



**“ESTUDIO EXPERIMENTAL EXPLORATORIO DE LA DESHIDRATACIÓN DE
ALIMENTOS UTILIZANDO CONVECCIÓN FORZADA ASISTIDA POR
ULTRASONIDO”**

**BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL
(TESIS PROFESIONAL)**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA
CÉSAR RUBÉN SÁNCHEZ MARTÍNEZ**

**ASESOR
MTRA. ROSA SILVA BADILLO**

**SINODALES
MTRA. LILIA BAUTISTA CANO
DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ**

Pachuca de Soto, Hgo. OCTUBRE 2025

138 páginas





Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo, **18/Septiembre/2025**
No. de oficio: DIQyB/081/2025

Asunto: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

C. CÉSAR RUBÉN SÁNCHEZ MARTÍNEZ
PRESENTE

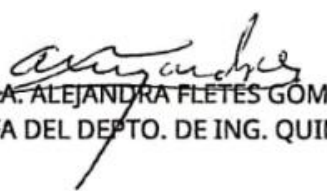
Con el presente me permito informarle que el tema "Estudio experimental exploratorio de la deshidratación de alimentos utilizando convección forzada asistida por ultrasonido" ha sido ACEPTADO para ser presentado por la Opción TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS PROFESIONAL) contemplada en la normatividad vigente para tal efecto.

Por lo anterior se le ha designado como asesora a la MTRA. ROSA SILVA BADILLO, como comisión revisora a la MTRA. LILIA BAUTISTA CANO y DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ. Una vez hecha la revisión final se liberará por dicho comité para su impresión y proceder a sustentar al ACTO DE RECEPCIÓN PROFESIONAL

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"


DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



ccp. archivo
AFG/bfa

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta
C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: ciquimica@pachuca.tecnim.mx | www.pachuca.tecnim.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo, a **06/ Octubre 2025**

Oficio No. DIQyB/081/2025

ASUNTO: Liberación para el Acto de Recepción Profesional

C. CÉSAR RUBÉN SÁNCHEZ MARTÍNEZ, No. de Control: 18201035
Egresada del Programa Educativo de Ingeniería Química y Bioquímica
PRESENTE

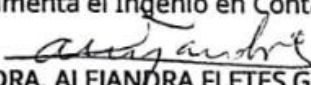
Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del proyecto:	"Estudio experimental exploratorio de la deshidratación de alimentos utilizando convección forzada asistida por ultrasonido"
Producto:	TESIS PROFESIONAL

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"


DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ

JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p.- Expediente.
AFG/bfa

ITPAC-AC-PO-008-06



2025
Año de
La Mujer

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta

C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399

e-mail: ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

En una ocasión, justamente antes de comenzar con el presente proyecto, hubo alguien que me ayudó mucho a crecer como persona. Me abrió las puertas a un mundo en dónde yo solo era expectante y me permitió desarrollarme de una manera increíble, me dijo SÉ AGRADECIDO, trata de siempre agradecer todo lo que a ti te hace algún bien.

Muchas veces se empieza agradeciendo a la familia, a los padres, a los hermanos por todo el apoyo brindado para cumplir un sueño. Mi familia no ha sido la excepción, han sido el combustible que motivo a seguir, desde mis sobrinitas, Juli, Mari, Azu y Breic que vieron en mí muchísimo amor, muchísima dedicación y empeño por lo que es, fue y será mi carrera. Para mí, fuera de ser un orgullo graduarme como un Ingeniero Químico, es cumplirle un sueño a mi niño interior y evidentemente a mis padres, Rosario e Isabel. Y de corazón estoy muy agradecido con cada uno de ellos. A mí hermana More por estar ahí siempre apoyándome incondicionalmente, al pendiente de mí, de procurar mi bienestar y darme todo lo necesario para poder terminar y cumplir este gran sueño. A mí hermana Chayo por soportar mis enojos, mis corajes, mis desvelos y siempre dándome sus mejores palabras de aliento para seguir con mi sueño.

También quiero agradecerme a mí mismo por no desistir, por esforzarme y continuar. Pero sé que evidentemente esto no lo hubiera podido lograr sin el apoyo de mis profesoras, ellas han estado al pie del cañón conmigo, dándome seguimiento, con palabras de aliento para no rendirme. Maestra Lilia, Doctora Fletes, Maestra Rosita, gracias, gracias, gracias por estar dándome tranquilidad y apoyo. Por haberme permitido seguir y darme ese impulso que necesitaba para no desistir y no rendirme.

Es por ello, que este trabajo va dirigido a todas esas personas que nunca dudaron de mí, que no dejaron de confiar en que sí se podía. En todas ellas que miraron en mi persona interés y amor por la carrera. Que ahora estoy a nada de decir, y con mucho orgullo, SOY INGENIERO QUÍMICO.

A mis amigos también les hago una mención especial, porque fueron los que me arroparon cuando llegué a un lugar donde no conocía a nadie. A todos aquellos que conocí y fueron parte de mi generación, a los que fui conociendo a lo largo de la carrera. Me encontré con

personas increíbles, muy lindas y agradables. Aunque nuestros caminos tomarán y tomaron distintos rumbos, yo los seguiré llevándolos conmigo a todas partes, en el corazón.

Y para finalizar, aun sabiendo que me estoy quedando corto en las palabras, agradezco infinitamente a las personas encargadas del proyecto por brindarme toda su confianza y apoyo, al Dr. José Luis Camacho, por el aprendizaje que me está impartiendo para ampliar mi saber. Por haberme dado la oportunidad de crecer como persona, como ser humano, mejorando varios aspectos de mi vida tanto personal y profesionalmente. Asimismo, al profesor que siempre ha seguido mis pasos a dónde quiera que voy y esta vez me permitió encontrarme con personas que me terminarán de formar académicamente como él lo hizo desde que yo estaba en la Prepa, Profe Tavo, muchísimas gracias.

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis exploratorio del proceso de deshidratación de manzana y nopal mediante convección forzada de aire, asistida por ultrasonido transmitido a través del mismo medio. Se evaluó el efecto combinado de temperatura, velocidad del aire y aplicación de ultrasonido sobre la tasa de secado, con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso y conservar la calidad del producto. Las pruebas se realizaron a temperaturas de 30 °C y 50 °C, y velocidades de aire de 2 m/s y 4 m/s. Los resultados preliminares indican que la asistencia ultrasónica acelera la pérdida de humedad, especialmente a bajas temperaturas, mostrando un alto potencial como técnica complementaria en procesos de secado térmicamente sensibles. La asistencia por ultrasonido, una técnica emergente, ha demostrado mejorar la transferencia de masa en diversos procesos de conservación. Particularmente, la transmisión del ultrasonido a través del aire representa una alternativa no invasiva, con el potencial de acelerar el secado sin comprometer la integridad estructural del alimento. Este estudio exploratorio se centra en evaluar el comportamiento de la deshidratación de manzana (*Malus domestica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) bajo condiciones controladas de secado asistido por ultrasonido aéreo. Se utilizaron muestras frescas de manzana y nopal, seleccionadas por uniformidad de tamaño, madurez y contenido de humedad inicial. Las muestras fueron cortadas en rodajas de espesor uniforme (aproximadamente 5 mm). El equipo experimental consistió en una cámara de secado por convección forzada, equipada con un generador de ultrasonido de alta frecuencia, el cual transmite ondas acústicas a través del flujo de aire caliente. Las condiciones experimentales a las que se evaluaron fueron a dos temperaturas: 30 °C (baja temperatura) y 50 °C (temperatura moderada). Y dos velocidades de aire: 2 m/s (baja velocidad) y 4 m/s (alta velocidad). En cada combinación, se realizaron ensayos con y sin asistencia ultrasónica para comparar los efectos del tratamiento. Como principal resultado se obtuvieron curvas de eliminación de agua en función del tiempo y se determinó su comportamiento cinético utilizando modelos empíricos, para cada uno de los experimentos se identificó el modelo al que mejor se ajustaron a los resultados experimentales, para lo que se utilizó análisis de regresión no lineal. Para el análisis estadístico de los resultados, como variable de respuesta se utilizó el coeficiente cinético, k , del modelo de Newton-Lewis y se determinó el efecto de cada una de las variables independientes sobre dicho coeficiente. Se pudo comprobar que la aplicación de US provoca cambios importantes en la cinética de

deshidratado, tanto de la manzana como del nopal, siendo más acentuado en la manzana. Las variables medidas fueron: Pérdida de masa en función del tiempo (curvas de secado), contenido de humedad final y observaciones físicas (color, contracción, textura visual). Los resultados indican que la asistencia ultrasónica aumentó significativamente la tasa de pérdida de humedad, particularmente a 30 °C y 2 m/s, donde el secado fue más lento sin asistencia. Este fenómeno puede atribuirse a la mejora en la transferencia de masa promovida por las microvibraciones inducidas por el ultrasonido. A temperaturas más bajas, la asistencia ultrasónica permitió un secado más rápido con menor contracción y oscurecimiento, lo que sugiere una posible ventaja en términos de conservación de la calidad sensorial. El presente estudio exploratorio demuestra que la asistencia por ultrasonido transmitido a través del aire puede mejorar la eficiencia del secado por convección forzada, especialmente a temperaturas bajas. Los resultados sugieren una menor degradación del producto y una reducción significativa del tiempo de proceso. El uso de esta técnica puede representar una alternativa viable para el procesamiento de alimentos sensibles al calor como la manzana y el nopal. Se recomienda profundizar en futuras investigaciones, incluyendo análisis fisicoquímicos, perfil sensorial y evaluación del consumo energético total del proceso.

ABSTRAC

This study presents an exploratory analysis of the apple and cactus dehydration process using forced air convection, assisted by ultrasound transmitted through the same medium. The combined effect of temperature, air velocity, and ultrasound application on the drying rate was evaluated, with the aim of improving process efficiency and preserving product quality. Tests were conducted at temperatures of 30°C and 50°C, and air velocities of 2 m/s and 4 m/s. Preliminary results indicate that ultrasonic assistance accelerates moisture loss, especially at low temperatures, showing high potential as a complementary technique in thermally sensitive drying processes. Ultrasound assistance, an emerging technique, has been shown to improve mass transfer in various preservation processes. In particular, ultrasound transmission through air represents a noninvasive alternative, with the potential to accelerate drying without compromising the structural integrity of the food. This exploratory study focuses on evaluating the dehydration behavior of apple (*Malus domestica*) and cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under controlled drying conditions assisted by aerial ultrasound. Fresh apple and cactus samples were selected for uniformity of size, maturity, and initial moisture content. The samples were sliced with uniform thickness (approximately 5 mm). The experimental equipment consisted of a forced convection drying chamber equipped with a high-frequency ultrasound generator, which transmits acoustic waves through the hot air flow. The experimental conditions evaluated were two temperatures: 30°C (low temperature) and 50°C (moderate temperature). The air speeds were two times higher: 2 m/s (low speed) and 4 m/s (high speed). In each combination, tests were conducted with and without ultrasound assistance to compare the treatment effects. The main results were water removal curves as a function of time, and their kinetic behavior was determined using empirical models. For each of the experiments, the model that best fit the experimental results was identified, for which nonlinear regression analysis was used. For the statistical analysis of the results, the kinetic coefficient, k , of the Newton-Lewis model was used as the response variable, and the effect of each of the independent variables on said coefficient was determined. It was found that the application of US causes significant changes in the dehydration kinetics of both apple and cactus, being more pronounced in the apple. The variables measured were: mass loss as a function of time (drying curves), final moisture content, and physical observations (color, shrinkage, visual texture). The results indicate that

ultrasonic assistance significantly increased the rate of moisture loss, particularly at 30°C and 2 m/s, where drying was slower without assistance. This phenomenon can be attributed to the improvement in mass transfer promoted by ultrasound-induced microvibrations. At lower temperatures, ultrasonic assistance allowed faster drying with less shrinkage and browning, suggesting a potential advantage in terms of sensory quality preservation. The present exploratory study demonstrates that ultrasonic assistance transmitted through air can improve the efficiency of forced convection drying, especially at low temperatures. The results suggest less product degradation and a significant reduction in process time. The use of this technique may represent a viable alternative for the processing of heat-sensitive foods such as apple and cactus. Further research is recommended, including physicochemical analysis, sensory profiling, and evaluation of the total energy consumption of the process.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
ABSTRAC	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xv
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMAS A RESOLVER	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN.....	5
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Manzana	6
2.1.1 Tipos de manzana	7
2.1.2 Propiedades de la manzana fresca.....	8
2.1.3 Caracterización de la manzana en seco.....	9
2.2 Nopal	9
2.2.1 Características Generales.....	10
2.2.2 Morfología de la planta.....	10
2.2.3 Flores y frutos	10
2.2.4 Adaptaciones.....	11
2.2.5 Tamaño y forma.....	11
2.2.6 Contenido nutrimental	11
2.3 Deshidratación.....	12
2.3.1 Deshidratado con aire caliente	13
2.3.2 La deshidratación convectiva asistida por ultrasonido.....	13
2.3.3 Deshidratación osmótica.....	15
2.4 Impacto de la combinación de la convección forzada y el uso de ultrasonido	15
2.4.1 Eficiencia energética.....	15
2.4.2 Mejora de la calidad del producto final	15
2.4.3 Reducción del tiempo de proceso	16
2.4.4 Preservación de nutrientes	16

2.4.5 Mejor control sobre las propiedades organolépticas	16
2.4.6 Reducción de pérdidas postprocesamiento	16
2.4.7 Sostenibilidad y aprovechamiento de recursos	17
2.5 Uso de US en el deshidratado de alimentos	17
2.5.1 Efectos de los ultrasonidos sobre la deshidratación de alimentos.....	17
2.5.2 Transmisión a través del aire	18
2.5.3 Contacto directo.....	20
2.6 Cinética de deshidratado	21
2.7 Modelado del proceso de deshidratado	22
2.8 Diseño y Análisis de experimentos	24
2.8.1 Diseño Factorial Fraccionado $2(4 - 1)$	24
2.9 Análisis de regresión no lineal	26
2.9.1 Métodos de Estimación.....	27
2.10 Coeficiente de determinación	28
2.10.1 Definición Matemática del Coeficiente de Determinación R^2	28
Capítulo 3 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS	31
3.1 Identificación de variables y factores	31
3.2 Diseño de experimentación Exploratoria.....	33
3.3 Diseño del plan experimentos.....	37
3.4 Procedimiento para pruebas de deshidratado.....	38
Capítulo 4 RESULTADOS.....	42
4.1 Pruebas preliminares	42
4.1.1 Primera prueba preliminar	42
4.1.2 Segunda prueba preliminar.	48
4.2 Corridas de acuerdo con el diseño experimentos exploratorio	55
4.2.1 Corrida 1	55
4.2.2 Corrida 2	62
4.2.3 Corrida 3	68
4.2.4 Corrida 4	74
4.2.5 Corrida 5	81
4.2.6 Corrida 6	87
4.2.7 Corrida 7	93
4.2.8 Corrida 8	99
4.3 Resumen de resultados de la experimentación exploratoria	104
4.4 Experimentos de validación.	108
4.5 Análisis de resultados de la experimentación exploratoria.....	113

Capítulo 5	EVALUACIÓN O IMPACTO ECÓNOMICO	115
Capítulo 6	CONCLUSIONES	116
Capítulo 7	RECOMENDACIONES GENERALES	117
7.1	Recomendaciones para la realización de cada uno de los experimentos	120
7.2	Experiencia adquirida.....	121
7.3	Competencias desarrolladas y aplicadas.....	123
7.4	Competencias de los programas de estudio	125
BIBLIOGRAFÍA		126
ANEXOS		135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades de la manzana por Kg de materia (Sánchez, 2025).....	8
Tabla 2.2 Caracterización de la manzana en seco por Kg de materia (Sánchez, 2025).	9
Tabla 2.3 Contenido nutrimental del nopal por Kg de materia (Sánchez, 2025).	12
Tabla 2.4 Modelos empíricos del deshidratado de alimentos (Sánchez, 2025).....	23
Tabla 3.1 Variables independientes, entradas (Sánchez, 2025).	31
Tabla 3.2 Factores controlables (Sánchez, 2025).	32
Tabla 3.3 Factores no controlables (Sánchez, 2025).	32
Tabla 3.4 Variables dependientes, salidas (Sánchez, 2025).	33
Tabla 3.5 Valores de cada nivel (Sánchez, C.R. 2025).	35
Tabla 3.6 Relaciones de alías para cada variable de proceso (Sánchez, 2025).	35
Tabla 3.7 Niveles de las variables independientes (Sánchez, 2025).	35
Tabla 3.8 Plan de experimentos (Sánchez, 2025).....	37
Tabla 3.9 Plan de experimentos aleatorizados (Sánchez, 2025).....	38
Tabla 4.1 Datos de operación (Sánchez, 2025).	42
Tabla 4.2 Datos obtenidos durante la primera prueba preliminar (Sánchez, 2025).	43
Tabla 4.3 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la primera prueba preliminar (Sánchez, 2025).	45
Tabla 4.4 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la primera prueba preliminar (Sánchez, 2025).	47
Tabla 4.5 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).	48
Tabla 4.6 Datos obtenidos durante la segunda prueba preliminar (Sánchez, 2025).....	49
Tabla 4.7 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la segunda prueba preliminar (Sánchez, 2025).	51
Tabla 4.8 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la segunda prueba preliminar (Sánchez, 2025).	54
Tabla 4.9 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	55
Tabla 4.10 Datos obtenidos durante la corrida 1 (Sánchez, 2025).	55

Tabla 4.11 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 1 (Sánchez, 2025).....	58
Tabla 4.12 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 1 (Sánchez, 2025).....	61
Tabla 4.13 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	62
Tabla 4.14 Datos obtenidos durante la corrida 2 (Sánchez, 2025).	62
Tabla 4.15 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 2 (Sánchez, 2025).....	65
Tabla 4.16 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 2 (Sánchez, 2025).....	67
Tabla 4.17 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	68
Tabla 4.18 Datos obtenidos durante la corrida 3 (Sánchez, 2025).	69
Tabla 4.19 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 3 (Sánchez, 2025).....	71
Tabla 4.20 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la tercera experimentación (Sánchez, 2025).....	73
Tabla 4.21 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	74
Tabla 4.22 Datos obtenidos durante la corrida 4 (Sánchez, 2025).	75
Tabla 4.23 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 4 (Sánchez, 2025).....	77
Tabla 4.24 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 4 (Sánchez, 2025).....	80
Tabla 4.25 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	81
Tabla 4.26 Datos obtenidos durante la corrida 5 (Sánchez, 2025).	81
Tabla 4.27 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 5 (Sánchez, 2025).....	84
Tabla 4.28 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 5 (Sánchez, 2025).....	86
Tabla 4.29 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	87
Tabla 4.30 Datos obtenidos durante la corrida 6 (Sánchez, 2025).	87

Tabla 4.31 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 6 (Sánchez, 2025).....	90
Tabla 4.32 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 6 (Sánchez, 2025).....	92
Tabla 4.33 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	93
Tabla 4.34 Datos obtenidos durante la corrida 7 (Sánchez, 2025).	93
Tabla 4.35 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 7 (Sánchez, 2025).....	96
Tabla 4.36 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 7 (Sánchez, 2025).....	98
Tabla 4.37 Condiciones iniciales (Sánchez, 2025).....	99
Tabla 4.38 Datos obtenidos durante la corrida 8 (Sánchez, 2025).	99
Tabla 4.39 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 8 (Sánchez, 2025).....	101
Tabla 4.40 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la segunda experimentación (Sánchez, 2025).	103
Tabla 4.41 Contenido de humedad en las muestras a diferentes tiempos de la prueba durante las 8 corridas de la experimentación exploratoria (Sánchez, 2025).	104
Tabla 4.42 Datos obtenidos del comportamiento de la humedad cada una de las experimentaciones realizadas (Sánchez, 2025).	107
Tabla 4.43 Datos obtenidos de la primera prueba de validación (Sánchez, 2025).....	108
Tabla 4.44 Ajuste de modelo de Lewis-Newton obtenido mediante Solver para el primer experimento de prueba (Sánchez, 2025).	109
Tabla 4.45 Datos obtenidos de la segunda prueba de validación (Sánchez, 2025).	110
Tabla 4.46 Ajuste de modelo de Lewis-Newton obtenido mediante Solver para el segundo experimento de prueba (Sánchez, 2025).	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Mapa de sede del Centro de Investigación (IPN-CICATA Querétaro, 2024).	5
Fig. 1.2 Logo de la institución (IPN-CICATA Querétaro, 2024).....	5
Fig. 2.1 Manzana Amarilla (NatGeo, 2022).	6
Fig. 2.2 Manzano (NatGeo, 2022).....	6
Fig. 2.3 Nopal y su fruto (FAO, 2020).	10
Fig. 2.4 Curva de contenido de humedad (X) como función del tiempo, condiciones de secado constantes (Geankoplis 2016).....	21
Fig. 3.1 Diagrama del proceso de deshidratado por convección forzada asistido con US (Sánchez, 2024).	34
Fig. 3.2 Equipo de deshidratado a nivel laboratorio (Sánchez, 2024).....	40
Fig. 3.3 Muestras de manzana antes y después de su deshidratado (Sánchez, 2025).	41
Fig. 3.4 Muestras de manzana antes y después de su deshidratado (Sánchez, 2025).	41
Fig. 4.1 Curva de deshidratado de la primera prueba preliminar (Sánchez, 2025).	44
Fig. 4.2 Curva de deshidratado normalizada de la primera prueba preliminar para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).....	46
Fig. 4.3 Curva de deshidratado de la segunda prueba preliminar (Sánchez, 2025).....	50
Fig. 4.4 Curva de deshidratado normalizada de la segunda prueba preliminar para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).....	53
Fig. 4.5 Curva de deshidratado de la corrida 1 (Sánchez, 2025).	57
Fig. 4.6 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 1 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	60
Fig. 4.7 Curva de deshidratado de la corrida 2 (Sánchez, 2025).	64
Fig. 4.8 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 2 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	66
Fig. 4.9 Curva de deshidratado de la corrida 3 (Sánchez, 2025).	70
Fig. 4.10 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 3 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	72
Fig. 4.11 Curva de deshidratado de la corrida 4 (Sánchez, 2025).	76

Fig. 4.12 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 4 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	79
Fig. 4.13 Curva de deshidratado de la corrida 5 (Sánchez, 2025).	82
Fig. 4.14 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 5 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	85
Fig. 4.15 Curva de deshidratado de la corrida 6 (Sánchez, 2025).	88
Fig. 4.16 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 6 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	91
Fig. 4.17 Curva de deshidratado de la corrida 7 (Sánchez, 2025).	94
Fig. 4.18 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 7 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	97
Fig. 4.19 Curva de deshidratado de la corrida 8 (Sánchez, 2025).	100
Fig. 4.20 Curva de deshidratado normalizada de la primera experimentación para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado (Sánchez, 2025).	102
Fig. 4.21 Curvas de deshidratado a diferentes condiciones experimentaciones, de acuerdo con el diseño experimental exploratorio (Sánchez, 2025).	106
Fig. 4.22 Curva de deshidratado de la primera experimentación de validación (Sánchez, 2025).	109
Fig. 4.23 Curva de deshidratado de la segunda experimentación de validación (Sánchez, 2025).	111
Fig. 4.24 Gráfica experimentos comparativos (Sánchez, 2025).	112

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.2 Relación para cálculo de NLS	27
Ecuación 2.3 Relación para cálculo de coeficiente de determinación.....	28
Ecuación 2.4 Relación de SSR	29
Ecuación 2.5 Relación de SST	29
Ecuación 2.6 Relación para coeficiente de determinación	30

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

El deshidratado de alimentos son procesos fundamentales en la conservación de productos alimenticios, ya que permiten extender su vida útil, reducir su peso y volumen para facilitar su almacenamiento y transporte, y mantener sus propiedades nutricionales, organolépticas y microbiológicas. Tradicionalmente, estos procesos se han llevado a cabo utilizando métodos convencionales como el secado por aire caliente, sin embargo, en los últimos años, se han explorado técnicas innovadoras que mejoran la eficiencia energética, la calidad del producto final y el tiempo de procesamiento. El presente proyecto se enfoca en el estudio y desarrollo de un sistema combinado de deshidratado por convección forzada y ultrasonido para el tratamiento de alimentos. La convección forzada es un método de secado que utiliza aire caliente circulante para extraer la humedad de los alimentos, y es ampliamente utilizado por su simplicidad, bajo costo y efectividad. Sin embargo, este método puede resultar en la pérdida de compuestos volátiles y vitaminas sensibles al calor, lo que afecta la calidad nutricional del producto. Por otro lado, el uso de ultrasonido como una técnica complementaria se ha revelado como una opción prometedora en la mejora de la eficiencia de los procesos de secado. Los ultrasonidos inducen micro vibraciones dentro del alimento, lo que facilita la ruptura de las paredes celulares y acelera la liberación de agua desde el interior del producto. Combinado con la convección forzada, el ultrasonido puede reducir significativamente el tiempo de secado, mejorar la calidad del producto final y conservar mejor sus propiedades bioactivas. El objetivo principal de este proyecto es investigar la aplicación conjunta de ambos métodos para optimizar el proceso de deshidratado de alimentos, evaluando parámetros clave como el tiempo de secado y la humedad al equilibrio que se puede alcanzar. A través de este enfoque innovador, se busca no solo mejorar la calidad y la eficiencia del secado, sino también contribuir a la sostenibilidad del sector alimentario al reducir el consumo energético y el desperdicio de alimentos. El proyecto general donde se enmarca el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un prototipo de secador que integre estos dos métodos, proporcionando una solución avanzada y eficaz para la deshidratación de alimentos en diversas aplicaciones industriales, como la producción de frutas deshidratadas, vegetales, hierbas y otros productos alimenticios de valor agregado.

1.1 PROBLEMAS A RESOLVER

El proceso de deshidratación de alimentos es largo principalmente debido a que el agua en los alimentos está muy bien integrada en sus células y estructuras. En el caso de alimentos como frutas, verduras o carnes, el agua no solo está en la superficie, sino también atrapada dentro de las células vegetales o animales.

Cuando se deshidrata un alimento, se debe evaporar el agua de manera controlada, para que el alimento no pierda sus nutrientes ni cambie demasiado su estructura. Sin embargo, el agua está firmemente unida a las moléculas dentro de los alimentos de tal forma que no solo se evapora con el calor, sino que a veces es necesario un proceso más largo para liberar toda el agua atrapada.

El agua, como se mencionó anteriormente, tiene una gran capacidad para absorber calor (calor específico), lo que significa que, para calentar una cantidad de agua en un alimento, se requiere mucho más calor que para otras sustancias. Además, para evaporar el agua (es decir, convertirla en vapor), se necesita superar el calor latente de vaporización, que es la energía necesaria para cambiar el agua de líquido a gas sin aumentar su temperatura.

Este calor latente de vaporización es especialmente importante en la deshidratación, porque incluso si el alimento se calienta a una temperatura relativamente baja, se necesita mucha energía para que el agua se evapore. En términos generales, el agua tiene un valor de 2260 Joules por gramo para cambiar de líquido a vapor. Es una cantidad considerable de energía solo para separar el agua de los alimentos.

Gran parte del peso de los alimentos es agua. Esto significa que, en el proceso de deshidratación, estamos tratando de eliminar una cantidad considerable de su masa, lo que lleva tiempo y consume mucha energía, ya que hay que calentar y evaporar grandes cantidades de agua.

El secado por aire caliente es el más común, pero como el calor tiene que penetrar en el alimento y evaporar el agua en su interior, este proceso puede ser lento y costoso en términos energéticos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Conocer los efectos de la aplicación del ultrasonido en el deshidratado de alimentos por convección forzada, mediante experimentación exploratoria.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar pruebas preliminares de deshidratación por convección forzada asistida por ultrasonido utilizando equipo de laboratorio.
2. Plantear un diseño de experimentos para la fase exploratoria utilizando herramientas de estadística.
3. Desarrollar las corridas experimentales de acuerdo con diseño experimental planteado.
4. Hacer el análisis de resultados de los experimentos de la fase exploratoria.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El deshidratado es una de operaciones industriales en la conservación de alimentos más importantes y de uso intensivo de energía. Con el paso de los años han surgido nuevas tendencias tecnológicas en las que se utilizan de manera simultánea más de un método de secado, principalmente combinando métodos convencionales con nuevas tecnologías. En el caso particular se trabaja con el proceso más común de secado que es el secado con aire caliente o convectivo con la aplicación de ultrasonido, lo anterior porque se han reportado resultados muy relevantes en cuanto a la reducción del tiempo y consumo de energía respecto al proceso convencional sin la aplicación de ultrasonido.

Este proyecto forma parte de una investigación más amplia en el uso de ultrasonido para distintas operaciones relacionadas con la germinación, desinfección y conservación de alimentos que se desarrolla en el grupo de investigación de energías alternas del CICATA Unidad Querétaro del IPN. Para los estudios del deshidratado ya se cuenta con el equipo de laboratorio instrumentado para la realización de este tipo de pruebas.

La justificación para el uso de convección forzada y ultrasonido en la deshidratación de alimentos se centra principalmente en su eficiencia energética, la preservación de la calidad nutricional y sensorial del producto final, la reducción del tiempo de procesamiento y los beneficios sostenibles. Ambos métodos ofrecen ventajas sobre los métodos convencionales de secado, proporcionando una alternativa más rápida, eficiente y menos destructiva para la deshidratación de alimentos.

1.4 DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN

El Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (IPN-CICATA Querétaro), se ubica en la Ciudad de Querétaro en el Estado de Querétaro, México. Perteneció al Instituto Politécnico Nacional, es un centro de investigación científico y tecnológico, concebido para servir de enlace entre la comunidad científica y los sectores productivos de bienes y servicios, para atenderlos y ofrecerles soluciones a sus problemas de desarrollo.

Para el cumplimiento de este objetivo, IPN-CICATA Querétaro desarrolla programas de investigación científica y tecnológica con un enfoque interdisciplinario y, de igual forma, atiende la formación de recursos humanos de alto nivel contribuyendo decisivamente al fortalecimiento de la calidad y la competitividad nacional e internacional del aparato productivo en México.



Fig. 1.1 Mapa de sede del Centro de Investigación. Nota: Imagen creada por IPN-CICATA Querétaro, 2024.



Fig. 1.2 Logo de la institución. Nota: Imagen creada por IPN-CICATA Querétaro, 2024.

En relación al trabajo de investigación el IPN-CICATA Querétaro ha realizado una gran cantidad de proyectos vinculados con apoyo económico del IPN, CONACYT y la Industria por lo que se han generado patentes, modelos de utilidad, prototipos y diversos desarrollos en sus 5 diferentes líneas de investigación: Análisis de imágenes, Biotecnología, Mecatrónica, Energías alternativas y Procesamiento de materiales y manufactura, las cuales están ligadas con la actividad económica de la región y del país.

Actualmente, en el IPN-CICATA Querétaro, se desarrollan los programas de Maestría y Doctorado, se han mantenido en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACYT, desde su ingreso en el 2007, en la actualidad su status es de Consolidado. Así también, se cuenta con la Especialidad y además con los tres programas en su modalidad con la industria. Del año 2003 que se tuvo a los dos primeros graduados en el Posgrado en Tecnología Avanzada al mes de enero de 2023, se han graduado 380 alumnos, los cuales son: 101 de doctorado, 268 de maestría y 11 de especialidad. La matrícula en ese semestre A23 es de 65 alumnos.

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Manzana

La manzana (Fig. 2.1) es el fruto del manzano (*Pyrus malus* L.), árbol de la familia de las rosáceas, a la que también pertenecen otras frutas como el melocotón, el albaricoque, la ciruela y la cereza (NatGeo, 2022).



Fig. 2.1 Manzana Amarilla. Nota: Fotografía tomada para representar una manzana amarilla de Natgeo, 2020.

Los manzanos (Fig. 2.2) se cultivan en todo el mundo y son las especies más utilizadas del género *Malus*. El árbol se originó en Asia Central, donde su ancestro salvaje, *Malus sieversii*, todavía se encuentra hoy en día. Las manzanas se han cultivado durante miles de años en Asia y Europa y fueron llevadas a América por colonos europeos. Las manzanas tienen un significado religioso y mitológico en muchas culturas, incluyendo la tradición nórdica, griega y cristiana europea (NatGeo, 2022).



Fig. 2.2 Manzano. Nota: Fotografía tomada para representar un manzano de Natgeo, 2022.

Los manzanos son grandes si se cultivan a partir de semillas. Generalmente, los cultivares de manzana se propagan injertados en portainjertos, que controlan el tamaño del árbol resultante. Hay más de 7500 cultivares conocidos de manzanas con diferentes características.

