.1. Posición del Sol en coordenadas horarias

Bajo este método, ver [13, p. 13], la posición del Sol se determina con tres ángulos:

- Declinación (δ): Ángulo entre el Ecuador y la dirección del Sol.
- Latitud (ϕ): Ángulo entre el paralelo de un lugar y el Ecuador, es positivo para el hemisferio norte y negativo para el sur.
- Ángulo horario (h): Ángulo entre el plano meridiano del punto considerado y el del que pasa por el Sol. Depende de la hora del día, siendo nulo al medio día solar, antes negativo y después positivo. En una circunferencia con 360° y días de 24 h, cada hora corresponde 15°. Su cálculo se muestra en la ecuación (3).

$$h = 15(TSV - 12) \quad (3)$$

Con el ángulo horario expresado en grados y TSV las horas del Tiempo Solar Verdadero.

Dado que la duración de un día varía a lo largo del año, acorde con [13, p. 14], se definió el Tiempo Solar Medio (TSM), un tiempo ficticio que supone al planeta como una esfera a velocidad de rotación constante, es la hora local; la diferencia de entre el TSV menos el TSM se conoce como ecuación del tiempo. Para un día determinado, Whillier desarrolló la ecuación (4) [13, p. 15].

$$ET = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B, \quad B = \frac{360}{364} (\#Día - 81) \quad (4)$$

Con ET en minutos y B en grados.

Aunado a lo anterior, el TSV también depende de la longitud, de esa forma es posible calcularlo mediante la ecuación (5) [13, p. 16].

$$TSV = HO - e + ET + \frac{1}{15}(\lambda_m - \lambda) \quad (5)$$

Donde HO se refiere a la hora oficial del país (que puede diferir del TSM por la diferencia del huso horario elegido), e es el adelanto respecto a la hora civil, mientras que λ_m y λ son las longitudes del meridiano medio del uso horario adoptado y del que pasa por el punto estudiado.

2.1.2. Posición del Sol en coordenadas angulares

En este sistema, según [13, pp. 16–17], el referente es el plano tangente a la superficie de la Tierra en el punto considerado, de manera que la posición del Sol se describe con dos ángulos:

- Azimut (γ): Ángulo entre la dirección sur y la dirección de la proyección del Sol en el plano horizontal, con origen en el sur, positivo hacia el oeste y negativos en el este.
- Altitud (α): Ángulo entre la posición del Sol y su proyección en el plano horizontal. Originado en el horizonte y positivo en sentido ascendente.

También existe el ángulo cenital, entre la posición del Sol y la perpendicular al plano horizontal, se calcula con la ecuación (6).

$$\psi = 90 - \alpha \quad (6)$$

Las ecuaciones que relacionan los ángulos en coordenadas angulares con las horarias son la (7), (8) y (9).

$$\cos \psi = \sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (7)$$

$$\cos \gamma = \frac{1}{\cos \alpha} (\sin \phi \cos \delta \cos h - \cos \phi \sin \delta) \quad (8)$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha} \quad (9)$$

Conocidas la latitud y la declinación es posible calcular la hora de puesta del Sol, donde la altitud es 0° , de forma que el ángulo horario y el azimut se calculan mediante las ecuaciones (10) y (11) [13, p. 18].

$$\cos h_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (10)$$

$$\text{sen } \gamma_s = \cos \delta \text{ sen } h_s \quad (11)$$

Así, la duración del día puede calcularse con la ecuación (12) [13, p. 18].

$$t_d = \frac{2}{15} \text{acos}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (12)$$

Actualmente existen páginas de internet que ofrecen estos cálculos, destaca la página de la NOAA el solar calculator, que ofrece información de los principales ángulos, medio día solar, amanecer y puesta de Sol, entre otros; esta calculadora está disponible en el siguiente vínculo: <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/>

2.2. RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

En línea con [13, p. 18], la irradiancia (I) se define como la energía radiante que incide sobre una superficie por unidad de tiempo. La irradiancia fuera de la atmósfera recibida a la distancia media Sol-Tierra se le llama constante solar cuyo valor aceptado es $1,353 \frac{W}{m^2}$ o $4,871 \frac{MJ}{m^2 h}$. Acerca de la radiación extraterrestre (Ilustración 1), destaca que de la energía recibida, 97.8% está entre los 0.2 y $3 \mu m$ de longitud de onda; con una distribución espectral ultravioleta en 9%, luz visible en 40% e infrarrojo en 51%. Al atravesar la atmósfera, sus partículas absorben una buena parte de esta radiación.

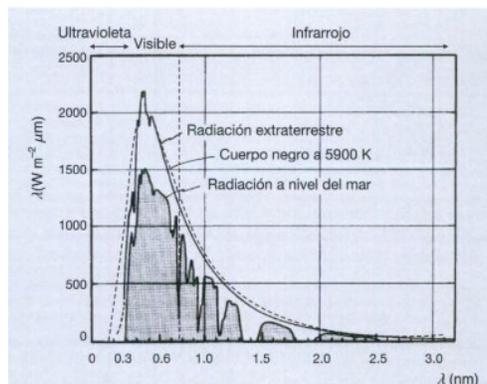


Ilustración 1. Espectro de radiación solar. Fuente: [13, p. 19]

Por otro lado, la irradiación (H) es la radiación que incide sobre una superficie en un periodo de tiempo, se describe entonces con la ecuación (13) [13, p. 20].

$$H = \int_t^{t+\Delta t} I dt \quad (13)$$

2.3. RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE

Es la radiación que penetra la atmósfera, luego de la cual atraviesa una capa de aire y dependiendo de su masa, espesor y densidad variará la absorción y dispersión de esta. Las principales moléculas de absorción son las de agua y anhídrido carbónico, mientras el ozono actúa sobre el ultravioleta (potencialmente cancerígeno). La absorción así depende del camino óptico que recorre el Sol, siendo mínima en el punto más alto y máxima a la salida y puesta del Sol [13, p. 21].

Sobre la superficie terrestre existen varios tipos de energía radiante [13, p. 22]:

- Radiación directa: Es la que incide sobre la superficie terrestre sin cambiar de dirección, excepto aquella que proviene de la refracción atmosférica.
- Radiación difusa: Es la parte que se difunde por choques con las moléculas del aire, su distribución es casi uniforme.
- Albedo: Es la radiación que incide después de reflejarse en la superficie. En determinados casos es una cantidad considerable que deberá tomarse en cuenta.
- Radiación global: Suma de la radiación directa y difusa.
- Radiación total: Es la suma de la radiación global y el albedo.

2.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

2.4.1. Piranómetro o solarímetro

Mide la irradiancia global, se basa en la exposición de una lámina metálica reflectante junto a otra absorbente la cual ganará calor, produciendo así un gradiente de temperatura, medido por un termopar, que se supondrá proporcional a la radiación recibida. Además, se compone de un sensor análogo colocado bajo una superficie semiesférica de cristal de cuarzo transparente a cualquier longitud de onda [13, p. 23].

2.4.2. Pirheliómetro o actinómetro

Mide solo la radiación solar directa, básicamente es un piranómetro en el fondo de un tubo recubierto de pintura absorbente en su interior para reducir la reflexión, siendo estrecho para ver al Sol y lo menos posible al cielo. Requiere de un sistema de seguimiento solar si se desean datos a lo largo del día [13, p. 24].

2.4.3. Heliógrafo

Mide la insolación, es decir, el número de horas de Sol brillante en un día. El más utilizado es el modelo de Campbell Stockes, consiste en una bola transparente de cristal entre el Sol y una banda de papel absorbente donde se concentra la luz por medio de la bola, dejando una marca de intensidad proporcional a la de la radiación solar. El papel se marca además con las horas y al medir la longitud de la huella solar se calcula la insolación; aceptando esta como el tiempo en el que la irradiancia directa es igual o mayor a $100 \frac{W}{m^2}$. El cociente de las horas de insolación sobre la duración del día (desde la salida hasta la puesta del Sol) es el coeficiente de insolación [13, pp. 24–25].

2.5. SECADO DE ALIMENTOS

La principal dificultad para los alimentos es el deterioro por crecimiento de microorganismos o el crecimiento de patógenos, además de otros como la oxidación de las grasas y pardeamiento; que pueden generar grandes pérdidas económicas, sin mencionar los efectos en la salud y nutrición humana. Existen diversas técnicas de conservación de alimentos dependiendo del motivo de la conservación; algunos

de ellos son el curado, esterilización, refrigeración y fermentación, u otras más sofisticadas como la pasteurización, vacío, secado y deshidratación, liofilización, esterilización UV, entre otros [14].

De ellas, el secado se logra gracias al paso de aire caliente a través del producto, lo que elimina el agua que contiene mediante su evaporación; así impide el crecimiento de bacterias que no pueden vivir en un medio seco. Es un proceso que busca la extracción de humedad, se consigue mediante una corriente de aire, natural o forzada, a temperatura ambiente o precalentada; en éste se produce una transferencia de calor desde el aire caliente hasta el producto lo que permite la vaporización de humedad y la transferencia de masa hasta una corriente de aire [15, p. 99].

Las técnicas de deshidratación y secado han sido de las más utilizadas a través de la historia; la primera consiste en la eliminación de agua mediante una fuente de calor artificial, y la segunda se refiere a un tratamiento en condiciones ambientales [16].

2.5.1. Secado Artificial

En palabras de [17], la “deshidratación o secado artificial se refiere a la eliminación parcial o total del agua en un producto que se encuentra al final en estado sólido por medio de energía secundaria”; esto se lleva a cabo en condiciones de control para que el producto tenga la mejor calidad nutricional posible. Entre criterios básicos para secar alimentos es lograr su conservación, la disminución de peso y que los productos finales sean convenientes.

2.5.2. Secado solar

El secado solar de alimentos es uno de los métodos más antiguos conocido por el hombre para la conservación de alimentos, copiado y mejorado del proceso natural que era llevado a cabo en ciertos frutos luego de su madurez, los cuales se conservaban naturalmente con la pérdida de humedad, impidiendo la acción de agentes deteriorantes [17].

El secado por energía solar tiene una gran facilidad de ejecución. Además, son ideales para comunidades con bajos recursos ya que no requiere energía eléctrica, por ello es una práctica ampliamente difundida en el mundo. Cabe mencionar que también posee mínimos costos de almacenamiento, empaque y transporte; y no requiere de instalaciones especiales para su almacenamiento posterior [14].

Secado a Cielo Abierto

El secado solar a cielo abierto se refiere a la exposición directa de los alimentos al Sol. Este método presenta el inconveniente de la contaminación debido a viento, lluvia, insectos, polvo, roedores y tiempos prolongados de secado. Esta técnica tradicional, se realiza dispersando los productos en una capa delgada sobre una superficie (usualmente el suelo a campo abierto) expuestos directamente a los rayos solares, pero dadas sus desventajas se puede perder entre un 30% y 40% de la producción [15, p. 100], [17], [18].

Secado Mediante un Deshidratador solar

Para hacer frente a las problemáticas del secado tradicional, surgieron los secadores o deshidratadores solares, donde los productos a deshidratar son protegidos por un gabinete; estos secadores pueden ser directos, indirectos o mixtos (véase la Tabla 1) [18].

Tabla 1. Tipos de deshidratadores solares

Tipo de Deshidratador solar	Características
Directo	El producto se encuentra a exposición directa de la radiación solar dentro de un gabinete, sin control de condiciones de radiación
Indirecto	El producto en un gabinete no es expuesto a la radiación solar, se realiza conexión con un colector solar que proporciona el aire caliente para conseguir el proceso de deshidratado
Mixto	El producto se expone a la radiación en el gabinete conectado a un colector solar, lo que incrementa la capacidad de secado

Fuente: Elaboración propia con [18]

2.6. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SECADO

El secado es un proceso complejo relacionado con transferencia de calor y masa, la energía térmica se transfiere como calor sensible y latente que aumenta la temperatura del producto para así evaporar el agua. Como un proceso intensivo en energía, en el ámbito industrial, corresponde del 10 al 25% del consumo total de energía de los países desarrollados [2, p. 4]; existe la posibilidad de mejorar y optimizar estos procesos mediante pretratamientos y postratamientos, que también mejoran la calidad del producto. Algunas técnicas de preprocesamiento son el escaldado, la salazón, deshidratación osmótica y el remojo; mientras, técnicas posprocesamiento son el envasado, recubrimiento, mezcla, entre otros. La innovación en secadores contribuye a la reducción del consumo energético, en el 2010 según datos de Mujumdar, existían 100 secadores comerciales de 500 tipos de secadores; dichos deshidratadores variando acorde a las necesidades del diseño acorde a la temperatura y presión deseada o diversas entradas de calor. Así se pueden clasificar por método de operación o por el modo de suministrar calor [2, pp. 4–6]:

- Método de operación
 - ☞ Secador por lotes: Buenos a pequeña escala, se carga un lote húmedo hasta que alcance la humedad deseada, luego se procede al siguiente lote; su diseño, construcción y operación suele ser sencilla pero su eficiencia es menor. Como ejemplos se tienen secadores de horno, bandeja y solares.
 - ☞ Secador continuo: Para producción en masa, carga y descarga durante la operación a través de una transportadora.
- Suministro de calor
 - ☞ Secado por conducción: El calor se suministra por una superficie caliente en contacto con el producto hasta provocar la ebullición. Usado para productos líquidos o en suspensión, a temperaturas iguales o superiores a sus puntos de ebullición. El contenido de humedad puede ser muy bajo.

- ☞ Secado por convección: La energía térmica se suministra por medios convectivos, gases como el aire, gas inerte o vapor sobrecalentado calentados por medio de otra superficie a mayor temperatura. Se encarga de evaporar la humedad para luego llevársela. Es de alta velocidad y tiene una alta tasa de eliminación.
- ☞ Secado por radiación: El calor se trasmite por la radiación de un cuerpo caliente o el Sol; aumentando la temperatura hasta la evaporación de agua. Ejemplos son el secado a cielo abierto y secadores solares.
- ☞ Mixto: Acorde al medio de secado, la naturaleza del producto, presión de operación, método de manejo del material, etc. Combina los anteriores para reducir los tiempos de secado.

2.6.1. Actividad de agua

Es la responsable del deterioro de los alimentos, se relaciona con la calidad y periodo de almacenamiento seguro. Se observa de dos formas, como agua libre o como humedad ligada. La putrefacción sucede en el agua libre por reacciones químicas (enzimáticas y no enzimáticas) y procesos biológicos, influye en la generación de esporas y en el crecimiento de microorganismos (bacterias, mohos, levaduras y hongos). La velocidad de estas reacciones puede reducirse al mantener una actividad de agua menor a 0.6. Lo que se obtiene mediante la deshidratación o añadiendo químicos como azúcar, sal y glicerol, aunque estos últimos alteran el sabor. Así, la actividad de agua se mide por el contenido de agua libre, definida como la relación entre la presión parcial del vapor de agua por encima del producto húmedo y la presión parcial del agua pura a la misma temperatura. Aumenta con el incremento de la temperatura y la presión, tomando valores de 0 a 1. La Ilustración 2 es un mapa o diagrama de estabilidad, donde se observan los agentes de deterioro acorde a la actividad de agua, para bajos valores los alimentos se ven afectados por pardeamiento, oxidación y reacción enzimáticas, como principales.

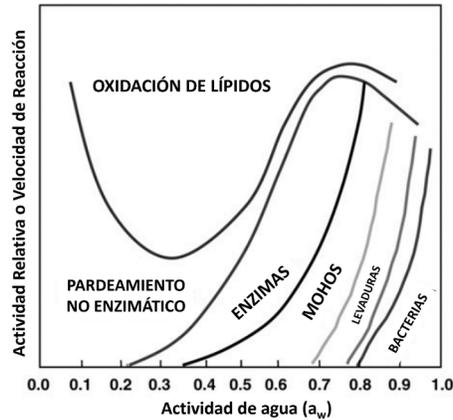


Ilustración 2. Diagrama de estabilidad acorde a la actividad de agua. Fuente: [2, p. 8]

De acuerdo con Beuchat en 1981 [2, p. 8], para valores inferiores a 0.6 no hay proliferación microbiana, y este valor se alcanza en productos alimenticios para valores de humedad menores al 10%.

Existen otros factores que pueden propiciar el crecimiento de microorganismos tales como temperatura, contenido nutricional, pH, conservadores y el contenido de oxígeno [2, p. 7].

2.6.2. Propiedades del aire de secado

El aire atmosférico se compone de aire seco (con nitrógeno y oxígeno) y vapor de agua [2, p. 9].

Temperatura de bulbo seco y húmedo

La temperatura de bulbo seco es la medida por un termómetro normal, denotada como T_{db} . Si se cubre por un tejido húmedo entonces se conoce como temperatura de bulbo húmedo T_{wd} . En saturación estas temperaturas se igualan, la diferencia entre ellas se nombra depresión de bulbo húmedo [2, p. 9].