Existen cultivares que producen frutos adecuados para cocinar, consumir crudos o producción de sidra. Tanto árboles como frutos son susceptibles de padecer enfermedades, como hongos, bacterias y plagas de parásitos, que se pueden controlar por medios orgánicos y no orgánicos. En 2010, el genoma del fruto fue secuenciado como parte de la investigación sobre el control de enfermedades y la reproducción selectiva en la producción de manzanas. La producción mundial de manzanas en 2018 fue de 86 millones de toneladas, y China representa casi la mitad del total (NatGeo, 2022).

En lo que se refiere a su perfil nutricional, una de sus principales virtudes es su acción reguladora del intestino, algo que es posible gracias a que es rica en fibra soluble e insoluble. Por ejemplo, una manzana de 150 gramos aporta unos 5 gramos de fibra, algo que se une a sus 16 gramos de azúcares (fructosa, sacarosa y glucosa), y 22 gramos de carbohidratos (NatGeo, 2022), (Frutas Olivar, 2020), (Alonso, 2022).

Contiene flavonoides y polifenoles por lo que es rica en antioxidantes, en vitaminas del grupo B (B1, B2 y B6), vitamina C, fósforo, potasio y calcio. Además, gracias a la presencia de ácido málico y tartárico facilita la digestión de aquellos alimentos que posean un alto contenido en grasas (Tabla 2.1). Y es mejor lavarlas bien y comerlas sin pelar, ya que la piel de la manzana contiene pectina que protege la mucosa intestinal (Frutas Olivar, 2020), (Alonso, 2022).

Según destaca el European Journal of Clinical Nutrition, uno de los fitoquímicos de la manzana es la quercetina, que permite prevenir los problemas cardiovasculares, las enfermedades inflamatorias como la artritis, el asma y hasta las contracturas musculares. La manzana, a su vez, tiene ácidos como el tartárico y el málico, que ayudan a digerir mejor las grasas que consumimos. Por ello se aconseja comer esta fruta como postre luego de una ingesta copiosa, ya sea al mediodía o por la noche (NatGeo, 2022), (Frutas Olivar, 2020).

2.1.1 Tipos de manzana

Existen más de mil variedades de manzanas en todo el mundo. Hay manzanas de todo tipo: rojas, amarillas, verdes, crujientes, dulces, aromáticas, ácidas. Algunas de las variedades más conocidas son:

Golden Delicious

Variedad americana muy cultivada en todo el mundo, de piel color amarillo dorado, es fina, dulce y aromática.

Granny Smith

Variedad australiana, destaca por su color verde intenso con algunos puntitos blancos, muy crujiente y jugosa.

Reineta gris del Canadá

Es una variedad francesa de gran tamaño y forma achatada con piel gruesa y color amarillo oxidado es jugosa con un punto ácido.

Red Starking

Es una de las variedades más conocidas, originaria de Estados Unidos, presenta una piel roja, brillante, con estrías rojas y verdosas, con sabor dulce y suave.

Royal Gala

Originaria de Nueva Zelanda, esta variedad presenta una piel con estrías rojas y naranjas sobre un fondo amarillo verdoso, muy aromática y jugosa.

2.1.2 Propiedades de la manzana fresca

Las manzanas contienen, agua, lípidos, azúcar, minerales, proteínas, vitaminas liposolubles (Tabla 2.1) (Frutas Olivar, 2020).

Tabla 2.1 Propiedades de la manzana por Kg de materia. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Agua: 85 %	Proteínas: 0.24-0.40 kcal
Energía: 47.00-61.54 kcal	Carbohidratos: 11.43-13.37 g
Lípidos: 0.10-0.58 g	
Fibras: 1.80-2.20 g	<u>Vitaminas Liposolubles</u>
Azúcar: 10.39 g	A Retinol: 0.00-4.33 µg
	A Carotenoides: 18.00-26.00 µg
<u>Minerales</u>	E o Tocoferol: 0.490-0.590 mg
Calcio: 4.00-7.10 mg	K o Filoquinona: 2.20-2.20 µg
Cinc: 0.100-0.103 mg	

Cloro: 2.20-2.20 mg	<u>Vitaminas Liposolubles</u>
Fósforo: 6.07-12.00 mg	B1 o Tiamina: 0.023-0.035 mg B2 o
Hierro: 0.100-0.480 mg	Riboflavina: 0.020-0.032 mg B3 o Niacina: 0.100-0.68 mg
Magnesio: 5.00-6.40 mg	B5 o Ác. Pantoténico: 0.1000.100 mg
Manganeso: 0.030-0.100 mg	B6 o Piridoxina: 0.060-0.103 mg

2.1.3 Caracterización de la manzana en seco

La manzana en seco contiene diferentes cantidades de minerales, de proteínas y además de vitaminas (Tabla 2.2) (Frutas Olivar, 2020).

Tabla 2.2 Caracterización de la manzana en seco por Kg de materia. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Energía: 238.00-254.81 kcal	Proteínas: 0.80-2.00 kcal
Lípidos: 0.30-1.63 g	Carbohidratos: 56.97-60.10 g
Fibras: 9.70-10.07 g	
	<u>Vitaminas Liposolubles</u>
<u>Minerales</u>	A Retinol: 0.00-0.00 µg
Calcio: 16.00-38.00 mg	A Carotenoides: 91.00-91.00 µg
Cinc: 0.50-0.50 mg	E o Tocoferol: 1.45-1.45 mg
Cloro: 1.00-1.00 mg	
Fósforo: 33.00-50.00 mg	<u>Vitaminas Liposolubles</u>
Hierro: 0.50-3.00 mg	B1 o Tiamina: 0.058-0.100 mg B2 o Riboflavina: 0.025-0.100 mg B3 o Niacina: 0.40-0.40 mg
Magnesio: 16.00-16.00 mg	
Manganeso: 0.50-0.50 mg	
Potasio: 540.00-622.00 mg	
Sodio: 10.00-16.00 mg	

2.2 Nopal

El nopal (*Opuntia* spp.) es una planta suculenta perteneciente a la familia Cactaceae, originaria de América, especialmente de México, donde es un ingrediente clave en la dieta tradicional y la medicina popular. El nopal es conocido tanto por sus palas comestibles como por sus frutos (tunas), los cuales son ricos en nutrientes como fibra, vitaminas, minerales y antioxidantes (Villarreal, 2013). Además, el nopal tiene una destacada adaptabilidad a climas áridos y suelos pobres, lo que lo convierte en una opción importante para la agricultura en zonas de sequía (FAO, 2020).



Fig. 2.3 Nopal y su fruto. Nota: Fotografía tomada para representar un nopal y su fruto de FAO, 2020.

2.2.1 Características Generales

Parte comestible: Las palas (nopalitos), que se consumen frescas, cocidas o procesadas, y los frutos (tunas).

Usos: En la alimentación, la medicina tradicional y la industria cosmética.

Beneficios para la salud: Ayuda a controlar los niveles de glucosa, tiene propiedades antiinflamatorias y digestivas (Sandoval, 2007).

2.2.2 Morfología de la planta

El nopal tiene un tallo que es plano y fleshoso, compuesto por segmentos llamados palas o nopalitos, que son las partes comestibles y utilizadas en diversas aplicaciones. Las palas son de forma ovalada o elíptica y miden entre 20 y 30 cm de largo, dependiendo de la especie. Estas están cubiertas por espinas, aunque algunas variedades no las tienen o tienen espinas más pequeñas. También presentan areolas, que son pequeñas áreas de crecimiento de espinas diminutas llamadas glóquidas, las cuales pueden causar irritación en la piel. El nopal tiene un sistema de raíces fibrosas que se desarrollan superficialmente, lo que permite que la planta capture eficientemente el agua durante la lluvia (Ochoa, 2003).

2.2.3 Flores y frutos

Las flores del nopal son grandes y coloridas, en tonos que varían desde el amarillo hasta el rojo o naranja, dependiendo de la especie. Estas flores son hermafroditas, lo que facilita su polinización. El fruto, conocido como tuna, es carnososo y de forma ovalada. Su color varía

entre verde, amarillo o rojo según la variedad y tiene pequeñas semillas comestibles en su interior.

2.2.4 Adaptaciones

El nopal está adaptado a vivir en ambientes áridos gracias a su capacidad para almacenar agua en sus tejidos. Esta característica le permite sobrevivir en condiciones de sequía y suelos poco fértiles. Su fisiología CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas) le permite realizar la fotosíntesis principalmente durante las horas nocturnas, cuando la pérdida de agua es mínima, lo que lo hace muy eficiente en la conservación de agua (Ochoa, 2003).

2.2.5 Tamaño y forma

El nopal puede llegar a medir entre 1 y 2 metros de altura dependiendo de las condiciones del suelo y el clima. La planta crece principalmente en forma arbustiva, pero algunas especies pueden formar estructuras más arborescentes. Las palas tienen bordes dentados o lisos, y la planta puede expandirse rápidamente a través de la emisión de nuevos brotes desde la base (Ochoa, 2003).

Como se mencionó anteriormente, las palas son las partes comestibles más importantes del nopal y se caracterizan por ser planas y suplementadas con espinas (Sandoval, 2007). Además, su capacidad para almacenar agua permite que el nopal se adapte a ambientes áridos, como los de muchas regiones de México (Ochoa, 2003).

2.2.6 Contenido nutrimental

El nopal es bajo en calorías (16 kcal por cada 100 g) y tiene un alto contenido de fibra (2.4 g), lo que lo convierte en un excelente aliado para el control del peso y la salud digestiva (Sandoval, 2007).

Su contenido de vitamina C (14 mg) y vitamina A (150 UI) lo hace beneficioso para fortalecer el sistema inmunológico y mantener la salud ocular y dérmica (Sandoval, 2007).

Además, el nopal es una buena fuente de minerales como el calcio (56 mg) y el magnesio (50 mg), que son esenciales para la salud ósea y muscular (Ochoa, 2003). Su contenido nutrimental se muestra en la tabla 2.1 (Avila & Sánchez, 2018), (Méndez, 2014), (Ávila & Ramírez, 2011), (Sánchez & Cano, 2002).

Tabla 2.3 Contenido nutrimental del nopal por Kg de materia. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Nutriente	Cantidad
Energía	16 kcal
Agua	90 %
Proteínas	1.0 g
Grasas	0.2 g
Carbohidratos	3.9 g
Fibra dietética	2.0 g
Azúcares	0.4 g
Calcio	56 mg
Hierro	0.6 mg
Magnesio	30 mg
Fósforo	10 mg
Potasio	260 mg
Sodio	6 mg

2.3 Deshidratación

La deshidratación es un método antiguo de conservación de alimentos y se utiliza ampliamente para conservar frutas y verduras. Su función principal es eliminar la humedad de los alimentos y evitar la descomposición y el crecimiento de microorganismos. Tiene como objetivo garantizar la estabilidad del producto, la seguridad microbiológica del producto, reducir los cambios químicos y físicos y extender el almacenamiento a largo plazo manteniendo la calidad del producto durante el deshidratado (Fernández, 2015), (Kaveh, 2018). En el proceso, el agua se elimina por evaporación gracias al suministro de aire caliente (Iriarte, 2018), (Iglesias, 2018).

El método de deshidratado afecta en gran medida las propiedades físico-químicas del producto como apariencia, color y propiedades físicas como contracción y porosidad, que determinan la calidad del secado (Gamboa, 2014).

El procesamiento antes del deshidratado puede alterar el metabolismo del tejido extirpado, dañando así las conexiones celulares o enzimáticas. También son importantes para reducir los cambios indeseables que se producen en contacto con el aire durante la deshidratación y posterior almacenamiento (Iriarte, 2018).

2.3.1 Deshidratado con aire caliente

La deshidratación convectiva es el proceso de conservación de alimentos más utilizado debido a su sencillez de funcionamiento. El proceso consiste básicamente en poner en contacto una corriente de aire caliente y seco con los alimentos para reducir su contenido de humedad. El calor necesario para evaporar el agua proviene del aire caliente y lo extrae de la cámara de deshidratación.

El deshidratado convectivo es un método basado en la evaporación del agua que utiliza el flujo de aire para evaporar el agua, eliminando la humedad y previniendo el crecimiento de bacterias que no pueden sobrevivir en un ambiente seco (Estrada, 2018).

La calidad del alimento seco puede reducir la sensibilidad de los compuestos nutritivos y provocar cambios indeseables en las propiedades fisicoquímicas de los alimentos (Gamboa, 2014). El deshidratado convectivo se utiliza como proceso general para el secado de productos agrícolas y alimenticios, reduciendo peso y volumen, reduciendo costos de empaque, almacenamiento y transporte (Miranda, 2018), (Iriarte, 2018). En el proceso de deshidratado por aire caliente se producen simultáneamente dos procesos que determinan la velocidad del proceso:

1. Transferencia de calor: hay aire alrededor del producto que permite que el agua se evapore.
2. Transferencia de agua: la evaporación se produce desde el interior del producto hacia la superficie.

La transferencia de calor puede ocurrir por convección, conducción, radiación o una combinación de estos mecanismos. La eliminación de agua de la superficie del material en forma de vapor depende básicamente de condiciones externas como temperatura, humedad, velocidad, dirección del flujo de aire caliente y geometría fija (Ruiz, 2015).

2.3.2 La deshidratación convectiva asistida por ultrasonido

La deshidratación convectiva asistida por ultrasonido (DCAU) es una técnica innovadora que combina el proceso de deshidratación con la aplicación de ultrasonido para mejorar la transferencia de calor y masa, optimizando la eliminación de agua de un material o producto, generalmente alimentos o biomateriales. Esta tecnología se basa en el uso de ondas

ultrasónicas de alta frecuencia para generar cavitación en el medio, lo cual facilita la movilización de las moléculas de agua y mejora la eficiencia del proceso de secado (Chia & Vigneswaran, 2019; Ochoa & Ortiz, 2020).

2.3.2.1 Mecanismos de la deshidratación convectiva asistida por ultrasonido

El proceso de DCAU se fundamenta en dos principios principales:

Cavitación acústica: El ultrasonido genera ondas de presión que provocan la formación de pequeñas burbujas dentro del material. Estas burbujas implosionan, liberando energía que aumenta la temperatura localmente, lo cual favorece la evaporación del agua de los productos (Panić & Jovanović, 2017).

Mejora de la transferencia de calor y masa: La aplicación de ultrasonido en el proceso de deshidratación aumenta la permeabilidad del material, lo que facilita la difusión del vapor de agua hacia la superficie y reduce la resistencia al flujo de calor (Xie & Zhang, 2020).

2.3.2.2 Ventajas de la deshidratación convectiva asistida por ultrasonido

El uso de ultrasonido en los procesos de deshidratación ofrece varias ventajas comparado con las técnicas convencionales, como la reducción de tiempos de secado, el menor consumo de energía y la mejora en la calidad del producto final, preservando nutrientes y propiedades sensoriales (Chia & Vigneswaran, 2019; Xie & Zhang, 2020).

2.3.2.3 Aplicaciones de la DCAU

La DCAU ha sido utilizada principalmente en la industria alimentaria para mejorar el secado de productos como frutas, verduras, hierbas, y otros alimentos delicados. Además, también tiene aplicaciones en la conservación de biomateriales y productos farmacéuticos, donde la preservación de las propiedades bioactivas es crucial (Panić & Jovanović, 2017; Ochoa & Ortiz, 2020).

2.3.3 Deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica es un proceso que se utiliza principalmente para reducir el contenido de agua de los productos alimenticios sin someterlos a condiciones extremas de calor, lo que ayuda a preservar sus propiedades nutricionales, organolépticas y estructurales. Este proceso implica la inmersión de los alimentos en una solución osmótica, generalmente compuesta de azúcares, sal o una combinación de ambos, lo que provoca un flujo de agua desde el interior del producto hacia la solución osmótica debido a la diferencia de concentración.

2.4 Impacto de la combinación de la convección forzada y el uso de ultrasonido

2.4.1 Eficiencia energética

Convección forzada: Este proceso mejora la transferencia de calor al incrementar la circulación del aire caliente sobre el alimento. Usando ventiladores o sistemas de aire forzado, se puede mantener una temperatura constante que facilita la eliminación rápida de la humedad del alimento. Es un proceso relativamente eficiente en términos energéticos, especialmente si se utiliza en combinación con técnicas de recirculación de aire o energía solar (Smith, 2020; Pérez & Gómez, 2019).

Ultrasonido: Aunque se usa principalmente para generar vibraciones a alta frecuencia, que pueden ayudar a fragmentar las paredes celulares de los alimentos, el ultrasonido también favorece la deshidratación al reducir la tensión superficial de los líquidos dentro de las células. Esto permite una evaporación más eficiente a temperaturas relativamente bajas, lo cual también ahorra energía y evita el deterioro térmico de los nutrientes (Martínez, 2018; Gómez, 2021).

2.4.2 Mejora de la calidad del producto final

Convección forzada: Este método permite un control preciso de la temperatura y la humedad, lo cual ayuda a evitar el sobrecalentamiento del producto. En alimentos sensibles al calor, como frutas y vegetales, la convección forzada puede ser más eficiente y menos agresiva que otros métodos, preservando mejor las características sensoriales (Jones, 2017).

Ultrasonido: Los ultrasonidos pueden mejorar la penetración del calor en los alimentos debido a la formación de microburbujas dentro del agua presente en las células vegetales o

animales. Esto puede acelerar la liberación de agua sin que se requieran altas temperaturas. Además, el ultrasonido puede ayudar a reducir la oxidación y la degradación de compuestos sensibles al calor, como las vitaminas (Hernández & López, 2016).

2.4.3 Reducción del tiempo de proceso

Convección forzada: La circulación del aire caliente acelera el proceso de transferencia de calor y la eliminación de humedad de los alimentos. Esto resulta en una reducción significativa del tiempo de deshidratación (González & Pérez, 2018).

Ultrasonido: El uso de ultrasonido en combinación con la convección forzada puede disminuir considerablemente los tiempos de secado al facilitar una salida más rápida del agua contenida en las células (Roberts, 2020).

2.4.4 Preservación de nutrientes

Convección forzada: Cuando se controla adecuadamente la temperatura y la circulación de aire, la convección forzada puede evitar la destrucción de nutrientes sensibles al calor, como vitaminas y antioxidantes (Rodríguez, 2022).

Ultrasonido: Como el ultrasonido opera a bajas temperaturas y puede acelerar la deshidratación sin aplicar calor excesivo, se reduce el riesgo de descomposición térmica de nutrientes sensibles (Torres & Pérez, 2019).

2.4.5 Mejor control sobre las propiedades organolépticas

Convección forzada: Al mantener un control preciso sobre la temperatura y la circulación de aire, se puede evitar la formación de cambios indeseados en la textura, color y sabor del producto (Zhang, 2020).

Ultrasonido: Este proceso puede contribuir a una mejor conservación de la textura original del alimento, ya que la vibración ultrasónica facilita una salida más homogénea de agua (Martínez & Rodríguez, 2021).

2.4.6 Reducción de pérdidas postprocesamiento

Convección forzada y ultrasonido: Ambos métodos pueden resultar en menos pérdida de producto debido a la menor necesidad de manejar el alimento a temperaturas extremas o por tiempos prolongados (González & Sánchez, 2018; Cruz, 2020).

2.4.7 Sostenibilidad y aprovechamiento de recursos

Convección forzada: Al optimizar el uso de energía y tiempo en el proceso de deshidratación, se puede lograr una mayor sostenibilidad en la producción de alimentos (López, 2019).

Ultrasonido: El uso de ultrasonido permite realizar procesos más rápidos y a menores temperaturas, lo que puede resultar en menos desperdicio de energía y recursos (Bustos, 2017).

2.5 Uso de US en el deshidratado de alimentos

El uso de US en la deshidratación de alimentos es una tecnología emergente que mejora la eficiencia del proceso, reduce el tiempo de secado y puede preservar mejor las propiedades nutricionales y sensoriales de los productos. El ultrasonido se aplica de manera que, mediante ondas acústicas, se genera una vibración que induce la formación de microcanales en los alimentos, facilitando la transferencia de humedad y mejorando la tasa de deshidratación, especialmente a bajas temperaturas.

Según Pérez y Martínez (2019), El ultrasonido no solo acelera el proceso de deshidratación, sino que también ayuda a mantener la calidad del alimento, preservando sus características organolépticas, como el sabor y el color, al reducir el calor necesario durante el proceso (p. 102). El uso de ultrasonido durante la deshidratación tiene un efecto positivo sobre las propiedades físico-químicas de los alimentos, ya que mejora la estructura porosa de los productos deshidratados, lo que facilita la rehidratación posterior y mejora la textura (González, 2021).

El ultrasonido, al ser combinado con otros métodos como la convección de aire caliente, optimiza el proceso de deshidratación, reduciendo el tiempo de tratamiento y mejorando la eficiencia energética, lo cual es clave en la industria alimentaria (Sánchez & Rodríguez, 2022).

2.5.1 Efectos de los ultrasonidos sobre la deshidratación de alimentos.

La tecnología de ultrasonido ha sido ampliamente investigada en el campo de la deshidratación de alimentos debido a sus efectos positivos en la mejora de la eficiencia del proceso, la preservación de nutrientes y la reducción del tiempo necesario para eliminar la humedad de los productos. Los ultrasonidos generan ondas acústicas de alta frecuencia que,

al ser aplicadas a los alimentos, pueden inducir fenómenos como la cavitación, lo que favorece la penetración de calor y la transferencia de masa en el proceso de secado.

El uso de ultrasonidos en la deshidratación de alimentos puede mejorar la eficiencia del proceso al aumentar la tasa de transferencia de calor y humedad. Los ultrasonidos generan vibraciones que inducen la cavitación, lo que aumenta la permeabilidad de la estructura celular de los alimentos. Este fenómeno mejora la salida de agua y acelera el proceso de secado, lo que puede resultar en un menor tiempo de deshidratación en comparación con métodos convencionales, como el secado al aire o al sol (Liu, 2016).

Además de la mejora en la eficiencia, los ultrasonidos también pueden contribuir a la preservación de nutrientes sensibles al calor durante el proceso de deshidratación. Algunos estudios han mostrado que el uso de ultrasonidos puede ayudar a mantener las propiedades bioactivas de los alimentos deshidratados, como las vitaminas y antioxidantes, en comparación con los métodos tradicionales de secado que pueden causar pérdidas significativas de estos compuestos (Chaves-López, 2017).

Los ultrasonidos también pueden influir en la textura y la apariencia de los alimentos deshidratados. Algunos estudios indican que este tratamiento puede resultar en productos con una textura más crujiente y una mejor rehidratación, lo que mejora la calidad del producto final. La aplicación de ultrasonidos a frecuencias específicas puede incluso generar una mayor uniformidad en la distribución de la humedad dentro del producto (Yang et al., 2020).

Los ultrasonidos se han probado en diversos tipos de alimentos, como frutas, verduras, carnes y hierbas. Cada tipo de alimento responde de manera diferente a la aplicación de ultrasonidos, dependiendo de su estructura, contenido de agua y características físicas (Ravichandran, 2020). Sin embargo, en general, la aplicación de ultrasonidos es prometedora para aumentar la eficiencia y calidad de la deshidratación en muchos productos alimenticios.

2.5.2 Transmisión a través del aire

La transmisión de ultrasonido a través del aire es un aspecto fundamental en la tecnología de ultrasonidos, ya que los ultrasonidos, a pesar de ser ondas acústicas de alta frecuencia, pueden propagarse a través del aire en función de diversas condiciones, como la frecuencia, la amplitud y las características del medio. Aunque el aire es un medio con baja densidad

comparado con líquidos o sólidos, los ultrasonidos pueden atravesarlo a distancias relativamente cortas. Esto es particularmente relevante en aplicaciones como la deshidratación de alimentos y la limpieza industrial, donde las ondas ultrasónicas son generadas y utilizadas en el aire para influir en el proceso de tratamiento (Müller, 2018).

2.5.2.1 Características de la transmisión de ultrasonido en el aire

Propagación de las ondas ultrasónicas: Las ondas ultrasónicas son vibraciones de presión que se propagan a través de medios elásticos como gases, líquidos y sólidos. Sin embargo, la capacidad de propagación de las ondas en el aire es limitada debido a su baja densidad, lo que implica que las ondas ultrasónicas en el aire tienen una mayor atenuación o pérdida de energía. Esto se debe a factores como la absorción y dispersión de las ondas en las moléculas del aire (Müller, 2018).

Frecuencia y atenuación: La atenuación de las ondas ultrasónicas en el aire es mayor a frecuencias más altas. Esto significa que las frecuencias ultrasónicas de mayor frecuencia, que se utilizan comúnmente en aplicaciones industriales o de investigación, se atenúan rápidamente a medida que viajan a través del aire. Por lo tanto, se requiere un diseño adecuado de los transductores y una potencia suficiente para asegurar que las ondas ultrasónicas lleguen al objetivo deseado (Müller, 2018).

Efectos de la temperatura y la humedad: La temperatura y la humedad del aire también afectan la propagación de las ondas ultrasónicas. La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas es mayor en condiciones de alta temperatura y humedad, lo que puede influir en la eficacia de la transmisión a través del aire. En aplicaciones de secado, como en la deshidratación de alimentos, la humedad relativa puede afectar la eficiencia de la transmisión de las ondas ultrasónicas, ya que un mayor contenido de humedad en el aire puede alterar la velocidad de propagación de las ondas y la intensidad de la cavitación (Liu, 2016).

Aplicaciones en deshidratación de alimentos: En el contexto de la deshidratación de alimentos, la transmisión de ultrasonidos a través del aire se puede aprovechar para generar efectos acústicos que favorecen la deshidratación de manera no invasiva. Aunque los ultrasonidos suelen ser aplicados directamente sobre el alimento o mediante líquidos, también pueden emplearse para crear ondas acústicas en el aire que interactúan con las

superficies de los productos. Esto mejora la penetración del calor y aumenta la tasa de transferencia de humedad, acelerando el proceso de secado (Liu, 2016).

2.5.3 Contacto directo

La transmisión de ultrasonido por contacto directo se refiere a la aplicación de ondas ultrasónicas directamente sobre el alimento, generalmente a través de un transductor colocado en contacto con la superficie del producto. Este método es eficaz en la mejora de la eficiencia en procesos de deshidratación, ya que facilita la penetración de las ondas acústicas dentro de los alimentos, promoviendo una transferencia de calor y masa más eficiente.

El ultrasonido por contacto directo implica el uso de ondas acústicas de alta frecuencia que son transmitidas a través del transductor hacia el alimento. Cuando las ondas ultrasónicas entran en contacto con el alimento, inducen efectos como la cavitación, la generación de microburbujas y vibraciones a nivel celular, lo que favorece la salida de agua de las células del producto (Yuan, 2020). Esto acelera el proceso de deshidratación al mejorar la transferencia de humedad desde el interior del alimento hacia la superficie.

Uno de los principales beneficios del ultrasonido por contacto directo es la reducción del tiempo de deshidratación. La cavitación inducida por las ondas ultrasónicas crea microcanales dentro de la estructura celular, lo que facilita la salida de agua y mejora la penetración del calor (Ma, 2016). Además, este proceso puede ayudar a preservar los nutrientes sensibles al calor, como las vitaminas y antioxidantes, que pueden ser destruidos en métodos de deshidratación tradicionales, como el secado por aire caliente (Yuan, 2020).

El ultrasonido por contacto directo se ha aplicado con éxito en la deshidratación de diversos productos alimenticios, incluidos vegetales, frutas y hierbas. Por ejemplo, investigaciones han demostrado que la aplicación de ultrasonidos sobre manzanas y tomates antes del secado reduce significativamente el tiempo necesario para eliminar la humedad sin comprometer la calidad del producto final (Liu, 2017). Además, este tratamiento mejora la textura y la capacidad de rehidratación del producto deshidratado, lo que es importante para su calidad en el consumo posterior.

Es crucial que los parámetros operativos, como la frecuencia, la potencia y el tiempo de exposición de las ondas ultrasónicas, sean cuidadosamente controlados. Las frecuencias más

altas pueden causar una mayor atenuación en los alimentos, por lo que se recomienda ajustar estos parámetros en función del tipo de alimento y el objetivo deseado (Ma, 2016). Además, el uso de transductores eficientes que puedan transmitir las ondas de manera uniforme sobre la superficie del alimento es esencial para obtener buenos resultados.

2.6 Cinética de deshidratado

El deshidratado es un proceso muy complejo y se necesitan modelos confiables para predecirlo (Iglesias, 2018). Se representa mediante una curva que muestra la variación de la humedad en el tiempo como se muestra en la figura 2.4, obteniendo resultados que determinan el tiempo necesario para evaluar el tamaño del deshidratador y establecer las condiciones de operación (Roberti, 2011).

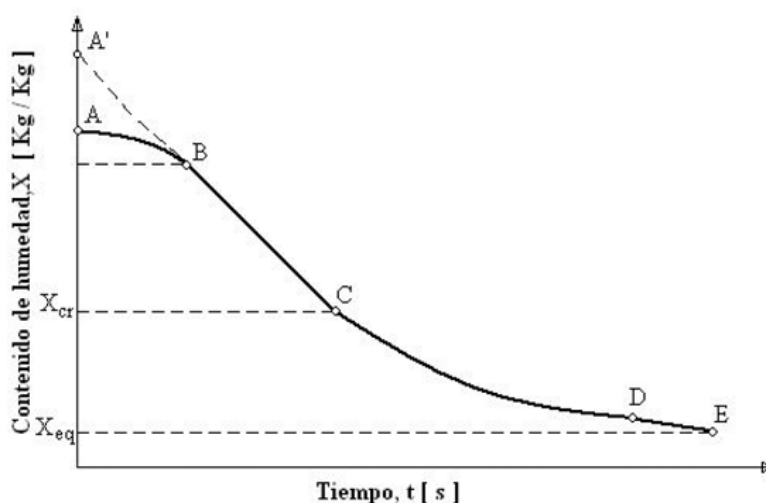


Fig. 2.4 Curva de contenido de humedad (X) como función del tiempo, condiciones de secado constantes. Nota: Escala creada por elaboración de Geankoplis, 2016.

Lo que permite normalizar las curvas de secado y formular modelos generales mediante datos experimentales es haciendo uso del contenido de humedad adimensional, MR, para desarrollarlos, la humedad adimensional está dada por la ecuación 2.1:

$$MR = \frac{W - W_e}{W_o - W_e}$$

Ecuación 2.1 Relación para la humedad adimensional

W representa el contenido de humedad en el alimento a un tiempo determinado, W_o el contenido de humedad inicial, y W_e el contenido de humedad al equilibrio, éste último dado por interpretación de datos experimentales.

2.7 Modelado del proceso de deshidratado

El modelado del proceso de deshidratación es esencial para optimizar las condiciones del proceso, predecir el comportamiento de los alimentos durante el secado y mejorar la eficiencia energética. A través de modelos matemáticos y computacionales, es posible simular el comportamiento de la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado, lo que permite ajustar parámetros como la temperatura, el tiempo de exposición y la velocidad de flujo del aire. Estos modelos son fundamentales para predecir la calidad del producto final, considerando factores como la textura, la retención de nutrientes y la reducción del tiempo de secado.

Existen diversos enfoques para modelar el proceso de deshidratación, entre los cuales se incluyen modelos empíricos, físicos y numéricos. Los modelos empíricos se basan en la observación experimental de los datos, y se utilizan comúnmente debido a su simplicidad y capacidad de proporcionar predicciones rápidas. Estos modelos suelen estar representados por ecuaciones que describen la relación entre el tiempo y las variables de operación, como la temperatura o la humedad (Kumar, 2017). Sin embargo, los modelos físicos y numéricos, que se basan en principios de transferencia de calor y masa, ofrecen una representación más precisa y detallada del proceso (Cai, 2018).

El proceso de deshidratación involucra principalmente dos mecanismos: la transferencia de calor desde el ambiente hacia el alimento y la transferencia de masa de la humedad del interior del producto hacia la superficie. Los modelos que describen estos procesos se basan en las ecuaciones de difusión de calor y masa. En el caso de los alimentos porosos, como las frutas y verduras, se utilizan modelos que tienen en cuenta tanto la conductividad térmica del material como las propiedades de difusión de la humedad dentro de la estructura celular (Liu, 2018).

Uno de los modelos más utilizados para describir la transferencia de calor y masa en el proceso de deshidratación es el modelo de difusión de agua en la matriz del alimento. Este modelo asume que el agua se mueve desde el interior hacia la superficie del producto por difusión, y que las tasas de evaporación y la intensidad del flujo de calor son las fuerzas que impulsan el proceso de deshidratación (Li & Wang, 2020).

El modelado del proceso de deshidratación tiene aplicaciones clave en la industria alimentaria, ya que permite reducir costos y mejorar la calidad de los productos. Al entender cómo varían las condiciones de secado con diferentes parámetros, los modelos permiten optimizar el uso de energía y tiempo en el proceso de deshidratación, lo cual es particularmente importante en aplicaciones comerciales a gran escala. Además, los modelos permiten predecir la calidad del producto final, incluyendo la textura y la preservación de los nutrientes, lo que es esencial para la aceptación del consumidor (Wang, 2020).

La mayoría de las ecuaciones derivadas de modelos teóricos utilizados en alimentos suelen basarse en la ley de Fick (Delfiya, 2021). Las ecuaciones empíricas comúnmente utilizadas para modelar la cinética de deshidratado son: Newton, Henderson-Pabis, Page, Page modificada, logarítmica, dos ecuaciones, Midilli-Kucuk. Aunque la mayoría de los modelos son empíricos, se basan principalmente en el modelo de difusión de la segunda ley de Fick (Deng, 2017). Mediante modelos matemáticos se puede estimar el tiempo necesario para reducir el contenido de humedad del producto bajo diferentes condiciones y temperaturas ideales, mejorando así la eficiencia del proceso (Cárcel, 2011).

En la tabla 2.4 se muestra una lista de los modelos empíricos que se utilizan para describir la cinética del proceso de deshidratado de alimentos.

Tabla 2.4 Modelos empíricos del deshidratado de alimentos. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Modelo	Ecuación
<i>LEWIS NEWTON</i>	$MR = e^{-kt}$
<i>MIDILLI</i>	$MR = ae^{-kt^n} + bt$
<i>PAGE MODIFICADO</i>	$MR = e^{-kt^n}$
<i>PAGE MODIFICADO II</i>	$MR = e^{-\left(k\left(\frac{t}{L^2}\right)^n\right)}$

<i>EC DE DIFUSIÓN DE FICK</i>	$MR = e^{-\left(k\left(\frac{t}{L^2}\right)\right)}$
<i>HENDERSON Y PABIS</i>	$MR = ae^{-kt}$
<i>LOGARÍTMICO</i>	$MR = ae^{-kt} + b$
<i>DOS TERMINOS</i>	$MR = ae^{-kt} + be^{-mt}$
<i>DOS TERMINOS EXPONENCIAL</i>	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-gt}$

Las letras **a**, **b**, **g**, **L**., **m** y **n** son coeficientes y **t** es el tiempo de secado. El coeficiente **k** se utiliza para comparar la cinética del deshidratado; **k** tiene una relación directa con la velocidad de deshidratado. (Pandiselvam, 2023), (García-Pérez, 2011).

2.8 Diseño y Análisis de experimentos

El Diseño y Análisis de Experimentos (DAE) es una herramienta fundamental en la estadística aplicada a la investigación experimental, usada para optimizar procesos y obtener información valiosa sobre cómo los factores afectan la respuesta en sistemas complejos. Uno de los enfoques más útiles es el diseño factorial fraccionado de dos niveles, que permite explorar de manera eficiente los efectos de varios factores con un número reducido de experimentos.

En este caso, abordaremos el diseño factorial fraccionado $2^{(4-1)}$, que es un diseño con 4 factores y un diseño fraccionado $2^{(4-1)}$, es decir, un diseño que representa una fracción de un diseño factorial completo de 4 factores con 2 niveles cada uno. Según Montgomery (2017), un diseño factorial completo para 4 factores tendría $2^4 = 16$ combinaciones, mientras que el diseño fraccionado $2^{(4-1)}$ implica realizar solo $2^3 = 8$ experimentos, lo que reduce considerablemente el número de combinaciones necesarias (Montgomery, 2017).

2.8.1 Diseño Factorial Fraccionado $2^{(4-1)}$

Un diseño factorial de 4 factores y 2 niveles implica que cada factor tiene dos niveles (por ejemplo, bajo = -1, alto = +1). El número total de combinaciones de los 4 factores en un diseño factorial completo sería:

$$2^4 = 16 \text{ combinación de los factores.}$$

Sin embargo, en el caso de un diseño fraccionado $2^{(4-1)}$, solo se realiza una fracción de estos experimentos. El exponente "-1" indica que el diseño incluye 1/2 del total de las combinaciones posibles, es decir, solo 8 experimentos (porque $\frac{2^4}{2^1} = 2^3 = 8$) (Montgomery, 2017).

2.8.1.1 Estructura del Diseño Factorial Fraccionado $2^{(4-1)}$

1. **Factores:** Este diseño involucra 4 factores (denotados comúnmente como A, B, C, D).
2. **Niveles de los Factores:** Cada uno de los factores tiene 2 niveles (-1 y +1), representando las condiciones baja y alta para cada factor.
3. **Número de Experimentos:** El diseño fraccionado tiene $2^{4-1} = 8$ experimentos. Esto significa que se seleccionan solo una fracción de todas las posibles combinaciones.
4. **Asignación de Combinaciones:** En un diseño factorial fraccionado, algunas combinaciones de factores no se realizan. Para construir este diseño, se utiliza una matriz de fraccionamiento que selecciona las combinaciones que se van a realizar (Montgomery, 2017).

2.8.1.2 Ventajas del Diseño Factorial Fraccionado $2^{(4-1)}$

El diseño factorial fraccionado tiene varias ventajas sobre el diseño factorial completo:

1. **Reducción de Costos y Tiempo:** Reducir el número de experimentos de 16 a 8 permite obtener información significativa de manera más económica y eficiente, especialmente cuando los recursos son limitados.
2. **Exploración de Interacciones:** Aunque algunos efectos secundarios (como interacciones de mayor orden) se omiten, el diseño permite identificar los efectos principales de los factores y algunas interacciones de primer orden (Montgomery, 2017).
3. **Uso en Estudios Preliminares:** Este tipo de diseño es ideal para investigaciones exploratorias donde se desea obtener una visión inicial de los factores que más influyen en el proceso (Montgomery, 2017).

2.8.1.3 Análisis de un Diseño Factorial Fraccionado $2^{(4-1)}$

El análisis de un diseño factorial fraccionado de $2^{(4-1)}$ se realiza utilizando la técnica del Análisis de Varianza (ANOVA). Los pasos básicos para realizar el análisis incluyen:

1. **Cálculo de la Media General:** Se calcula el promedio de todas las observaciones (respuestas).
2. **Cálculo de los Efectos Principales:** Se determinan los efectos principales de cada factor comparando los promedios de las respuestas de los niveles bajos y altos de cada factor.
3. **Identificación de Interacciones:** Las interacciones entre factores pueden ser estimadas, aunque algunas de estas interacciones de mayor orden pueden ser confundidas debido al fraccionamiento (Montgomery, 2017).
4. **Pruebas de Hipótesis:** Se realizan pruebas estadísticas para determinar si los efectos principales y las interacciones son significativamente diferentes de cero.
5. **Estimación de los Efectos Confundidos:** En un diseño factorial fraccionado, algunos efectos pueden confundirse debido al número reducido de experimentos. Estos efectos se deben identificar y, en algunos casos, se pueden eliminar si no son significativos (Montgomery, 2017).

2.9 Análisis de regresión no lineal

El análisis de regresión no lineal se utiliza cuando la relación entre las variables dependiente e independiente no puede ser modelada adecuadamente mediante una función lineal. Este tipo de análisis es fundamental para explorar relaciones complejas, como las que se encuentran en el comportamiento de sistemas físicos, biológicos o económicos (Montgomery, 2017, p. 472). En este sentido, se utilizan diferentes modelos no lineales, como los modelos exponenciales, logarítmicos y de tipo potencial, para representar estas relaciones (Kutner, Nachtsheim, Neter, & Li, 2005).

El método de los mínimos cuadrados no lineales (NLS) es el principal enfoque para estimar los parámetros en modelos no lineales. En este proceso, se minimiza la suma de los cuadrados de los residuos entre los valores observados y los valores predichos por el modelo ajustado

(Montgomery, 2017). Además, para ajustar parámetros en estos modelos, se utilizan algoritmos iterativos, como el método de Gauss-Newton y el método de Levenberg-Marquardt. Estos métodos son fundamentales para garantizar que el modelo no lineal se ajuste de manera eficiente a los datos (Seber & Wild, 1989).

Las pruebas estadísticas que se realizan en regresión no lineal incluyen la prueba t para evaluar la significancia de cada parámetro estimado y la prueba F para comprobar la validez global del modelo ajustado. Estas pruebas permiten evaluar si los parámetros son significativamente diferentes de cero y si el modelo en su conjunto explica adecuadamente la variabilidad observada en los datos (Montgomery, 2017).

El coeficiente de determinación R^2 y el análisis de residuos son comúnmente usados para evaluar la bondad del ajuste en regresión no lineal. El primero mide la proporción de variabilidad explicada por el modelo, mientras que el análisis de residuos verifica que no exista un patrón sistemático en los errores del modelo, lo que indicaría un ajuste inadecuado (Kutner et al., 2005).

2.9.1 Métodos de Estimación

En la regresión no lineal, la estimación de los parámetros generalmente se realiza mediante algoritmos iterativos, ya que las ecuaciones de los modelos no lineales no tienen una solución analítica directa.

2.9.1.1 Método de los Mínimos Cuadrados No Lineales (NLS)

El método de los mínimos cuadrados no lineales es el más utilizado para estimar los parámetros en modelos no lineales. Este método minimiza la suma de los cuadrados de los residuos entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.

$$\theta = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta))^2$$

Ecuación 2.1 Relación para cálculo de NLS

Donde y_i es el valor observado, $f(x_i, \theta)$ es el valor predicho por el modelo con parámetros θ y n es el número de observaciones.

2.9.1.2 Método de Gauss-Newton

El método de Gauss-Newton es una técnica iterativa utilizada para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales. Este algoritmo utiliza la aproximación lineal de la función no lineal para actualizar los parámetros en cada iteración. Es eficiente para modelos no lineales suaves, pero puede no ser adecuado si el modelo tiene una forma no suave o si los parámetros iniciales están lejos del valor óptimo.

2.9.1.3 Método de Levenberg-Marquardt

El método de Levenberg-Marquardt es una mejora del método de Gauss-Newton. Combina el método de Gauss-Newton con un enfoque de descenso de gradiente. Este método es más robusto que el de Gauss-Newton, ya que ajusta la cantidad de regularización según el progreso del ajuste. Se usa ampliamente en problemas de ajuste no lineal debido a su capacidad para manejar situaciones difíciles como parámetros iniciales malos o funciones altamente no lineales.

2.10 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación R^2 es una medida estadística utilizada para evaluar qué tan bien un modelo de regresión se ajusta a los datos observados. Se trata de una proporción de la variabilidad total de los datos que es explicada por el modelo. En otras palabras, R^2 indica qué tan bien los valores predichos por el modelo se acercan a los valores observados.

2.10.1 Definición Matemática del Coeficiente de Determinación R^2

El coeficiente de determinación R^2 se calcula como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs,i} - Y_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs})^2}$$

Ecuación 2.2 Relación para cálculo de coeficiente de determinación

Dónde:

$Y_{obs,i}$ son los valores observados de la variable dependiente (los valores reales o experimentales).

$Y_{pred,i}$ son los valores predichos por el modelo.

$\bar{Y}_{obs}$ es la media de los valores observados de la variable dependiente.

n es el número total de observaciones.

2.10.1.1 Interpretación de R^2 :

$R^2 = 1$: El modelo predice perfectamente los valores observados. Esto significa que el 100% de la variabilidad en los datos es explicada por el modelo.

$R^2 = 0$: El modelo no explica nada de la variabilidad en los datos. Los valores predichos no tienen relación con los valores observados.

$0 < R^2 < 1$: El modelo explica una fracción de la variabilidad de los datos, pero no completamente.

En general, cuanto más cerca esté R^2 de 1, mejor será el ajuste del modelo a los datos.

2.10.1.2 Cálculo de R^2 :

1. Suma de los cuadrados de los residuos (SSR):

$$SSR = \sum_{i=1}^n (Y_{obs,i} - Y_{pred,i})^2$$

Ecuación 2.3 Relación de SSR

Esta es la variabilidad no explicada por el modelo.

2. Suma total de los cuadrados (SST):

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs})^2$$

Ecuación 2.4 Relación de SST

Esta es la variabilidad total de los datos.

3. **Cálculo de R^2 :** Usando las sumas de cuadrados obtenidas:

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST}$$

Ecuación 2.5 Relación para coeficiente de determinación

Capítulo 3 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

1. Identificación de la variable de respuesta y los factores de entrada y sus niveles alto y bajo.
2. Diseño de experimentación exploratoria o “screening”.
3. Realización de experimentos de acuerdo al diseño definido.
4. Análisis estadísticos de resultados.

3.1 Identificación de variables y factores

Si identificaron las principales variables independientes (entradas), las de respuesta y las factores controlables y no controlables del proceso de deshidratado por convección forzada asistido por ultrasonido, US, y se identificaron los rangos más comúnmente utilizados y se definieron los valores a utilizar en la experimentación. En las tablas 3.1 a la 3.4 se muestran los factores y las variables de respuestas, así como sus rangos e información complementaria utilizada en la experimentación.

Tabla 3.1 Variables independientes, entradas. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Consc.	Variable	Rango/Opciones	Símbolo
1	Temperatura del aire	Tamb-100°C	Ta
2	Velocidad del aire	0-4 m/s	Va
3	Ultrasonido	Frecuencia: 40 kHz, Potencia: 100-600 W	F _{US}
4	Producto a deshidratar	Frutas, verduras	M

Tabla 3.2 Factores controlables. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Consc.	Variable	Valor/definición
1	Generador de US (transductor, placa vibratoria, cuerno)	Transductores
2	Forma de aplicación del US: Contacto directo o aerotransportado; continuo o intermitente	Aerotransportado y continuo
3	Tiempo de irradiación	Durante todo el proceso
4	Forma de las muestras	Rebanada cilíndrica
5	Tamaño de las muestras	60 de diámetro y 6 mm de espesor
6	%H ₂ O inicial de las muestras	Como se adquiriera
7	Colocación de las muestras dentro de la cámara	Charola con malla
8	Pretratamiento de las muestras	Ninguno
3	Distancia de las muestras con la fuente de ultrasonido	5 cm

Tabla 3.3 Factores no controlables. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Consc.	Variable	Símbolo
1	Temperatura ambiente	T _{amb}
2	Humedad del ambiente	%H _{ra}
3	Humedad de la cámara	%H _{rc}

Tabla 3.4 Variables dependientes, salidas. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Consc.	Variable	Símbolo
1	Peso de la muestra en función del tiempo	W_m
2	Temperatura de la muestra en función del tiempo	T_m
3	Consumo de energía en función del tiempo	C_E
4	Consumo de energía acumulado	C_{EA}

De las cuatro variables dependientes identificadas solo se utilizó el peso de muestra en función del tiempo para el análisis de resultados, dado que esta variable está asociada a la cinética del deshidratado y el alcance del presente trabajo se limita al estudio cinético.

3.2 Diseño de experimentación Exploratoria

Se identificaron 4 variables independientes, 8 factores controlables, 3 factores no controlables y 3 variables dependientes. En la figura 3.1, se muestran en un diagrama.

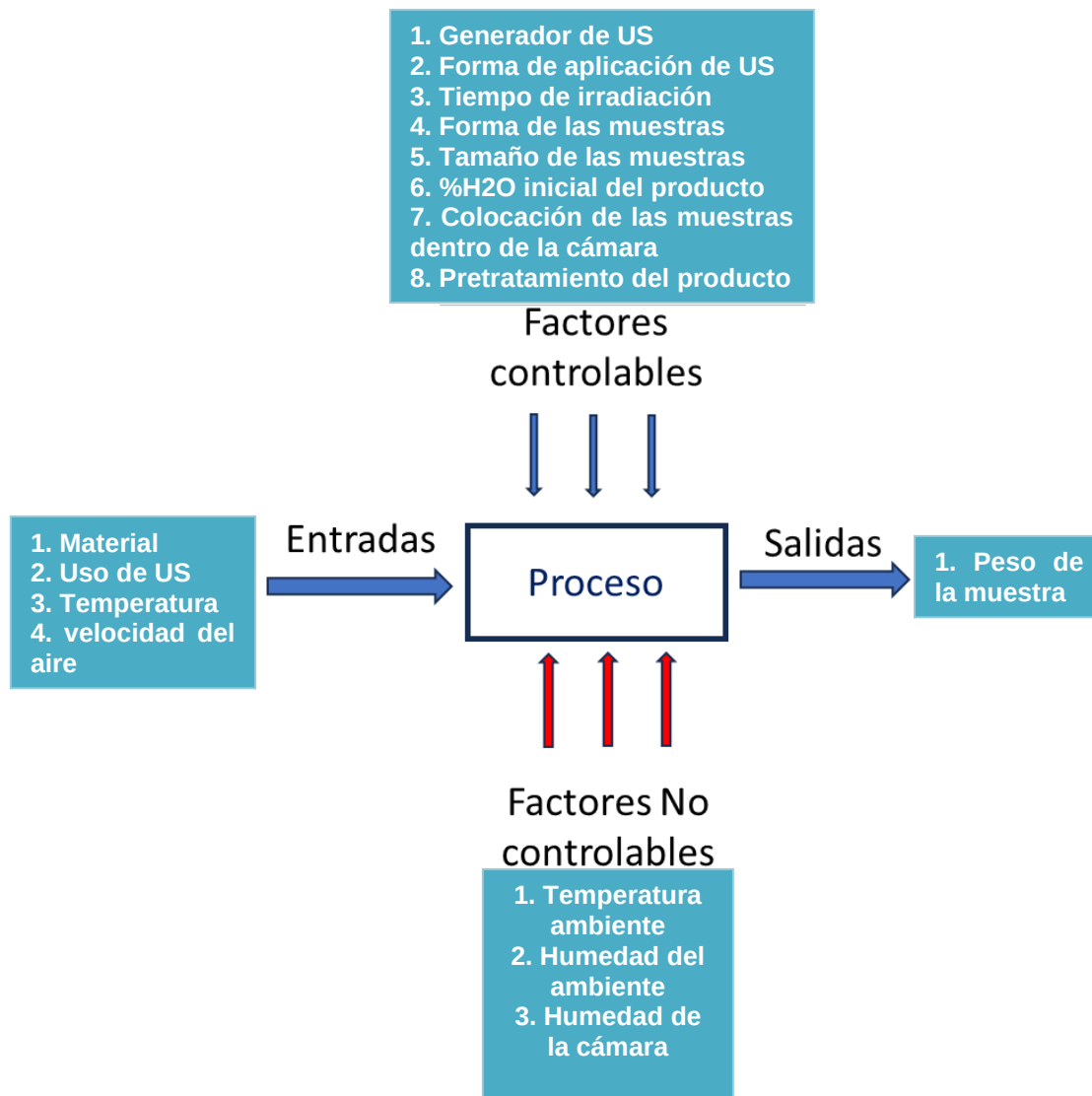


Fig. 3.1 Diagrama del proceso de deshidratado por convección forzada asistido con US. Nota: Diagrama creado por elaboración propia Sánchez, C. 2024.

Considerando el número de variables independientes, se utilizará un diseño de experimentos factorial fraccionario a dos niveles tipo $2^{(4-1)}$ con resolución IV. En la Tabla 3.6 se muestran las relaciones de alías con los valores de cada nivel con relación a la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de cada nivel. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Nivel	+1 alto
	-1 bajo

Tabla 3.6 Relaciones de alías para cada variable de proceso. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Plan de experimentos				
Experimento	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	-	-	+	+
3	-	+	-	+
4	-	+	+	-
5	+	-	-	+
6	+	-	+	-
7	+	+	-	-
8	+	+	+	+

Para este diseño experimental se requieren 8 corridas experimentales.

Tabla 3.7 Niveles de las variables independientes. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Variables independientes (entradas)				
	Consc.	Variable	Nivel bajo	Nivel alto
A	1	Temperatura del aire, °C	30	50
B	2	Velocidad del aire, m/s	2	4
C	3	Uso del US	sin	con
E	4	Producto a deshidratar	Nopal	Manzana

Los niveles han sido definidos de acuerdo con lo reportado por diversos autores en sus publicaciones, así como los datos típicos utilizados en el deshidratado por convección forzada.

1. **Temperatura del aire.** En la literatura revisada se utilizan temperaturas que van de los 30 a 70 °C, siendo muy reiterativo el uso de 40°C. En diversas publicaciones comerciales, deshidratadoras VINCON, manual deshidratador Hamilton Beach, por ejemplo, se recomienda 40-65 °C para distintas frutas, verduras y hierbas.
2. **Velocidad del aire.** En la literatura revisada se reportan velocidades de entre 0.4 a 6 m/s, siendo más común el uso de 1 m/s. En equipos industriales se utilizan 3 m/s como referencia, dato proporcionado por diseñador de deshidratadoras industriales de la empresa VINCON, S.A. de C.V.
3. **Tiempo de deshidratado.** En la literatura revisada se reporta que se utilizan 2.8 a 12 hrs dependiendo de producto a deshidratar, VINCON recomienda de 8 a 16 hrs para diferentes frutas y chiles; 7 hrs para manzana. El manual del deshidratador Hamilton Beach 32100A recomienda 6 a 25 hrs para frutas, de 5 a 16 hrs para verduras y de 4-7 hrs para hierbas. Para manzana en rebanadas de 6mm a 60°C de 8-10 hrs.
4. **Distancia entre fuente de US y producto.** En la literatura se reportan de 6 a 30 cm. Por el tamaño y diseño del equipo a utilizar, se seleccionaron los niveles altos y bajos mostrados en la tabla 1.
5. **Frecuencia del US.** De acuerdo con lo reportado en la literatura, se utiliza muy comúnmente alrededor de 20 kHz, 21.7 es el más común, en algunas investigaciones se reportan hasta 40 kHz, dependiendo del producto a deshidratar. Aguilar Torres utilizó: 34 kHz para manzana y 70 kHz para tomate. Otros autores usan entre 20 y 26 kHz para manzana, para nopal no se reporta.
6. **Potencia del US.** En la literatura especializada se reportan de 15 a 200 W, más comúnmente entre 50 y 200 y no depende del producto a deshidratar.
7. **Intensidad del US.** En la literatura se reportan niveles desde 120 hasta 170 db; en la modelación realizada con COMSOL Multiphysics los resultados mejores se logran entre 180-200 db.

En la literatura especializada se reportan los resultados de la deshidratación de varios productos alimenticios: kiwi, fresa, frambuesa, tomate, zanahoria, piel de limón,

chícharo, berenjena, pimiento verde, mandioca, papa, ajo, pistache, maíz, hígado de cerdo, entre otros. La manzana es el producto más estudiado y se ha elegido referencia, por otro lado, se reportado que a porosidad es la característica del material que más influye en la efectividad el US. Las estructuras blandas y de poros abiertos son más propensas a los efectos mecánicos de los ultrasonidos, mientras que los materiales con una estructura dura y compacta son menos afectados por la energía acústica, por lo que adicional a la manzana se utilizará nopal porque su estructura es diferente y no ha sido estudiado.

3.3 Diseño del plan experimentos

Para el desarrollo del plan de experimentos se hace uso de las tablas 3.5, 3.6 y 3.7, en donde ya se tienen determinados cada uno de los niveles, tanto alto como bajo asociado a cada una de las variables de proceso. Ya definida cada una de las variables con su respectivo nivel, se sustituyen los valores positivos y negativos de la tabla 3.6 con el de la variable correspondiente, quedando como resultado la tabla 3.9 del plan de experimentos.

Tabla 3.8 Plan de experimentos. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Plan de experimentos				
Experimento	A	B	C	D
1	30	2	sin	Nopal
2	30	2	con	Manzana
3	30	4	sin	Manzana
4	30	4	con	Nopal
5	50	2	sin	Manzana
6	50	2	con	Nopal
7	50	4	sin	Nopal
8	50	4	con	Manzana

Posteriormente se hace una aleatorización de cada uno de los experimentos para tener una mejor interpretación de los resultados de cada una experimentación, teniendo como resultado un nuevo acomodo para cada una de sus corridas. En la tabla 3.10 se muestra el orden en el que se harán dichas experimentaciones.

Tabla 3.9 Plan de experimentos aleatorizados. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Plan de experimentos					
Experimento	A	B	C	D	Orden
1	30	2	sin	Nopal	Primero
2	30	2	con	Manzana	Quinto
3	30	4	sin	Manzana	Tercero
4	30	4	con	Nopal	Octavo
5	50	2	sin	Manzana	Cuarto
6	50	2	con	Nopal	Séptimo
7	50	4	sin	Nopal	Segundo
8	50	4	con	Manzana	Sexto

3.4 Procedimiento para pruebas de deshidratado

1. Encender el equipo de deshidratado estableciendo la temperatura de operación y la velocidad de aire.
2. Dejar encendido el equipo durante un tiempo para que se estabilice.
3. Limpieza del producto a deshidratar:
Lavado con agua y ayuda de un cepillo suave para remover cualquier suciedad adherida.
Enjuague con agua limpia.
Secado con un trapo limpio o toallas de papel.
4. Corte:
Manzana: Rodajas transversales de 6 ± 2 mm de espesor, obtenidas con rebanadora tipo mandolina.

Nopal: rodajas redondas de 6 ± 5 mm de espesor, obtenida por corte con molde circular de 60 mm de diámetro interno.

5. Colocar la canastilla dentro de la cámara de deshidratado para tarar el medidor de peso para que este comience en 0.000 kg.
6. Retirar la canastilla para colocar cada una de las muestras en la charola.
7. Colocar la canastilla con las muestras dentro de la cámara de deshidratado.
8. Introducir un termopar dentro de una muestra para medir su temperatura.
9. Una vez colocada la canastilla, verificar que el medidor de peso no tenga fluctuaciones para posteriormente cerrar la cámara y cuando ésta se encuentre estable, volver a tarar para que vuelva a empezar en 0.000 kg.
10. Encender el equipo ya con las condiciones de operación establecidas de velocidad de aire y temperatura.
11. Registrar datos obtenidos cada 15 minutos hasta que el peso deje de ser variable. Asumiendo de tal manera que se llegó al equilibrio.

Para el uso del ultrasonido:

12. Encender el equipo de ultrasonido.
13. Asignarle el tiempo de operación del ultrasonido.
14. Cambiar el agua de enfriamiento cada 45 minutos para evitar que el equipo se sobrecaliente.

Para las pruebas de deshidratado, se empleó un equipo construido por el Dr. José Luis Camacho con recirculación de aire siendo así un sistema cerrado para aprovechar y optimizar la transferencia de calor con el material, reciclando el aire utilizado para la evaporación del agua del material a deshidratar. El equipo consta de sensores de humedad, de velocidad y de temperatura; que ayudan a recolectar los datos de interés durante el proceso. También tiene una celda de carga conectada a un indicador de peso, donde se refleja la variación de peso respecto al tiempo de proceso. El equipo se muestra en la figura 3.2.



Fig. 3.2 Equipo de deshidratado a nivel laboratorio. Nota: Fotografía tomada por elaboración propia Sánchez, C. 2024.

En las figuras 3.3 y 3.4 se aprecian los cambios que sufren un par de muestras de manzana durante su deshidratado sin uso y con uso de US, respectivamente, desde cómo se observan antes de que inicie el proceso y como se ve una vez terminado el mismo.



Fig. 3.3 Muestras de manzana antes y después de su deshidratado. Nota: Fotografía tomada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.



Fig. 3.4 Muestras de manzana antes y después de su deshidratado. Nota: Fotografía tomada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Capítulo 4 RESULTADOS

4.1 Pruebas preliminares

4.1.1 Primera prueba preliminar

En la tabla 4.1 se muestran las condiciones iniciales utilizada en la primera prueba preliminar.

Tabla 4.1 Datos de operación. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales	
Peso de la charola	0.585 kg
Peso de la muestra	217 gr
Temperatura ambiente	23.2 °C
Temperatura de Operación	45 °C
Producto	Manzana
Velocidad de aire	2 m/s
Humedad inicial del material	85%

En la tabla 4.2 se muestran los datos de peso vs tiempo registrados durante la primera prueba preliminar, así como los valores calculados del contenido de humedad en la muestra y la humedad adimensional.

Tabla 4.2 Datos obtenidos durante la primera prueba preliminar. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo de deshidratado, min	Peso, gr	Humedad en la muestra, %*	MR (Exp)
0	217	100	1
18	215	99.0783	0.9852
30	205	94.47	0.9111
40	194	89.4009	0.8296
52	184	84.7926	0.7556
60	178	82.0276	0.7111
70	172	79.2627	0.6667
80	167	76.9585	0.6296
95	158	72.8111	0.563
110	153	70.5069	0.5259
120	150	69.1244	0.5037
145	139	64.0553	0.4222
155	136	62.6728	0.4
167	132	60.8295	0.3704
176	129	59.447	0.3481
182	127	58.5253	0.3333
214	118	54.3779	0.2667
229	115	52.9954	0.2444
251	110	50.6912	0.2074
259	110	50.6912	0.2074
283	106	48.8479	0.1778
320	100	46.0829	0.1333
340	98	45.1613	0.1185
367	96	44.2396	0.1037
379	95	43.7788	0.0963
402	93	42.8571	0.0815
419	91	41.9355	0.0667
440	86	39.6313	0.0296
460	85	39.1705	0.0222
556	82	37.788	0

***El porcentaje de humedad indicado es respecto al contenido inicial de humedad en la muestra.**

En la Fig. 4.1 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado.

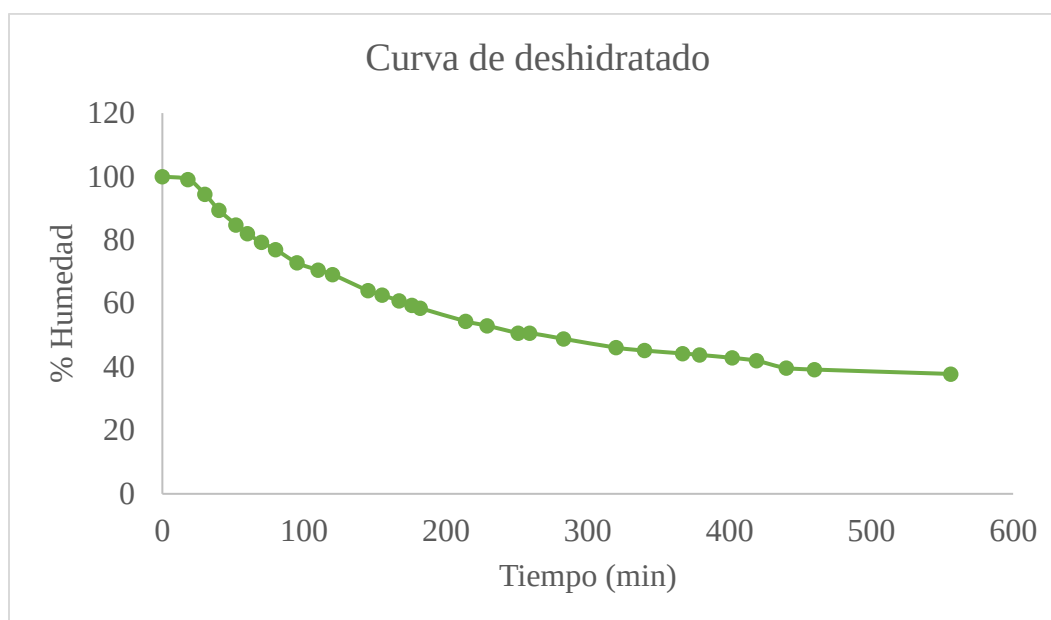


Fig. 4.1 Curva de deshidratado de la primera prueba preliminar (Sánchez, 2025).

En la tabla 4.3 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.2 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.4 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la primera prueba preliminar.