Temperatura de punto de rocío

Referida a la temperatura de condensación del vapor de agua en forma de rocío, que ocurre al enfriar el aire a temperatura y presión constante hasta alcanzar la saturación. Se denota como T_{dp} [2, p. 9].

Humedad específica y relativa

Son parámetros que indican la cantidad de contenido de vapor de agua en el aire. La humedad específica es la relación de masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco en la mezcla de vapor y aire, se expresa en gramos de agua entre kg de aire seco. La humedad relativa es la división entre la presión parcial de vapor de agua en una mezcla y la presión parcial de la mezcla saturada a igual temperatura, expresada en porcentaje [2, pp. 9–10].

Carta psicrométrica

Representa la humedad absoluta, temperatura de punto de rocío y los volúmenes específicos con respecto a la temperatura de bulbo seco. El eje horizontal es la temperatura de bulbo seco, el vertical es la masa de contenido de humedad por kg de aire seco. La temperatura de punto de rocío se expresa como una curva en la parte superior correspondiente al 100% de humedad relativa, entre esta y la línea base del gráfico se trazan las curvas de humedad relativa en porcentaje. La temperatura de bulbo húmedo se representa con líneas diagonales a 30° del eje horizontal inclinadas hacia la derecha. El volumen específico corresponde a una diagonal inclinada a 60°C. La humedad relativa disminuye con el calentamiento y aumenta con el enfriamiento [2, pp. 10–11].

2.6.3. Propiedades del producto húmedo

Además de las propiedades del aire, la velocidad de secado se ve influenciada por las propiedades del producto a deshidratar. Las principales son el contenido de humedad y el contenido de humedad en equilibrio [2, p. 14].

Contenido de humedad

La mayoría de los productos agrícolas e industriales contienen humedad, ésta se expresa en porcentaje o en número decimal; es posible calcularla como humedad en base húmeda (m) y en base seca (M). Por conveniencia, los productos suelen expresarlo en base seca, pero en productos agrícolas es más usual la base húmeda [2, p. 14]. Acerca de éstos se describen más en el apartado de Cinética de secado y el cálculo se observa en Obtención de las Cinéticas de Secado del Capítulo 3.

Ambas se relacionan entre sí mediante las ecuaciones (14) y (15) [2, p. 15].

$$M = \frac{m}{1 - m} \quad (14)$$

$$m = \frac{M}{1 + M} \quad (15)$$

Conforme su contenido de humedad es posible dividir los productos en higroscópicos y no higroscópicos; los primeros el contenido de humedad es de humedad ligada que en un proceso de secado permanecerá como humedad residual; así, en los no higroscópicos la humedad es de agua libre y es posible removerla en su totalidad. Gran parte de los productos son higroscópicos [2, p. 16].

Contenido de humedad en equilibrio

Es el contenido de humedad cuando el producto absorbe y libera la misma humedad en el aire ambiental (sin intercambio neto), ocurre cuando se somete a temperatura y humedad relativa constante y en equilibrio con el aire alrededor, y la presión de vapor de agua es igual a la presión parcial del aire. Se denota como M_e , con él se puede obtener el contenido mínimo de humedad posible en determinadas condiciones [2, p. 18].

El contenido de humedad libre en un producto decrece con la disminución de la humedad relativa del aire y suministrando calor. Por su parte, el contenido de humedad en equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura a una humedad relativa dada [2, p. 19].

2.6.4. Cinética de secado

La cinética de secado se refiere a los estudios basados en los cambios de la cantidad promedio de humedad con el tiempo; es contrario a la dinámica del secado qué son los cambios de temperatura y humedad. Describe entonces la cantidad de humedad evaporada, el tiempo, consumo de energía, entre otros. Por supuesto que, esto también depende de la transferencia de calor y masa entre la superficie del cuerpo, ambiente y el interior del material. La intensidad de secado refleja un cambio

en la cantidad de humedad, que es influenciado por temperatura, humedad, velocidad relativa del aire, presión total, etcétera [19].

Particularmente, la **humedad en base húmeda** hace referencia a la humedad contenida en el alimento respecto a su masa total (masa seca y masa de agua). Por su parte, la **humedad en base seca** toma como referente la masa seca constante en el alimento, es así como se obtiene el número de veces o el porcentaje de agua en comparación con la masa sólida. (Un coeficiente igual a 2 o 200% expresa que se tiene el doble de masa de agua que de masa sólida seca) [20].

Curvas de secado

Éstas describen el secado de cualquier producto:

- Variación de contenido de humedad en el tiempo
- Velocidad de secado frente al tiempo
- Velocidad de secado frente al contenido de humedad

Durante el secado, el contenido de humedad varía conforme pasa el tiempo, la curva resultante explica la reducción de humedad del producto y con ello es posible obtener la velocidad de secado. La curva que describe la velocidad difiere en cada caso dado el tipo de material y su estructura, esta velocidad se define como la masa de agua eliminada por unidad de tiempo por unidad de masa de material seco, o por unidad de tiempo y área [2, p. 23]. Estas curvas se ilustran de manera ejemplificativa en la Ilustración 3.

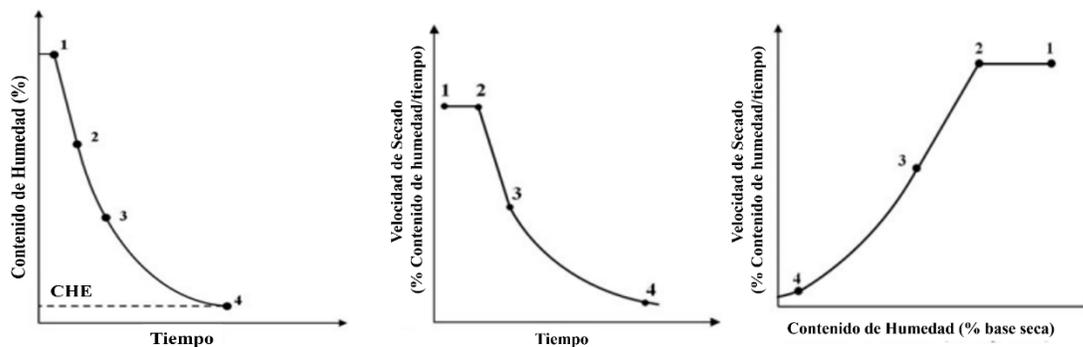


Ilustración 3. Curvas de secado. Contenido de humedad respecto al tiempo (Izquierda), velocidad de secado frente al tiempo (Centro) y Velocidad de secado frente contenido de humedad (Derecha). Fuente:[2, p. 24]

Los periodos identificados son: de 1 a 2 el periodo de secado constante (a velocidad constante), con la superficie en condiciones de saturación con movimiento de humedad por difusión; de 2 a 3 es el periodo de tasa decreciente (tasa de secado reduce de forma lineal), cuando la humedad alcanza su punto crítico y la superficie no está saturada lo que dificulta la evaporación; de 3 a 4 un segundo periodo de tasa decreciente, con una superficie casi seca y movimiento de humedad del interior hacia la superficie; alcanzado el punto 4 se llega al Contenido de Humedad en Equilibrio (CHE) [2, pp. 24–25].

2.6.5. Secado de capa delgada

Referido al secado del producto húmedo como una sola rebanada, lo suficientemente delgada como para considerar una temperatura uniforme. Esta suposición, aunada a la consideración de la temperatura del aire ambiente y del producto como equivalentes, conllevan a un error, sin embargo, sólo se presenta al inicio del proceso y se reduce considerablemente con la reducción del espesor; es de esta manera que el estudio del secado de capa delgada toma una especial importancia. Las ecuaciones que derivan de esto pueden ser teóricas, semiteóricas o empíricas. Surgen modelos teóricos de ajuste en base a la resistencia interna del producto a la transferencia de humedad, para explicar el comportamiento de secado en cualquier condición, no obstante, pueden implicar errores importantes. Por otro lado, los modelos con ecuaciones semiteóricas y empíricas atienden a la resistencia externa a la transferencia de humedad entre el producto y el aire [2, p. 9], [21].

Los modelos teóricos y semi-teóricos más utilizados se derivan de la segunda ley de difusión de Fick como lo son Weibull, Midilli-Kuçük, Two-Terms y Modified Henderson and Pabis. Otros derivan de la ley de enfriamiento de Newton como el modelo de Page [2, p. 29].

Modelos en base a la segunda Ley de Fick de difusión

Esta ley es aplicada en situaciones de difusión prácticas, dado que éstas no están en estado estacionario. Para una zona del sólido determinada, el flujo y gradiente de difusión varían con el tiempo lo que ocasiona la generación o agotamiento de las sustancias difundidas. La ecuación (16) de derivadas parciales describe esta ley [22].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (16)$$

Donde D es el coeficiente de difusión y $\frac{\partial C}{\partial x}$ el gradiente de difusión, en caso de que el coeficiente sea constante, la ecuación (16) se reduce a la ecuación (17) [22].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} (C) \quad (17)$$

Con C como la concentración, esta suele expresarse en unidades de masa de las sustancias que se difunden entre el volumen del sólido ($\frac{kg}{m^3}$).

Algunos de los modelos derivados de esta ley son los enlistados a continuación [21]:

- **Modelo Two-terms:** Propuesto por Henderson, utiliza los dos primeros términos de la solución general en serie de la segunda Ley de Fick, con el fin de corregir deficiencias en el modelo de Henderson & Pabis; usado luego por Glenn en el secado de granos. Expresado matemáticamente como en la ecuación (18).

$$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (18)$$

Donde a y b son constantes adimensionales que indican la forma, mientras k_1 y k_2 corresponden a las constantes de secado en unidades de s^{-1} .

- **Modified Henderson & Pabis:** Dadas algunas áreas de oportunidad en los modelos de Henderson & Pabis y Two-terms, Karathanos añade el tercer término de la solución general de la segunda Ley de Fick, explicando que el primer término define la última parte, el segundo la parte intermedia mientras

el tercero la parte inicial de la curva de secado; expresado como en la ecuación (19).

$$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (19)$$

En la cual, a, b y c nuevamente son las constantes adimensionales que indican la forma, y k, g, h las constantes de secado (s^{-1}).

- **Midilli-Kuçuk:** Modelo propuesto por Midilli y Kuçuk en modificación al de Henderson y Pabis añadiendo el término empírico t , resultando en un nuevo modelo con un término exponencial y uno lineal como se muestra en la ecuación (20).

$$MR = n_1 \exp(-kt^{n_2}) + Ct \quad (20)$$

Donde n_1, n_2 y C son las constantes del modelo, y k la constante de secado.

- **Weibull:** Es un modelo probabilístico utilizado en la descripción de cambios en la deshidratación osmótica, rehidratación, hidratación, etcétera. Se normalizó mediante el análisis de transferencia de masa basado en la suposición de que el coeficiente de difusión es representativo general de la rapidez del proceso (ecuación (21)) [23].

$$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (21)$$

Modelos en base a la Ley de enfriamiento de Newton

Esta ley establece que la velocidad de enfriamiento de un objeto (o de calentamiento) es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y su medio circundante. Descrito de forma matemática, un objeto a temperatura inicial en una habitación a temperatura T_1 (supuesta constante), siendo $T(t)$ la temperatura del objeto en el instante t y k una constante de proporcionalidad acorde a las temperaturas, la ecuación (22) corresponde a esta ley [24].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k(T(t) - T_1) \quad (22)$$

En base a esta ley se construye el modelo de **Page**, el cual modificó el modelo de Lewis añadiendo una constante adimensional empírica (n) y lo aplicó al modelo de secado de maíz sin cáscara. Se expresa como se observa en la ecuación (23)[21].

$$MR = \exp(-(kt^n)) \quad (23)$$

Con k como la constante de secado.

2.6.6. Eficiencia del secador

De manera general, para un secador el análisis de energía resulta vital. Al ser un proceso que busca reducir costos en el consumo de energía conocer su eficiencia resulta de relevancia. En particular, el secado por convección consume mayor energía dado que elimina humedad con el calor latente de vaporización. Los valores de consumo de energía y eficiencia permiten evaluar el secador. Para llevar a cabo el cálculo se considera la relación entre la cantidad de energía requerida para la evaporación y la energía total suministrada (ecuación (24)) [2, pp. 32–33].

$$\eta = \frac{\text{energía de evaporación}}{\text{total de energía suministrada}} \quad (24)$$

2.6.7. Colorimetría

En cuanto a colorimetría toma relevancia el sistema CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), uno de los más importantes y utilizados actualmente. Se basan en el uso de fuentes de iluminación y observadores estándares [25, p. 62]. Utiliza tres coordenadas para localizar un color en un espacio de color, entre los cuales destacan [25, pp. 62–64]:

1) CIE XYZ

Este CIE triestímulo se consigue mediante la multiplicación de los valores de iluminante, reflectancia o transmisión y funciones del observador patrón, para luego sumarlo a la longitud de onda en el espectro visible. Para calcular los componentes tricromáticos es posible el uso de un colorímetro de tres filtros, con tres mediciones de reflejo de luz para calcular X, Y, Z. Ahora bien, por el teorema de Pitágoras se calcula la diferencia entre dos muestras en el espacio euclídeo (ΔE , ecuación (25)).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (25)$$

Donde E viene de Empfindung del alemán, cuyo significado es sensación. Así, dos muestras con los mismos valores señalan el mismo color a las mismas condiciones de iluminación y observación; mientras, a valores distintos indican un cambio de coloración.

2) CIE L*a*b*

Este sistema nace de los inconvenientes del sistema XYZ en el año de 1976, transformando éstos hasta un espacio de color más uniforme. Como ventaja destaca su similitud con la percepción visual humana, con distancias equitativas en el sistema aproximadamente iguales a las visuales. Mediante transformaciones no lineales, se obtuvo un sólido de color, así un nuevo espacio de color; definido ahora con coordenadas rectangulares L*, a* y b*, con cilíndricas L*, H* y C*. En este sistema la diferencia de color (ΔE) se calcula como en la ecuación (26).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (26)$$

En esta, L^* es la luminosidad (0 a 100, de negro a blanco respectivamente), y las coordenadas a^* y b^* formando un plano perpendicular a L^* ; a^* como desviación del punto acromático de la luminosidad hacia el rojo si es positiva y al verde en caso contrario, y b^* hacia el amarillo de ser positiva y hacia el azul si es negativa; juntas, a^* y b^* describen la cromaticidad, y con L^* se define el color del estímulo. Sin embargo, hasta este punto no se describe el tono ni la saturación.

3) CIE $L^*C^*H^*$

El inconveniente presentado en el sistema $L^*a^*b^*$, se resuelve con C^* (croma) y H^* (tono), relacionados con el sistema anterior mediante las ecuaciones (27) y (28).

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (27)$$

$$H^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (28)$$

C^* con valores de 0 en estímulos acromáticos, hasta 150 como común, mayor a 1,000 en estímulos monocromáticos. El ángulo hue (H^*) varía de 0° a 360° , donde a 0° representa el color rojo, a 90° el amarillo, verde a 180° y azul al alcanzar los 270° [26]; siendo indefinida a valores acromáticos, es decir, $a^* = b^* = 0$. Junto con L^* definen el espacio de color en coordenadas cilíndricas.

Al comparar el color de dos muestras, para definir sus diferencias se utilizan $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*, \Delta H^*$ (ecuación (29)) y ΔE para la diferencia global (26) [27].

$$\Delta P^* = P_{muestra}^* - P_{referencia}^* \quad (29)$$

Donde P^* representa el valor para el que se desea calcular la diferencia (L^*, a^*, b^*, C^* o H^*). De esta forma y acorde con el sistema CIE [26], las diferencias representan:

- ΔL^* : Los valores positivos indican que la muestra es más clara que la muestra de referencia; así, de ser negativo indica que es más oscura.

- Δa^* : Valores positivos demuestran que la muestra es más roja, negativos que es más verde.
- Δb^* : De ser positiva señala que la muestra es más amarilla, de lo contrario (valor negativo) es más azul.
- ΔC^* : Un valor positivo denota una mayor intensidad o saturación en la muestra, si es negativo entonces hay menor saturación.
- ΔH^* : Cuando adquiere valores positivos refleja que el ángulo hue está en dirección contraria a las manecillas del reloj desde el valor estándar; por su parte, los números negativos apuntarán en dirección a las manecillas del reloj.

2.7. PERA

Este fruto es originario de Europa oriental y Asia occidental, llegando a América mediante colonizadores ingleses en lo que hoy es Canadá. Aporta vitaminas A, C, E y del grupo B, además de minerales esenciales como el calcio, hierro, potasio y fósforo. Suele utilizarse en gastronomía, consumido en fresco, mermeladas, conservas, jugos, vinos, licores, gelatinas, entre otros [12].

Se cosecha del árbol del peral (ver Ilustración 4), mayoritariamente caducifolios de la familia rosáceas, de troncos erectos y grises con hojas ovaladas de longitudes hasta los 10 cm; denotado con líneas en verde oscuro y flores blancas. Se tienen en existencia más de 30 variedades, las que pueden dividirse acorde a la temporada entre verano e invierno [12].