Tabla 4.3 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la primera prueba preliminar. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	100	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
18	99.0783	0.9852	0.8979	0.9174	0.9207	0.9207	0.8979	0.8979	0.8979	0.8979	0.9134
30	94.4700	0.9111	0.8356	0.8597	0.8639	0.8639	0.8356	0.8356	0.8356	0.8356	0.8574
40	89.4009	0.8296	0.7871	0.8126	0.8173	0.8173	0.7871	0.7871	0.7871	0.7871	0.8120
52	84.7926	0.7556	0.7326	0.7581	0.7629	0.7629	0.7326	0.7326	0.7326	0.7326	0.7593
60	82.0276	0.7111	0.6983	0.7232	0.7279	0.7279	0.6983	0.6983	0.6983	0.6983	0.7253
70	79.2627	0.6667	0.6577	0.6811	0.6857	0.6857	0.6577	0.6577	0.6577	0.6577	0.6843
80	76.9585	0.6296	0.6195	0.6410	0.6453	0.6453	0.6195	0.6195	0.6195	0.6195	0.6449
95	72.8111	0.5630	0.5663	0.5843	0.5880	0.5880	0.5663	0.5663	0.5663	0.5663	0.5889
110	70.5069	0.5259	0.5177	0.5319	0.5350	0.5350	0.5177	0.5177	0.5177	0.5177	0.5365
120	69.1244	0.5037	0.4876	0.4992	0.5018	0.5018	0.4876	0.4876	0.4876	0.4876	0.5037
145	64.0553	0.4222	0.4199	0.4251	0.4265	0.4265	0.4199	0.4199	0.4199	0.4199	0.4288
155	62.6728	0.4000	0.3955	0.3983	0.3993	0.3993	0.3955	0.3955	0.3955	0.3955	0.4015
167	60.8295	0.3704	0.3681	0.3681	0.3686	0.3686	0.3681	0.3681	0.3681	0.3681	0.3707
176	59.4470	0.3481	0.3488	0.3469	0.3471	0.3471	0.3488	0.3488	0.3488	0.3488	0.3490
182	58.5253	0.3333	0.3365	0.3334	0.3333	0.3333	0.3365	0.3365	0.3365	0.3365	0.3351
214	54.3779	0.2667	0.2778	0.2691	0.2680	0.2680	0.2778	0.2778	0.2778	0.2778	0.2691
229	52.9954	0.2444	0.2540	0.2431	0.2416	0.2416	0.2540	0.2540	0.2540	0.2540	0.2423
251	50.6912	0.2074	0.2226	0.2092	0.2072	0.2072	0.2226	0.2226	0.2226	0.2226	0.2074
259	50.6912	0.2074	0.2122	0.1980	0.1959	0.1959	0.2122	0.2122	0.2122	0.2122	0.1959
283	48.8479	0.1778	0.1838	0.1678	0.1653	0.1653	0.1838	0.1838	0.1838	0.1838	0.1649
320	46.0829	0.1333	0.1473	0.1296	0.1268	0.1268	0.1473	0.1473	0.1473	0.1473	0.1258

340	45.1613	0.1185	0.1307	0.1125	0.1097	0.1097	0.1307	0.1307	0.1307	0.1307	0.1085
367	44.2396	0.1037	0.1112	0.0929	0.0900	0.0900	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.0887
379	43.7788	0.0963	0.1035	0.0853	0.0824	0.0824	0.1035	0.1035	0.1035	0.1035	0.0810
402	42.8571	0.0815	0.0902	0.0723	0.0695	0.0695	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0681
419	41.9355	0.0667	0.0815	0.0640	0.0613	0.0613	0.0815	0.0815	0.0815	0.0815	0.0598
440	39.6313	0.0296	0.0718	0.0550	0.0524	0.0524	0.0718	0.0718	0.0718	0.0718	0.0510
460	39.1705	0.0222	0.0637	0.0475	0.0451	0.0451	0.0637	0.0637	0.0637	0.0637	0.0437
556	37.7880	0.0000	0.0359	0.0235	0.0217	0.0217	0.0359	0.0359	0.0359	0.0359	0.0207

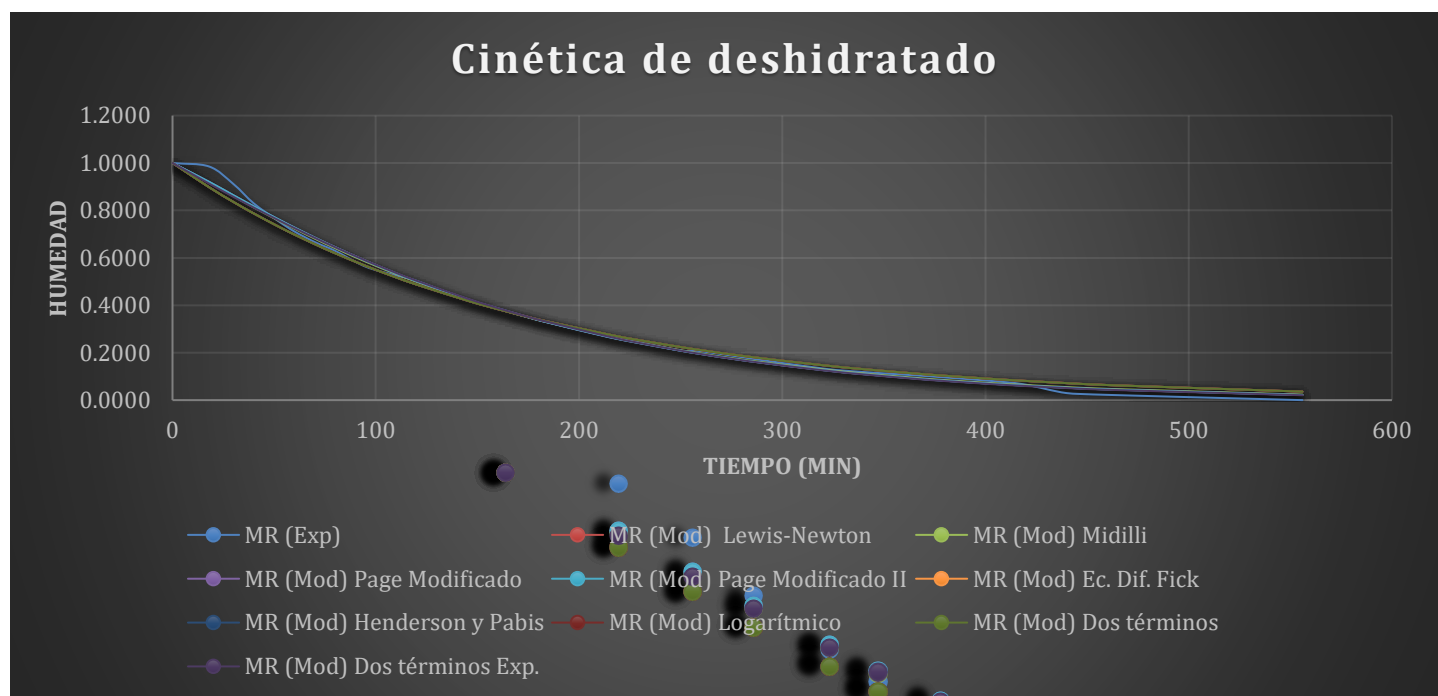


Fig. 4.2 Curva de deshidratado normalizada de la primera prueba preliminar para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.4 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la primera prueba preliminar. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Parámetros									Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0060		0.9894	0.0224
MIDILLI	40	1.0000	0.0000				0.0036	1.1000	0.9957	0.0110
PAGE MODIFICADO	40						0.0033	1.1185	0.9959	0.0107
PAGE MODIFICADO II	40	1.0000					0.0033	1.1185	0.9959	0.0107
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	1.0000			0.6923		0.0041		0.9913	0.0224
HENDERSON Y PABIS	40	1.0000					0.0060		0.9910	0.0224
LOGARÍTMICO	40	1.0000	0.0000				0.0060		0.9917	0.0224
DOS TERMINOS	40	0.9495	0.0000			1.3394	0.1155		0.9910	0.0224
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	3.9213	1.1490				0.0086		0.9950	0.0124

4.1.2 Segunda prueba preliminar.

En la tabla 4.5 se encuentran las condiciones iniciales utilizada en la segunda prueba preliminar.

Tabla 4.5 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales	
Peso de la charola	0.585
Peso de la muestra	0.361
Temperatura ambiente	23.2
Temperatura de Operación	40
Producto	Manzana
Velocidad de aire	2 m/s
Humedad inicial del material	85%

En la tabla 4.6 se muestran los datos de peso vs tiempo registrados durante la primera prueba preliminar, así como los valores calculados del contenido de humedad en la muestra y la humedad adimensional.

Tabla 4.6 Datos obtenidos durante la segunda prueba preliminar. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo min	Humedad Del ambiente	Pérdida de humedad de la muestra, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad en la muestra
0	41	0	0.361	100
15	28	0.014	0.347	96.1219
30	26	0.03	0.331	91.6898
45	32	0.046	0.315	87.2576
60	31	0.06	0.301	83.3795
75	23	0.072	0.289	80.0554
90	28	0.082	0.279	77.2853
105	28	0.093	0.268	74.2382
120	28	0.099	0.262	72.5762
135	25	0.105	0.256	70.9141
150	24	0.112	0.249	68.9751
165	24	0.116	0.245	67.867
180	23	0.124	0.237	65.651
195	22	0.129	0.232	64.2659
210	23	0.136	0.225	62.3269
225	22	0.142	0.219	60.6648
240	22	0.15	0.211	58.4488
255	21	0.155	0.206	57.0637
270	21	0.161	0.2	55.4017
285	21	0.166	0.195	54.0166
300	21	0.171	0.19	52.6316
315	21	0.176	0.185	51.2465
330	20	0.181	0.18	49.8615
345	19	0.186	0.175	48.4765
360	19	0.191	0.17	47.0914
375	25	0.195	0.166	45.9834
390	21	0.197	0.164	45.4294
405	20	0.201	0.16	44.3213
420	20	0.204	0.157	43.4903
435	20	0.207	0.154	42.6593
450	56	0.221	0.14	38.7812
465	49	0.224	0.137	37.9501
480	25	0.227	0.134	37.1191
495	24	0.23	0.131	36.2881
510	24	0.234	0.127	35.1801

525	23	0.239	0.122	33.795
540	21	0.241	0.12	33.241
555	20	0.243	0.118	32.687
570	20	0.245	0.116	32.133
585	19	0.247	0.114	31.5789
600	19	0.249	0.112	31.0249
615	19	0.25	0.111	30.7479
630	18	0.251	0.11	30.4709

En la Fig. 4.3 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado.

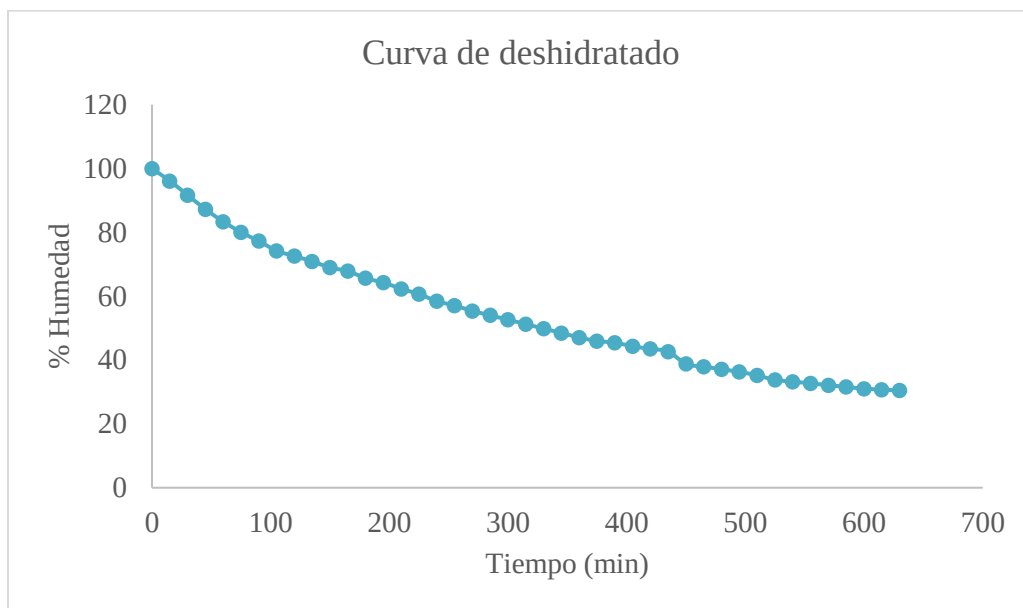


Fig. 4.3 Curva de deshidratado de la segunda prueba preliminar. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.7 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.4 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

Tabla 4.7 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la segunda prueba preliminar. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

tiempo min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis- Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	100	1.0000	1.0000	0.8481	1.0000	0.9403	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
15	96.1219	0.9442	0.9395	0.8156	0.9549	0.9114	0.9395	0.9395	0.9395	0.9395	0.9490
30	91.6898	0.8805	0.8826	0.7795	0.9057	0.8747	0.8826	0.8826	0.8826	0.8826	0.8993
45	87.2576	0.8167	0.8292	0.7429	0.8565	0.8355	0.8292	0.8292	0.8292	0.8292	0.8509
60	83.3795	0.7610	0.7790	0.7067	0.8083	0.7953	0.7790	0.7790	0.7790	0.7790	0.8040
75	80.0554	0.7131	0.7318	0.6714	0.7617	0.7550	0.7318	0.7318	0.7318	0.7318	0.7588
90	77.2853	0.6733	0.6875	0.6370	0.7169	0.7152	0.6875	0.6875	0.6875	0.6875	0.7153
105	74.2382	0.6295	0.6459	0.6039	0.6740	0.6762	0.6459	0.6459	0.6459	0.6459	0.6735
120	72.5762	0.6056	0.6068	0.5719	0.6331	0.6381	0.6068	0.6068	0.6068	0.6068	0.6336
135	70.9141	0.5817	0.5700	0.5413	0.5942	0.6013	0.5700	0.5700	0.5700	0.5700	0.5955
150	68.9751	0.5538	0.5355	0.5119	0.5572	0.5659	0.5355	0.5355	0.5355	0.5355	0.5591
165	67.8670	0.5378	0.5031	0.4838	0.5223	0.5318	0.5031	0.5031	0.5031	0.5031	0.5246
180	65.6510	0.5060	0.4727	0.4570	0.4892	0.4992	0.4727	0.4727	0.4727	0.4727	0.4917
195	64.2659	0.4861	0.4440	0.4315	0.4579	0.4680	0.4440	0.4440	0.4440	0.4440	0.4606
210	62.3269	0.4582	0.4172	0.4072	0.4284	0.4384	0.4172	0.4172	0.4172	0.4172	0.4312
225	60.6648	0.4343	0.3919	0.3840	0.4007	0.4102	0.3919	0.3919	0.3919	0.3919	0.4033
240	58.4488	0.4024	0.3682	0.3621	0.3745	0.3834	0.3682	0.3682	0.3682	0.3682	0.3771
255	57.0637	0.3825	0.3459	0.3412	0.3499	0.3581	0.3459	0.3459	0.3459	0.3459	0.3523
270	55.4017	0.3586	0.3249	0.3214	0.3268	0.3342	0.3249	0.3249	0.3249	0.3249	0.3289
285	54.0166	0.3386	0.3053	0.3027	0.3051	0.3116	0.3053	0.3053	0.3053	0.3053	0.3070

300	52.6316	0.3187	0.2868	0.2849	0.2847	0.2903	0.2868	0.2868	0.2868	0.2868	0.2863
315	51.2465	0.2988	0.2694	0.2681	0.2656	0.2703	0.2694	0.2694	0.2694	0.2694	0.2670
330	49.8615	0.2789	0.2531	0.2522	0.2477	0.2515	0.2531	0.2531	0.2531	0.2531	0.2488
345	48.4765	0.2590	0.2378	0.2372	0.2309	0.2338	0.2378	0.2378	0.2378	0.2378	0.2317
360	47.0914	0.2390	0.2234	0.2230	0.2152	0.2172	0.2234	0.2234	0.2234	0.2234	0.2157
375	45.9834	0.2231	0.2099	0.2096	0.2005	0.2016	0.2099	0.2099	0.2099	0.2099	0.2008
390	45.4294	0.2151	0.1972	0.1970	0.1867	0.1871	0.1972	0.1972	0.1972	0.1972	0.1868
405	44.3213	0.1992	0.1852	0.1850	0.1739	0.1735	0.1852	0.1852	0.1852	0.1852	0.1737
420	43.4903	0.1873	0.1740	0.1738	0.1619	0.1608	0.1740	0.1740	0.1740	0.1740	0.1614
435	42.6593	0.1753	0.1635	0.1632	0.1506	0.1489	0.1635	0.1635	0.1635	0.1635	0.1500
450	38.7812	0.1195	0.1536	0.1532	0.1402	0.1379	0.1536	0.1536	0.1536	0.1536	0.1393
465	37.9501	0.1076	0.1443	0.1437	0.1304	0.1276	0.1443	0.1443	0.1443	0.1443	0.1294
480	37.1191	0.0956	0.1356	0.1349	0.1212	0.1180	0.1356	0.1356	0.1356	0.1356	0.1201
495	36.2881	0.0837	0.1273	0.1265	0.1127	0.1090	0.1273	0.1273	0.1273	0.1273	0.1115
510	35.1801	0.0677	0.1196	0.1186	0.1048	0.1007	0.1196	0.1196	0.1196	0.1196	0.1034
525	33.7950	0.0478	0.1124	0.1112	0.0974	0.0930	0.1124	0.1124	0.1124	0.1124	0.0959
540	33.2410	0.0398	0.1056	0.1043	0.0905	0.0858	0.1056	0.1056	0.1056	0.1056	0.0890
555	32.6870	0.0319	0.0992	0.0977	0.0840	0.0792	0.0992	0.0992	0.0992	0.0992	0.0825
570	32.1330	0.0239	0.0932	0.0916	0.0780	0.0730	0.0932	0.0932	0.0932	0.0932	0.0764
585	31.5789	0.0159	0.0876	0.0858	0.0725	0.0673	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0708
600	31.0249	0.0080	0.0823	0.0804	0.0673	0.0620	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0656
615	30.7479	0.0040	0.0773	0.0753	0.0624	0.0571	0.0773	0.0773	0.0773	0.0773	0.0608
630	30.4709	0.0000	0.0726	0.0705	0.0579	0.0525	0.0726	0.0726	0.0726	0.0726	0.0563

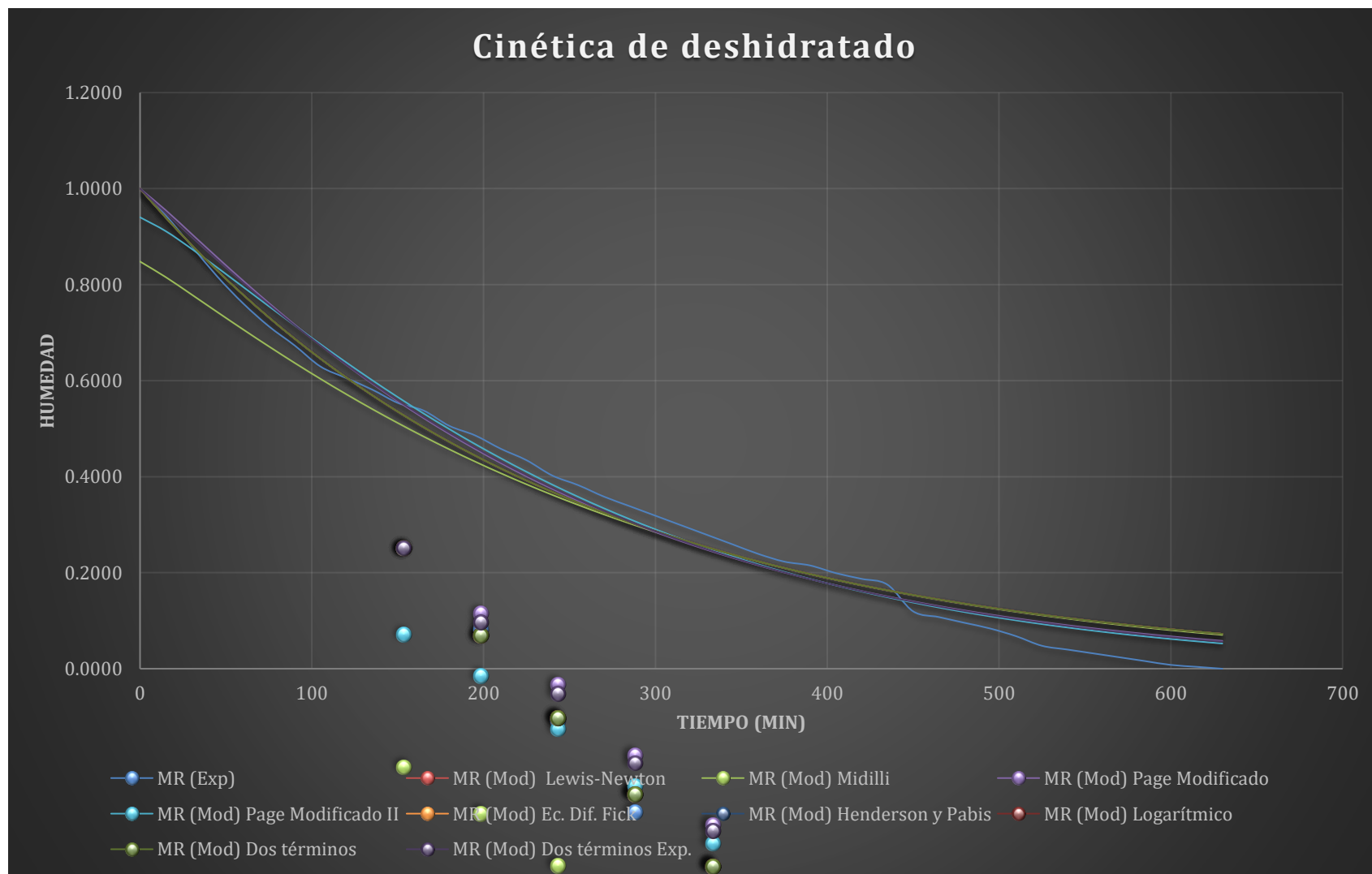


Fig. 4.4 Curva de deshidratado normalizada de la segunda prueba preliminar para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la Tabla 4.8 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la primera prueba preliminar.

Tabla 4.8 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la segunda prueba preliminar. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Modelos	Parámetros								Análisis estadístico	
	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0042		0.9753	0.0662
MIDILLI	40	0.8481	0.0000				0.0019	1.1112	0.9595	0.1361
PAGE MODIFICADO	40						0.0023	1.1033	0.9837	0.0548
PAGE MODIFICADO II	40	0.9403					0.0012	1.2104	0.9861	0.0468
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	1.0000			0.8290		0.0035		0.9803	0.0662
HENDERSON Y PABIS	40	1.0000					0.0042		0.9803	0.0662
LOGARÍTMICO	40	1.0000	0.0000				0.0042		0.9803	0.0662
DOS TERMINOS	40	0.9714	0.0000			1.3394	0.1436		0.9803	0.0662
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	3.6294	1.1539				0.0058		0.9847	0.0501

4.2 Corridas de acuerdo con el diseño experimentos exploratorio

4.2.1 Corrida 1

En la tabla 4.9 se muestran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.10 con los datos obtenidos durante la corrida 1 del diseño de experimentos.

Tabla 4.9 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	30
Peso de la muestra	0.189	v aire Op.	1.92-2.2 m/s
Temperatura de ambiente	17.6	Material	Nopal
%HR Ambiente	55	Humedad inicial del material	90%
Espesor de la muestra	6.6-7.1 mm		

Tabla 4.10 Datos obtenidos durante la corrida 1. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad del ambiente	Humedad de la cámara	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	55	37	0	0.189	90
15	53.9	36	0.009	0.18	85.71
30	51.9	35	0.018	0.171	81.43
45	41.4	34	0.024	0.165	78.57
60	43.7	33	0.03	0.159	75.71
75	43.2	32	0.035	0.154	73.33
90	42.7	32	0.04	0.149	70.95
105	42.3	32	0.044	0.145	69.05
120	42	31	0.048	0.141	67.14
135	37.2	31	0.052	0.137	65.24
150	35.1	30	0.057	0.132	62.86

165	33.8	30	0.06	0.129	61.43
180	33.3	29	0.063	0.126	60.00
195	32	29	0.066	0.123	58.57
210	31.8	29	0.069	0.12	57.14
225	33	29	0.072	0.117	55.71
240	31.8	28	0.074	0.115	54.76
255	31.1	27	0.077	0.112	53.33
270	30.9	27	0.079	0.11	52.38
285	29.7	27	0.082	0.107	50.95
300	29	27	0.084	0.105	50.00
315	28.3	26	0.086	0.103	49.05
330	28.3	26	0.088	0.101	48.10
345	28	28	0.09	0.099	47.14
360	29.1	28	0.092	0.097	46.19
375	29.3	27	0.094	0.095	45.24
390	29.3	26	0.095	0.094	44.76
405	29.8	26	0.097	0.092	43.81
420	29.8	27	0.098	0.091	43.33
435	30.5	27	0.1	0.089	42.38
450	31.1	27	0.101	0.088	41.90
465	31.3	27	0.102	0.087	41.43
480	31	26	0.103	0.086	40.95
495	31.6	26	0.105	0.084	40.00
510	31.8	26	0.106	0.083	39.52
525	32.2	26	0.107	0.082	39.05
540	32.8	26	0.108	0.081	38.57
555	33.4	26	0.108	0.081	38.57
570	33.9	26	0.109	0.08	38.10
585	34.2	26	0.11	0.079	37.62
600	34.6	26	0.111	0.078	37.14
615	34.8	26	0.112	0.077	36.67
630	35.1	26	0.112	0.077	36.67

En la Fig. 4.5 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 1.

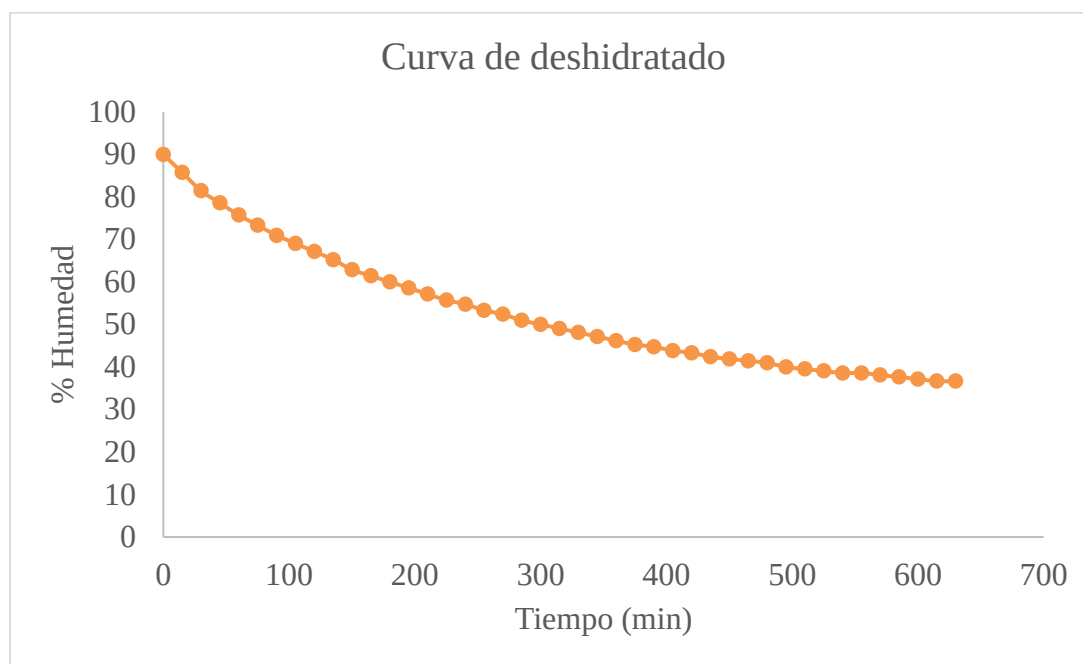


Fig. 4.5 Curva de deshidratado de la corrida 1. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.11 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.6 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.12 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 1.

Tabla 4.11 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 1. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	90	1	1	1.0000	1.0000	0.9528	0.9995	0.9995	0.9995	1.0000	1.0000
15	85.7143	0.9196	0.9299	0.9364	0.9388	0.9081	0.9295	0.9295	0.9295	0.9299	0.9362
30	81.4286	0.8393	0.8647	0.8739	0.8775	0.8578	0.8644	0.8644	0.8644	0.8647	0.8761
45	78.5714	0.7857	0.8041	0.8146	0.8187	0.8071	0.8038	0.8038	0.8038	0.8041	0.8195
60	75.7143	0.7321	0.7478	0.7586	0.7629	0.7573	0.7475	0.7475	0.7475	0.7478	0.7661
75	73.3333	0.6875	0.6954	0.7060	0.7104	0.7091	0.6951	0.6951	0.6951	0.6954	0.7157
90	70.9524	0.6429	0.6466	0.6567	0.6609	0.6629	0.6464	0.6464	0.6464	0.6466	0.6683
105	69.0476	0.6071	0.6013	0.6106	0.6145	0.6187	0.6012	0.6012	0.6012	0.6013	0.6237
120	67.1429	0.5714	0.5592	0.5675	0.5711	0.5768	0.5591	0.5591	0.5591	0.5592	0.5817
135	65.2381	0.5357	0.5200	0.5273	0.5305	0.5371	0.5199	0.5199	0.5199	0.5200	0.5421
150	62.8571	0.4911	0.4835	0.4898	0.4926	0.4996	0.4835	0.4835	0.4835	0.4835	0.5049
165	61.4286	0.4643	0.4496	0.4548	0.4573	0.4643	0.4496	0.4496	0.4496	0.4496	0.4699
180	60.0000	0.4375	0.4181	0.4222	0.4243	0.4311	0.4181	0.4181	0.4181	0.4181	0.4370
195	58.5714	0.4107	0.3888	0.3919	0.3936	0.4000	0.3888	0.3888	0.3888	0.3888	0.4060
210	57.1429	0.3839	0.3616	0.3637	0.3650	0.3709	0.3616	0.3616	0.3616	0.3616	0.3769
225	55.7143	0.3571	0.3362	0.3374	0.3383	0.3436	0.3363	0.3363	0.3363	0.3362	0.3495
240	54.7619	0.3393	0.3127	0.3130	0.3136	0.3181	0.3127	0.3127	0.3127	0.3127	0.3238
255	53.3333	0.3125	0.2908	0.2903	0.2906	0.2944	0.2908	0.2908	0.2908	0.2908	0.2997
270	52.3810	0.2946	0.2704	0.2692	0.2692	0.2722	0.2704	0.2704	0.2704	0.2704	0.2771
285	50.9524	0.2679	0.2514	0.2496	0.2493	0.2516	0.2515	0.2515	0.2515	0.2514	0.2559
300	50.0000	0.2500	0.2338	0.2314	0.2309	0.2324	0.2339	0.2339	0.2339	0.2338	0.2359

315	49.0476	0.2321	0.2174	0.2145	0.2138	0.2146	0.2175	0.2175	0.2175	0.2174	0.2173
330	48.0952	0.2143	0.2022	0.1988	0.1979	0.1980	0.2022	0.2022	0.2022	0.2022	0.1997
345	47.1429	0.1964	0.1880	0.1842	0.1832	0.1827	0.1881	0.1881	0.1881	0.1880	0.1834
360	46.1905	0.1786	0.1748	0.1707	0.1695	0.1684	0.1749	0.1749	0.1749	0.1748	0.1680
375	45.2381	0.1607	0.1626	0.1582	0.1568	0.1552	0.1627	0.1627	0.1627	0.1626	0.1536
390	44.7619	0.1518	0.1512	0.1465	0.1451	0.1430	0.1513	0.1513	0.1513	0.1512	0.1402
405	43.8095	0.1339	0.1406	0.1357	0.1342	0.1317	0.1407	0.1407	0.1407	0.1406	0.1276
420	43.3333	0.1250	0.1307	0.1257	0.1241	0.1212	0.1308	0.1308	0.1308	0.1307	0.1159
435	42.3810	0.1071	0.1216	0.1164	0.1147	0.1115	0.1216	0.1216	0.1216	0.1216	0.1049
450	41.9048	0.0982	0.1131	0.1078	0.1061	0.1026	0.1131	0.1131	0.1131	0.1131	0.0947
465	41.4286	0.0893	0.1051	0.0998	0.0981	0.0943	0.1052	0.1052	0.1052	0.1051	0.0852
480	40.9524	0.0804	0.0978	0.0924	0.0906	0.0867	0.0978	0.0978	0.0978	0.0978	0.0763
495	40.0000	0.0625	0.0909	0.0856	0.0838	0.0796	0.0910	0.0910	0.0910	0.0909	0.0680
510	39.5238	0.0536	0.0845	0.0792	0.0774	0.0731	0.0846	0.0846	0.0846	0.0845	0.0603
525	39.0476	0.0446	0.0786	0.0733	0.0715	0.0672	0.0787	0.0787	0.0787	0.0786	0.0531
540	38.5714	0.0357	0.0731	0.0678	0.0661	0.0616	0.0732	0.0732	0.0732	0.0731	0.0464
555	38.5714	0.0357	0.0680	0.0628	0.0610	0.0566	0.0680	0.0680	0.0680	0.0680	0.0402
570	38.0952	0.0268	0.0632	0.0581	0.0564	0.0519	0.0633	0.0633	0.0633	0.0632	0.0345
585	37.6190	0.0179	0.0588	0.0538	0.0521	0.0476	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0292
600	37.1429	0.0089	0.0547	0.0498	0.0481	0.0436	0.0547	0.0547	0.0547	0.0547	0.0243
615	36.6667	0.0000	0.0508	0.0460	0.0444	0.0400	0.0509	0.0509	0.0509	0.0508	0.0197
630	36.6667	0.0000	0.0473	0.0426	0.0410	0.0367	0.0473	0.0473	0.0473	0.0473	0.0155