Ilustración 4. Árbol del peral y su fruto, la pera. Fuente: [12]

Ahondando en su información nutricional, la Tabla 2 muestra su composición nutritiva en estado fresco por cada 100 gramos del fruto [28].

Tabla 2. Contenido nutricional de la pera

Nombre	Monto	Unidad
Agua	84	Gramos
Energía	57	Kcal
Energía	239	KJ
Proteína	0.36	Gramos
Lípidos totales	0.14	Gramos
Ceniza	0.32	Gramos
Carbohidratos	15.2	Gramos
Fibra	3.1	Gramos
Azúcares	9.75	Gramos
Sacarosa	0.71	Gramos
Glucosa	2.6	Gramos
Fructosa	6.42	Gramos
Calcio	9	Miligramos
Hierro	0.18	Miligramos
Magnesio	7	Miligramos
Fósforo	12	Miligramos
Potasio	116	Miligramos
Sodio	1	Miligramos
Zinc	0.1	Miligramos
Cobre	0.082	Miligramos
Manganeso	0.048	Miligramos
Selenio	0.1	Microgramos
Fluoruro	2.2	Microgramos
Vitamina C	4.3	Miligramos
Tiamina (B1)	0.012	Miligramos
Riboflavina (B2)	0.026	Miligramos
Niacina (B3)	0.161	Miligramos
Ácido pantoténico (B5)	0.049	Miligramos
Vitamina B6	0.029	Miligramos
Folato	7	Microgramos
Colina	5.1	Miligramos
Betaína	0.2	Miligramos
Vitamina A	1	Microgramos
Caroteno, beta	14	Microgramos
Caroteno, alfa	1	Microgramos
criptoxantina, beta	2	Microgramos

Luteína + zeaxantina	44	Microgramos
Vitamina E	0.12	Miligramos
Tocoferol, gamma	0.03	Miligramos
Tocotrienol, alfa	0.02	Miligramos
Vitamina K	4.4	Microgramos
Ácidos grasos, saturados totales	0.022	Gramos
SFA 16:0	0.017	Gramos
SFA 18:0	0.03	Gramos
Ácidos grasos, monoinsaturados totales	0.084	Gramos
MUFA 16:1	0.002	Gramos
MUFA 18:1	0.081	Gramos
MUFA 20:1	0.001	Gramos
Ácidos grasos, poliinsaturados totales	0.094	Gramos
AGPI 18:2	0.093	Gramos
AGPI 18:3	0.001	Gramos
Triptófano	0.002	Gramos
Treonina	0.011	Gramos
Isoleucina	0.011	Gramos
Leucina	0.019	Gramos
Lisina	0.017	Gramos
Metionina	0.002	Gramos
Cistina	0.002	Gramos
Fenilalanina	0.011	Gramos
Tirosina	0.002	Gramos
Valina	0.017	Gramos
Arginina	0.01	Gramos
Histidina	0.002	Gramos
Alanina	0.014	Gramos
Ácido aspártico	0.105	Gramos
Ácido glutámico	0.03	Gramos
Glicina	0.013	Gramos
Prolina	0.021	Gramos
Serina	0.015	Gramos

Fuente: Elaboración propia con [28]

2.7.1. Producción de pera en el Mundo

En el mundo, para el año de 2020 la FAO [29] contabilizó una producción de 23,109,000 toneladas en una superficie cosechada de 1,292,709 hectáreas; el principal productor es China con 16,000,000 de toneladas (Ton) y abarcando un 77.5% del total, seguido de Italia con 619,000 Ton, Estados Unidos con 609,000 Ton, Argentina 600,000 Ton, Turquía 545,000 Ton, Sudáfrica 431,000 Ton, Países Bajos 400,000 Ton, Bélgica 392,000 Ton, España 323,000 Ton e India con 306,000 Ton. De manera general, la producción por región en porcentaje respecto a la producción mundial se observa en la Ilustración 5.

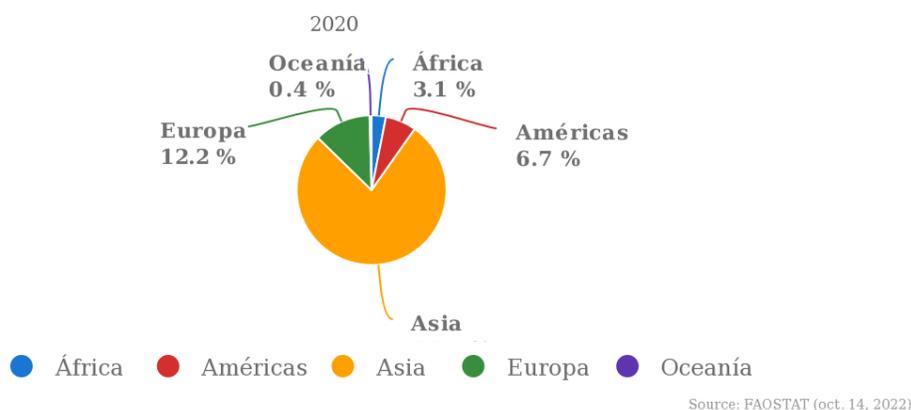


Ilustración 5. Gráfica de proporción de producción de Peras por región. Fuente: [29]

Acerca del valor económico de dicho fruto, en 2020 arrojó una producción bruta de 19,467,828 miles de dólares. La Ilustración 6, muestra el crecimiento de esta producción bruta desde 1991 hasta el 2020.

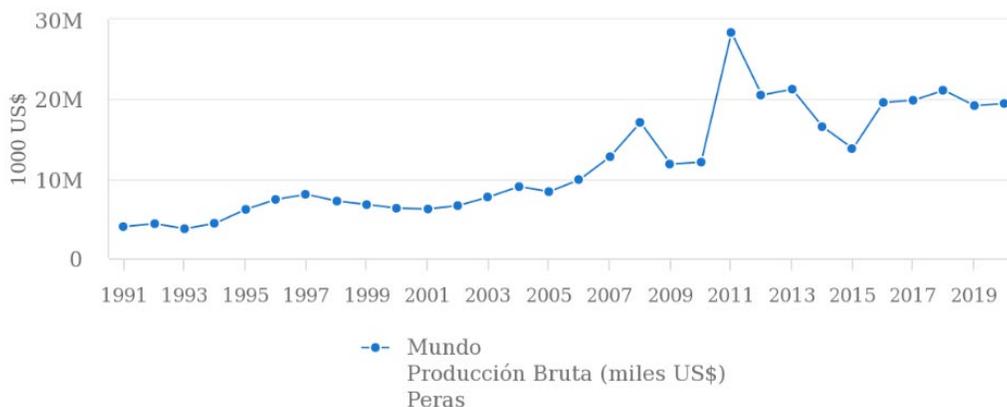


Ilustración 6. Gráfica de producción bruta de peras de 1991 a 2020 en miles de US\$. Fuente: [29]

2.7.2. Producción de pera en México

Para el año de 2020, a nivel nacional la producción sumó 25,978 toneladas de este fruto, con una superficie sembrada de 3,743 hectáreas, repartidas en 18 estados. Las variedades cultivadas de mayor comercialización son Anjou, Bartlett, Bosc, Seckel y Kieffer. El método de fruticultura utilizado es denominado “traspatio o lindero” y resalta que su cultivo contribuye a la economía de los productores al proveerles de ingresos mientras otros granos se encuentran en desarrollo.

México es el cuarto productor de este fruto en el continente Americano y, de acuerdo con datos de la Delegación SADER (2020), Puebla es el principal estado de donde se obtiene la pera a nivel nacional, seguido por Michoacán y Morelos; estos estados producen 12,000, 6,000 y 2,000 toneladas, respectivamente. El periodo de mayor producción se ubica entre julio y octubre, destacando septiembre, con una cosecha de hasta 7,500 toneladas. En cuanto a la exportación, ésta se concentra en Belice, Estados Unidos y Emiratos Árabes [12].

Por su parte, en 2018, Puebla reportó una producción de 11,363 toneladas en sus 1,930 hectáreas de cultivo. De los 50 municipios productores de pera, al frente de sus altas cifras, sobresalen Huejotzingo con 2,373.5 toneladas, Chiautzingo con 1,066.8 Ton, Tlatlauquitepec 634.2 Ton, Zacatlán 591.7 Ton y Teziutlán con 582.0 Ton, entre otros como Xiutetelco, Calpan, San Jerónimo Tecuanipan, soltepec, Tochimilco, San Martín Texmelucan y Domingo Arenas. Esta producción representa 32,662,280 pesos, que abastecen mercados locales y centrales de abasto de México, Hidalgo y Tlaxcala, principalmente [30].

Desperdicio a nivel nacional

Se estima que de manera anual se desperdician alrededor de 26,704 toneladas de pera a nivel nacional, lo que es un 31.23% de la producción en 2018 y que representan 29,374 toneladas de CO₂ equivalente y un costo aproximado de \$5.7 millones de pesos [1, pp. 17, 20].

Capítulo 3 . METODOLOGÍA

3.1. MATERIA PRIMA

Dada su contribución económica a los productores, así como el periodo en el que se realizaron las pruebas, se seleccionó a la pera piedra (*Pyrus Communis*), cultivada y cosechada en el municipio de Hueyapan en el Estado de Morelos. Dicho fruto fue cortado poco antes de un estado de maduración avanzado con el fin de soportar el tiempo necesario en espera de días libres de nubosidad para llevar a cabo las pruebas correspondientes.

3.2. MÉTODOS DE SECADO

Tal como el título lo indica, los métodos de secado seleccionados son a cielo abierto y dentro de un deshidratador solar mixto tipo gabinete para así llevar a cabo su comparación.

3.2.1. Secado a cielo abierto

Para el estudio de este proceso se colocaron dos mallas de teflón sobre una mesa metálica (esto para simular un nivel dentro del deshidratador), ambas en posición horizontal, en un área libre de sombras de 0.585 m^2 , como se observa en la Ilustración 8. C).

3.2.2. Secado en el deshidratador solar tipo gabinete

El secador de alimentos utilizado en esta prueba fue un deshidratador solar tipo gabinete anidado a un colector solar plano para calentamiento de aire (cuya área de apertura es de 1.69 m^2). Este colector transporta el aire caliente, gracias a la convección natural, hacia la cámara de secado; la cual cuenta con secciones de policarbonato transparente para conseguir el calentamiento directo sobre el producto a deshidratar.

Aunado a ello, cuenta con un ventilador solar encargado de contribuir a la extracción de aire húmedo al interior de la cámara con el fin de favorecer el proceso de secado. Asimismo, viene integrado con un termómetro y un medidor de humedad. El sistema completo, así como las partes mencionadas se observan en la Ilustración 7.



Ilustración 7. Deshidratador solar mixto tipo gabinete y sus partes

Este deshidratador fue orientado hacia el Ecuador, permaneciendo fijo todo el tiempo, y llenado con producto fresco en sus 5 niveles de capacidad tanto en el lado este como oeste.

3.3. INSTRUMENTACIÓN

Para realizar la metodología descrita a continuación, se requirieron 6 sensores de temperatura y humedad de la marca OMEGA ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\%$) para medir la humedad de las bandejas (uno por cada nivel del deshidratador) y uno más para las bandejas a cielo abierto. Dos piranómetros de la marca Kipp & Zonen, 14 sensores de temperatura pt1000 ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) con carcasa, dos medidores de velocidad de aire Dwyer ($\pm 3\%$ y $\pm 1.5\%$, para cuantificar la velocidad de aire en las rejillas y el ventilador respectivamente) y una balanza digital marca Torrey. Haciendo uso de un flexómetro se tomarán las dimensiones del deshidratador.

Para medir el contenido inicial y final de humedad en la pera se utilizó de una balanza Ohaus y un medidor de actividad de agua Rotronic Higrolab C1. Para determinar la diferencia de color se utilizó un colorímetro portátil de la marca HFBTE.

3.4. PUESTA A PUNTO DE LA PRUEBA

De los sensores de temperatura pt1000, 10 se fijaron a las mallas metálicas, dos a la entrada del colector solar y dos más a la salida (al interior del deshidratador), todos ellos conectados a un adquisidor de datos, obteniendo la información de las variables a medir mediante el desarrollo de un programa en el software VEE pro

9.3, cada 30 segundos. Mediante el uso de este mismo programa y el adquisidor se conectaron los piranómetros, orientados al Ecuador; uno inclinado al mismo ángulo que el colector del deshidratador solar y otro vertical.

Con el flexómetro se tomaron las medidas del deshidratador, considerando como de relevancia el área de apertura del colector y las áreas del gabinete de policarbonato transparente (área de techo y vertical).

3.5. CINÉTICAS DE SECADO DE DESHIDRATACIÓN DE PERA A CIELO ABIERTO Y EN EL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE

3.5.1. Preparación del alimento

Se lavó y rebanó la pera en rodajas de 3.3 ± 1 mm de espesor, las cuales fueron distribuidas en 12 mallas de teflón, las cuales fueron numeradas y pesadas sin fruto, para luego tarar en la báscula y colocar con un peso aproximado de 150 g en todas ellas. Una vez todo listo, se introdujeron 10 mallas al secador y dos más sobre la mesa para el secado a cielo abierto.

3.5.2. Registro del Peso y Determinación de Humedad

Una vez iniciada la prueba, se tomó nota del peso de las muestras iniciales cada 20 minutos las primeras 2 h. Una vez transcurridos 120 minutos, se realizó lo mismo cada hora hasta que no cambió significativamente el peso, considerando como criterio una disminución menor a 1% en las últimas 3 mediciones considerando el peso total (fruto deshidratado más la malla), o bien, al cumplirse las 8 h estimadas de secado. Aunado a esto, se realizó una rotación de mallas entre los niveles 1 y 5 a las 5 h de secado. Se graficó la pérdida de peso respecto al tiempo, sin considerar el peso de la malla.

Por su parte, para la determinación de la humedad, se utilizaron la termobalanza Ohaus y el medidor de actividad de agua Rotronic Higrölab C1. Dado que el proceso para determinar la humedad afecta las propiedades del producto, primero se procedió con la cuantificación de actividad de agua para pasar a la determinación de humedad, configurado para una muestra de 3 g sometida a una temperatura de 105°C hasta registrar un cambio de peso menor a 1 mg en 90 segundos.

Finalmente se procedió a la obtención de la cinética de secado como se menciona en el siguiente apartado.

3.5.3. Obtención de las Cinéticas de Secado

En una hoja de Excel se registraron las siguientes variables: tiempo, peso, humedad inicial de la muestra, humedad base húmeda, masa de agua, masa seca, humedad base seca. Luego se introdujeron los pesos registrados en la prueba, así como la humedad determinada. Para determinar la cantidad de masa de agua inicial se hará uso de la ecuación (30).

$$Masa_{aguainicial} = (Peso_{inicial})(Humedad_{basehúmeda}(\%)) \quad (30)$$

Mientras, para determinar la masa de sólidos secos se usará la ecuación (31).

$$Masa_{sólidossecos} = Peso_{inicial} - Masa_{aguainicial} \quad (31)$$

La humedad en base seca se calcula con la ecuación (32).

$$Humedad_{baseseca} = \frac{Masa_{agua}}{Masa_{sólidossecos}} \quad (32)$$

Para calcular la masa de agua se utilizará la ecuación (33).

$$Masa_{agua} = Peso - Masa_{sólidossecos} \quad (33)$$

Para conocer el contenido de humedad en base húmeda se opta por la ecuación (34).

$$Humedad_{basehúmeda} = \frac{Masa_{agua}}{Peso} \quad (34)$$

Por último se comparará el contenido de humedad de la muestra seca con el obtenido mediante la medición experimental y se graficarán el contenido de humedad en base húmeda y seca respecto al tiempo, así como la velocidad de secado respecto al tiempo y al contenido de humedad [31].

3.6. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL DESHIDRATADOR SOLAR MIXTO TIPO GABINETE

Para conocer la eficiencia del deshidratador se requerirán mediciones de la irradiancia, las medidas del colector y la cabina de secado, y la velocidad del aire; para ello se utilizaron el piranómetro, el flexómetro y los medidores de aire. Con apoyo de Excel se llevarán a cabo los cálculos a continuación [31].

Para el cálculo de la eficiencia térmica instantánea del colector solar la ecuación (35) sería la siguiente.

$$\eta_c = \frac{\text{calor ganado}}{\text{calor recibido}} = \frac{\dot{m}C_p(T_{out,c} - T_{in,c})}{A_c I_T} \quad (35)$$

Dónde, A_c es el área de apertura del colector, I_T es la irradiancia solar en el plano del colector, y se considerará el calor específico del aire a presión constante. Por su parte, para el flujo másico, considerando acorde al balance de energía un flujo igual de entrada que de salida, se tomó la velocidad de salida del aire en las rejillas y el ventilador de la cabina de secado, las áreas correspondientes, y la densidad acorde a la temperatura del aire.