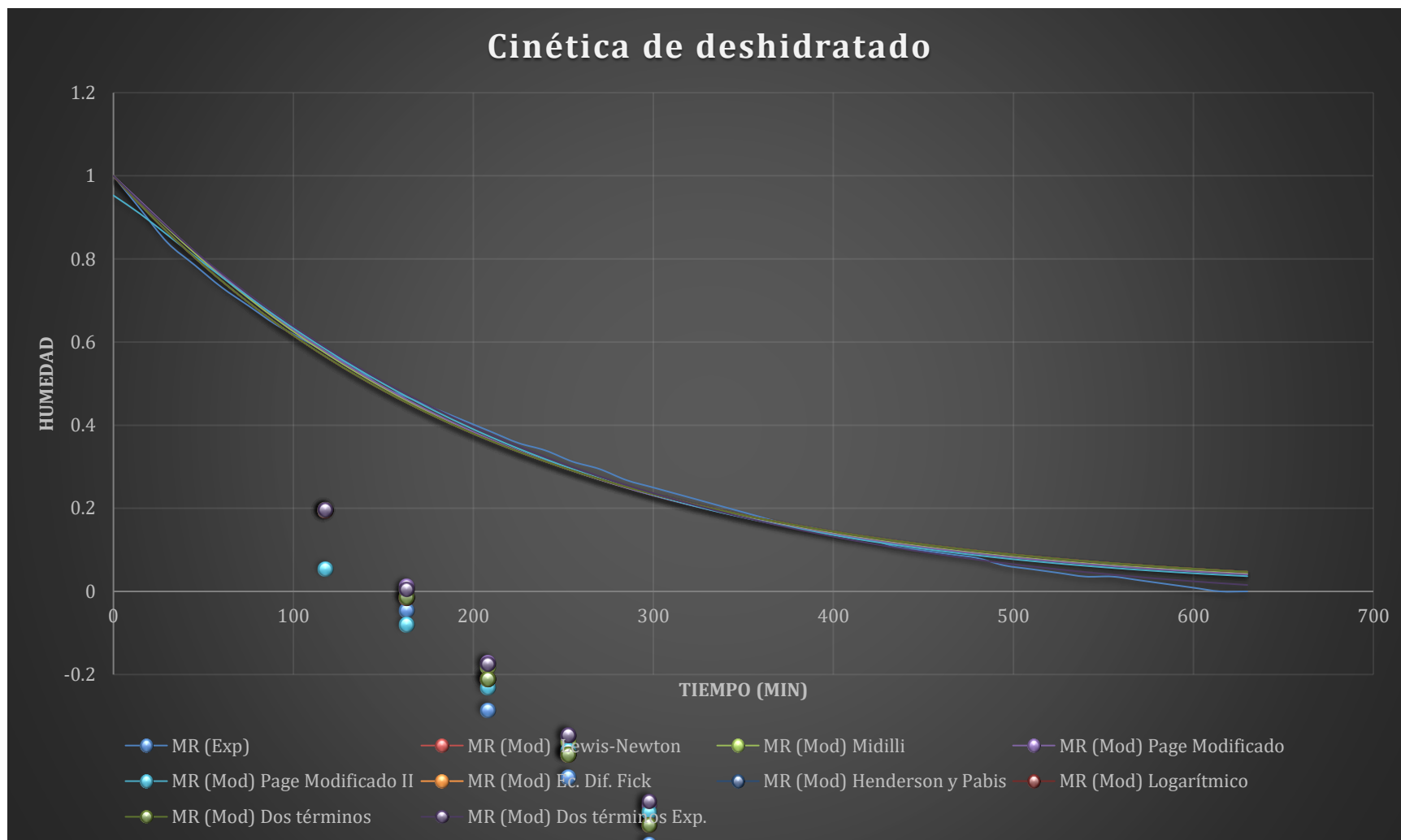


Fig. 4.6 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 1 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.12 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 1. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0048		0.9906	0.0230
MIDILLI	40	1.0000	0.0000				0.0040	1.0358	0.9937	0.0205
PAGE MODIFICADO	40						0.0037	1.0498	0.9937	0.0203
PAGE MODIFICADO II	40	0.9528					0.0023	1.1279	0.9950	0.0163
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	0.9995			0.7634		0.0037		0.9929	0.0230
HENDERSON Y PABIS	40	0.9995					0.0048		0.9929	0.0230
LOGARÍTMICO	40	0.9995	0.0000				0.0048		0.9929	0.0230
DOS TERMINOS	40	0.9649	0.0000			1.3394	0.1358		0.9929	0.0230
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	20.4972	0.9760				0.0030		0.9972	0.0096

4.2.2 Corrida 2

En la tabla 4.13 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.14 con los datos obtenidos durante la corrida 2 del diseño de experimentos.

Tabla 4.13 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	30
Peso de la muestra	0.129	v aire Op.	1.92-2.2 m/s
Temperatura de ambiente	17.6	Material	Manzana
%HR Ambiente	55	Humedad inicial del material	85%
Espesor de la muestra	5.5-6.1 mm		

Tabla 4.14 Datos obtenidos durante la corrida 2. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad de la cámara	Humedad del ambiente	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	39	49.5	0	0.129	85
15	39	49.5	0.015	0.114	75.12
30	39	52.4	0.022	0.107	70.50
45	39	57.9	0.027	0.102	67.21
60	39	49.9	0.035	0.094	61.94
75	37	51.2	0.04	0.089	58.64
90	34	51.5	0.045	0.084	55.35
105	34	52.5	0.051	0.078	51.40
120	31	47.9	0.056	0.073	48.10
135	31	46.4	0.059	0.07	46.12
150	31	44	0.063	0.066	43.49
165	31	42.1	0.067	0.062	40.85

180	30	39.9	0.071	0.058	38.22
195	30	36.4	0.075	0.054	35.58
210	29	35.7	0.079	0.05	32.95
225	32	34	0.081	0.048	31.63
240	29	32.7	0.084	0.045	29.65
255	29	31.1	0.086	0.043	28.33
270	25	29.6	0.088	0.041	27.02
285	27	29.3	0.09	0.039	25.70
300	25	28.7	0.093	0.036	23.72
315	25	26.7	0.095	0.034	22.40
330	24	25.6	0.096	0.033	21.74
345	23	25.2	0.098	0.031	20.43
360	24	26.1	0.1	0.029	19.11
375	22	23.6	0.102	0.027	17.79
390	22	26.5	0.103	0.026	17.13
405	23	26.3	0.104	0.025	16.47
420	21	24.6	0.106	0.023	15.16
435	22	25.8	0.107	0.022	14.50
450	22	26.4	0.108	0.021	13.84
465	21	27.1	0.108	0.021	13.84

En la Fig. 4.7 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 2.

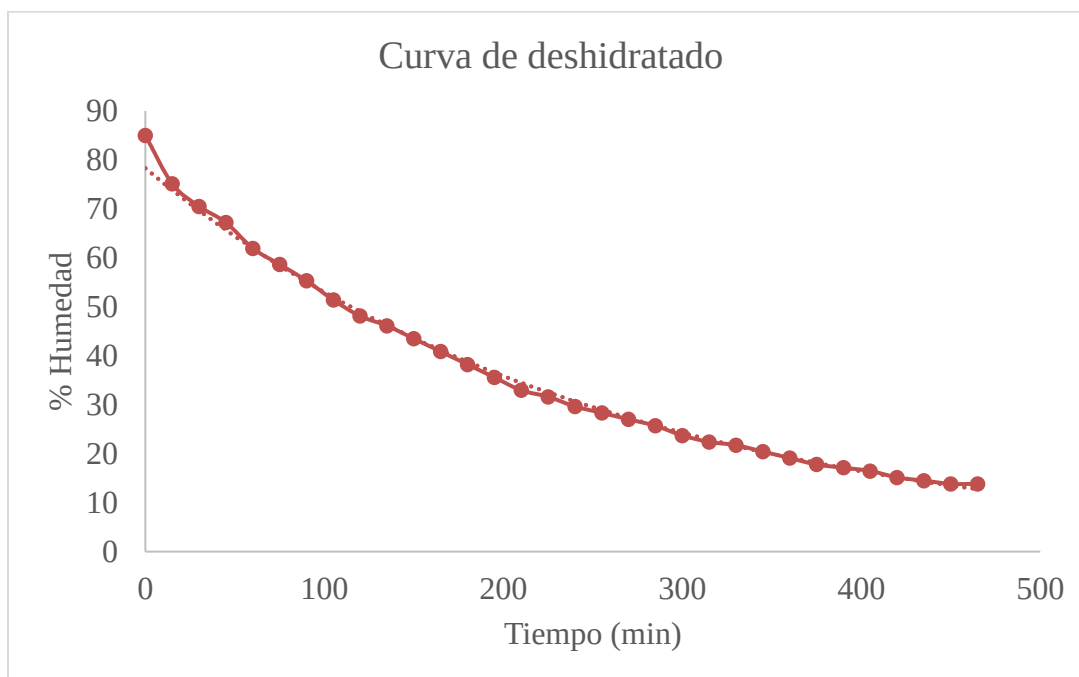


Fig. 4.7 Curva de deshidratado de la corrida 2. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.15 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.8 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.16 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 2.

Tabla 4.15 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 2. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	85	1	1	0.9391	1.0000	0.9391	0.9976	0.9976	0.9976	1.0000	1.0000
15	75.1163	0.8611	0.9086	0.8870	0.9227	0.8870	0.9066	0.9066	0.9066	0.9086	0.9185
30	70.5039	0.7963	0.8256	0.8255	0.8447	0.8255	0.8240	0.8240	0.8240	0.8256	0.8418
45	67.2093	0.7500	0.7502	0.7628	0.7708	0.7628	0.7489	0.7489	0.7489	0.7502	0.7697
60	61.9380	0.6759	0.6816	0.7015	0.7018	0.7015	0.6806	0.6806	0.6806	0.6816	0.7025
75	58.6434	0.6296	0.6193	0.6427	0.6380	0.6427	0.6185	0.6185	0.6185	0.6193	0.6400
90	55.3488	0.5833	0.5627	0.5869	0.5792	0.5869	0.5621	0.5621	0.5621	0.5627	0.5821
105	51.3953	0.5278	0.5113	0.5345	0.5253	0.5345	0.5109	0.5109	0.5109	0.5113	0.5287
120	48.1008	0.4815	0.4646	0.4857	0.4759	0.4857	0.4643	0.4643	0.4643	0.4646	0.4794
135	46.1240	0.4537	0.4221	0.4403	0.4308	0.4403	0.4220	0.4220	0.4220	0.4221	0.4342
150	43.4884	0.4167	0.3836	0.3984	0.3897	0.3984	0.3835	0.3835	0.3835	0.3836	0.3928
165	40.8527	0.3796	0.3485	0.3598	0.3522	0.3598	0.3486	0.3486	0.3486	0.3485	0.3549
180	38.2171	0.3426	0.3167	0.3245	0.3182	0.3245	0.3168	0.3168	0.3168	0.3167	0.3204
195	35.5814	0.3056	0.2877	0.2921	0.2872	0.2921	0.2879	0.2879	0.2879	0.2877	0.2889
210	32.9457	0.2685	0.2614	0.2626	0.2592	0.2627	0.2616	0.2616	0.2616	0.2614	0.2602
225	31.6279	0.2500	0.2375	0.2358	0.2337	0.2358	0.2378	0.2378	0.2378	0.2375	0.2342
240	29.6512	0.2222	0.2158	0.2114	0.2107	0.2115	0.2161	0.2161	0.2161	0.2158	0.2107
255	28.3333	0.2037	0.1961	0.1894	0.1898	0.1894	0.1964	0.1964	0.1964	0.1961	0.1893
270	27.0155	0.1852	0.1782	0.1694	0.1710	0.1694	0.1785	0.1785	0.1785	0.1782	0.1700
285	25.6977	0.1667	0.1619	0.1514	0.1539	0.1514	0.1622	0.1622	0.1622	0.1619	0.1525
300	23.7209	0.1389	0.1471	0.1351	0.1385	0.1351	0.1474	0.1474	0.1474	0.1471	0.1368
315	22.4031	0.1204	0.1337	0.1205	0.1246	0.1205	0.1340	0.1340	0.1340	0.1337	0.1226

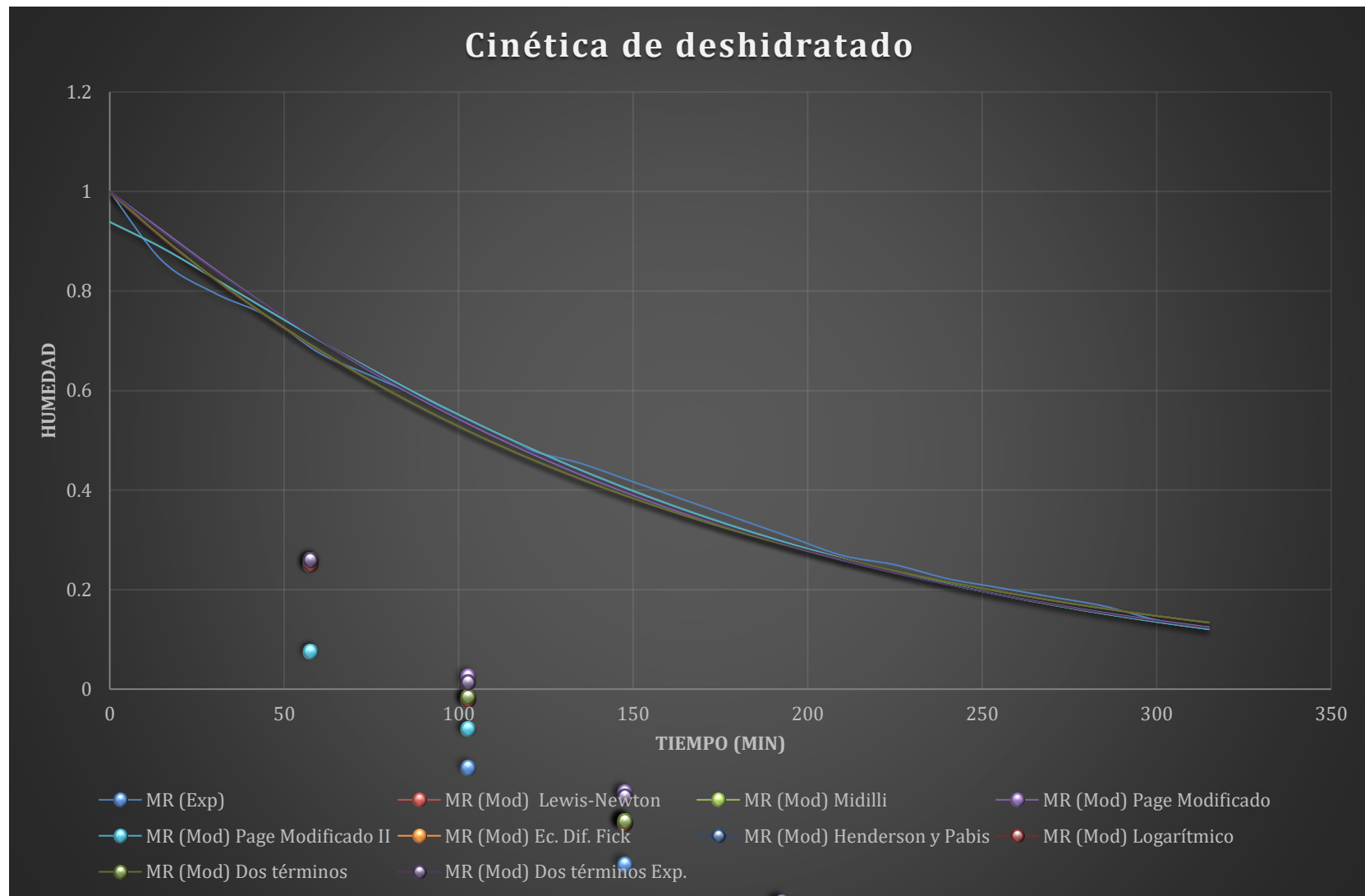


Fig. 4.8 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 2 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.16 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 2. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0064		0.9904	0.0252
MIDILLI	40	0.9391	0.0000				0.0024	1.1770	0.9946	0.0158
PAGE MODIFICADO	40						0.0045	1.0685	0.9927	0.0215
PAGE MODIFICADO II	40	0.9391					0.0024	1.1769	0.9946	0.0158
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	0.9976			0.5402		0.0034		0.9916	0.0251
HENDERSON Y PABIS	40	0.9976					0.0064		0.9914	0.0251
LOGARÍTMICO	40	0.9976	0.0000				0.0064		0.9916	0.0251
DOS TERMINOS	40	0.9504	0.0000			1.3394	0.1257		0.9914	0.0252
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	27.2031	1.0142				0.0089		0.9936	0.0186

4.2.3 Corrida 3

En la tabla 4.17 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.18 con los datos obtenidos durante la corrida 3 del diseño de experimentos.

Tabla 4.17 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	30
Peso de la muestra	0.169	v aire Op.	3.9-4.2 m/s
Temperatura de ambiente	25	Material	Manzana
%HR Ambiente	55	Humedad inicial del material	85%
Espesor de la muestra	5.8-6.1 mm		

Tabla 4.18 Datos obtenidos durante la corrida 3. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad de la cámara	Humedad del ambiente	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	37	39.7	0	0.169	85
15	29	36.7	0.011	0.158	79.47
30	29	36.2	0.026	0.143	71.92
45	28	35.2	0.039	0.13	65.38
60	28	39.9	0.047	0.122	61.36
75	27	40.6	0.054	0.115	57.84
90	25	41.1	0.059	0.11	55.33
105	25	39.6	0.064	0.105	52.81
120	24	38.6	0.068	0.101	50.80
135	23	37.1	0.072	0.097	48.79
150	23	36.8	0.076	0.093	46.78
165	23	35.5	0.08	0.089	44.76
180	22	34.1	0.084	0.085	42.75
195	22	32.6	0.087	0.082	41.24
210	21	32	0.091	0.078	39.23
225	21	32.4	0.094	0.075	37.72
240	21	29.7	0.097	0.072	36.21
255	22	30.6	0.1	0.069	34.70
270	23	30	0.103	0.066	33.20
285	22	29.5	0.105	0.064	32.19
300	22	29.3	0.109	0.06	30.18
315	22	29.2	0.112	0.057	28.67
330	22	29.2	0.113	0.056	28.17
345	21	28.5	0.115	0.054	27.16
360	21	28.3	0.117	0.052	26.15
375	20	28.2	0.118	0.051	25.65
390	21	27	0.119	0.05	25.15
405	20	28.2	0.12	0.049	24.64
420	20	28.1	0.12	0.049	24.64
435	20	28.3	0.12	0.049	24.64

En la Fig. 4.5 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 3.

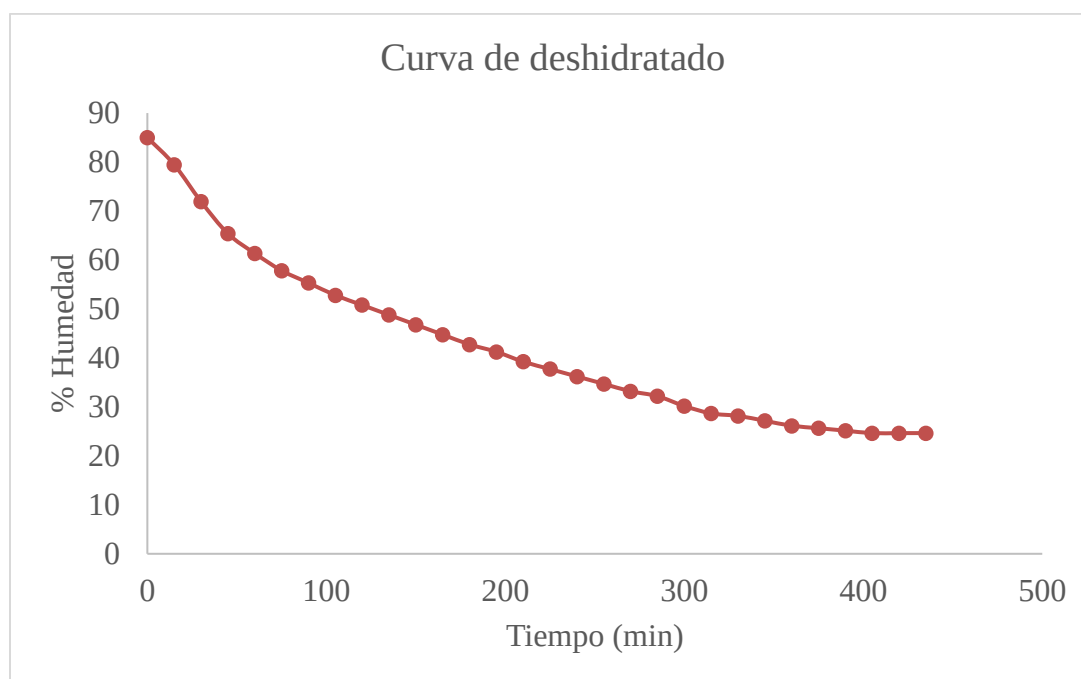


Fig. 4.9 Curva de deshidratado de la corrida 3. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.19 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.10 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial. En la Tabla 4.20 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 3.

Tabla 4.19 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 3. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	85	1	1	0.9920	1.0000	0.9691	0.9931	0.9931	0.9931	1.0000	1.0000
15	79.4675	0.9083	0.8954	0.8930	0.8998	0.8845	0.8898	0.8898	0.8898	0.8954	0.9046
30	71.9231	0.7833	0.8017	0.8018	0.8075	0.8005	0.7974	0.7974	0.7974	0.8017	0.8175
45	65.3846	0.6750	0.7178	0.7193	0.7238	0.7220	0.7145	0.7145	0.7145	0.7178	0.7378
60	61.3609	0.6083	0.6427	0.6448	0.6483	0.6497	0.6402	0.6402	0.6402	0.6427	0.6651
75	57.8402	0.5500	0.5755	0.5777	0.5804	0.5836	0.5737	0.5737	0.5737	0.5755	0.5987
90	55.3254	0.5083	0.5153	0.5174	0.5194	0.5235	0.5141	0.5141	0.5141	0.5153	0.5382
105	52.8107	0.4667	0.4614	0.4632	0.4646	0.4690	0.4606	0.4606	0.4606	0.4614	0.4830
120	50.7988	0.4333	0.4131	0.4146	0.4155	0.4198	0.4128	0.4128	0.4128	0.4131	0.4327
135	48.7870	0.4000	0.3699	0.3711	0.3715	0.3754	0.3699	0.3699	0.3699	0.3699	0.3870
150	46.7751	0.3667	0.3312	0.3320	0.3321	0.3354	0.3314	0.3314	0.3314	0.3312	0.3453
165	44.7633	0.3333	0.2965	0.2970	0.2968	0.2995	0.2970	0.2970	0.2970	0.2965	0.3075
180	42.7515	0.3000	0.2655	0.2656	0.2652	0.2672	0.2661	0.2661	0.2661	0.2655	0.2731
195	41.2426	0.2750	0.2377	0.2375	0.2369	0.2383	0.2385	0.2385	0.2385	0.2377	0.2419
210	39.2308	0.2417	0.2129	0.2123	0.2116	0.2123	0.2137	0.2137	0.2137	0.2129	0.2136
225	37.7219	0.2167	0.1906	0.1898	0.1889	0.1891	0.1915	0.1915	0.1915	0.1906	0.1880
240	36.2130	0.1917	0.1707	0.1696	0.1687	0.1684	0.1716	0.1716	0.1716	0.1707	0.1648
255	34.7041	0.1667	0.1528	0.1516	0.1506	0.1498	0.1537	0.1537	0.1537	0.1528	0.1439
270	33.1953	0.1417	0.1368	0.1355	0.1345	0.1333	0.1378	0.1378	0.1378	0.1368	0.1249
285	32.1893	0.1250	0.1225	0.1210	0.1200	0.1185	0.1234	0.1234	0.1234	0.1225	0.1079
300	30.1775	0.0917	0.1097	0.1081	0.1071	0.1053	0.1106	0.1106	0.1106	0.1097	0.0925
315	28.6686	0.0667	0.0982	0.0966	0.0956	0.0935	0.0991	0.0991	0.0991	0.0982	0.0787

330	28.1657	0.0583	0.0879	0.0863	0.0853	0.0831	0.0888	0.0888	0.0888	0.0879	0.0663
345	27.1598	0.0417	0.0787	0.0771	0.0761	0.0737	0.0796	0.0796	0.0796	0.0787	0.0552
360	26.1538	0.0250	0.0705	0.0688	0.0679	0.0654	0.0713	0.0713	0.0713	0.0705	0.0452
375	25.6509	0.0167	0.0631	0.0615	0.0606	0.0581	0.0639	0.0639	0.0639	0.0631	0.0363
390	25.1479	0.0083	0.0565	0.0549	0.0540	0.0515	0.0573	0.0573	0.0573	0.0565	0.0284
405	24.6450	0.0000	0.0506	0.0490	0.0482	0.0457	0.0513	0.0513	0.0513	0.0506	0.0214
420	24.6450	0.0000	0.0453	0.0438	0.0430	0.0405	0.0460	0.0460	0.0460	0.0453	0.0151
435	24.6450	0.0000	0.0406	0.0391	0.0383	0.0359	0.0412	0.0412	0.0412	0.0406	0.0096

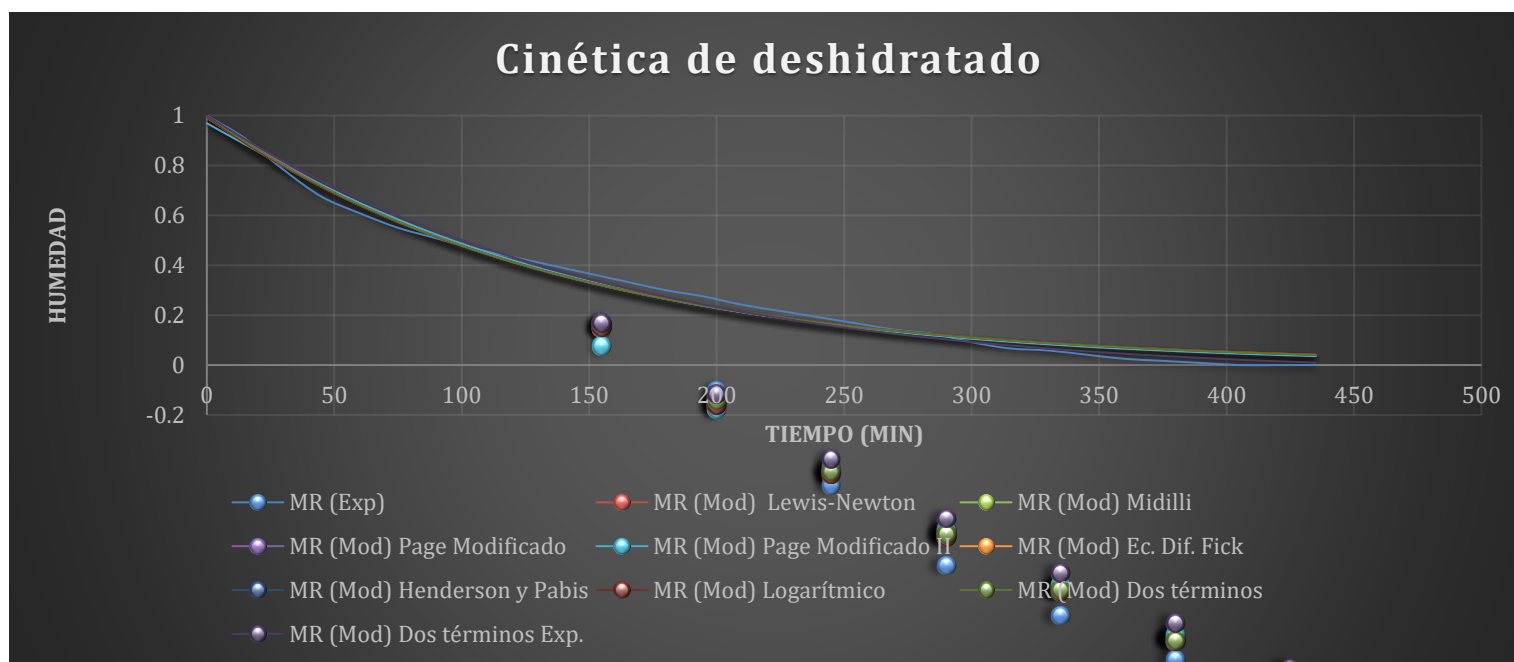


Fig. 4.10 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 3 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.20 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la tercera experimentación. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0074		0.9841	0.0293
MIDILLI	40	0.9920	0.0000				0.0067	1.0176	0.9877	0.0286
PAGE MODIFICADO	40						0.0067	1.0189	0.9875	0.0290
PAGE MODIFICADO II	40	0.9691					0.0051	1.0648	0.9881	0.0278
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	0.9931			0.6047		0.0044		0.9875	0.0292
HENDERSON Y PABIS	40	0.9931					0.0073		0.9875	0.0292
LOGARÍTMICO	40	0.9931	0.0000				0.0073		0.9875	0.0292
DOS TERMINOS	40	0.9304	0.0000			1.3394	0.1022		0.9874	0.0293
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	25.8940	0.9814				0.0045		0.9915	0.0208

4.2.4 Corrida 4

En la tabla 4.21 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.22 con los datos obtenidos durante la corrida 4 del diseño de experimentos.

Tabla 4.21 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	30
Peso de la muestra	0.159	v aire Op.	3.9-4.2 m/s
Temperatura de ambiente	16.5	Material	Nopal
%HR Ambiente	66.8	Humedad inicial del material	90%
Espesor de la muestra	5.5-6.8 mm		

Tabla 4.22 Datos obtenidos durante la corrida 4. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad de la cámara	Humedad del ambiente	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	43	65.7	0	0.159	90
15	41	65.4	0.011	0.148	83.77
30	39	64.6	0.02	0.139	78.68
45	38	61.6	0.027	0.132	74.72
60	38	59.5	0.032	0.127	71.89
75	36	57	0.036	0.123	69.62
90	34	55.5	0.041	0.118	66.79
105	33	51.8	0.044	0.115	65.09
120	33	49.7	0.049	0.11	62.26
135	31	47.7	0.052	0.107	60.57
150	31	45.6	0.056	0.103	58.30
165	31	44.1	0.059	0.1	56.60
180	31	43.2	0.062	0.097	54.91
195	32	43.4	0.065	0.094	53.21
210	32	40.8	0.069	0.09	50.94
225	32	38.9	0.071	0.088	49.81
240	32	37.7	0.073	0.086	48.68
255	30	35.9	0.075	0.084	47.55
270	29	35.5	0.077	0.082	46.42
285	28	34.9	0.078	0.081	45.85
300	28	35.2	0.079	0.08	45.28
315	28	35	0.08	0.079	44.72
330	27	34.6	0.082	0.077	43.58
345	27	36	0.083	0.076	43.02
360	27	34.9	0.085	0.074	41.89
375	26	33.5	0.087	0.072	40.75
390	26	34.1	0.088	0.071	40.19
405	26	35.2	0.089	0.07	39.62
420	26	34.8	0.09	0.069	39.06
435	26	35	0.091	0.068	38.49
450	26	34.8	0.092	0.067	37.92
465	26	34.5	0.094	0.065	36.79
480	26	35	0.094	0.065	36.79
495	28	36	0.095	0.064	36.23
510	28	37.7	0.096	0.063	35.66
525	28	38	0.096	0.063	35.66

En la Fig. 4.11 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 4.