Para calcular la eficiencia del secador solar se hará uso de la ecuación (36).

$$\eta_E = \frac{m_w h_{fg}}{(A_c + A_{G_T})I_{PI} + A_{G_V}I_{PV}} \quad (36)$$

Dónde m_w es la masa de agua evaporada y A_{G_T} es el área de la cabina de secado correspondiente a su techo, A_{G_V} el área de la superficie vertical de la cabina, I_{PI} la irradiancia en el plano del colector e I_{PV} la irradiancia en el plano vertical. En el caso de las pruebas a cielo abierto se considera su correspondiente área y la irradiancia en el plano horizontal, calculada con la ecuación (37), donde α es la altura solar y β el ángulo de inclinación.

$$I_{PH} = I_{PI} \left(\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\alpha + \beta)} \right) \quad (37)$$

Finalmente, la eficiencia de secado se estima mediante la ecuación (38). En el caso de las pruebas a cielo abierto se repite el procedimiento descrito en la ecuación anterior.

$$\eta_o = \frac{m_p C_{pp} (T_{p,t+dt} - T_{p,t}) + m_w h_{fg}}{I_{PI} (A_C \eta_C + A_G \tau_G) + A_{GV} I_{PV} \tau_G} \quad (38)$$

3.7. AJUSTE DEL MODELO ANALÍTICO A LA CURVA DE SECADO

El ajuste de datos se realizó en Python, este consistió en la expresión como una relación de humedad (MR) que luego fue trazada en función del tiempo. La relación requiere del contenido de humedad en el alimento en base seca en un tiempo t (W), la humedad en equilibrio (W_e) y la humedad inicial del fruto (W_0), todas ellas en unidades de $\frac{g_{agua}}{g_{materia\ seca}}$ (véase la ecuación (39)) [31].

$$MR = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} \quad (39)$$

Los modelos que se utilizarán para el ajuste de los datos se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelos de ajuste de datos

MODELO	ECUACIÓN
Weibull	$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Two-terms	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
Modified Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
Midilli-Kuçuk	$MR = n_1 \exp(-kt^{n_2}) + Ct$

Fuente: Elaboración propia con [31]

3.7.1. Análisis estadístico

Como criterios del buen ajuste de los datos experimentales respecto a los modelos matemáticos, se optará por tomar el coeficiente de determinación (R^2), chi cuadrado (χ^2) y la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$), haciendo uso de las ecuaciones (40), (41) y (42).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (40)$$

$$\chi_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (41)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (42)$$

Siendo MR la relación de humedad calculada con la ecuación (39), N en el número de datos y n el número de constantes del modelo [31].

3.8. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE SECADO

Se registrará en una bitácora la hora de inicio y la hora final de cada una de las pruebas, así se determinarán los tiempos de secado tanto a cielo abierto como en el deshidratador solar mixto tipo gabinete para su comparación. Asimismo, se consideraron las cinéticas y ajustes de curvas para observar los tiempos de secado cuando se alcanzan valores inferiores al 10% de humedad.

3.9. CAMBIO DE COLORACIÓN

Para evaluar el cambio de color se hizo uso del colorímetro portátil, tomando como referencia el color de una muestra húmeda y luego de las muestras secas 3 veces hasta obtener el promedio de la diferencia de color.

Capítulo 4 . DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas se llevaron a cabo en el mes de noviembre del 2022, la distribución de las mallas se muestra en la Ilustración 8. Los niveles considerados fueron numerados del 1 al 5 de abajo hacia arriba; esto al igual que la numeración de las mallas, se muestra en la Ilustración 9. Todas las mallas se cargaron con un promedio de 151 g (± 0.8 g) de alimento fresco.



Ilustración 8. Distribución de mallas. A) Secador lado este, B) Secador lado oeste, C) Cielo abierto.

Este	Oeste	
M10	M5	Nivel 5
M9	M4	Nivel 4
M8	M3	Nivel 3
M7	M2	Nivel 2
M6	M1	Nivel 1

Ilustración 9. Numeración de mallas y niveles

Las temperaturas y humedad, promedio en el deshidratador y ambientales, por cada prueba se observan en las gráficas de la Ilustración 10. La temperatura ambiental promedio de las pruebas es de 29.8 °C (± 0.72 °C) con una humedad ambiental de 40.6% ($\pm 1.87\%$). Dentro del deshidratador solar tipo gabinete se nota un incremento en la temperatura y decremento de la humedad respecto al tiempo. Respecto a los datos ambientales, la temperatura en el secador resulta en todo caso superior; mientras, la humedad inicia con valores similares para luego permanecer inferior a

la ambiental, con un decremento superior. El detalle de temperaturas y humedad por nivel se encuentra disponible en el ANEXO 1.

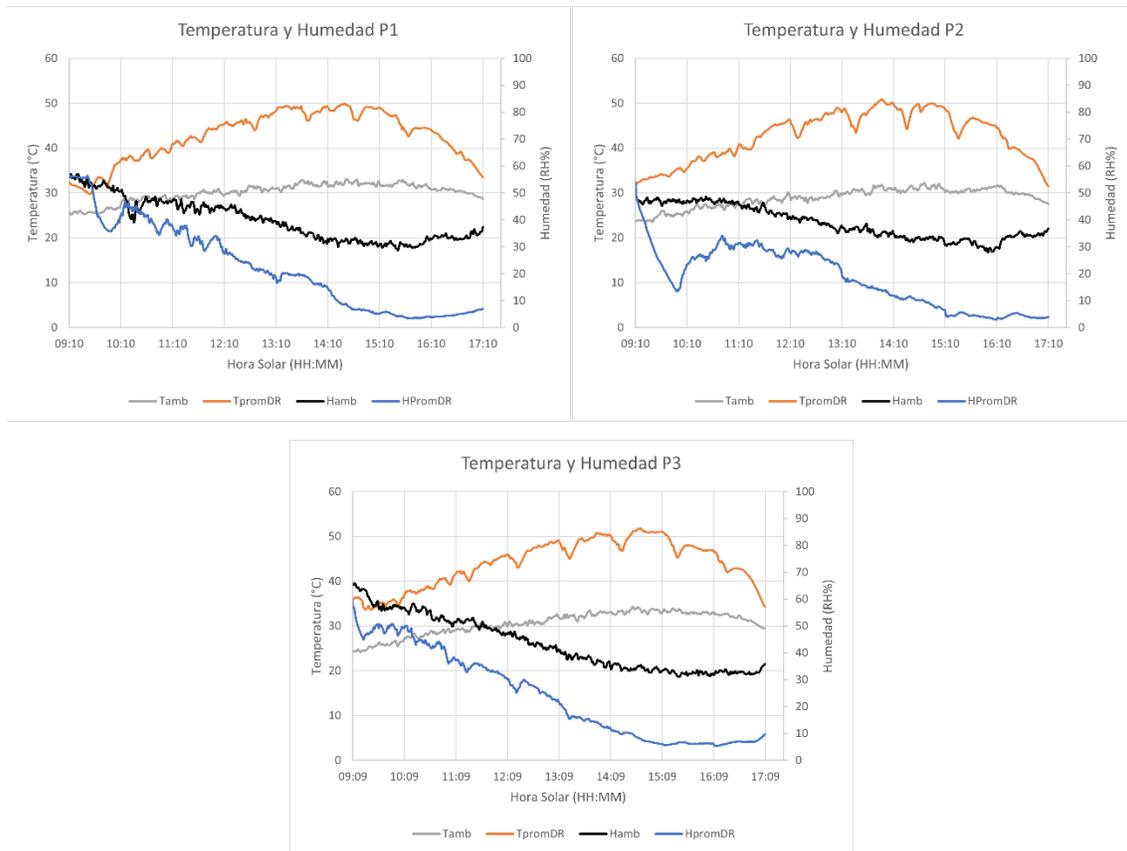


Ilustración 10. Gráficas de Temperatura y Humedad promedio en cada prueba

En otro punto, es posible apreciar la irradiancia y las temperaturas respecto al tiempo en la Ilustración 11. La irradiancia promedio, en el plano del colector, en los días de prueba fue de 732.12 W/m^2 ($\pm 5.49 \text{ W/m}^2$); es decir, una irradiación de 5.85 kWh/m^2 ($\pm 0.04 \text{ kWh/m}^2$) en las 8 h de duración de las pruebas. De acuerdo con las gráficas, las primeras 3 h denotan aumentos de temperatura conforme al aumento de la irradiancia hasta que se alcanza el medio día solar; luego, con el decremento de la irradiancia aún se observan ligeros incrementos en la temperatura hasta una disminución progresiva de la misma. Asimismo, se aprecia una pérdida de temperatura al momento de la apertura del deshidratador para medición del peso, lo que afecta el proceso de secado.

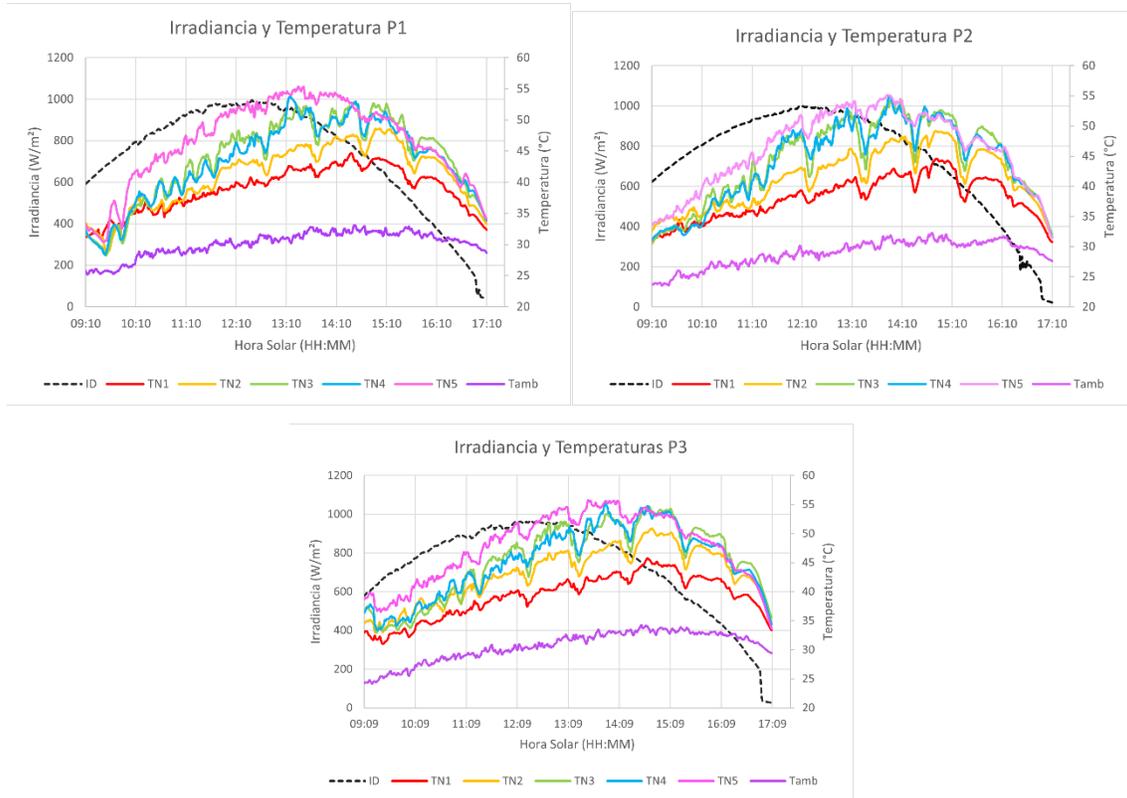


Ilustración 11. Gráficas de Irradiancia y Temperatura para cada prueba

Respecto al peso en relación con el tiempo, todas las pruebas iniciaron alrededor de las 09:10 h (horas solares), se tomó el peso para cada malla acorde a los intervalos descritos en la metodología. Los resultados de las mallas dentro del secador y a cielo abierto para cada día de prueba se muestran en las gráficas de la Ilustración 12.

Como es posible apreciar, los tiempos de secado y la pérdida de peso son bastante similares. Destacan las mallas 5 y 10 (nivel 5) en similitud con el secado a cielo abierto (CAO y CAE), el primer día de prueba semejante sobre todo a la malla 10, mientras los días de prueba dos y tres más similares al secado de la malla 5. En cuanto al resto de los niveles, las mallas presentan un secado análogo por cada nivel.

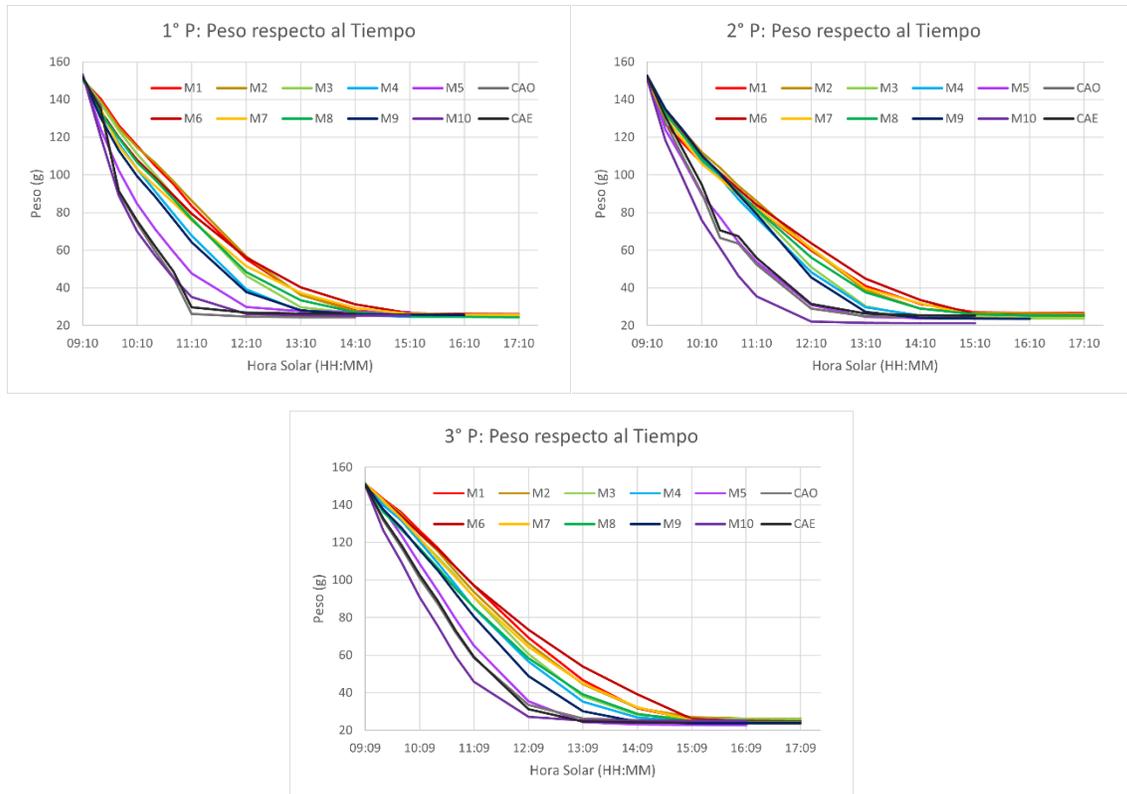


Ilustración 12. Gráficas Peso respecto al Tiempo por cada malla

Acerca de la determinación de la humedad inicial, en general las muestras seleccionadas presentaron una humedad promedio de 84.51% ($\pm 0.45\%$), mientras la actividad de agua fue de 0.98 en promedio (± 0.01). Por su parte, la humedad final promedio de las muestras deshidratadas en el secador fue de 5.85% ($\pm 0.95\%$) con actividad de agua de 0.32 (± 0.03), y a cielo abierto de 6.45% (± 0.42) con actividad de agua 0.33 (± 0.02); en ambos casos se observa la deshidratación necesaria por debajo de un 10% de humedad y menos de 0.6 de actividad de agua, lo que asegura evitar el desarrollo de microorganismos.

4.1. CINÉTICAS DE SECADO

De acuerdo con los cálculos de las cinéticas de secado, para el secado general de cada uno de los días de prueba en el deshidratador y a cielo abierto, la humedad inicial utilizada y la final obtenida se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Humedad inicial y final de cada prueba

Humedad (% agua)	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		General	
	DR	CA	DR	CA	DR	CA	DR	CA
Inicial	84.0		84.6		84.9		84.5 ± 0.45	
Final teórica	5.39	4.87	5.0	6.5	7.7	7.6	6.03 ± 1.19	6.32 ± 1.12
Final experimental	6.06	6.4	5.74	6.51	5.77	6.43	5.85	6.45
Desviación estándar	±1.01	±0.68	±1.19	±0.28	±0.73	±0.38	± 0.95	± 0.42

Por su parte, las gráficas de las cinéticas de secado por día de prueba y por nivel se observan en las gráficas de las ilustraciones 13 a 17.