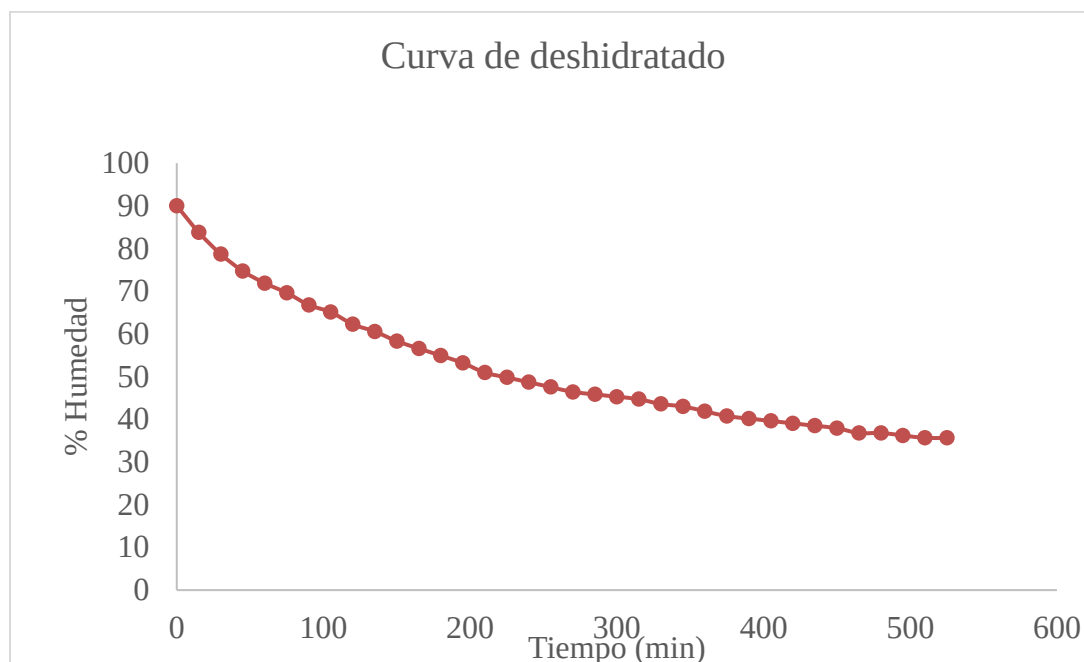


Fig. 4.11 Curva de deshidratado de la corrida 4. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.23 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.12 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.24 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 4.

Tabla 4.23 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 4. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR EXP	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	90	1	1	1	1	0.9561	1	0.9788	0.9788	1	1
15	83.7736	0.8854	0.9134	0.9196	0.9116	0.8876	0.9132	0.8951	0.8951	0.9126	0.9126
30	78.6792	0.7917	0.8342	0.8413	0.8315	0.8187	0.8339	0.8185	0.8185	0.8329	0.8329
45	74.7170	0.7188	0.7619	0.7680	0.7587	0.7532	0.7615	0.7484	0.7484	0.7601	0.7601
60	71.8868	0.6667	0.6959	0.7001	0.6923	0.6917	0.6954	0.6844	0.6844	0.6937	0.6937
75	69.6226	0.6250	0.6356	0.6376	0.6318	0.6343	0.6350	0.6258	0.6258	0.6331	0.6331
90	66.7925	0.5729	0.5806	0.5802	0.5766	0.5811	0.5799	0.5722	0.5722	0.5778	0.5778
105	65.0943	0.5417	0.5303	0.5275	0.5263	0.5319	0.5295	0.5233	0.5233	0.5273	0.5273
120	62.2642	0.4896	0.4843	0.4794	0.4804	0.4865	0.4835	0.4785	0.4785	0.4812	0.4812
135	60.5660	0.4583	0.4424	0.4355	0.4385	0.4446	0.4416	0.4375	0.4375	0.4392	0.4392
150	58.3019	0.4167	0.4040	0.3953	0.4003	0.4061	0.4032	0.4001	0.4001	0.4008	0.4008
165	56.6038	0.3854	0.3690	0.3588	0.3654	0.3707	0.3682	0.3658	0.3658	0.3658	0.3658
180	54.9057	0.3542	0.3371	0.3255	0.3336	0.3382	0.3362	0.3345	0.3345	0.3338	0.3338
195	53.2075	0.3229	0.3079	0.2952	0.3046	0.3085	0.3070	0.3059	0.3059	0.3047	0.3046
210	50.9434	0.2813	0.2812	0.2676	0.2781	0.2812	0.2804	0.2797	0.2797	0.2780	0.2780
225	49.8113	0.2604	0.2568	0.2426	0.2539	0.2562	0.2560	0.2558	0.2558	0.2538	0.2537
240	48.6792	0.2396	0.2346	0.2198	0.2318	0.2334	0.2338	0.2339	0.2339	0.2316	0.2316
255	47.5472	0.2188	0.2142	0.1991	0.2117	0.2125	0.2135	0.2139	0.2139	0.2113	0.2113
270	46.4151	0.1979	0.1957	0.1804	0.1933	0.1934	0.1950	0.1956	0.1956	0.1929	0.1929
285	45.8491	0.1875	0.1787	0.1634	0.1765	0.1760	0.1780	0.1788	0.1788	0.1760	0.1760
300	45.2830	0.1771	0.1632	0.1479	0.1612	0.1601	0.1626	0.1635	0.1635	0.1606	0.1606
315	44.7170	0.1667	0.1491	0.1339	0.1472	0.1456	0.1485	0.1495	0.1495	0.1466	0.1466
330	43.5849	0.1458	0.1362	0.1213	0.1344	0.1324	0.1356	0.1367	0.1367	0.1338	0.1338

345	43.0189	0.1354	0.1244	0.1098	0.1227	0.1203	0.1238	0.1250	0.1250	0.1221	0.1221
360	41.8868	0.1146	0.1136	0.0994	0.1121	0.1093	0.1131	0.1143	0.1143	0.1114	0.1114
375	40.7547	0.0938	0.1038	0.0900	0.1024	0.0993	0.1032	0.1045	0.1045	0.1017	0.1017
390	40.1887	0.0833	0.0948	0.0814	0.0935	0.0902	0.0943	0.0956	0.0956	0.0928	0.0928
405	39.6226	0.0729	0.0866	0.0737	0.0854	0.0819	0.0861	0.0874	0.0874	0.0847	0.0847
420	39.0566	0.0625	0.0791	0.0667	0.0780	0.0743	0.0786	0.0799	0.0799	0.0773	0.0773
435	38.4906	0.0521	0.0722	0.0604	0.0712	0.0675	0.0718	0.0731	0.0731	0.0706	0.0705
450	37.9245	0.0417	0.0660	0.0547	0.0650	0.0612	0.0656	0.0668	0.0668	0.0644	0.0644
465	36.7925	0.0208	0.0602	0.0496	0.0594	0.0556	0.0599	0.0611	0.0611	0.0588	0.0588
480	36.7925	0.0208	0.0550	0.0449	0.0543	0.0504	0.0547	0.0559	0.0559	0.0536	0.0536
495	36.2264	0.0104	0.0503	0.0407	0.0496	0.0457	0.0499	0.0511	0.0511	0.0489	0.0489
510	35.6604	0	0.0459	0.0369	0.0453	0.0414	0.0456	0.0467	0.0467	0.0447	0.0447
525	35.6604	0	0.0419	0.0335	0.0413	0.0376	0.0416	0.0427	0.0427	0.0408	0.0408

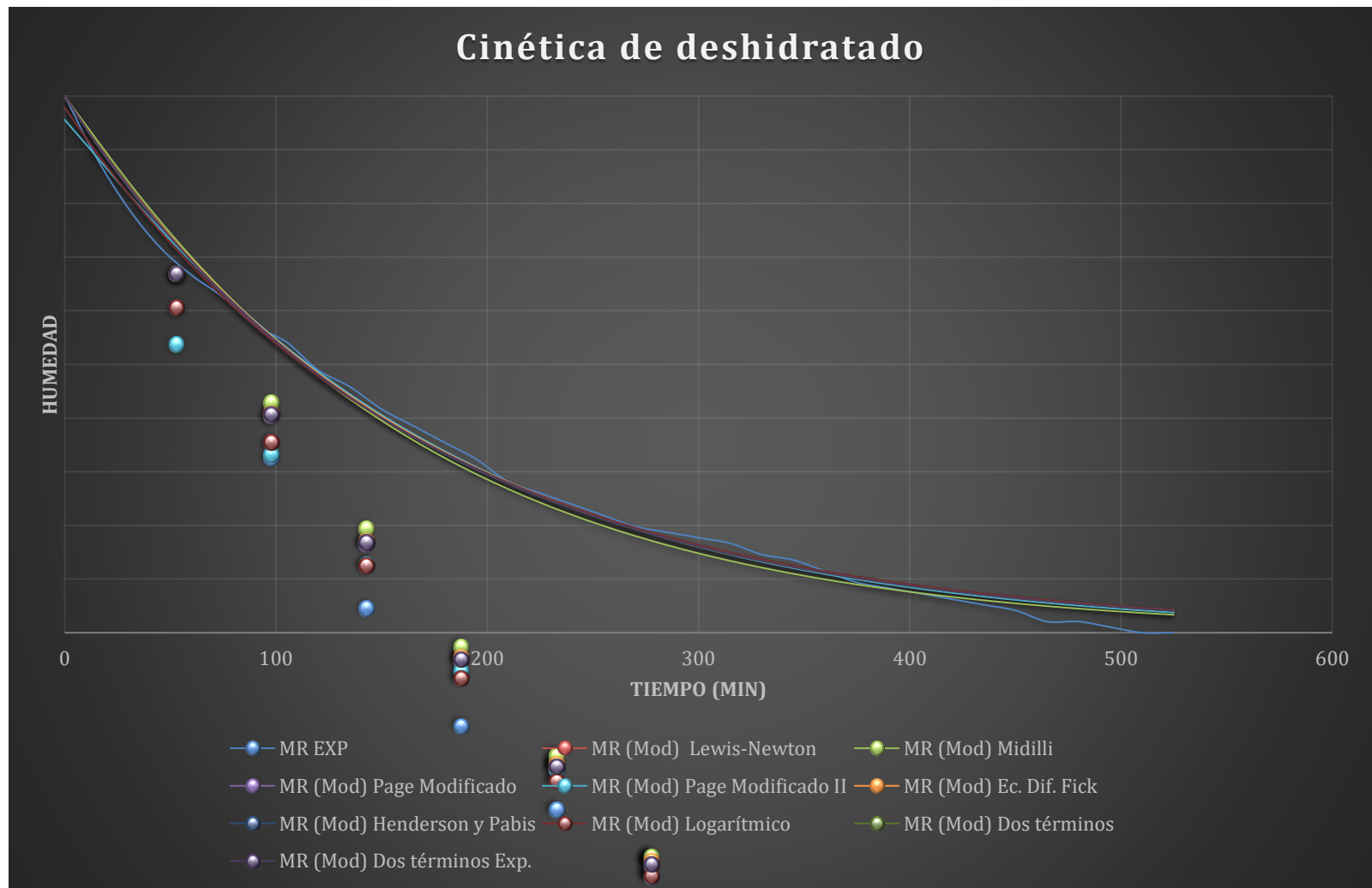


Fig. 4.12 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 4 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.24 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 4. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0060		0.9954	0.0109
MIDILLI	40	1.0000	0.0000				0.0050	1.0445	0.9936	0.0216
PAGE MODIFICADO	40						0.0062	0.9953	0.9949	0.0173
PAGE MODIFICADO II	40	0.9561					0.0042	1.0615	0.9957	0.0145
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	1.0000			0.4324		0.0026		0.9962	0.0131
HENDERSON Y PABIS	40	0.9788					0.0060		0.9953	0.0159
LOGARÍTMICO	40	0.9788	0.0000				0.0060		0.9954	0.0159
DOS TERMINOS	40	0.9293	0.0000			1.3394	0.0831		0.9949	0.0174
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	0.4112	0.9993				0.0061		0.9948	0.0174

4.2.5 Corrida 5

En la tabla 4.25 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.26 con los datos obtenidos durante la corrida 5 del diseño de experimentos.

Tabla 4.25 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	50
Peso de la muestra	0.200	v aire Op.	1.92-2.2 m/s
Temperatura de ambiente	17.6	Material	Manzana
%HR Ambiente	55	Humedad inicial del material	85%
Espesor de la muestra	6.6-7.1 mm		

Tabla 4.26 Datos obtenidos durante la corrida 5. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

tiempo min	Humedad de la cámara	Humedad del ambiente	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	25	54	0	0.2	85
15	16	43.3	0.032	0.168	71.4
30	13	43.4	0.058	0.142	60.35
45	12	43.5	0.078	0.122	51.85
60	12	42.6	0.094	0.106	45.05
75	12	41.7	0.108	0.092	39.1
90	11	38.8	0.116	0.084	35.7
105	10	37.7	0.125	0.075	31.875
120	10	37.3	0.132	0.068	28.9
135	10	37.1	0.14	0.06	25.5
150	9	35.4	0.146	0.054	22.95
165	9	32.6	0.15	0.05	21.25

180	9	31.4	0.155	0.045	19.125
195	8	31.5	0.158	0.042	17.85
210	8	30.7	0.161	0.039	16.575
225	8	29.7	0.164	0.036	15.3
240	7	28.2	0.166	0.034	14.45
255	7	27.1	0.167	0.033	14.025
270	7	26.3	0.168	0.032	13.6
285	7	26.1	0.169	0.031	13.175
300	7	25.8	0.169	0.031	13.175
315	6	26.1	0.169	0.031	13.175

En la Fig. 4.13 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 5.

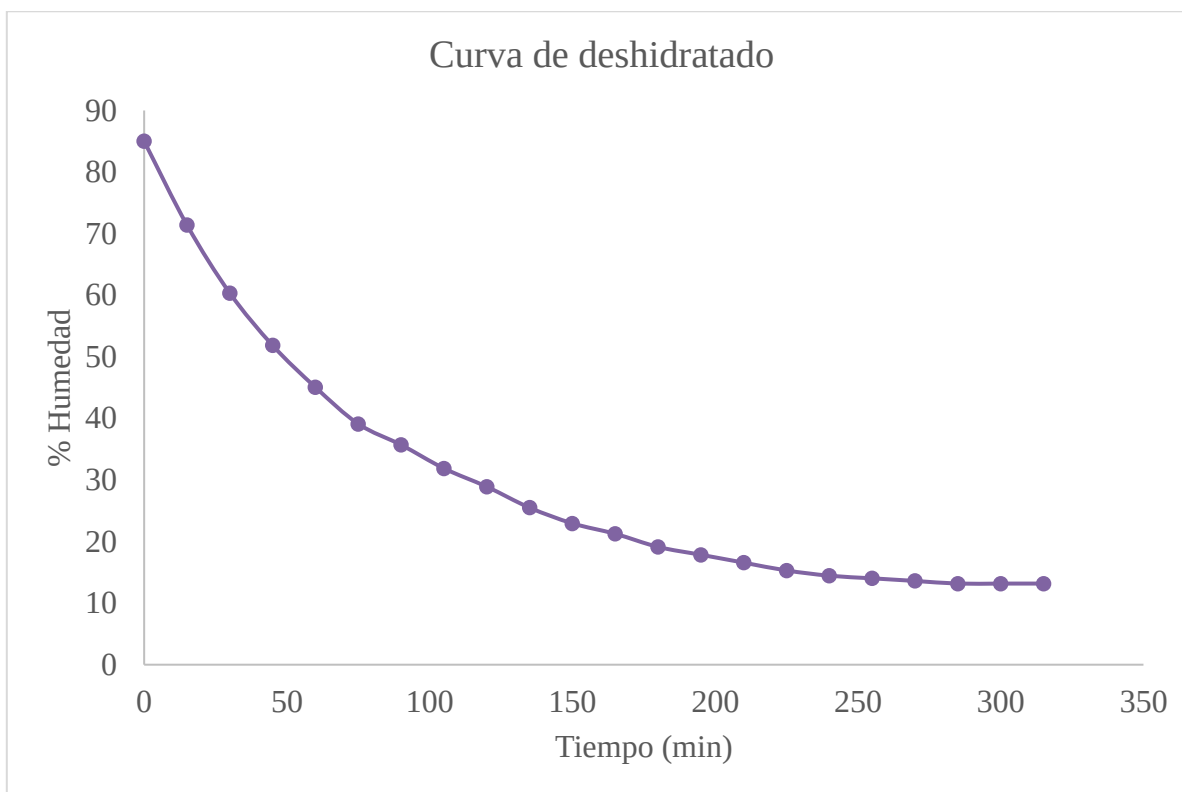


Fig. 4.13 Curva de deshidratado de la corrida 5. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.27 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.14 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.28 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 5.

Tabla 4.27 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 5. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis- Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	85	1	1	1.0000	1.0000	0.9895	0.9972	0.9972	0.9972	1.0000	1.0000
15	71.4000	0.8107	0.8166	0.8797	0.8201	0.8169	0.8147	0.8147	0.8147	0.8166	0.8240
30	60.3500	0.6568	0.6669	0.7374	0.6704	0.6701	0.6657	0.6657	0.6657	0.6669	0.6776
45	51.8500	0.5385	0.5446	0.6033	0.5474	0.5482	0.5439	0.5439	0.5439	0.5446	0.5559
60	45.0500	0.4438	0.4447	0.4852	0.4466	0.4477	0.4444	0.4444	0.4444	0.4447	0.4550
75	39.1000	0.3609	0.3631	0.3849	0.3641	0.3652	0.3631	0.3631	0.3631	0.3631	0.3713
90	35.7000	0.3136	0.2965	0.3020	0.2968	0.2976	0.2967	0.2967	0.2967	0.2965	0.3021
105	31.8750	0.2604	0.2422	0.2349	0.2418	0.2423	0.2424	0.2424	0.2424	0.2422	0.2450
120	28.9000	0.2189	0.1978	0.1814	0.1969	0.1972	0.1981	0.1981	0.1981	0.1978	0.1979
135	25.5000	0.1716	0.1615	0.1394	0.1603	0.1603	0.1618	0.1618	0.1618	0.1615	0.1591
150	22.9500	0.1361	0.1319	0.1068	0.1305	0.1303	0.1322	0.1322	0.1322	0.1319	0.1273
165	21.2500	0.1124	0.1077	0.0817	0.1062	0.1058	0.1080	0.1080	0.1080	0.1077	0.1013
180	19.1250	0.0828	0.0879	0.0627	0.0864	0.0859	0.0883	0.0883	0.0883	0.0879	0.0800
195	17.8500	0.0651	0.0718	0.0485	0.0703	0.0697	0.0721	0.0721	0.0721	0.0718	0.0627
210	16.5750	0.0473	0.0586	0.0379	0.0571	0.0566	0.0589	0.0589	0.0589	0.0586	0.0486
225	15.3000	0.0296	0.0479	0.0301	0.0465	0.0459	0.0482	0.0482	0.0482	0.0479	0.0373
240	14.4500	0.0178	0.0391	0.0245	0.0378	0.0372	0.0393	0.0393	0.0393	0.0391	0.0281
255	14.0250	0.0118	0.0319	0.0204	0.0307	0.0301	0.0321	0.0321	0.0321	0.0319	0.0208
270	13.6000	0.0059	0.0261	0.0176	0.0250	0.0244	0.0263	0.0263	0.0263	0.0261	0.0150
285	13.1750	0.0000	0.0213	0.0157	0.0203	0.0198	0.0215	0.0215	0.0215	0.0213	0.0103
300	13.1750	0.0000	0.0174	0.0145	0.0165	0.0160	0.0175	0.0175	0.0175	0.0174	0.0067
315	13.1750	0.0000	0.0142	0.0137	0.0134	0.0130	0.0143	0.0143	0.0143	0.0142	0.0039

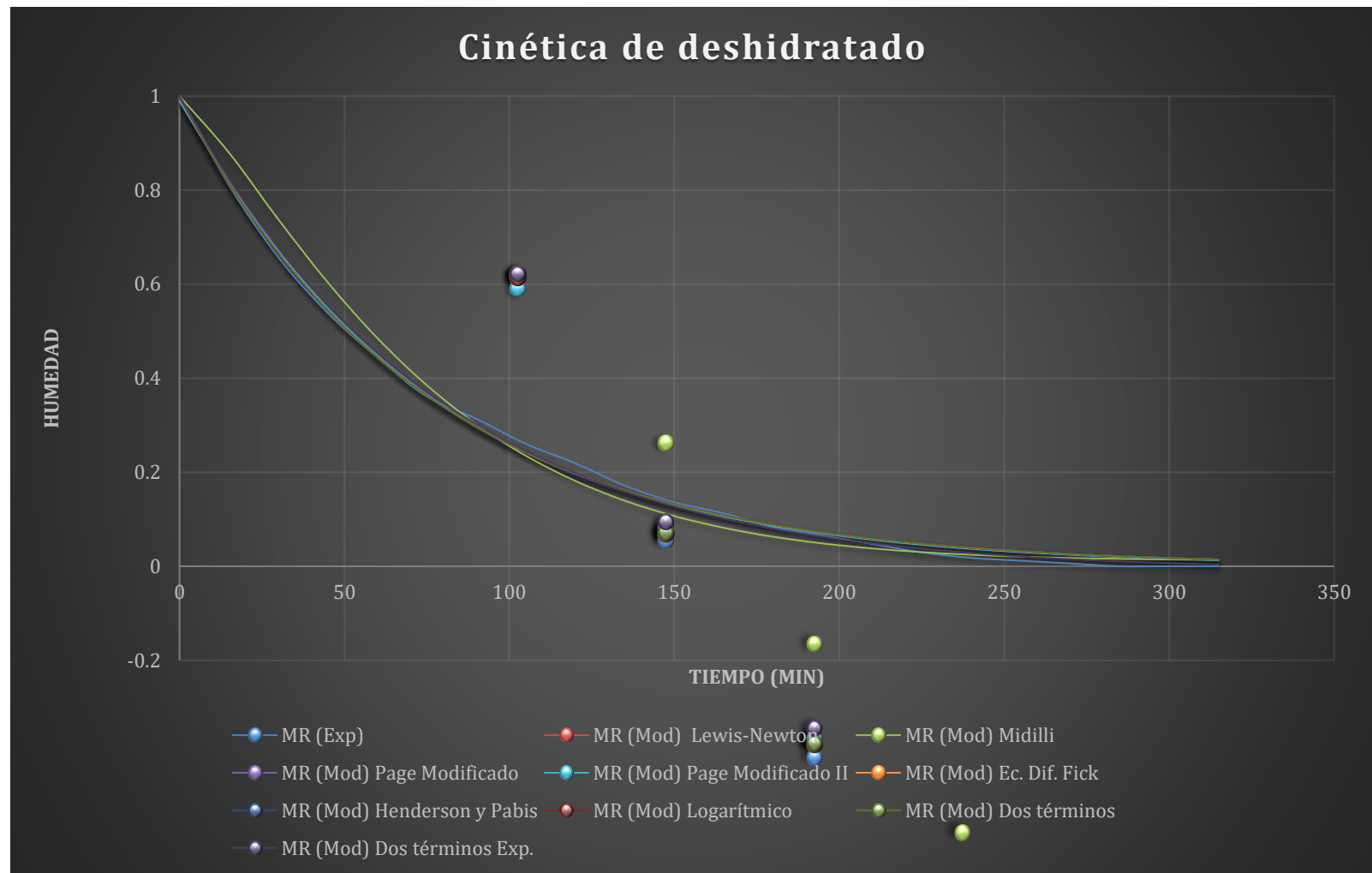


Fig. 4.14 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 5 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.28 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 5. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0135		0.9964	0.0042
MIDILLI	40	1.0000	0.0000				0.0044	1.2494	0.9858	0.0245
PAGE MODIFICADO	40						0.0128	1.0115	0.9976	0.0041
PAGE MODIFICADO II	40	0.9895					0.0120	1.0244	0.9977	0.0040
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	0.9972			0.4176		0.0056		0.9976	0.0041
HENDERSON Y PABIS	40	0.9972					0.0135		0.9976	0.0041
LOGARÍTMICO	40	0.9972	0.0000				0.0135		0.9976	0.0041
DOS TERMINOS	40	0.8930	0.0000			1.3394	0.1194		0.9976	0.0042
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	29.2219	0.9899				0.0100		0.9984	0.0028

4.2.6 Corrida 6

En la tabla 4.29 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.30 con los datos obtenidos durante la corrida 6 del diseño de experimentos.

Tabla 4.29 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	50
Peso de la muestra	0.136	v aire Op.	2.05-2.13 m/s
Temperatura de ambiente	27.2	Material	Nopal
%HR Ambiente	40	Humedad inicial del material	90%
Espesor de la muestra	6.1-7.1 mm		

Tabla 4.30 Datos obtenidos durante la corrida 6. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

tiempo de secado min	Peso de la muestra	Pérdida de peso	% Humedad
0	0	0.136	90
15	0.01	0.126	83.38
30	0.019	0.117	77.43
45	0.025	0.111	73.46
60	0.032	0.104	68.82
75	0.037	0.099	65.51
90	0.043	0.093	61.54
105	0.047	0.089	58.90
120	0.051	0.085	56.25
135	0.056	0.08	52.94
150	0.06	0.076	50.29
165	0.063	0.073	48.31

180	0.066	0.07	46.32
195	0.069	0.067	44.34
210	0.072	0.064	42.35
225	0.074	0.062	41.03
240	0.076	0.06	39.71
255	0.078	0.058	38.38
270	0.08	0.056	37.06
285	0.082	0.054	35.74
300	0.084	0.052	34.41
315	0.086	0.05	33.09
330	0.087	0.049	32.43
345	0.088	0.048	31.76
360	0.089	0.047	31.10
375	0.09	0.046	30.44
390	0.091	0.045	29.78
405	0.092	0.044	29.12
420	0.093	0.043	28.46

En la Fig. 4.15 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra el tiempo de deshidratado en la corrida 6.

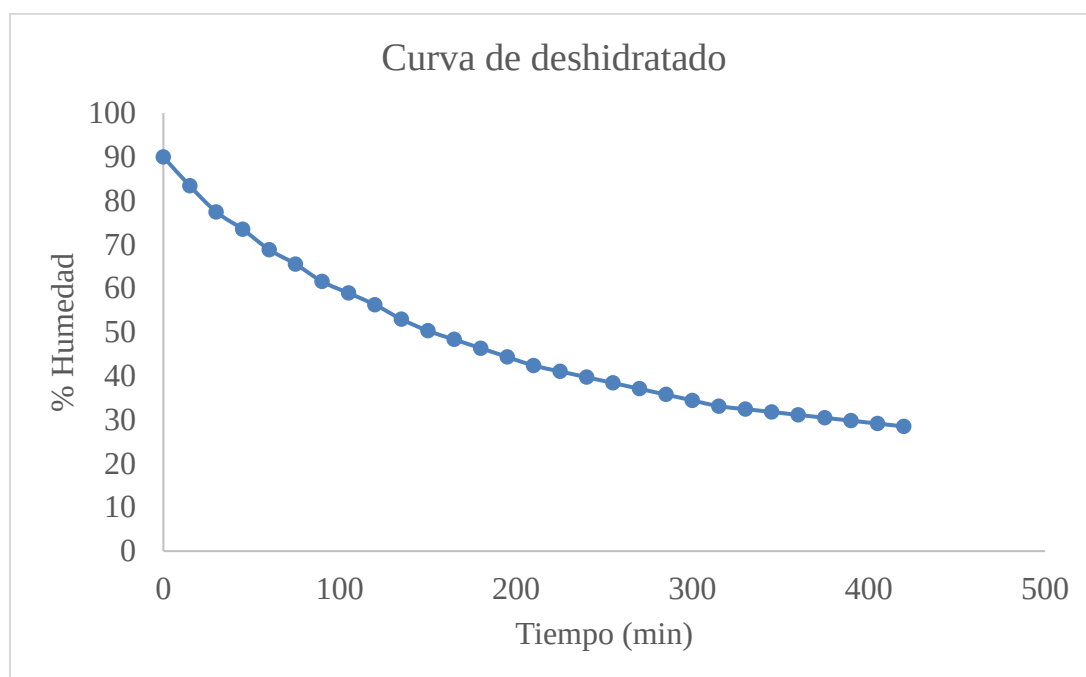


Fig. 4.15 Curva de deshidratado de la corrida 6. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.31 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.16 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.32 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 6.

Tabla 4.31 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 6. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	90	1	1	0.9673	1.0000	0.9673	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
15	83.3824	0.8925	0.8979	0.8978	0.9157	0.8978	0.8979	0.8979	0.8979	0.8979	0.9101
30	77.4265	0.7957	0.8063	0.8211	0.8299	0.8211	0.8063	0.8063	0.8063	0.8063	0.8255
45	73.4559	0.7312	0.7240	0.7459	0.7488	0.7459	0.7240	0.7240	0.7240	0.7240	0.7465
60	68.8235	0.6559	0.6501	0.6745	0.6736	0.6745	0.6501	0.6501	0.6501	0.6501	0.6733
75	65.5147	0.6022	0.5838	0.6078	0.6047	0.6078	0.5838	0.5838	0.5838	0.5838	0.6058
90	61.5441	0.5376	0.5242	0.5461	0.5418	0.5461	0.5242	0.5242	0.5242	0.5242	0.5439
105	58.8971	0.4946	0.4707	0.4894	0.4847	0.4894	0.4707	0.4707	0.4707	0.4707	0.4873
120	56.2500	0.4516	0.4226	0.4377	0.4330	0.4377	0.4226	0.4226	0.4226	0.4226	0.4358
135	52.9412	0.3978	0.3795	0.3906	0.3864	0.3907	0.3795	0.3795	0.3795	0.3795	0.3891
150	50.2941	0.3548	0.3408	0.3481	0.3444	0.3481	0.3408	0.3408	0.3408	0.3408	0.3468
165	48.3088	0.3226	0.3060	0.3096	0.3067	0.3096	0.3060	0.3060	0.3060	0.3060	0.3087
180	46.3235	0.2903	0.2748	0.2750	0.2729	0.2750	0.2748	0.2748	0.2748	0.2748	0.2744
195	44.3382	0.2581	0.2467	0.2440	0.2426	0.2440	0.2467	0.2467	0.2467	0.2467	0.2437
210	42.3529	0.2258	0.2215	0.2161	0.2156	0.2162	0.2215	0.2215	0.2215	0.2215	0.2161
225	41.0294	0.2043	0.1989	0.1913	0.1914	0.1913	0.1989	0.1989	0.1989	0.1989	0.1914
240	39.7059	0.1828	0.1786	0.1690	0.1698	0.1691	0.1786	0.1786	0.1786	0.1786	0.1694
255	38.3824	0.1613	0.1604	0.1493	0.1505	0.1493	0.1604	0.1604	0.1604	0.1604	0.1498
270	37.0588	0.1398	0.1440	0.1317	0.1334	0.1317	0.1440	0.1440	0.1440	0.1440	0.1323
285	35.7353	0.1183	0.1293	0.1160	0.1181	0.1160	0.1293	0.1293	0.1293	0.1293	0.1167
300	34.4118	0.0968	0.1161	0.1021	0.1046	0.1021	0.1161	0.1161	0.1161	0.1161	0.1029
315	33.0882	0.0753	0.1043	0.0898	0.0925	0.0898	0.1043	0.1043	0.1043	0.1043	0.0907

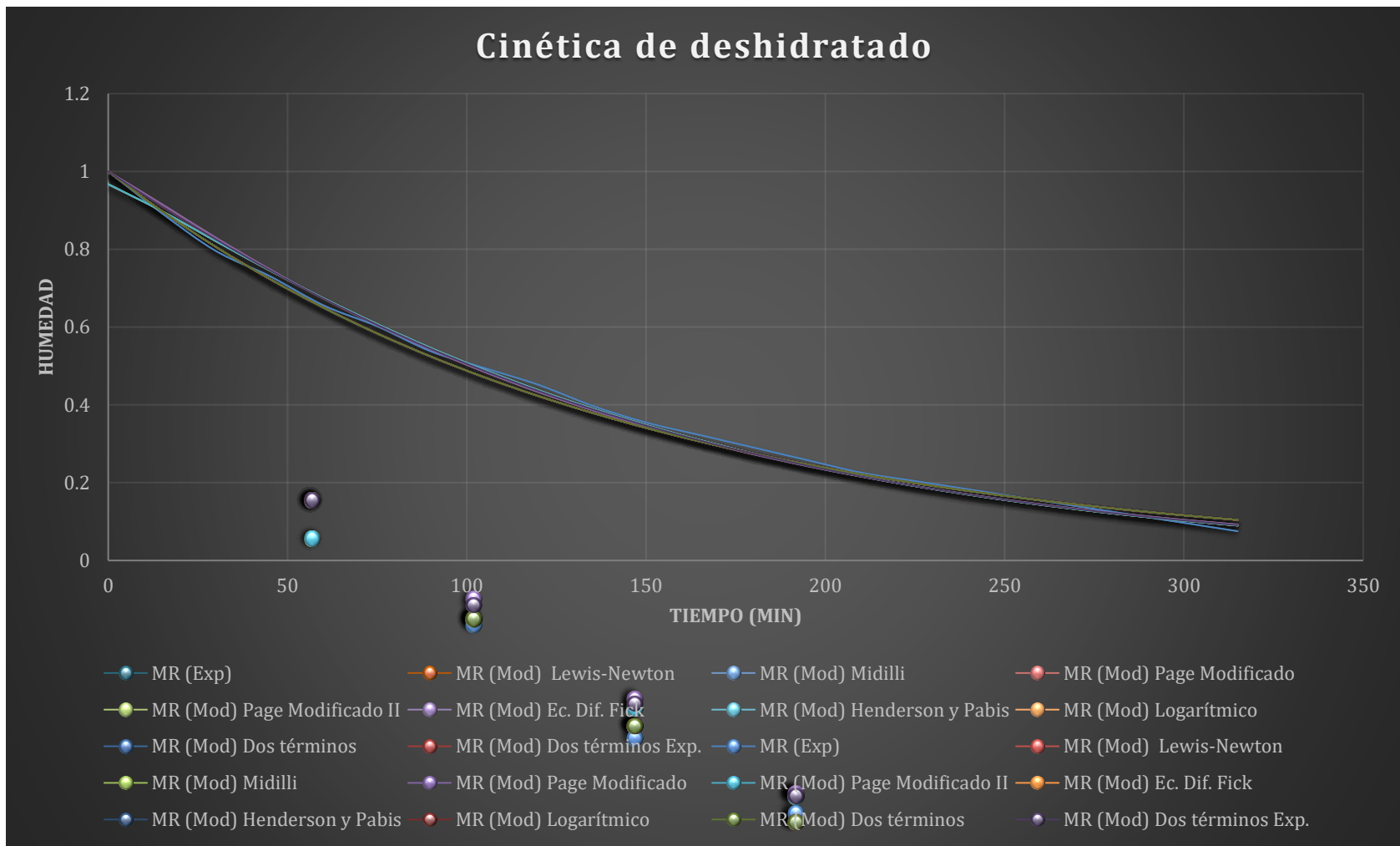


Fig. 4.16 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 6 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.32 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 6. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0072		0.9932	0.0147
MIDILLI	40	0.9673	0.0000				0.0034	1.1372	0.9967	0.0083
PAGE MODIFICADO	40						0.0047	1.0831	0.9961	0.0098
PAGE MODIFICADO II	40	0.9673					0.0034	1.1373	0.9967	0.0083
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	1.0000			0.5079		0.0036		0.9942	0.0147
HENDERSON Y PABIS	40	1.0000					0.0072		0.9942	0.0147
LOGARÍTMICO	40	1.0000	0.0000				0.0072		0.9942	0.0147
DOS TERMINOS	40	0.9444	0.0000			1.3394	0.1255		0.9942	0.0147
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	27.0952	1.0151				0.0102		0.9968	0.0081

4.2.7 Corrida 7

En la tabla 4.33 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.34 con los datos obtenidos durante la corrida 7 del diseño de experimentos.

Tabla 4.33 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	50
Peso de la muestra	0.128	v aire Op.	3.9-4.2 m/s
Temperatura de ambiente	22	Material	Nopal
%HR Ambiente	40	Humedad inicial del material	90%
Espesor de la muestra	6.6-7.1 mm		

Tabla 4.34 Datos obtenidos durante la corrida 7. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad del ambiente	Humedad de la cámara	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	40	15	0	0.128	90.00
15	40	13	0.012	0.116	81.56
30	39	12	0.018	0.11	77.34
45	38.6	12	0.024	0.104	73.13
60	37.5	11	0.03	0.098	68.91
75	34.3	10	0.036	0.092	64.69
90	28.7	9	0.041	0.087	61.17
105	25.5	7	0.045	0.083	58.36
120	24.9	7	0.049	0.079	55.55
135	24.5	7	0.053	0.075	52.73
150	25.4	7	0.057	0.071	49.92

165	25.6	7	0.06	0.068	47.81
180	26.1	7	0.063	0.065	45.70
195	22.3	7	0.067	0.061	42.89
210	26.3	7	0.071	0.057	40.08
225	26.3	6	0.073	0.055	38.67
240	24.5	6	0.076	0.052	36.56
255	25.5	5	0.078	0.05	35.16
270	28.3	6	0.08	0.048	33.75
285	24.2	5	0.083	0.045	31.64
300	22.1	5	0.085	0.043	30.23
315	22.4	5	0.086	0.042	29.53
330	24.4	5	0.088	0.04	28.13
345	24	5	0.09	0.038	26.72
360	26.9	6	0.091	0.037	26.02
375	26.4	6	0.091	0.037	26.02
390	29.6	6	0.091	0.037	26.02

En la Fig. 4.17 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 7.

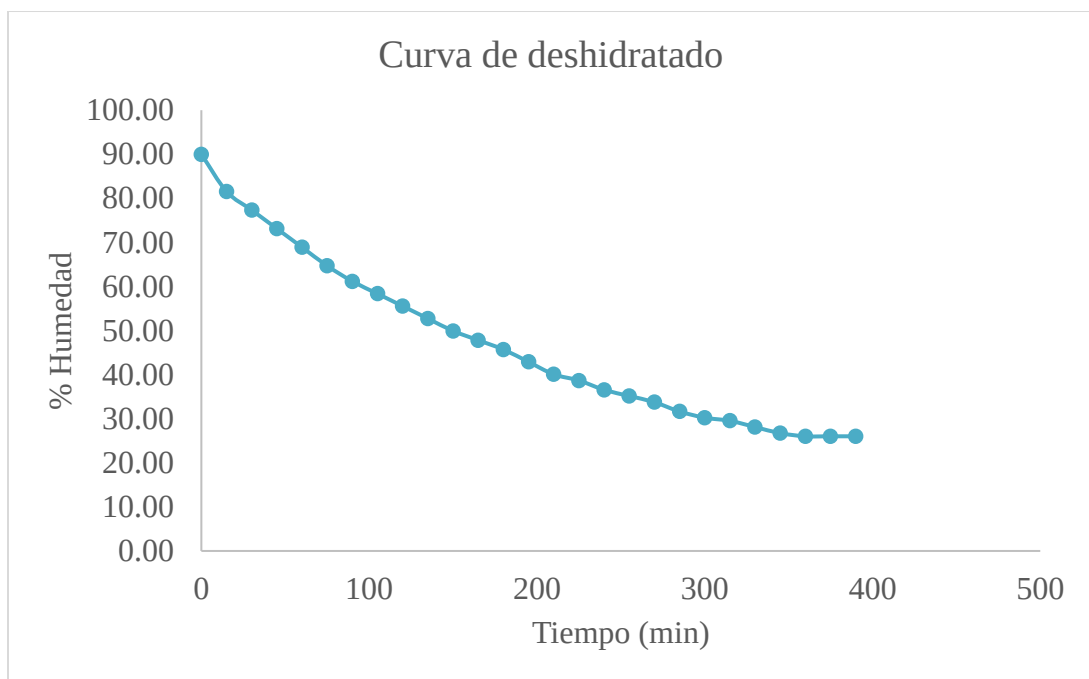


Fig. 4.17 Curva de deshidratado de la corrida 7. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.35 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.18 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.36 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 7.

Tabla 4.35 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 7. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis-Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	90	1	1	0.9386	1.0000	0.9417	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
15	81.5625	0.8681	0.8983	0.8915	0.9254	0.8917	0.8983	0.8983	0.8983	0.8983	0.9133
30	77.3438	0.8022	0.8069	0.8286	0.8433	0.8268	0.8069	0.8069	0.8069	0.8069	0.8326
45	73.1250	0.7363	0.7248	0.7614	0.7633	0.7584	0.7248	0.7248	0.7248	0.7248	0.7576
60	68.9063	0.6703	0.6510	0.6939	0.6876	0.6903	0.6510	0.6510	0.6510	0.6510	0.6879
75	64.6875	0.6044	0.5848	0.6281	0.6172	0.6244	0.5848	0.5848	0.5848	0.5848	0.6232
90	61.1719	0.5495	0.5253	0.5653	0.5523	0.5619	0.5253	0.5253	0.5253	0.5253	0.5632
105	58.3594	0.5055	0.4719	0.5063	0.4930	0.5033	0.4719	0.4719	0.4719	0.4719	0.5076
120	55.5469	0.4615	0.4239	0.4514	0.4391	0.4489	0.4239	0.4239	0.4238	0.4239	0.4560
135	52.7344	0.4176	0.3807	0.4008	0.3903	0.3990	0.3807	0.3807	0.3807	0.3807	0.4082
150	49.9219	0.3736	0.3420	0.3546	0.3463	0.3534	0.3420	0.3420	0.3420	0.3420	0.3640
165	47.8125	0.3407	0.3072	0.3127	0.3067	0.3120	0.3072	0.3072	0.3072	0.3072	0.3232
180	45.7031	0.3077	0.2759	0.2748	0.2713	0.2747	0.2759	0.2759	0.2759	0.2759	0.2854
195	42.8906	0.2637	0.2479	0.2407	0.2396	0.2412	0.2479	0.2479	0.2479	0.2479	0.2506
210	40.0781	0.2198	0.2226	0.2103	0.2114	0.2112	0.2226	0.2226	0.2226	0.2226	0.2185
225	38.6719	0.1978	0.2000	0.1833	0.1862	0.1845	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.1889
240	36.5625	0.1648	0.1796	0.1593	0.1639	0.1608	0.1796	0.1796	0.1796	0.1796	0.1616
255	35.1563	0.1429	0.1614	0.1381	0.1440	0.1398	0.1614	0.1614	0.1614	0.1614	0.1366
270	33.7500	0.1209	0.1450	0.1195	0.1265	0.1213	0.1450	0.1450	0.1450	0.1450	0.1136
285	31.6406	0.0879	0.1302	0.1031	0.1110	0.1051	0.1302	0.1302	0.1302	0.1302	0.0925
300	30.2344	0.0659	0.1170	0.0888	0.0972	0.0908	0.1170	0.1170	0.1170	0.1170	0.0733
315	29.5313	0.0549	0.1051	0.0763	0.0851	0.0784	0.1051	0.1051	0.1051	0.1051	0.0556

330	28.1250	0.0330	0.0944	0.0654	0.0745	0.0675	0.0944	0.0944	0.0944	0.0944	0.0395
345	26.7188	0.0110	0.0848	0.0560	0.0651	0.0580	0.0848	0.0848	0.0848	0.0848	0.0249
360	26.0156	0.0000	0.0761	0.0478	0.0569	0.0498	0.0761	0.0761	0.0761	0.0761	0.0115

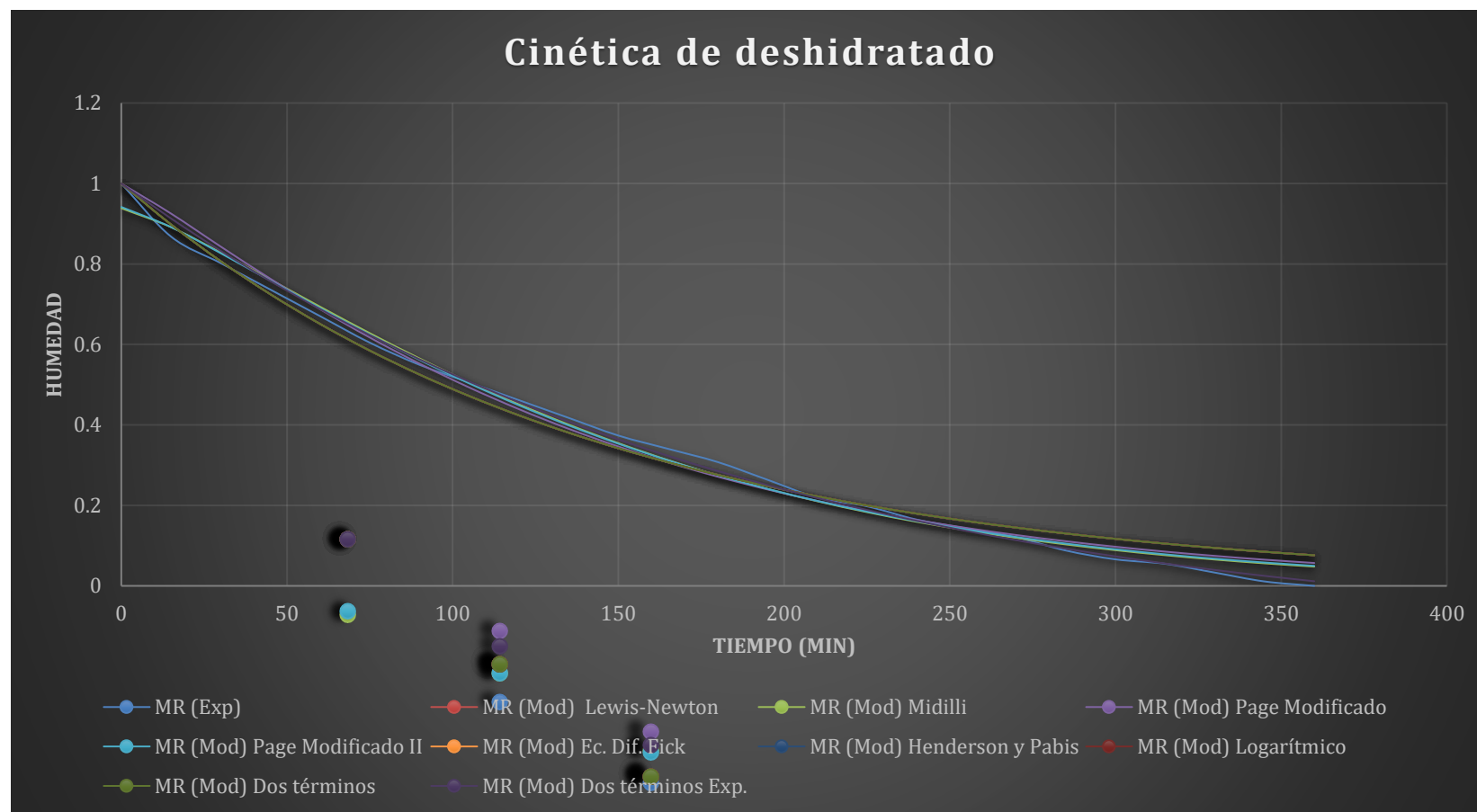


Fig. 4.18 Curva de deshidratado normalizada de la corrida 7 para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.36 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 7. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0072		0.9801	0.0328
MIDILLI	40	0.9386	0.0000				0.0016	1.2767	0.9916	0.0171
PAGE MODIFICADO	40						0.0036	1.1360	0.9893	0.0219
PAGE MODIFICADO II	40	0.9417					0.0018	1.2545	0.9917	0.0170
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	1.0000			0.5701		0.0041		0.9840	0.0328
HENDERSON Y PABIS	40	1.0000					0.0072		0.9840	0.0328
LOGARÍTMICO	40	1.0000	0.0000				0.0072		0.9840	0.0328
DOS TERMINOS	40	0.9120	0.0000			1.3394	0.0776		0.9840	0.0328
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	20.9464	0.9614				0.0034		0.9972	0.0061

4.2.8 Corrida 8

En la tabla 4.37 se encuentran los datos iniciales a determinadas condiciones de operación. Para posteriormente construir la tabla 4.38 con los datos obtenidos durante la corrida 8 del diseño de experimentos.

Tabla 4.37 Condiciones iniciales. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Datos iniciales		Condiciones de operación	
Peso de la rejilla	0.444	Temperatura de Operación	50
Peso de la muestra	0.134	v aire Op.	3.92-4.2 m/s
Temperatura de ambiente	17.8	Material	Manzana
%HR Ambiente	48.3	Humedad inicial del material	85%
Espesor de la muestra	5.5-6.1 mm		

Tabla 4.38 Datos obtenidos durante la corrida 8. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad de la cámara	Humedad del ambiente	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad
0	25	48.3	0	0.134	85
15	16	46.5	0.024	0.11	69.78
30	15	44.5	0.041	0.093	58.99
45	14	43.7	0.052	0.082	52.01
60	13	41	0.06	0.074	46.94
75	13	40.7	0.067	0.067	42.50
90	12	39	0.076	0.058	36.79
105	12	38.1	0.083	0.051	32.35
120	11	35.8	0.091	0.043	27.28
135	10	33.8	0.099	0.035	22.20
150	9	30.9	0.105	0.029	18.40
165	9	29.9	0.108	0.026	16.49
180	8	29.9	0.112	0.022	13.96
195	8	26.9	0.113	0.021	13.32
210	7	25.9	0.113	0.021	13.32

En la Fig. 4.19 se muestra la curva obtenida al graficar el % de humedad en la muestra contra al tiempo de deshidratado en la corrida 8.

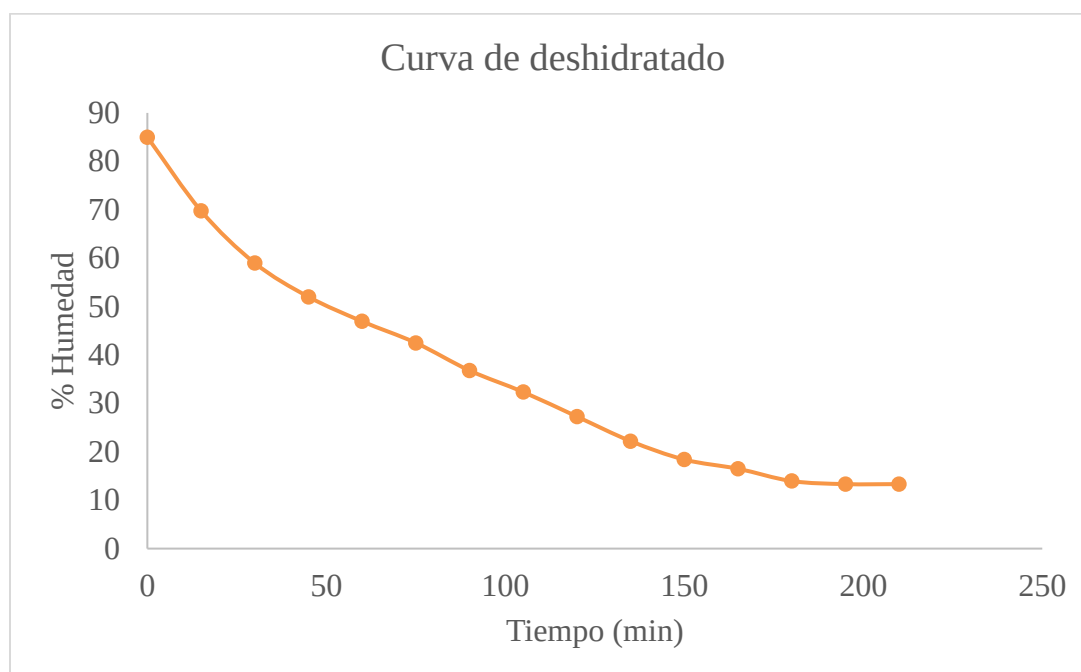


Fig. 4.19 Curva de deshidratado de la corrida 8. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.39 Se muestran los valores calculados del contenido de humedad adimensional, MR, normalizados, utilizando los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado. En la Fig. 4.20 se muestran las curvas de deshidratado normalizadas, la obtenida con los datos experimentales y con los modelos empíricos de cinética de deshidratado de Lewis-Newton, Midilli, Page Modificado, Page Modificado II, Ecuación de Difusión de Fick, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Dos términos Exponencial.

En la Tabla 4.40 se muestran los datos obtenidos para los valores de cada uno de los coeficientes y el respectivo valor de k, en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 8.

Tabla 4.39 Datos normalizados de los diferentes modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la corrida 8. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	% HUMEDAD	MR (Exp)	MR (Mod) Lewis- Newton	MR (Mod) Midilli	MR (Mod) Page Modificado	MR (Mod) Page Modificado II	MR (Mod) Ec. Dif. Fick	MR (Mod) Henderson y Pabis	MR (Mod) Logarítmico	MR (Mod) Dos términos	MR (Mod) Dos términos Exp.
0	85	1	1	0.9573	1.0000	0.9573	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
15	69.7761	0.7876	0.8091	0.8270	0.8392	0.8270	0.8091	0.8091	0.8091	0.8091	0.8346
30	58.9925	0.6372	0.6547	0.6869	0.6857	0.6869	0.6547	0.6547	0.6547	0.6547	0.6919
45	52.0149	0.5398	0.5297	0.5600	0.5538	0.5600	0.5297	0.5297	0.5297	0.5297	0.5693
60	46.9403	0.4690	0.4286	0.4507	0.4437	0.4507	0.4286	0.4286	0.4286	0.4286	0.4640
75	42.5000	0.4071	0.3468	0.3591	0.3534	0.3591	0.3468	0.3468	0.3468	0.3468	0.3739
90	36.7910	0.3274	0.2806	0.2837	0.2801	0.2837	0.2806	0.2806	0.2806	0.2806	0.2970
105	32.3507	0.2655	0.2271	0.2224	0.2211	0.2224	0.2271	0.2271	0.2271	0.2271	0.2316
120	27.2761	0.1947	0.1837	0.1733	0.1739	0.1733	0.1837	0.1837	0.1837	0.1837	0.1761
135	22.2015	0.1239	0.1487	0.1343	0.1363	0.1343	0.1487	0.1487	0.1487	0.1487	0.1293
150	18.3955	0.0708	0.1203	0.1035	0.1065	0.1035	0.1203	0.1203	0.1203	0.1203	0.0900
165	16.4925	0.0442	0.0973	0.0794	0.0830	0.0794	0.0973	0.0973	0.0973	0.0973	0.0571
180	13.9552	0.0088	0.0787	0.0606	0.0646	0.0606	0.0787	0.0787	0.0787	0.0787	0.0298
195	13.3209	0.0000	0.0637	0.0461	0.0501	0.0461	0.0637	0.0637	0.0637	0.0637	0.0074
210	13.3209	0.0000	0.0516	0.0349	0.0388	0.0349	0.0516	0.0516	0.0516	0.0516	-0.0110

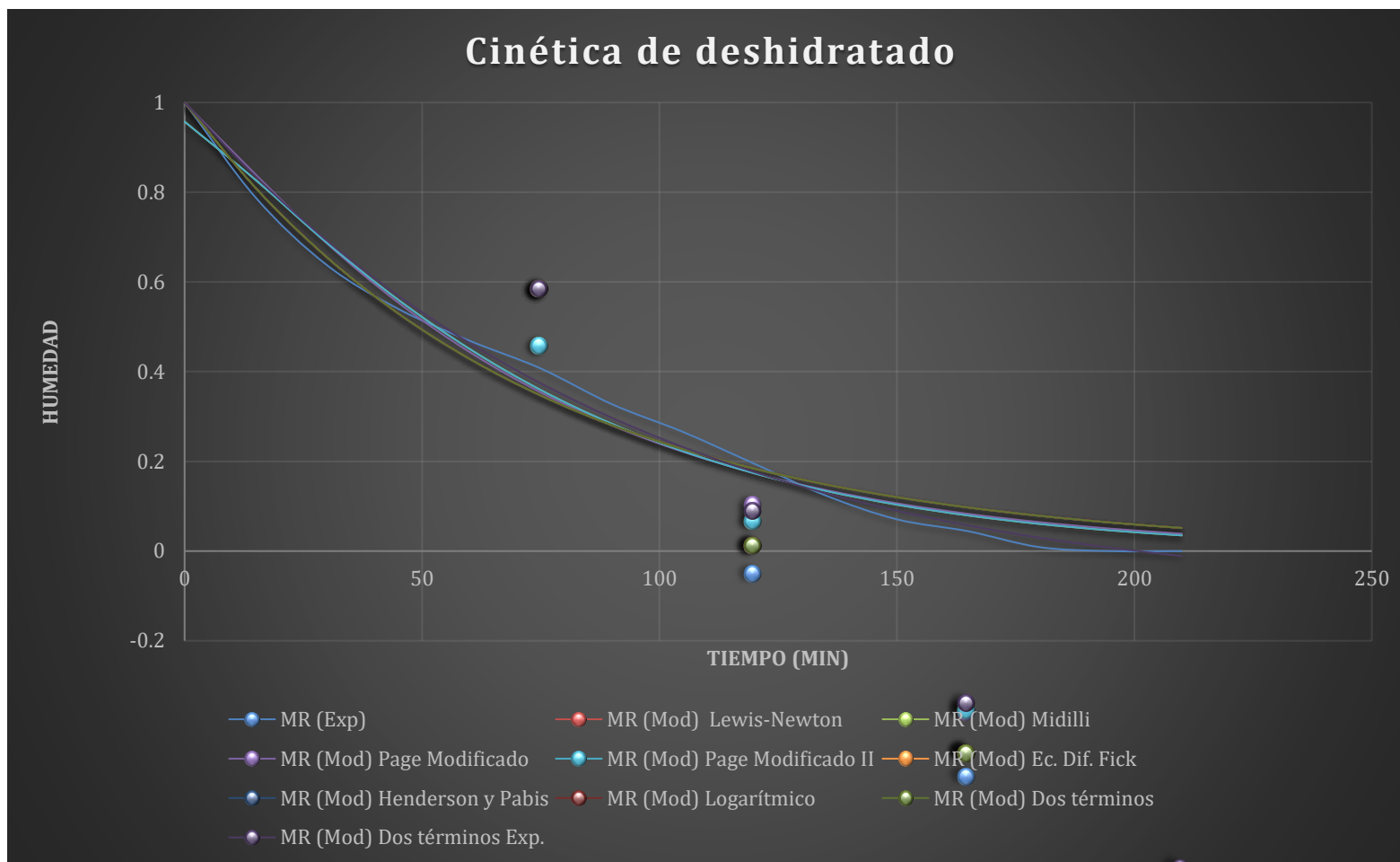


Fig. 4.20 Curva de deshidratado normalizada de la primera experimentación para la comparativa de cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tabla 4.40 Datos obtenidos en base a cada uno de los modelos empíricos de la cinética de deshidratado de la segunda experimentación. Nota:
Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0141		0.9701	0.0274
MIDILLI	40	0.9573	0.0000				0.0060	1.1819	0.9841	0.0215
PAGE MODIFICADO	40						0.0088	1.1064	0.9827	0.0234
PAGE MODIFICADO II	40	0.9573					0.0060	1.1819	0.9841	0.0215
EC DE DIFUSIÓN DE FICK	40	1.0000			0.3495		0.0049		0.9798	0.0274
HENDERSON Y PABIS	40	1.0000					0.0141		0.9798	0.0274
LOGARÍTMICO	40	1.0000	0.0000				0.0141		0.9798	0.0274
DOS TERMINOS	40	0.8809	0.0000			1.3394	0.1113		0.9798	0.0274
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	40	27.7421	0.9737				0.0070		0.9924	0.0108

4.3 Resumen de resultados de la experimentación exploratoria

En la tabla 4.41 se muestra el contenido de humedad en las muestras obtenido cada 15 min para las 8 corridas de la experimentación exploratoria. En la figura 4.21 se muestran las curvas de deshidratado obtenidas al graficar los datos de la tabla 4.41.

*Tabla 4.41 Contenido de humedad en las muestras a diferentes tiempos de la prueba durante las 8 corridas de la experimentación exploratoria.
Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.*

Tiempo, min	EXP 1 N, 30 °C, 2 m/s	EXP 2 M, 30 °C, 2 m/s, US	EXP 3 M, 30 °C, 4 m/s	EXP 4 N, 30 °C, 4 m/s, US	EXP 5 M, 50 °C, 2 m/s	EXP 6 N, 50 °C, 2 m/s, US	EXP 7 N, 50 °C, 4 m/s	EXP 8 M, 50 °C, 4 m/s, US
0	90	85	85	90	85	90	90	85
15	85.7143	75.1163	79.4675	83.7736	71.4000	83.3824	81.5625	69.7761
30	81.4286	70.5039	71.9231	78.6792	60.3500	77.4265	77.3438	58.9925
45	78.5714	67.2093	65.3846	74.7170	51.8500	73.4559	73.1250	52.0149
60	75.7143	61.9380	61.3609	71.8868	45.0500	68.8235	68.9063	46.9403
75	73.3333	58.6434	57.8402	69.6226	39.1000	65.5147	64.6875	42.5000
90	70.9524	55.3488	55.3254	66.7925	35.7000	61.5441	61.1719	36.7910
105	69.0476	51.3953	52.8107	65.0943	31.8750	58.8971	58.3594	32.3507
120	67.1429	48.1008	50.7988	62.2642	28.9000	56.2500	55.5469	27.2761
135	65.2381	46.1240	48.7870	60.5660	25.5000	52.9412	52.7344	22.2015
150	62.8571	43.4884	46.7751	58.3019	22.9500	50.2941	49.9219	18.3955
165	61.4286	40.8527	44.7633	56.6038	21.2500	48.3088	47.8125	16.4925
180	60.0000	38.2171	42.7515	54.9057	19.1250	46.3235	45.7031	13.9552
195	58.5714	35.5814	41.2426	53.2075	17.8500	44.3382	42.8906	13.3209
210	57.1429	32.9457	39.2308	50.9434	16.5750	42.3529	40.0781	13.3209
225	55.7143	31.6279	37.7219	49.8113	15.3000	41.0294	38.6719	

240	54.7619	29.6512	36.2130	48.6792	14.4500	39.7059	36.5625	
255	53.3333	28.3333	34.7041	47.5472	14.0250	38.3824	35.1563	
270	52.3810	27.0155	33.1953	46.4151	13.6000	37.0588	33.7500	
285	50.9524	25.6977	32.1893	45.8491	13.1750	35.7353	31.6406	
300	50.0000	23.7209	30.1775	45.2830	13.1750	34.4118	30.2344	
315	49.0476	22.4031	28.6686	44.7170	13.1750	33.0882	29.5313	
330	48.0952	21.7442	28.1657	43.5849		32.4265	28.1250	
345	47.1429	20.4264	27.1598	43.0189		31.7647	26.7188	
360	46.1905	19.1085	26.1538	41.8868		31.1029	26.0156	
375	45.2381	17.7907	25.6509	40.7547		30.4412	26.0156	
390	44.7619	17.1318	25.1479	40.1887		29.7794	26.0156	
405	43.8095	16.4729	24.6450	39.6226		29.1176		
420	43.3333	15.1550	24.6450	39.0566		28.4559		
435	42.3810	14.4961	24.6450	38.4906				
450	41.9048	13.8372		37.9245				
465	41.4286	13.8372		36.7925				
480	40.9524			36.7925				
495	40.0000			36.2264				
510	39.5238			35.6604				
525	39.0476			35.6604				
540	38.5714							
555	38.5714							
570	38.0952							
585	37.6190							
600	37.1429							
615	36.6667							
630	36.6667							

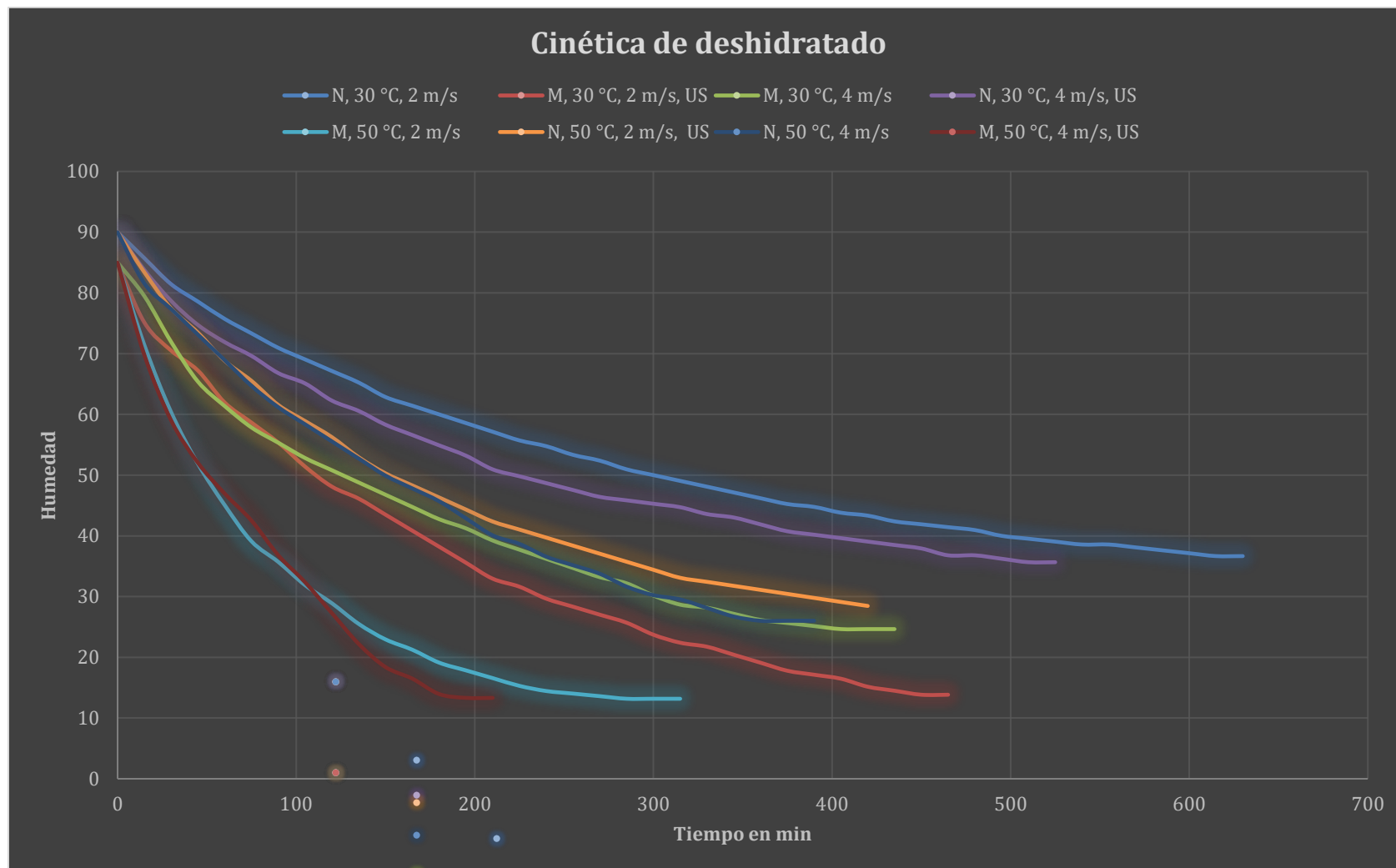


Fig. 4.21 Curvas de deshidratado a diferentes condiciones experimentaciones, de acuerdo con el diseño experimental exploratorio. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.42 muestra un resumen general de los resultados obtenidos de la experimentación exploratoria, adicionando la corrida 9 y 10, como experimentos de validación y comparativa de las corridas 4 y 8 respectivamente. Dónde se muestran los resultados de las experimentaciones en base al modelo de Lewis-Newton para la cinética de deshidratado y el coeficiente de correlación.