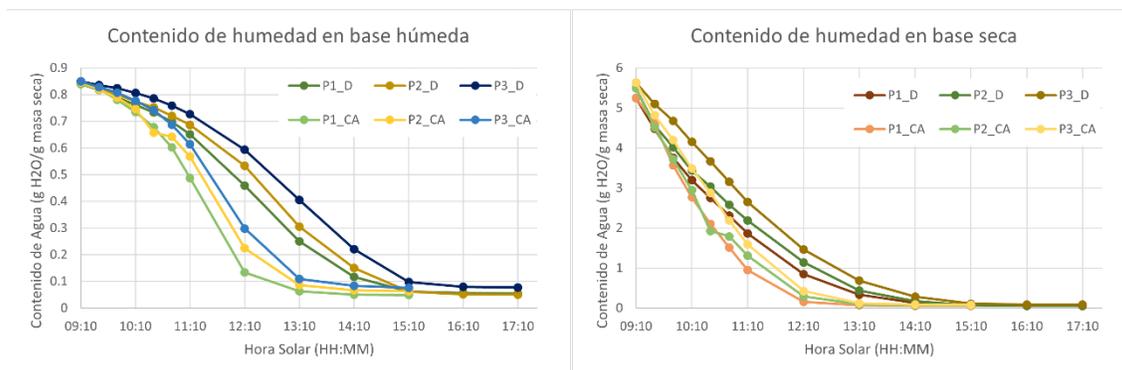


Ilustración 13. Gráficas de contenido de humedad en base húmeda y seca en el Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo abierto en cada uno de los días de prueba

De la Ilustración 13, en todas las pruebas el secado a cielo abierto muestra una pérdida de humedad más rápida, sin embargo el deshidratador solar permite la deshidratación de una carga 5 veces mayor en un tiempo aceptable; sobre este punto, las gráficas presentadas muestran que se alcanzaron niveles de humedad aceptables desde un tiempo menor al que se dio por finalizada la prueba, esto último se discutirá más a fondo en el apartado de tiempo de secado.

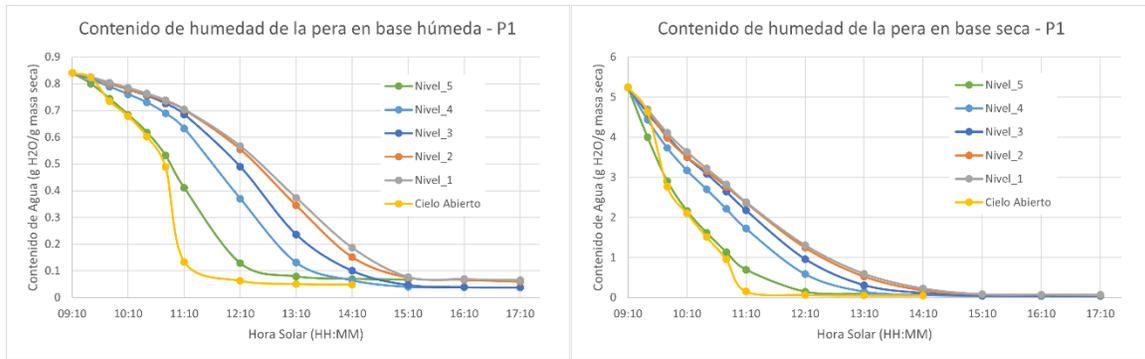


Ilustración 14. Gráficas de contenido de humedad en base húmeda y seca por nivel en el Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo abierto en la Prueba 1

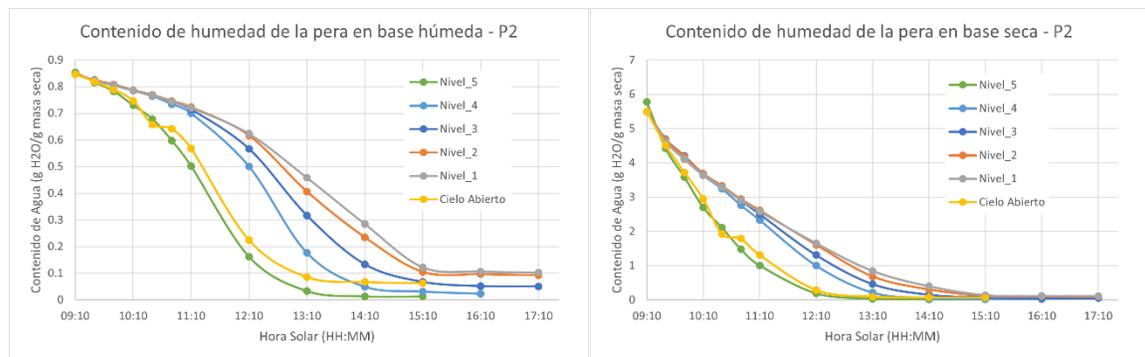


Ilustración 15. Gráficas de contenido de humedad en base húmeda y seca por nivel en el Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo abierto en la Prueba 2

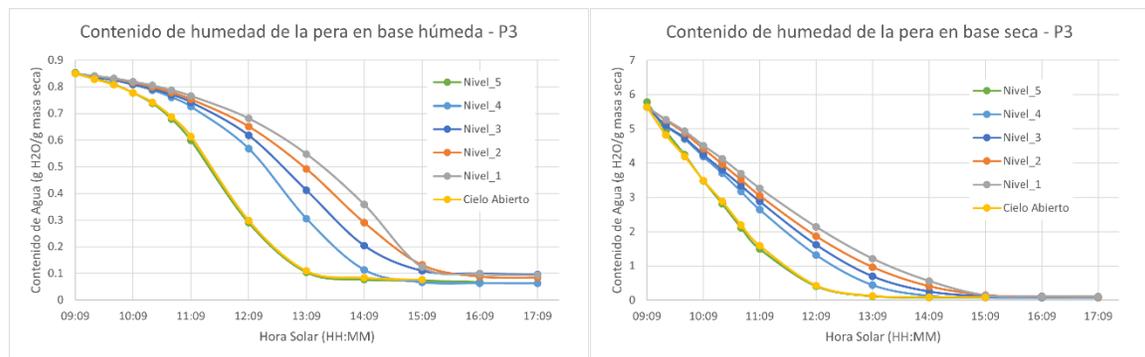


Ilustración 16. Gráficas de contenido de humedad en base húmeda y seca por nivel en el Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo abierto en la Prueba 3

Acorde a los resultados de las ilustraciones 14 a 16; los valores estimados y medidos son bastante cercanos en todos los casos. Las diferencias pueden provenir de las mediciones de humedad inicial y final de las muestras seleccionadas, considerando la posibilidad de que algunas podrían tener mayores o menores

valores de humedad, tanto inicial como final. Esto destaca para las pruebas 2 y 3, cuyos primeros dos niveles indican valores de humedad cercanas o un poco superiores al 10% (ver Ilustración 15 e Ilustración 16), sin embargo las mediciones experimentales indican valores alrededor del 6%, lo que indicaría que los valores de humedad inicial considerados en realidad eran ligeramente menores; contrario a lo anterior, los últimos niveles presentan humedades inferiores a las medidas, es decir, la humedad del producto fresco podría ser ligeramente superior a la considerada en los cálculos.

Tal como resultó en la pérdida de peso (Ilustración 12), las cinéticas por prueba denotan una pérdida de contenido de humedad respecto al tiempo similar entre el nivel 5 en el deshidratador y a cielo abierto, el resto de los niveles va decreciendo en velocidad conforme disminuye el nivel. De forma general, el producto deshidratado en el secador tiene valores inferiores de humedad en comparación con los productos a cielo abierto.

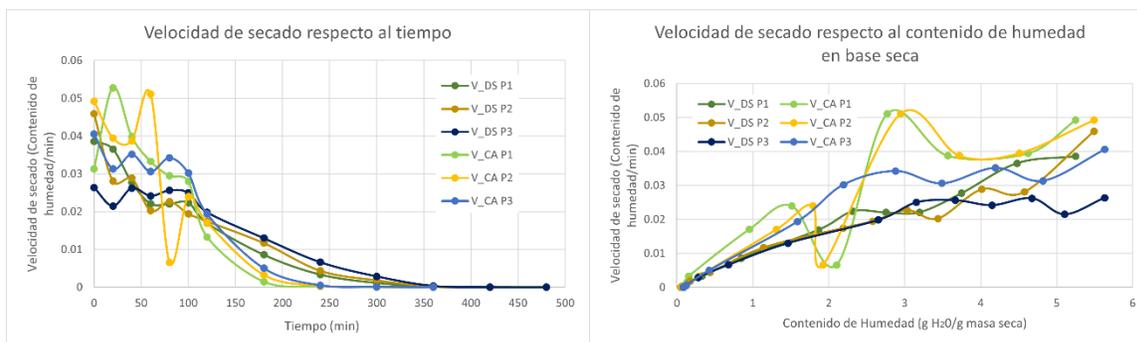


Ilustración 17. Gráficas de velocidad de secado respecto al tiempo y al contenido de humedad en base seca

Por su lado, la Ilustración 17 muestra la velocidad de secado. La gráfica de la derecha (respecto al tiempo) conforme a lo descrito los fundamentos teóricos, las secciones correspondientes a secado constante, primer periodo de tasa decreciente y el segundo hasta el punto de CHE, no son tan claros como en el caso ideal; para el deshidratador, las primeras pruebas, las mediciones iniciales no muestran similitud con una velocidad constante, más bien es oscilatoria entre valores que decrecen ampliamente para luego tener un decremento pequeño (similar a una constante); en el caso de la última prueba los valores oscilan en menor medida y es

más sencillo vislumbrar un comportamiento similar a una constante; posterior a ello se observa un decremento más pronunciado, sin embargo las dos zonas de decremento no están bien definidas, esto puede deberse también a la cantidad de datos con los que se cuentan. Considerando esto, en el periodo entre los 120 y 180 minutos (min) la velocidad se denota lineal por ser dos puntos pero luego, el resto de los puntos aparentan construir el segundo decremento.

En cuanto a las velocidades de secado a cielo abierto, las gráficas de las primeras pruebas presentan una amplia oscilación, la tercera prueba es similar al del deshidratador en cuanto a las zonas. Una última observación sobre esta gráfica sería que su velocidad inicialmente es superior a la del deshidratador, pero a partir de los 100 min decrece de manera pronunciada, mientras en el secador decrece en menor medida. Esto por el estado de secado de las muestras, a cielo abierto alcanzan el secado en menores tiempos por lo que en cierto punto la extracción de humedad se vuelve más difícil; aun así, el deshidratador con una mayor carga mantiene una velocidad superior.

En la gráfica izquierda de la Ilustración 17 (respecto al contenido de humedad), al inicio las pruebas son muy distintas en el deshidratador; en la primera, la velocidad se mantiene casi constante los primeros 20 min; en la segunda, el decremento es de inmediato oscilando los primeros 80 min; y en la tercera, los primeros 100 min mantiene una velocidad con pocas oscilaciones. La segunda zona podría ser, en la primera prueba, el periodo de los 20 a 100 min con un decremento pronunciado hasta parecer constante; en la segunda los 80 min de oscilación vislumbran dos decrementos de 40 min, por lo que podría establecerse la segunda zona de los 40 a los 80 min; en la tercera prueba un pequeño decremento se observa de los minutos 100 a 120 min. El resto de tiempo correspondería a la tercera zona. En términos de la cantidad de humedad, en un intento por vislumbrar dichas zonas, en un contenido de humedad de 6 a 4.5 se podría ver un primer comportamiento de velocidad, de 4.5 a 2.5 aproximadamente se identificaría la segunda zona y debajo de 2.5 procedería la tercera zona.

Para el secado a cielo abierto, a pesar del comportamiento de la velocidad, el contenido de agua entre 6 y 2.8 podría identificarse como la primera zona con las velocidades de secado menos oscilatorias, de 2.8 a 1.5 como una segunda zona con un decremento de velocidad superior y el resto hasta el 0 comprenderían el segundo decremento de velocidad.

4.2. EFICIENCIA DEL DESHIDRATADOR SOLAR TIPO GABINETE

La eficiencia del colector, del secador y de secado por prueba y en general se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Eficiencia de colector, secador y de secado para cada prueba y promedio

<i>Eficiencia (%)</i>	<i>Prueba 1</i>	<i>Prueba 2</i>	<i>Prueba 3</i>	<i>Promedio</i>
<i>Colector Promedio</i>	37.4 ± 12.5	36.8 ± 13.8	32.8 ± 9.2	35.7 ± 11.9
<i>Colector Máx/Mín</i>	65.8 / 19.4	58.4 / 16.4	47.4 / 18.2	65.8 / 16.4
<i>Secador General</i>	5.76	5.73	5.77	5.7 ± 0.02
<i>Secador Rango</i>	0.07 – 24	0.06 – 26.3	0.06 – 15.7	NA
<i>Secado General</i>	11.16	11.18	11.79	11.4 ± 0.36
<i>Secado Rango</i>	-0.24 – 38.3	-0.18 – 44	-0.02 – 35.7	NA
<i>Cielo Abierto Ec.36 -General</i>	8.00	6.67	7.00	7.2 ± 0.69
<i>Cielo Abierto Ec.36-Rango</i>	0.01 – 52.7	0.04 – 28.9	0.06 – 25.88	NA
<i>Cielo Abierto Ec.38-General</i>	8.24	6.8	7.2	7.4 ± 0.74
<i>Cielo Abierto Ec.38-Rango</i>	0.1 – 52.9	-0.05 – 29.4	0.15 – 27.3	NA

Fuente: Elaboración propia

De esta tabla se observan eficiencias superiores para el secado a cielo abierto respecto al secador, con valores de 7.2% y 5.7% respectivamente, no obstante, al considerar la eficiencia general de secado el deshidratador solar tiene una eficiencia superior de 11.4% (± 0.36%) respecto a una eficiencia a cielo abierto de 7.4% (± 0.74%). De los rangos de eficiencia de secado, tanto para el deshidratador como a

cielo abierto, se obtienen valores negativos debido a que, en la última medición, la temperatura resulta ligeramente inferior respecto a la medición anterior.

En esta sección cabe mencionar que, para la eficiencia del colector, la densidad promedio considerada fue de $0.995 \frac{kg}{m^3} (\pm 0.009 \frac{kg}{m^3})$, con una velocidad de aire promedio de $0.66 \frac{m}{s} (\pm 0.23 \frac{m}{s})$ y un calor específico de $1,067.16 \frac{J}{kgK} (\pm 12.83 \frac{J}{kgK})$; en el cálculo de la eficiencia del secador, el calor latente promedio en el secador solar fue de $2,406.41 \frac{kJ}{kg} (\pm 12.45 \frac{kJ}{kg})$ y de $2,411.82 \frac{kJ}{kg} (\pm 50.90 \frac{kJ}{kg})$ a cielo abierto; finalmente, para la eficiencia general de secado, el calor específico de la pera considerado fue de $3,810 \frac{J}{kgK}$ y una transmisividad de 0.84 para el policarbonato [31].

4.3. AJUSTE DE MODELOS ANALÍTICOS

De manera general, el modelo de mejor ajuste tanto a cielo abierto como en el deshidratador es el de Midilli- Kuçuk, esto acorde a los resultados del análisis estadístico. Cabe destacar que todos los modelos presentaron un coeficiente de determinación mayor a 0.9 (bastante cercanos a 1), χ^2 menores a 0.004 y RMSE inferiores a 0.06 (muy cercanos a 0); aun así es posible determinar un modelo particular dado su mejor ajuste con respecto a los demás. Los coeficientes para cada modelo analítico y los resultados de cada criterio del análisis estadístico para la pera deshidratada en el deshidratador solar tipo gabinete y a cielo abierto se muestran en la Tabla 6. Asimismo, las gráficas de dichos modelos con los datos experimentales se aprecian en la Ilustración 18.

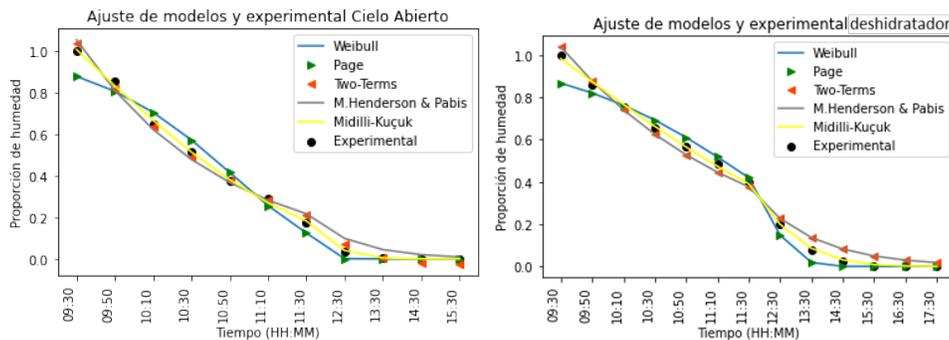


Ilustración 18. Gráficas de los modelos analíticos con los datos experimentales

En ambos casos, es de fácil observación notar la semejanza del modelo Midilli-Kuçük con los datos experimentales, esto respecto al resto de los modelos que denotan mayores diferencias visuales.

Tabla 6. Coeficientes de modelos analíticos y su análisis estadístico para el Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo Abierto

Modelo	Coeficientes y Parámetros de ajuste	Método de Secado	
		DR General	Cielo Abierto
Weibull	α	9.48	14.44
	β	0.48	0.45
	r^2	0.980	0.976
	χ^2	0.003	0.004
	RMSE	0.048	0.055
	k	927.29	8.60×10^4
Page	n	9.48	14.44
	r^2	0.980	0.976
	χ^2	0.003	0.004
	RMSE	0.048	0.055
	a	64.45	-6,242.42
Two-terms	b	64.45	6,544.47
	k_1	12.18	11.29
	k_2	12.18	11.37
	r^2	0.988	0.994
	χ^2	0.001	0.001
	RMSE	0.036	0.026
Modified Henderson & Pabis	a	41.35	637.39
	b	41.35	637.40
	c	46.23	637.17
	k	12.18	18.96
	g	12.18	18.96
	h	12.18	18.96
	r^2	0.988	0.988
	χ^2	0.002	0.003
	RMSE	0.036	0.038
	n_1	2.30	2.51
	n_2	3.83	5.50
Midilli-Kuçük	k	2.95×10^1	1.50×10^1
	C	-6.31×10^{-3}	-1.08×10^{-3}
	r^2	0.999	0.998
	χ^2	9.167×10^{-5}	0.0002
	RMSE	0.007	0.0115

Fuente: Elaboración propia

La gráfica comparativa del modelo analítico de Midilli-Kuçük con los datos experimentales en el deshidratador solar y a cielo abierto se observan en la Ilustración 19.

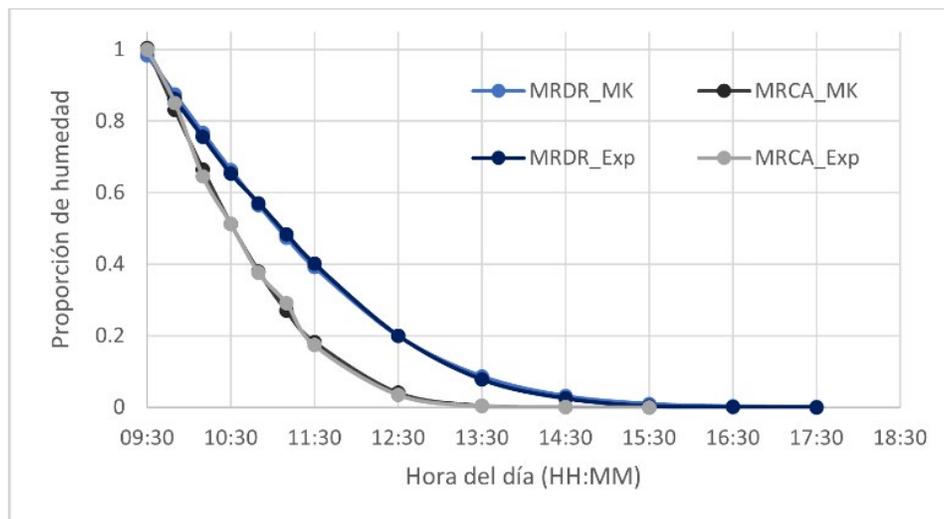


Ilustración 19. Gráfica del modelo Midilli-Kuçük en el deshidratador solar tipo gabinete y a cielo abierto

Así entonces, las ecuaciones (43) y (44) muestran el modelo Midilli- Kuçuk ajustado a los datos experimentales tanto en el deshidratador solar tipo gabinete como a cielo abierto, respectivamente. En estas, el tiempo t corresponde a los minutos transcurridos de acuerdo con la hora local dividido entre el total de minutos en un día.

$$MR = 2.3 \exp(29.52t^{3.83}) - 6.31 \times 10^{-3}t \quad (43)$$

$$MR = 2.51 \exp(15t^{5.5}) - 1.08 \times 10^{-3}t \quad (44)$$

Dadas las diferencias entre los tiempos y forma de secado para cada nivel dentro del deshidratador solar tipo gabinete, se optó por el ajuste de modelos a cada nivel y posteriormente de forma general para cada prueba, de esta manera los coeficientes de ajuste por modelo y sus resultados del análisis estadístico, así como las gráficas de los modelos ajustados con los datos experimentales por prueba, se observan en las tablas 10 a 12 e ilustraciones 21 a 23, disponibles en ANEXO 1. En éstas se demuestra que efectivamente, el modelo de Midilli-Kuçuk es el de mejor ajuste para todos los niveles y pruebas. Las gráficas con el modelo de mejor ajuste en los distintos niveles del deshidratador solar con los datos experimentales y la comparación del modelo general ajustado en el deshidratador y a cielo abierto para cada prueba, se visualizan en las ilustraciones 24 a 26 en la sección de ANEXO 1.

4.4. TIEMPO DE SECADO

Tal y como se menciona en la metodología, se tomaron mediciones de peso cada cierto periodo hasta que las últimas 3 mediciones (peso con malla) de las muestras no presentaran una diferencia superior al 1% entre ellas. Así, todas las mallas consiguieron un secado dentro del deshidratador solar tipo gabinete en un máximo de 8 h; no obstante, los diferentes niveles consiguieron un secado aceptable en diferentes tiempos, así la Tabla 7 muestra los tiempos de secado por prueba y por nivel. Por su parte, el secado a Cielo Abierto mostró tiempos de secado de 5 a 6 h.

Tabla 7. Tiempos de secado en el deshidratador solar tipo gabinete por nivel y a cielo abierto

	<i>TIEMPOS DE SECADO (h)</i>					
<i>Nivel</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>CA</i>
<i>Prueba 1</i>	8	8	8	7	6	5
<i>Prueba 2</i>	8	8	8	7	6	6
<i>Prueba 3</i>	8	8	8	8	7	6
<i>PROMEDIO</i>	8	8	8	7.3 ±0.57	6.3 ±0.57	5.6 ±0.57

Fuente: Elaboración propia

No obstante, acorde a las mediciones experimentales de contenido de humedad y pesos finales, así como lo observable en las cinéticas de secado, el producto deshidratado presentó niveles de humedad por debajo del 10% algunas horas antes. En la Tabla 8 es posible ver las horas cuando se alcanza una humedad en base húmeda menor al 10%.

Tabla 8. Tiempos de secado cuando las muestras alcanzan valores inferiores al 10% de humedad en base húmeda

	<i>TIEMPOS DE SECADO ALCANZANDO %HUMEDAD ≤ 10% (h)</i>					
<i>Nivel</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>CA</i>
<i>Prueba 1</i>	6	6	6	5	4	3
<i>Prueba 2</i>	6	6	6	5	4	4
<i>Prueba 3</i>	7	7	7	6	5	5
<i>PROMEDIO</i>	6.3 ±0.57	6.3 ±0.57	6.3 ±0.57	5.3 ±0.47	4.3 ±0.47	4 ±0.81

Fuente: Elaboración propia

La humedad promedio dentro del deshidratador de las muestras en estos intervalos de tiempo es de 6.97% ($\pm 1.06\%$), mientras, las muestras del secado a cielo abierto serían de 7.88% ($\pm 0.69\%$).

4.5. CAMBIO DE COLORACIÓN

Para cada una de las pruebas, los valores de color del producto fresco (MF) en promedio y las diferencias a cielo abierto (CA) y en el deshidratador solar (DR) se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Diferencias de color en las pruebas

	Prueba 1					Prueba 2					Prueba 3			
	MF		CA	DR		MF		CA	DR		MF		CA	DR
L	70.68	ΔL	4.9	4.8	L	68.25	ΔL	8.51	5.19	L	69.9	ΔL	10.44	6.35
a	1.39	Δa	3.12	4.02	a	4.17	Δa	-1.74	3.8	a	1.38	Δa	2.7	4.6
b	14.56	Δb	-0.25	2.33	b	19.81	Δb	-8.87	0.8	b	12.74	Δb	1.39	3.17
C	14.64	ΔC	0.37	3.11	C	20.26	ΔC	-9.05	1.84	C	12.81	ΔC	1.89	4.18
H	84.82	ΔH	-3.11	-3.45	H	78.45	ΔH	-0.16	-3.41	H	83.83	ΔH	-2.37	-3.71
		ΔE	5.81	6.68			ΔE	12.41	6.48			ΔE	10.87	8.46

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la luminosidad (L), ambas muestras denotan un aumento ligero, con valores positivos que indican muestras más claras, con diferencias superiores a cielo abierto respecto al deshidratador. El valor a^* , presenta una diferencia superior en el deshidratador; en ambos casos, con valores positivos, tiende al rojo (excepto en la Prueba 2, que a cielo abierto se inclina hacia el color verde acorde a su valor negativo). Por su parte, el valor b^* , a cielo abierto tiende al azul en dos de los casos con sus valores negativos y hacia el amarillo en el secador solar (valores positivos en todos los casos). En cuanto a la croma (C), a cielo abierto indica una mayor saturación en dos de los casos, mientras en el deshidratador apunta a mayor saturación en todos los casos. Mientras, en el tono (H), las diferencias en general son pequeñas, pero ligeramente superiores en el deshidratador; las cuales, así como a cielo abierto, se muestran en dirección a las manecillas del reloj (negativos), es decir, hacia tonalidades rojizas.

Así, la diferencia de coloración global (ΔE) en promedio, entre la muestra fresca y las muestras deshidratadas, para cielo abierto fue de 9.7 (± 2.8) y de 7.2 (± 0.9) para el deshidratador solar. De esta forma, los alimentos dentro del deshidratador conservan mejor el color respecto a cielo abierto, esto sobre todo por la gran diferencia en la luminosidad en las muestras a cielo abierto.

Capítulo 5 . CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de las pruebas la humedad inicial promedio de la pera fue de 84.50% ($\pm 0.44\%$), con actividad de agua de 0.979 en promedio (± 0.009). La humedad final promedio, medida de forma experimental, de las muestras deshidratadas en el deshidratador fue de 5.85% ($\pm 0.95\%$) con actividad de agua de 0.316 (± 0.028), y a cielo abierto de 6.45% (± 0.42) con actividad de agua 0.331 (± 0.024). Acorde a los resultados teóricos los valores son semejantes. Así ambos procesos mostraron niveles de humedad óptimos para evitar la proliferación de microorganismo, es decir, niveles de humedad menores al 10% y actividad de agua inferior a 0.6. En comparativa, las muestras dentro del secador solar presentaron en promedio valores inferiores de humedad y de actividad de agua. Sobre este punto cabe mencionar que las muestras de secado a cielo abierto estuvieron expuestas directamente al polvo y a algunos insectos, entre los cuales algunas moscas, lo que disminuye la calidad del producto.

De las cinéticas de secado, la velocidad de secado en el deshidratador es menor que a cielo abierto, esto debido a una mayor carga, destacando que el nivel 5 mantuvo un comportamiento similar al proceso a cielo abierto (el cual pudo beneficiarse un poco de estar sobre la mesa metálica blanca), el resto de los niveles con velocidades inferiores. Considerando los tiempos de secado, todas las muestras se secaron en un tiempo igual o menor a 8 h, sobre esto resulta relevante mencionar que los productos presentaron una humedad óptima entre las 4 y 7 h en el deshidratador, y de 3 a 5 h a cielo abierto. En la misma línea, se resalta el hecho de que el aumento de temperatura dentro del deshidratador continuó incluso después de alcanzar el medio día solar y su disminución fue poco pronunciada y siempre superior a la temperatura ambiente, por lo que el secado a cielo abierto muestra la desventaja de requerir una mayor área si se desea aumentar la producción de alimento seco, ya que difícilmente podría deshidratarse un segundo lote pasado el mediodía solar. Mientras, el deshidratador aprovecha la energía para continuar el proceso de secado.

Otro aspecto de importancia es el observable en la Ilustración 20 en el ANEXO 1, la humedad aumenta y existen disminuciones de temperatura dentro del deshidratador

debido a la apertura para medición de peso, por lo que el secado continuo podría arrojar mejores resultados. Aunado a ello, existe la posibilidad de incrementar la carga en el secador, lo que incrementaría su eficiencia.

El modelo de mejor ajuste a ambos procesos fue el de Midilli- Kuçuk, con coeficientes $R^2 = 0.999$, $\chi^2 = 0.0001$ y $RMSE = 0.007$ para el secado en el deshidratador solar y $R^2 = 0.998$, $\chi^2 = 0.0002$ y $RMSE = 0.011$ para el secado a cielo abierto. Las ecuaciones resultantes fueron la (43) y (44).

Acerca de la eficiencia de los procesos, el secado en general dentro del deshidratador mostró una eficiencia de $11.4\% \pm 0.36\%$, superior al $7.4\% \pm 0.74\%$ presentado en las pruebas a cielo abierto. Así, el secador solar obtuvo una eficiencia de secado general en el rango esperado, que acorde con López [31] para convección natural está entre el 10 y 15 %; sobre este mismo trabajo, destaca el diseño de un deshidratador pasivo indirecto acoplado a un colector solar de 1 m^2 con placa absorbente corrugada para secado de pera, el cual obtuvo una eficiencia de 11.11%. Respecto al secado a cielo abierto, el proceso dentro del deshidratador demostró ventaja. En otro punto, dentro del deshidratador solar se observa una mejor conservación del color.

En cuanto a la rotación de mallas realizada, se observa que resulta altamente beneficioso para conseguir el secado de todo el producto introducido, por lo que convendría ahondar en este aspecto para aprovechar la mayor cantidad de energía dentro del deshidratador, e incluso reducir los tiempos de secado.

Capítulo 6 . REFERENCIAS

- [1] J. Morton, “Memoria: Almacenamiento rural y desperdicio de alimentos en México”, México, 2019. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD005726.pdf>
- [2] O. Prakash and A. Kumar, *Solar Drying Technology: Concept, Desing, Testing, Modeling, Economics, and Enviroment*. Singapore: Green Energy and Technology, 2017. doi: 10.1007/978-981-10-3833-4.
- [3] F. M. I. de los Santos García, J. F. Lugo Saldaña, and E. Y. Sueños Gomora, “Deshidratación solar: la forma de conservar tus alimentos sin contaminar”, *Universitarios Potosinos*, San Luis Potosí, Jun. 2020. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <http://www.uaslp.mx/Comunicacion-Social/Documents/Divulgacion/Revista/Diecisiete/248/248-03.pdf>
- [4] J. Mendoza, R. Insuasti, O. Barrera, and M. Navarro, “Diseño y Simulación de un Deshidratador Mixto Indirecto de Frutas/Design and simulation of an Indirect Mixed Fruit Dehydrator”, *KnE Engineering*, pp. 107–124, Jan. 2020, doi: 10.18502/KEG.V5I2.6227.
- [5] S. R. Valdivia Espinoza and K. C. Alaníz Alaníz, “Evaluación de un deshidratador solar térmico de frutas y legumbres en la ciudad de Estelí en el año 2020”, Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Managua, 2021. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.unan.edu.ni/15496/1/20263.pdf>
- [6] E. Sámano Delgado, “Optimización de un deshidratador solar como tecnología para la deshidratación de frutas y hortalizas”, Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 2011. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/1984/FQFB-M-2011-0013.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [7] M. A. Guillén Álvarez, “Diseño, construcción y evaluación de un deshidratador solar para tomate”, Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, 2019. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.uvg.edu.gt/bitstream/handle/123456789/3449/tesis%20Guillen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] J. N. Marín Maceda, “Diseño de un deshidratador solar para secado de cabeza de Langostino al 10% de humedad”, Maestría, Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes, 2020. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2217/TESIS%20-%20MARIN%20MACEDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] M. Das and E. K. Akpınar, “Investigation of pear drying performance by different methods and regression of convective heat transfer coefficient with support vector machine”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 2, pp. 1–16, Jan. 2018, doi: 10.3390/app8020215.
- [10] A. Altaf *et al.*, “Study of the drying behavior of solar dryer and proximate analysis of the dried pear (*Pyrus communis*) and peach (*prunus persica*)”, *Pak J Agric Sci*, vol. 57, no. 5, pp. 1413–1420, Sep. 2020, doi: 10.21162/PAKJAS/20.821.
- [11] S. Tenorio Reyes, J. D. Robles Ramírez, E. U. Carrera Arellano, J. M. García González, and J. Carranza Concha, “Dehydration of pear in the form of slice in a direct solar dryer”, *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, vol. 3, pp. 1–10, 2019, doi: 10.19136/Jeeos.a3n1.3265.
- [12] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “La pera que te espera”, *Gobierno de México*, Sep. 26, 2020. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-pera-que-te-espera> (accessed Dec. 19, 2022).
- [13] L. Jutglar, *Energía solar*. Barcelona: Ediciones Ceac, 2004. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=i0qPPTGMRUYC&printsec=frontcov>

er&dq=energia+solar&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=energia%20solar&f=false

- [14] P. O. Delgado *et al.*, “Deshidratación solar de alimentos”, Chile, Feb. 2020. Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available: https://www.inapi.cl/docs/default-source/default-document-library/informe_dp-104.pdf?sfvrsn=88293bd9_0
- [15] J. Peinado, R. Vidal, and J. Gándara, “Deshidratación de alimentos utilizando energía solar térmica”, *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, vol. 10, pp. 99–107, 2013, Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7070085>
- [16] A. de Michelis and E. Ohaco, *Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala*, vol. 84. Argentina: INTA, 2015. Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_cartilla_secado.pdf
- [17] F. Boucher, *Tecnología Alimentaria Y Agroindustria Rural*. Bogotá: Celater, 1991. Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=R70Jy8mPtPUC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q=secado&f=false>
- [18] J. García, Y. Hernández, R. Conejo, I. Pilatowski, and V. García, “Deshidratación del chile guajillo (*Capsicum annuum*) utilizando el secado solar tradicional en planta, a cielo abierto, microtúnel y convencional.”, *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, vol. 4, p. 378, 2019, Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/3/51.pdf>
- [19] J. R. Dávila Nava, “Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire”, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, 2004. Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/capitulo4.pdf

- [20] E. Martines and L. Lira, “Análisis y Aplicación de las Expresiones del Contenido de Humedad en Sólidos”, *Simposio de Metrología*, p. 2, Oct. 2010, Accessed: May 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>
- [21] Z. Erbay and F. Icier, “A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results”, *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 50, no. 5, pp. 441–464, May 2010, doi: 10.1080/10408390802437063.
- [22] W. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Volumen I*. Barcelona: Editorial Reverté, 2020. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=38n7DwAAQBAJ&pg=PA107&dq=segunda+ley+de+fick+de+la+difusi%C3%B3n&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiLjJ6TxYb8AhVLMEQIHdG3BtgQ6AF6BAgJEA#v=onepage&q=segunda%20ley%20de%20fick%20de%20la%20difusi%C3%B3n&f=false>
- [23] O. Corzo, N. Bracho, and J. Rodríguez, “Predicción de los contenidos de agua y sal durante el salado de bagre usando diferentes mezclas salinas”, *Ciencias Básicas y Tecnología*, vol. 26, pp. 305–312, May 2014.
- [24] E. Purcell, S. Rigdon, and D. Varberg, *Cálculo*. Naucalpan: Pearson Educación, 2007. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=9arm2pJLSCIC&pg=PA350&dq=ley+de+enfriamiento+de+newton&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjkiPOvyYb8AhUSKEQIHQUxCmcQ6AF6BAgJEA#v=onepage&q=ley%20de%20enfriamiento%20de%20newton&f=false>
- [25] K. Mathias Rettig and K. Ah Hen, “El color en los alimentos un criterio de calidad medible”, *Agro Sur*, vol. 42, no. 2, pp. 57–66, Nov. 2014, doi: 10.4206/agrosur.2014.v42n2-07.

- [26] S. Suzanne, *Food Analysis*, Springer. Indiana: Department of Food Science, 2017.
- [27] P. Talens Oliag, “Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB”, España, Sep. 2019. Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83392/Talens%20-%20Evaluaci%C3%B3n%20del%20color%20y%20tolerancia%20de%20color%20en%20alimentos%20a%20trav%C3%A9s%20del%20espacio%20CIELAB.pdf?sequence=1>
- [28] U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, “FoodData Central - Pears, raw”, *Agricultural Research Service*, Jan. 04, 2019. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169118/nutrients> (accessed Dec. 19, 2022).
- [29] FAO, “FAOSTAT”, *FAO*, Nov. 15, 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed Dec. 26, 2022).
- [30] Representación AGRICULTURA Puebla, “Puebla, 1° Lugar en producción de pera a nivel nacional”, *Gobierno de México*, Aug. 06, 2018. <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-1-lugar-en-produccion-de-pera-a-nivel-nacional> (accessed Dec. 19, 2022).
- [31] E. C. López Vidaña, A. L. César Munguía, O. García Valladares, I. Pilatowsky Figueroa, and R. Brito Orosco, “Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*)”, *Renew Energy*, vol. 147, pp. 845–855, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.09.018.

ANEXO 1

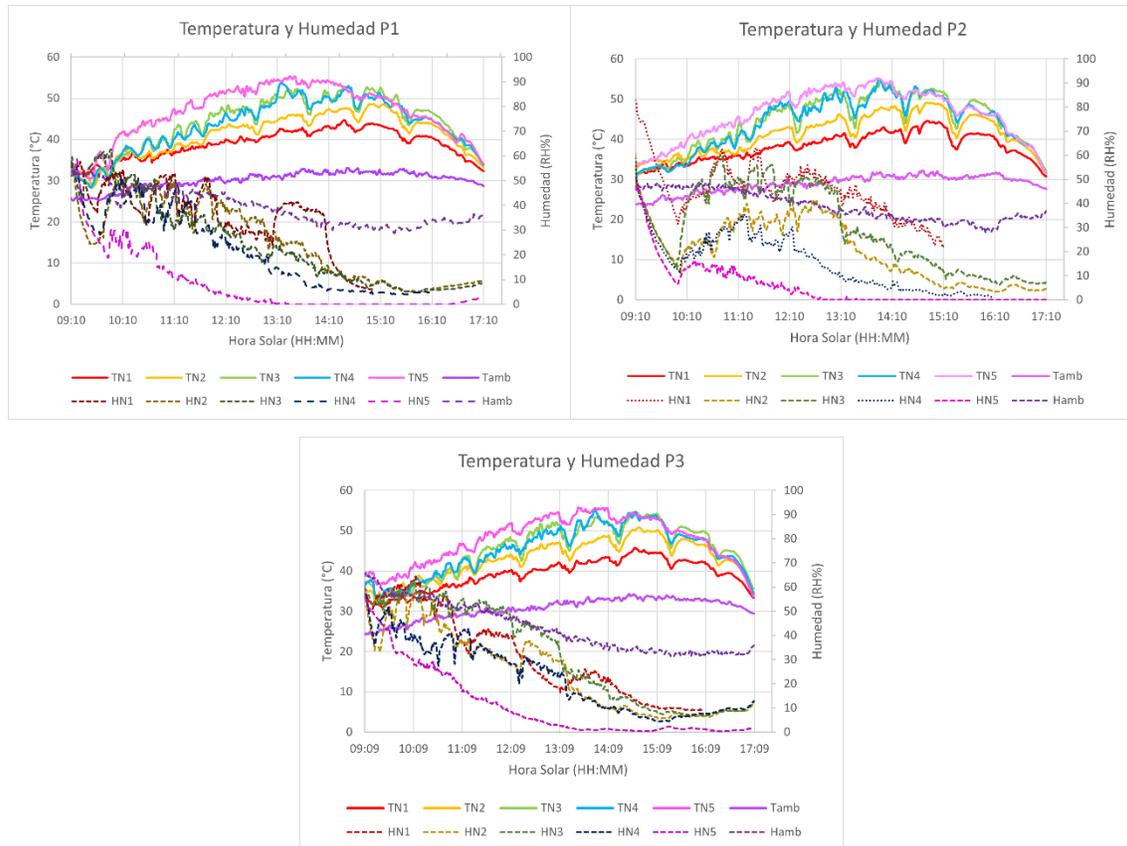


Ilustración 20. Temperatura y humedad, en el deshidratador y ambiente, por nivel en cada prueba

Una observación más detallada de la humedad y temperatura por nivel (Ilustración 20) muestra que dentro del deshidratador solar tipo gabinete destacan temperaturas superiores conforme aumenta el nivel, un resultado esperable dado que el nivel 5 es el que recibe la energía de forma más directa; los niveles 3 y 4 presentan temperaturas similares; en cuanto a la humedad, los 4 niveles inferiores presentan un comportamiento similar, asimismo se observa una alteración significativa debido a la apertura al momento de tomar las mediciones de peso, mientras el nivel 5 denota una afectación menor.

Tabla 10. Coeficientes de Modelos Analíticos dentro del Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo Abierto (Prueba 1)

Modelo	Coeficientes y Parámetros de ajuste	Método de Secado						
		Deshidratador solar tipo gabinete						Cielo Abierto
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	General	
Weibull	α	9.04	9.01	10.12	11.28	14.61	10.29	17.99
	β	0.49	0.49	0.48	0.47	0.44	0.47	0.44
	r^2	0.982	0.981	0.986	0.981	0.963	0.977	0.960
	χ^2	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.003	0.007
	RMSE	0.049	0.050	0.042	0.049	0.065	0.052	0.074
Page	k	573.08	590.97	1,503.81	4,809.45	1.33×10^5	2,072.46	2.24×10^6
	n	9.03	9.01	10.12	11.28	14.61	10.29	17.99
	r^2	0.982	0.981	0.986	0.981	0.963	0.977	0.960
	χ^2	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.003	0.007
	RMSE	0.049	0.050	0.042	0.049	0.065	0.052	0.074
Two-terms	a	45.73	50.78	68.86	154.36	-2.56×10^4	111.46	-2.56×10^4
	b	45.74	50.79	68.87	154.36	2.69×10^4	111.46	2.70×10^4
	k_1	11.27	11.56	12.31	14.39	14.96	13.58	14.60
	k_2	11.27	11.56	12.31	14.39	15.06	13.58	14.70
	r^2	0.985	0.985	0.983	0.986	0.998	0.992	0.979
	χ^2	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0002	0.001	0.005
	RMSE	0.044	0.044	0.046	0.041	0.012	0.03	0.054
	a	28.91	32.24	44.44	109.94	3,077.44	72.63	7,753.86
Modified Henderson & Pabis	b	28.91	32.24	44.44	109.94	3,077.48	72.63	7,757.10
	c	33.68	37.08	48.93	89.17	3,059.45	77.79	7,729.38
	k	11.28	11.56	12.31	14.39	23.01	13.58	25.22
	g	11.28	11.56	12.31	14.39	23.01	13.58	25.22
	h	11.28	11.56	12.31	14.39	23.01	13.58	25.22
	r^2	0.985	0.985	0.983	0.986	0.996	0.992	0.971
	χ^2	0.004	0.003	0.004	0.004	0.001	0.002	0.011
	RMSE	0.044	0.044	0.046	0.041	0.020	0.03	0.063
Midilli-Kuçuk	n_1	1.964	2.069	1.739	2.174	8.733	3.077	2.178
	n_2	4.0907	3.966	4.988	4.673	3.455	3.474	7.989
	k	30.234	29.159	57.951	60.217	53.328	28.363	1.239×10^{-3}
	C	-7.92×10^{-3}	-9.87×10^{-3}	-3.35×10^{-3}	-6.72×10^{-3}	-6.313×10^{-3}	-6.337×10^{-3}	-4.375×10^{-3}
	r^2	0.999	0.998	0.999	0.998	0.999	0.999	0.987
	χ^2	9.73×10^{-5}	0.0003	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.003
RMSE	0.008	0.014	0.0107	0.013	0.008	0.009	0.041	

Fuente: Elaboración propia

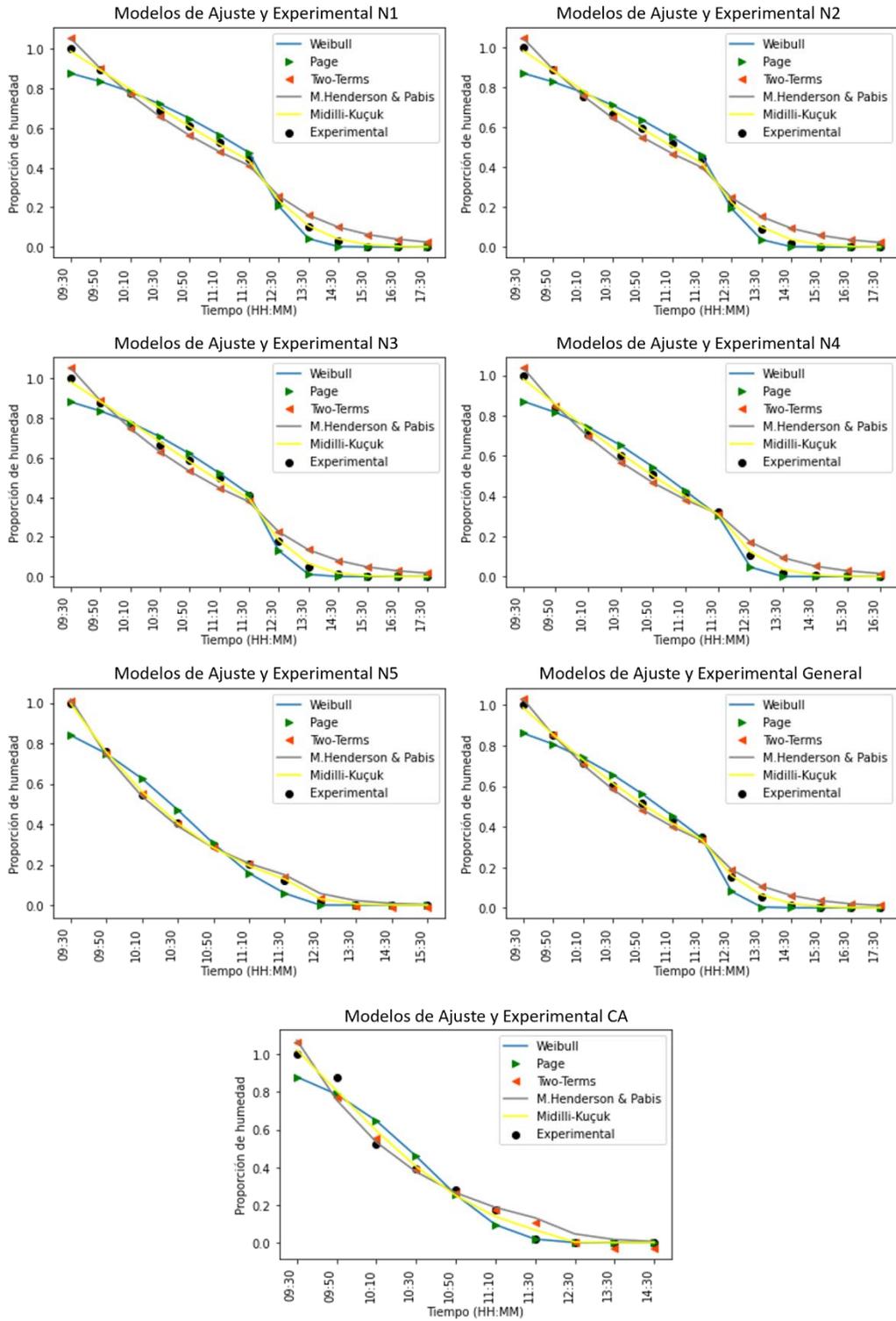


Ilustración 21. Gráficas de los modelos analíticos con los datos experimentales (Prueba 1)

Tabla 11. Coeficientes de Modelos Analíticos dentro del Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo Abierto (Prueba 2)

Modelo	Coeficientes y Parámetros de ajuste	Método de Secado						
		Deshidratador solar tipo gabinete						Cielo Abierto
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	General	
Weibull	α	7.52	8.00	8.91	9.92	13.55	9.05	13.38
	β	0.50	0.50	0.49	0.48	0.45	0.48	0.46
	r^2	0.975	0.979	0.984	0.985	0.971	0.976	0.969
	χ^2	0.003	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.005
	RMSE	0.053	0.048	0.045	0.041	0.055	0.052	0.061
Page	k	182.04	260.42	544.29	1,281.06	4.65x10 ⁴	712.15	3.50 x10 ⁴
	n	7.52	8.01	8.9	9.92	13.55	9.06	13.38
	r^2	0.975	0.979	0.984	0.985	0.971	0.976	0.969
	χ^2	0.003	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.005
	RMSE	0.053	0.048	0.045	0.041	0.055	0.052	0.061
Two-terms	a	-526.23	38.06	48.10	66.88	-9,373.16	70.24	-4,399.27
	b	547.58	38.06	48.10	66.88	9,804.11	70.24	4,633.26
	k_1	5.52	10.88	11.44	12.25	12.28	12.44	10.75
	k_2	5.58	10.88	11.44	12.25	12.36	12.44	10.84
	r^2	0.996	0.985	0.981	0.976	0.997	0.990	0.993
	χ^2	0.0005	0.002	0.003	0.004	0.0003	0.001	0.001
	RMSE	0.019	0.042	0.049	0.053	0.016	0.033	0.028
	a	23.00	22.91	30.47	44.54	2,605.10	45.14	1,351.39
Modified Henderson & Pabis	b	23.00	22.91	30.47	44.54	38.98	45.14	39.98
	c	24.24	30.33	35.27	44.80	51.56	50.23	51.56
	k	10.71	10.88	11.44	12.26	19.82	12.44	18.11
	g	10.71	10.88	11.44	12.26	87.15	12.44	87.15
	h	10.71	10.88	11.44	12.26	89.40	12.44	89.41
	r^2	0.988	0.985	0.981	0.976	0.993	0.990	0.988
	χ^2	0.002	0.003	0.004	0.005	0.001	0.002	0.003
	RMSE	0.036	0.042	0.049	0.053	0.026	0.033	0.038
Midilli-Kuçuk	n_1	3.221	2.253	1.792	1.617	4.712	2.993	3.189
	n_2	2.605	3.410	4.414	5.279	3.881	3.209	4.463
	k	13.306	19.745	36.581	67.522	56.905	21.861	72.487
	C	-0.034	-0.020	-9.37x10 ⁻³	-1.05x10 ⁻²	-8.35x10 ⁻³	-1.253x10 ⁻²	-6.56x10 ⁻³
	r^2	0.996	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998	0.996
	χ^2	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004	0.0001	0.0002	0.0007
RMSE	0.018	0.018	0.017	0.016	0.0108	0.014	0.021	

Fuente: Elaboración propia

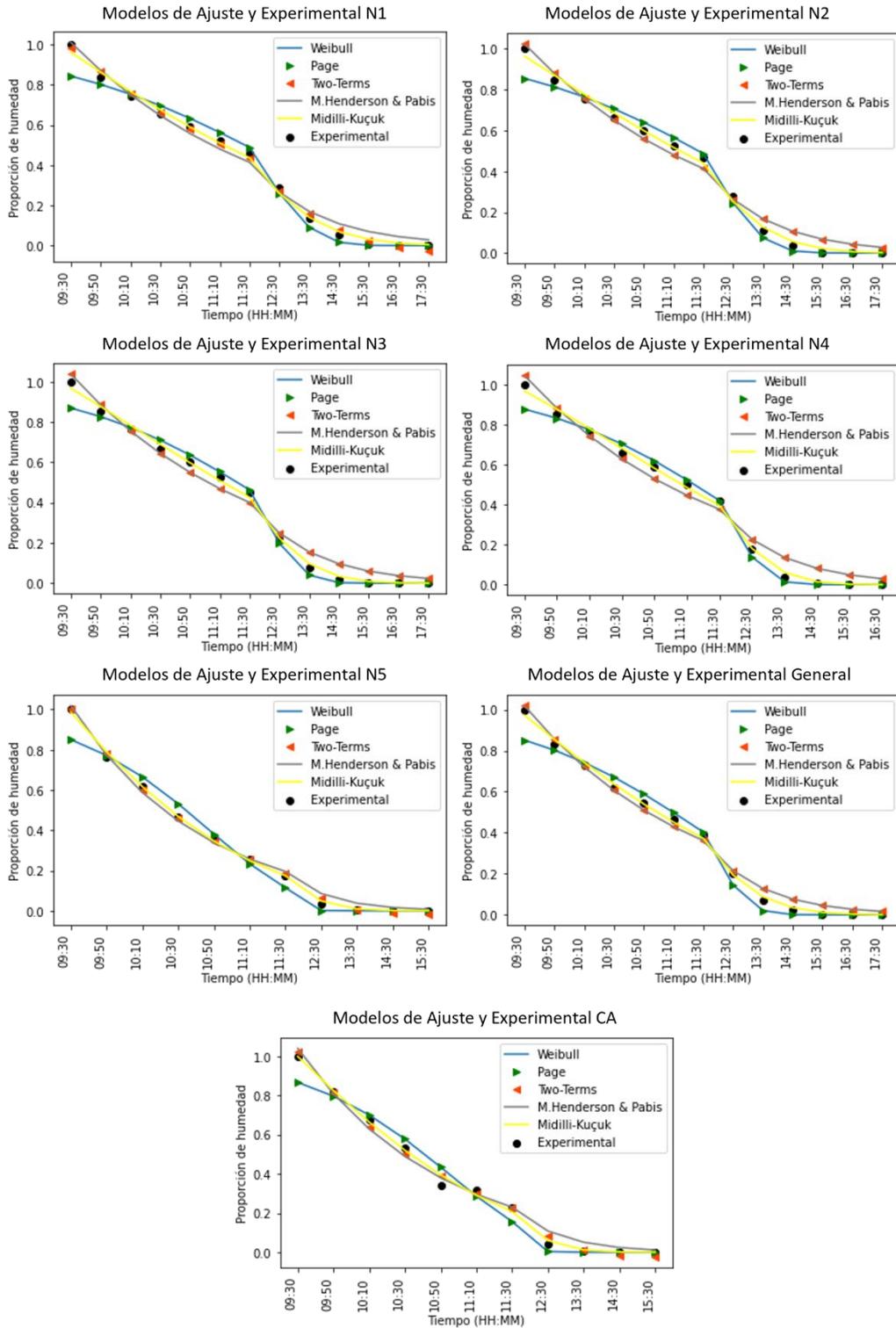


Ilustración 22. Gráficas de los modelos analíticos con los datos experimentales (Prueba 2)

Tabla 12. Coeficientes de Modelos Analíticos dentro del Deshidratador solar tipo gabinete y a Cielo Abierto (Prueba 3)

Modelo	Coeficientes y Parámetros de ajuste	Método de Secado						
		Deshidratador solar tipo gabinete						Cielo Abierto
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	General	
Weibull	α	8.32	8.84	9.32	10.26	13.69	9.47	13.34
	β	0.52	0.51	0.50	0.49	0.46	0.50	0.46
	r^2	0.988	0.987	0.989	0.990	0.987	0.985	0.987
	χ^2	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
	RMSE	0.039	0.041	0.037	0.037	0.041	0.043	0.041
Page	k	217.58	361.67	598.24	1,354.66	3.66x10 ⁴	727.17	2.58 x10 ⁴
	n	8.32	8.84	9.32	10.26	13.69	9.47	13.33
	r^2	0.988	0.987	0.989	0.990	0.987	0.985	0.987
	χ^2	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
	RMSE	0.039	0.041	0.037	0.037	0.041	0.043	0.041
Two-terms	a	19.97	25.72	34.10	46.19	293.37	40.06	-2,068.86
	b	19.97	25.72	34.10	46.19	293.37	40.07	2,146.10
	k_1	9.09	9.73	10.47	11.23	15.96	10.89	8.01
	k_2	9.09	9.73	10.47	11.23	15.96	10.89	8.08
	r^2	0.969	0.973	0.973	0.971	0.982	0.979	0.990
Modified Henderson & Pabis	χ^2	0.006	0.005	0.005	0.006	0.003	0.004	0.002
	RMSE	0.064	0.060	0.059	0.065	0.048	0.051	0.036
	a	11.88	15.70	21.28	29.34	194.45	25.20	153.51
	b	11.88	15.70	21.28	29.34	194.45	25.20	153.50
	c	16.20	20.04	25.66	33.75	197.79	29.76	153.22
Midilli-Kuçuk	k	9.09	9.73	10.47	11.23	15.96	10.89	15.34
	g	9.09	9.73	10.47	11.23	15.96	10.89	15.34
	h	9.09	9.73	10.47	11.23	15.96	10.89	15.34
	r^2	0.969	0.973	0.973	0.971	0.982	0.979	0.978
	χ^2	0.007	0.006	0.006	0.008	0.005	0.005	0.007
Midilli-Kuçuk	RMSE	0.064	0.060	0.059	0.065	0.048	0.051	0.054
	n_1	1.427	1.476	1.433	1.387	1.696	1.631	1.602
	n_2	4.894	5.010	5.483	6.183	6.624	4.881	6.791
	k	32.807	40.108	59.542	103.496	249.011	45.290	261.307
	C	-1.18x10 ⁻²	-3.28x10 ⁻³	-3.10x10 ⁻³	-1.79x10 ⁻³	4.66x10 ⁻⁴	-6.98x10 ⁻⁴	-2.20x10 ⁻³
Midilli-Kuçuk	r^2	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
	χ^2	4.59x10 ⁻⁵	1.12 x10 ⁻⁵	4.07 x10 ⁻⁵	3.72x10 ⁻⁵	4.90 x10 ⁻⁵	1.45 x10 ⁻⁵	0.0001
	RMSE	0.005	0.002	0.005	0.004	0.005	0.003	0.008

Fuente: Elaboración propia

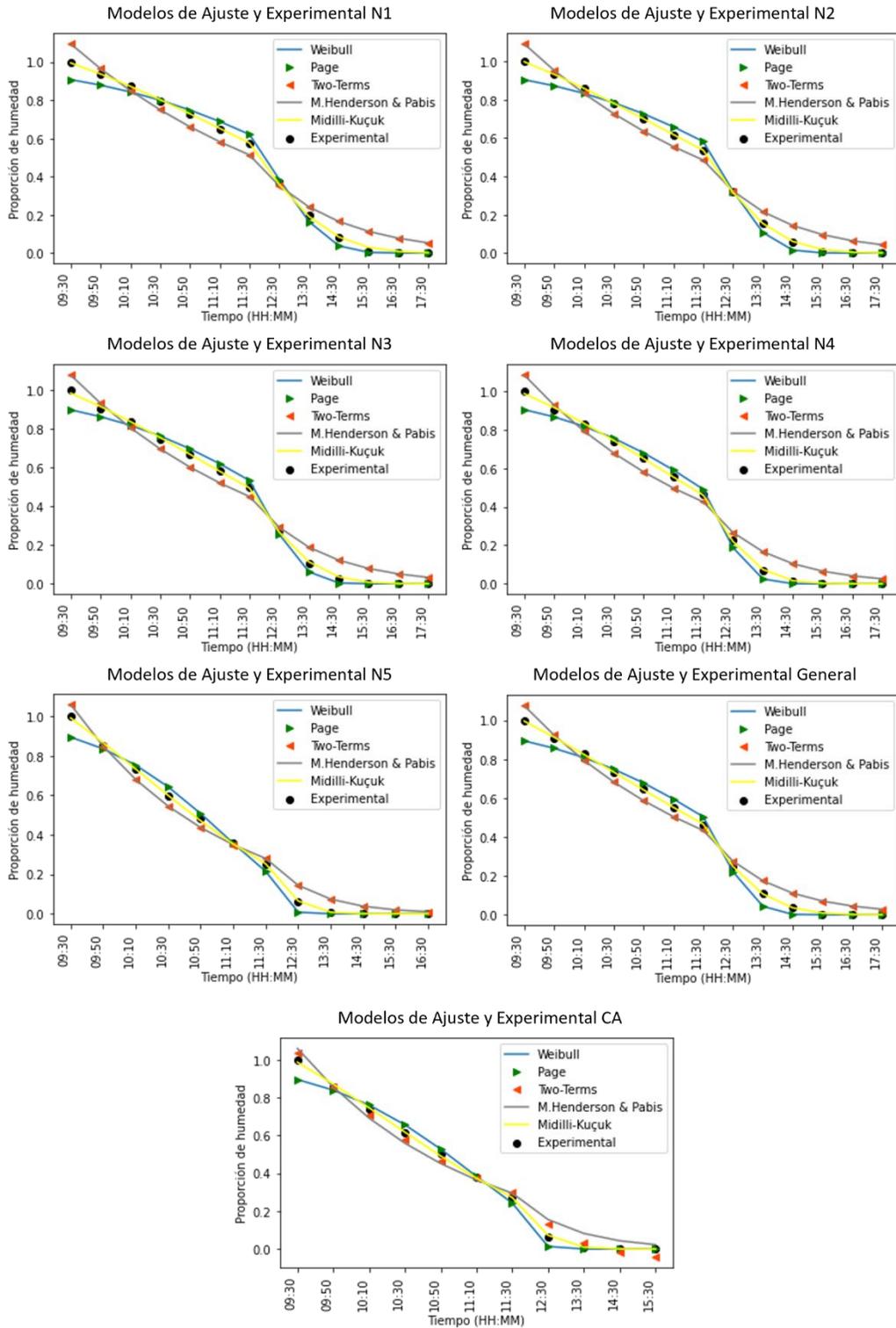


Ilustración 23. Gráficas de los modelos analíticos con los datos experimentales (Prueba 3)

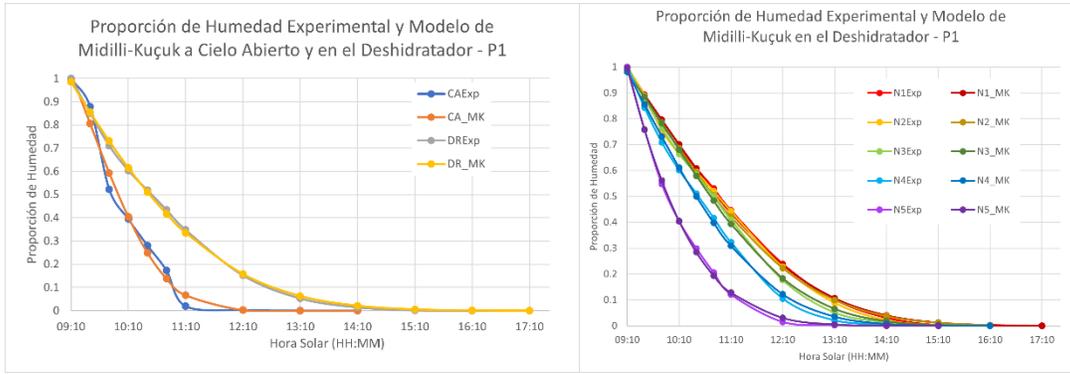


Ilustración 24. Gráficas de proporción de humedad en el deshidratador solar tipo gabinete por nivel (izquierda) y deshidratador solar tipo gabinete general en comparación con cielo abierto (derecha) (Prueba 1)

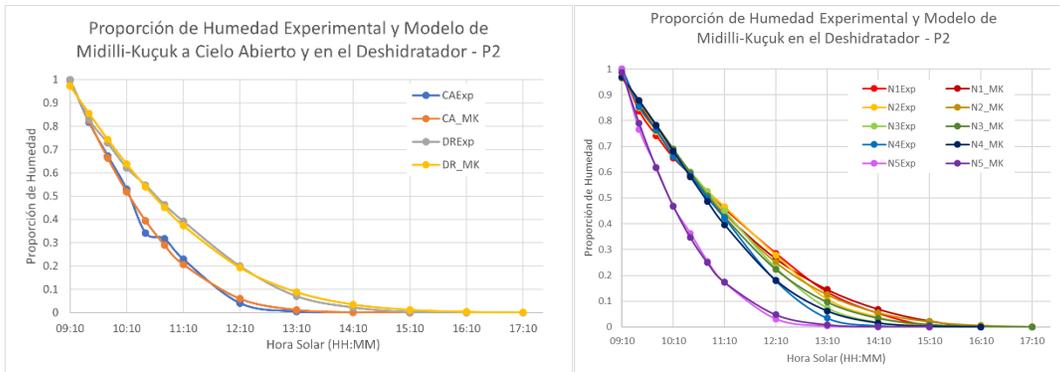


Ilustración 25. Gráficas de proporción de humedad en el deshidratador solar tipo gabinete por nivel (izquierda) y deshidratador solar tipo gabinete general en comparación con cielo abierto (derecha) (Prueba 2).

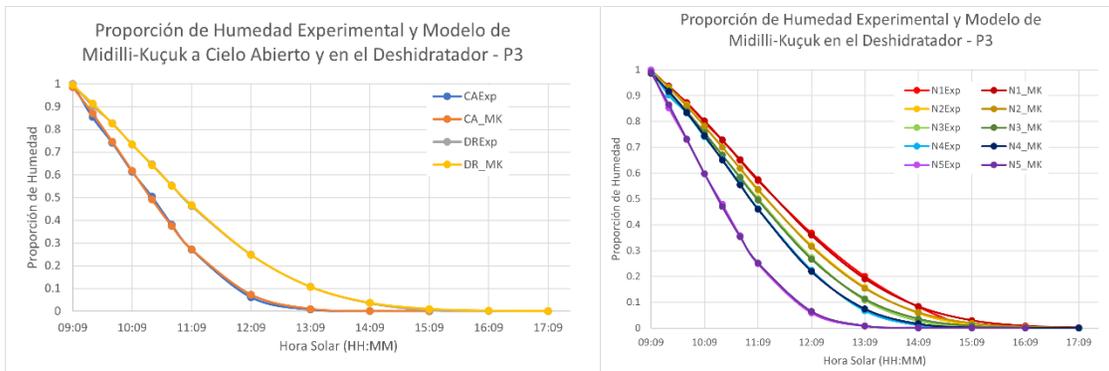


Ilustración 26. Gráficas de proporción de humedad en el deshidratador solar tipo gabinete por nivel (izquierda) y deshidratador solar tipo gabinete general en comparación con cielo abierto (derecha) (Prueba 3).