Tabla 4.42 Datos obtenidos del comportamiento de la humedad cada una de las experimentaciones realizadas. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Corrida	Condiciones experimentales				Resultados		
	Temp. del aire, °C	Vel. del aire, m/s	US	Producto	k cinética	Coef. de correlación, R ²	Humedad final de la fruta
1	30	2	NO	Nopal	0.0048	0.9906	36.66%
2	30	2	SI	Manzana	0.0064	0.9904	13.84%
3	30	4	NO	Manzana	0.0074	0.9841	24.64%
4	30	4	SI	Nopal	0.0060	0.9954	35.66%
5	50	2	NO	Manzana	0.0135	0.9964	13.18%
6	50	2	SI	Nopal	0.0072	0.9932	28.46%
7	50	4	NO	Nopal	0.0072	0.9801	27.02%
8	50	4	SI	Manzana	0.0141	0.9701	13.32%
9	30	4	NO	Nopal	0.0058	0.9854	36.00%
10	50	4	NO	Manzana	0.013	0.9905	8.12%

4.4 Experimentos de validación.

4.4.1 Primer experimento de validación.

La tabla 4.43 muestra los datos obtenidos del deshidratado de manzana a una temperatura de 50 °C y 4 m/s de velocidad de aire sin uso de US, para uno de los experimentos de validación y comparativa.

Tabla 4.43 Datos obtenidos de la primera prueba de validación. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad	Humedad del ambiente
0	0	0.125	85	52.4
15	0.02	0.105	71.40	52.4
25	0.03	0.095	64.60	45.1
80	0.066	0.059	40.12	38.2
180	0.099	0.026	17.68	38.2
220	0.109	0.016	10.88	35.8
240	0.111	0.014	9.52	34.3
255	0.111	0.014	9.52	SD
270	0.112	0.013	8.84	33.5
285	0.113	0.012	8.16	32.6
305	0.113	0.012	8.16	32.3

En la figura 4.22 representa el comportamiento de la humedad, con ciertas condiciones de operación de 50 °C y 4 m/s de velocidad de aire sin uso de US por un periodo de tiempo hasta llegar a su equilibrio teórico.

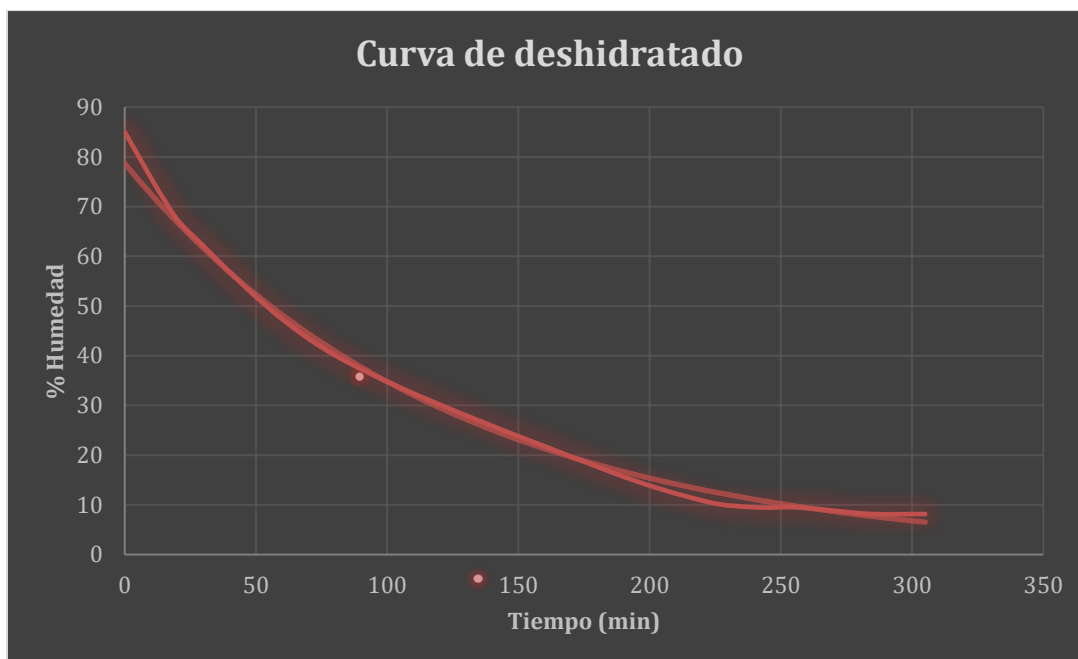


Fig. 4.22 Curva de deshidratado de la primera experimentación de validación. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.44 se muestra el modelo de Lewis-Newton utilizado como método de comparativa ante los datos experimentales del primer experimento de validación, con el ajuste de R^2 y el valor obtenido para la cinética, k .

Tabla 4.44 Ajuste de modelo de Lewis-Newton obtenido mediante Solver para el primer experimento de prueba. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

	Parámetros								Análisis estadístico	
Modelos	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0130		0.9905	0.0095

4.4.2 Segundo experimento de validación.

La tabla 4.45 muestra los datos obtenidos del deshidratado de nopal a una temperatura de 30 °C y 4 m/s de velocidad de aire sin uso de US, para uno de los experimentos de validación y comparativa.

Tabla 4.45 Datos obtenidos de la segunda prueba de validación. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Tiempo, min	Humedad de la cámara	Pérdida de humedad, gr	Peso de la muestra, gr	% Humedad	Humedad del ambiente
0	42	0	0.17	90	60.9
15	39	0.01	0.16	84.70588235	57.5
30	38	0.022	0.148	78.35294118	50.2
70	34	0.039	0.131	69.35294118	36.7
125	31	0.054	0.116	61.41176471	36.7
195	33	0.067	0.103	54.52941176	34.9
240	32	0.072	0.098	51.88235294	34.8
330	32	0.084	0.086	45.52941176	32.4
390	31	0.089	0.081	42.88235294	31.8
450	25	0.094	0.076	40.23529412	31.8
510	25	0.099	0.071	37.58823529	37
570	30	0.102	0.068	36	38.6

La figura 4.23 presenta el comportamiento de la humedad, con ciertas condiciones de operación de 30 °C y 4 m/s de velocidad de aire sin uso de US por un periodo de tiempo hasta llegar a su equilibrio teórico.



Fig. 4.23 Curva de deshidratado de la segunda experimentación de validación. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

En la tabla 4.46 se muestra el modelo de Lewis-Newton utilizado como método de comparativa ante los datos experimentales del segundo experimento de validación, con el ajuste de R^2 y el valor obtenido para la cinética, k.

Tabla 4.46 Ajuste de modelo de Lewis-Newton obtenido mediante Solver para el segundo experimento de prueba. Nota: Tabla creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

Modelos	Parámetros								Análisis estadístico	
	T (°C)	a	b	c	L ²	m	k	n	R ²	RMSE
LEWIS NEWTON	40						0.0058		0.9884	0.0116

En la figura 4.24 muestra el gráfico representativo del comportamiento del % de humedad a través del tiempo de proceso de cada una de las experimentaciones involucradas para el efecto de la comparativa sobre los tiempos y cinética de deshidratado con y sin uso de US.

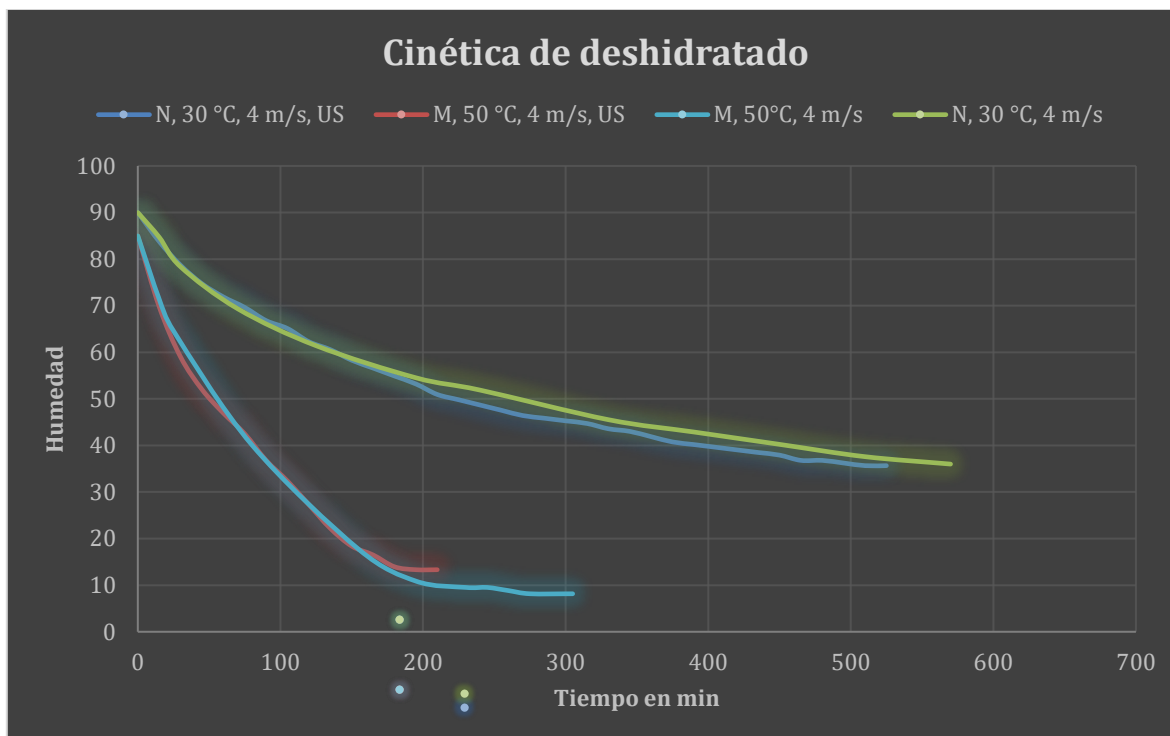


Fig. 4.24 Gráfica experimentos comparativos. Nota: Escala creada por elaboración propia Sánchez, C. 2025.

4.5 Análisis de resultados de la experimentación exploratoria

En la figura 4.21 se observa que la velocidad de deshidratado es mucho mayor cuando se utilizan velocidades de aire altas y temperaturas elevadas. Comparando los valores de k obtenidos en los distintos experimentos mostrados en la tabla 4.42, la mayor velocidad de deshidratado se obtuvo cuando se utilizaron la temperatura y la velocidad del aire más altos, 50°C y 4 m/s respectivamente; aplicando US y el producto deshidratado fue la manzana.

Para realizar el deshidratado de alimentos durante aquellos días donde la humedad del ambiente es relativamente baja, cuando la temperatura sea considerablemente alta para poder extraer la mayor cantidad del contenido de agua que posea el material que se desea deshidratar.

El efecto de la humedad del aire produce efectos en las pruebas de deshidratado, dado que la humedad en la cámara de deshidratado durante los experimentos es influida por este factor y este a su vez afecta sobre el porcentaje de humedad alcanzado al equilibrio, como puede verse en los experimentos de las corridas 3 y 8 en los que la humedad ambiental fue de 55% y 48.3% respectivamente; y los contenidos de humedad al equilibrio en el producto, fueron de 24.64% y 13.32% respectivamente.

Un punto importante del proyecto es que, la tecnología a probar, US, resultó ser significativa para reducir los tiempos de deshidratado y mejorar la calidad final del producto. Su impacto resulta ser más apreciable a temperaturas bajas y velocidades de aire bajas. Ya que, en las experimentaciones a altas velocidades y altas temperaturas es poco apreciable el cambio en la constante de la cinética de deshidratado, por lo que es difícil asegurar que factor termina por influir en el proceso. A lo que lleva a tener que realizar pruebas adicionales como método de comparación y validación de una experimentación a la que se le haya aplicado US para hacer su respectivo análisis. En donde, a temperaturas de 50 °C se reduce en un 9% el tiempo de deshidratado. A menores temperaturas de deshidratado es mayor el efecto de la aplicación del US como puede verse en la tabla 4.42 y en las figuras 4.21 y 4.24. Implementar su uso en temperaturas bajas de 30°C debido a que se presentó una mejoría del 40% en los tiempos de deshidratado y también mejorando la calidad final del producto, ambos casos particularmente en la manzana. Por lo que el nopal, aunque presentó mejorías en su deshidratado, es complicado extraerle el agua de su contenido a temperaturas bajas y con velocidades de flujo

de aire bajas, ya que presenta demasiada resistencia. Los mejores resultados estuvieron presentes a temperaturas altas.

En cada una de las corridas del diseño de experimentos, se presentó una correlación muy buena, elevada para cada uno de los modelos a analizar. Pero dado que algunos modelos, manejan más coeficientes, para poder tener una mejor interpretación de los resultados se tomó como referencia el modelo de Newton-Lewis para conocer la cinética de cada una de las experimentaciones. Y aunque no fue uno de los que mejor se ajustaba, permitió entender el comportamiento de la pérdida de humedad a través del tiempo de proceso. El método para estimar cada uno de los modelos y obtener la cinética de deshidratado fue Solver de una herramienta de Excel para la solución de ecuaciones por regresión no lineal del anexo 1.

Capítulo 5 EVALUACIÓN O IMPACTO ECÓNOMICO

La incorporación del ultrasonido en el proceso de deshidratación por convección forzada presenta un impacto económico relevante que debe ser evaluado para determinar la viabilidad industrial y comercial del método.

1. Reducción en tiempos de proceso

La asistencia ultrasónica aceleró significativamente la tasa de secado, especialmente a bajas temperaturas y velocidades de aire. Esto implica una reducción en el tiempo total de operación, traducándose en un ahorro directo de costos asociados a la energía eléctrica consumida por los ventiladores, calentadores y otros equipos involucrados.

2. Ahorro energético

Al poder operar a temperaturas más bajas (por ejemplo, 30 °C con ultrasonido en lugar de 50 °C sin asistencia), se reduce el consumo energético requerido para calentar el aire, lo que impacta positivamente en la factura energética y la huella ambiental del proceso.

3. Mejora en la calidad del producto y valor agregado

El menor daño térmico y la mejor conservación de características organolépticas (color, textura, sabor) pueden incrementar el valor comercial del producto final, permitiendo acceder a mercados con mayor exigencia o nichos gourmet.

4. Costos de implementación

Equipamiento ultrasónico: Inversión inicial en el generador y sistema de transmisión de ultrasonido, que debe ser evaluada frente a los beneficios en eficiencia.

Mantenimiento: Costos adicionales derivados del mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos ultrasónicos.

5. Retorno de inversión (ROI) y escalabilidad

El balance económico dependerá del volumen de producción y la integración del sistema en líneas industriales existentes. En escenarios de producción continua y a gran escala, el ROI puede ser atractivo gracias a la reducción del consumo energético y del tiempo de proceso.

Capítulo 6 CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas de deshidratado bajo un diseño de experimentos factorial fraccionado con 4 factores y dos niveles, donde el principal resultado obtenido fueron los valores constantes de la cinética de deshidratado, k , en el modelo de Newton-Lewis, que sirve para comparar las velocidades de deshidratado bajo diferentes condiciones de proceso y evaluar los efectos de las variables de entrada. La aplicación del Ultrasonido aumenta la velocidad de deshidratado, especialmente a baja temperatura y baja velocidad de aire. También se tiene un mejor efecto en materiales con mayor porosidad. Su aplicación resulta benéfica en los tiempos de proceso, al igual de que mejora la calidad final del material en cuestión de su humedad. Las condiciones en que se obtuvo la mayor velocidad de deshidratado fueron en los experimentos donde se trabajó a temperaturas altas con velocidades de aire altas. Aunque van relacionadas con el tipo de material a deshidratar, ya que cada uno presenta una resistencia diferente a la pérdida de agua. Cabe mencionar que para que se tuviera un mejor deshidratado, los factores a considerar fueron la temperatura de operación, el tipo de material a deshidratar, la velocidad de flujo de aire y por último el uso de US, en ese orden de relevancia. Y los factores no controlados, como la humedad exterior, tienen efecto en la velocidad de deshidratado, en los valores de porcentaje de humedad al equilibrio. Ya que, cuando existe una humedad elevada en el ambiente, resulta complicado desprender la mayor cantidad de agua del material por el equilibrio que llega a existir en la cámara de deshidratado y el entorno. Porque el aire se comienza a saturar de agua, de humedad, lo que implica no poder deshidratar más al material.

Hacer un estudio de esta manera, con un diseño de experimentos fraccionado tiene sus ventajas. Porque se puede obtener toda la información importante y relevante con una serie de experimentos reducida a estar manejando un diseño de experimentos completo lo cual consume un poco más de tiempo. Aunque se puede presentar un inconveniente por la cantidad de información que podría estarse perdiendo por la serie de experimentos que no se estén realizando. Pero optimizar los tiempos también resulta ser una cuestión de suma importancia, así que, si una fracción de experimentos logra ofrecer información relevante y de suma importancia, se hace dicha elección. Y si la información recabada no es suficiente se pueden hacer experimentaciones extras como medio de validación y comparativa, esto como alternativa a tener un panorama más completo y claro sobre lo obtenido.

Capítulo 7 RECOMENDACIONES GENERALES

1. Control de Temperatura del Equipo:

El uso de ultrasonido (US) durante el proceso de deshidratación puede generar un sobrecalentamiento del equipo. Esto podría afectar tanto la eficiencia del proceso como la durabilidad del equipo. Se recomienda considerar un sistema de refrigeración eficiente para los transductores de ultrasonido y otros componentes sensibles, con el fin de evitar daños por sobrecalentamiento. Además, establecer un protocolo de monitoreo constante de la temperatura del equipo puede ayudar a optimizar su funcionamiento.

2. Estudio de la Variable de Ultrasonido:

Dado que el ultrasonido es la variable principal en este proceso, se sugiere realizar una serie de experimentos para evaluar cómo diferentes parámetros del ultrasonido afectan el deshidratado de los alimentos. Algunas variables clave que se pueden estudiar son:

Frecuencia de ultrasonido: Evaluar si una frecuencia más alta o baja mejora la eficiencia de la deshidratación.

Duración de la aplicación: Experimentar con tiempos continuos o intermitentes de exposición al ultrasonido. Se podría explorar si aplicar el ultrasonido al inicio, durante o al final del proceso tiene efectos significativos.

Distancia de aplicación: Determinar la distancia óptima entre el transductor de ultrasonido y el alimento para maximizar la transferencia de energía y la eficiencia del proceso.

Modo de transmisión: Evaluar diferentes configuraciones de la transmisión de ultrasonido (por ejemplo, contacto directo o por aire).

3. Estudio de Diferentes Tipos de Alimentos:

El uso del ultrasonido en diferentes alimentos puede generar resultados muy variados debido a las diferencias en la estructura celular, contenido de agua, y características físicas de cada tipo de alimento. Además del nopal, que presentó resistencia a la pérdida de agua, se recomienda realizar estudios similares con otros tipos de alimentos que puedan beneficiarse

del tratamiento por ultrasonido, como frutas, verduras, carnes, o incluso productos lácteos, para establecer patrones generales o recomendaciones específicas.

4. Tratamiento Previo con Ultrasonido:

El pretratamiento con ultrasonido es una estrategia interesante para facilitar la deshidratación, especialmente en alimentos que tienen una estructura celular resistente, como el nopal. El ultrasonido puede ayudar a romper las paredes celulares, lo que permitiría un mejor contacto con el aire durante el proceso de deshidratación por convección forzada. Esta técnica podría ser evaluada como un paso previo al deshidratado, lo cual sería útil para mejorar la eficiencia y reducir el tiempo de deshidratación.

5. Optimización de Parámetros de Convección Forzada:

Es fundamental optimizar las condiciones de convección forzada (temperatura, velocidad del aire, etc.) cuando se utiliza ultrasonido, ya que ambos métodos trabajan en conjunto. El ultrasonido puede alterar la viscosidad del agua en los alimentos, lo que podría modificar la transferencia de calor y masa. Realizar estudios combinados de ultrasonido y convección forzada, ajustando parámetros de ambos procesos, puede permitir obtener resultados óptimos en términos de calidad, tiempo y eficiencia energética.

6. Evaluación de la Calidad del Producto Final:

Es esencial evaluar no solo la eficiencia de la deshidratación, sino también la calidad del producto final. Para ello, se recomienda analizar características como:

Color y textura: Realizar pruebas sensoriales y análisis instrumentales de color y textura para verificar si el ultrasonido afecta la calidad organoléptica del alimento.

Composición nutricional: Evaluar cómo el proceso de deshidratación asistido por ultrasonido impacta la retención de nutrientes en comparación con otros métodos de deshidratación tradicionales.

Rehidratación: Probar la capacidad de rehidratación de los productos deshidratados para asegurar que el proceso no afecte la calidad del alimento al momento de consumo.

7. Estrategias de Escalabilidad:

Para que el proceso sea viable a nivel industrial, es importante estudiar la escalabilidad del proceso de deshidratación asistido por ultrasonido. Esto incluiría la evaluación de la viabilidad económica, el costo de los equipos de ultrasonido, la energía requerida y la posible adaptación del proceso a grandes volúmenes de producción.

En resumen, el deshidratado de alimentos por convección forzada asistida por ultrasonido tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia y calidad del proceso. Sin embargo, se deben abordar aspectos técnicos como la optimización de los parámetros de ultrasonido y convección, la protección del equipo contra sobrecalentamiento y la evaluación exhaustiva de la calidad final del producto.

7.1 Recomendaciones para la realización de cada uno de los experimentos

1. La humedad relativa estará sujeta a las condiciones externas del día de experimentación y solo se medirá y registrará.
2. Tamaño de la muestra, forma, corte y pelado diferente en el caso del nopal, quitando toda su corteza lo cual permita que el contacto del aire con el material sea más directo y de esa manera se pueda extraer la mayor cantidad de agua.
3. Checar cuanto cabe en una sola charola, distribución de las muestras, porque para ver el efecto de la distancia al US solo se puede colocar muestra en una charola.
4. Colocación y distribución de las muestras. Definir la mejor distribución en la charola y colocarla en el nivel definido para la prueba, alto o bajo, de acuerdo con el diseño de experimentos.
5. Después introducir la canastilla a la cámara de deshidratado identificar que no haya alteraciones en el peso de la muestra.
6. Cerrar compuertas para evitar las fugas de aire y variaciones de humedad en el interior de la cámara de deshidratado.
7. Fijar las condiciones de prueba seleccionadas.
8. Pruebas de validación para la tecnología desarrollada.
9. Diseño de metodología de operación para las pruebas.
10. (Analizar la variación de peso cuando esté trabajando el soplador a velocidades altas.)
11. Si se va a manejar un peso constante de la muestra, un flujo constante de aire, se puede hacer el registro de esa variación de peso como valor constante. Obtener una tabla para corregir valores de peso.
12. Recolección de datos cada 15 minutos (de acuerdo a capacidad del sistema de adquisición).

7.2 Experiencia adquirida

Como profesional, la experiencia adquirida en el Centro de Investigación, principalmente fue aprender a ser muy minucioso al momento de indagar sobre un tema en particular. Para poder tener un buen manejo de la información que existe para evitar el plagio y evidentemente reconocer los derechos de autor de las personas que han dedicado su tiempo a hacer dichas contribuciones para la sociedad; siendo así un buen investigador.

Trabajar a nivel laboratorio sobre el proceso de deshidratado o secado de alimentos, muestra un panorama completo de todos los factores que se tienen que considerar para poder llevar el proceso. Ya que, existen infinitas variables que terminan por afectar el deshidratado. Desde las condiciones exteriores en conjunto con las condiciones de operación y como es que cada una de estas se ven involucradas en el proceso. Esto debido a que la cinética de deshidratado se comporta de manera distinta.

Todo proviene desde hacer una buena y adecuada selección de los alimentos a deshidratar. Ya que no todos se suelen comportar de la misma manera. Algunos ofrecen más resistencia al desprendimiento de agua en su contenido. Porque se debe de entender, que los alimentos poseen tres tipos de agua, agua superficial, agua libre y agua ligada. Ésta última es la que ofrece mayor resistencia para su desprendimiento. Y es aquí donde surge lo interesante, que fue la implementación del uso de US para poder romper las paredes celulares del material y permita el desprendimiento de la mayor cantidad de agua en el material.

Algunos alimentos conservan mejor sus nutrientes, sabor y textura después del deshidratado que otros. Con el tiempo, se aprenden las mejores prácticas para seleccionar ingredientes frescos y de alta calidad, encontrando así los más adecuados para hacer más eficiente el proceso. En este caso, contemplar que el nopal ofrece mayor resistencia al deshidratado debido a su consistencia, aunque en el transcurso de cada una de las experimentaciones se logran identificar las mejores formas de preparar los alimentos desde el proceso de lavado, pelado, cortado. Lo cual es esencial para garantizar una buena deshidratación y evitar la pérdida de nutrientes. Cada tipo de alimento requiere un tratamiento previo específico para optimizar la textura y el sabor.

El control preciso de la temperatura es fundamental para deshidratar correctamente los alimentos sin sobrecalentarlos o descomponerlos. Se requieren velocidades de flujo de aire y

temperaturas adecuados durante un tiempo considerado, el cuál fue determinado mediante la consideración de la humedad en equilibrio vista gravimétricamente donde ya no había variación del peso de la muestra.

Manejar un deshidratador diferente al típicamente conocido, haciendo esté un proceso más eficiente, ya que se ha buscado aprovechar de la mejor manera el aire calentado suministrado al sistema mediante una recirculación para su mejor optimización.

Entender y comprender la importancia del uso de US como una nueva tecnología suplementaria para el deshidratado de alimentos y el impacto e importancia que tiene.

También la utilización de herramientas estadísticas para realizar estudios de manera sistemática y optimizando recursos.

Identificar los factores controlables y no controlables involucrados en el desarrollo de experimentos de deshidratado de alimentos.

Análisis de resultados experimentales de cinética utilizando modelos empíricos.

Escritura de reportes técnicos con mayor grado de rigurosidad.

Síntesis y presentación de resultados.

7.3 Competencias desarrolladas y aplicadas

Durante el desarrollo del presente estudio experimental, el ingeniero químico desempeñó un papel fundamental en la planificación, ejecución y análisis del proceso de deshidratación de alimentos mediante convección forzada asistida por ultrasonido aéreo. Las competencias técnicas, científicas y profesionales aplicadas son las siguientes:

1. Análisis y diseño de procesos de transferencia

El ingeniero químico aplicó principios de transferencia de masa y calor para comprender la cinética de secado y optimizar los parámetros operativos. Se analizó cómo influyen la temperatura, velocidad del aire y aplicación de ultrasonido en la eficiencia del proceso.

2. Operaciones unitarias y control de procesos

El secado es una operación unitaria clave en ingeniería química. El profesional diseñó y operó el sistema de secado, evaluando los efectos de la asistencia ultrasónica sobre la velocidad de transferencia de humedad y la calidad del producto.

3. Investigación experimental aplicada

Se diseñó una matriz de pruebas experimentales bajo condiciones controladas. El ingeniero químico fue responsable de la formulación de hipótesis, recolección y análisis de datos, así como de la validación de resultados mediante el seguimiento de curvas de secado.

4. Innovación tecnológica

La implementación del ultrasonido transmitido por aire demuestra la capacidad del ingeniero químico para adoptar tecnologías emergentes, aplicándolas en procesos convencionales para mejorar la eficiencia energética y la calidad del producto.

5. Resolución de problemas técnicos complejos

A través del análisis crítico de los resultados, el ingeniero identificó las combinaciones más eficientes de temperatura y velocidad del aire, considerando tanto la reducción del tiempo de secado como la conservación de la estructura del alimento.

6. Trabajo colaborativo y multidisciplinario

El proyecto requirió la integración de conocimientos de otras disciplinas, como la ingeniería mecánica (flujo de aire), física acústica (ultrasonido) y ciencia de alimentos (estructura y comportamiento de matrices alimentarias).

7. Comunicación técnica y científica

El ingeniero químico participó activamente en la documentación de resultados, la redacción del presente informe técnico y la preparación de materiales para su difusión académica y profesional.

8. Enfoque sostenible

Se evaluaron aspectos energéticos y ambientales, proponiendo el uso del ultrasonido como una alternativa para reducir la temperatura y tiempo del proceso, lo cual tiene un impacto positivo en el consumo energético global.

7.4 Competencias de los programas de estudio

1. Diseño y análisis de experimentos.
2. Diseño factorial 2^k .
3. Secado de alimentos.
4. Cinética de deshidratado.
5. Modelado de la cinética de deshidratado.
6. Análisis estadístico (coeficiente de determinación, error cuadrático medio y chi-cuadrado).
7. Método de análisis de regresión no lineal.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alonso, A. (2022, 21 marzo). Una manzana al día, mantiene al médico en la lejanía. ¿Es verdad el refrán? La Vanguardia.
2. Amjad, W., Ali Gilani, G., Munir, A., Asghar, F., Ali, A., Waseem, M.: Energetic and exergetic thermal analysis of an inline-airflow solar hybrid dryer. *Applied Thermal Engineering* 166, 114632 (2020), DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.114632
3. Anderson, D. R., Sweeney, D. J., & Williams, T. A. (2015). *An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making* (13th ed.). Cengage Learning.
4. Ávila, A., & Sánchez, E. (2018). Análisis del contenido nutricional del nopal y su influencia en la salud humana. *Acta Universitaria*, 18(2), 45-59.
5. Ávila-Nava, A., & Ramírez-Morales, D. (2011). Propiedades y usos del nopal en la salud y la alimentación. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 42(1), 12-25.
6. Barbosa-Cánovas, G. V., Juliano, P., & Torres, J. A. (2015). Dehydration of foods: An overview and its impact on quality preservation. In *Food Processing: Principles and Applications* (pp. 179-204). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118962237.ch10>
7. Bird R. B., S.W.E.&.L.E.N.: Fenómenos de transporte; un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento (1976)
8. Bustos, M., Rodríguez, F., & López, A. (2017). *Eficiencia energética en el proceso de deshidratación con ultrasonido*. *Journal of Food Engineering*, 42(3), 210-220.
9. Cai, X., Zhang, M., & Li, J. (2018). Modeling of drying processes in food engineering: Applications and advances. *Food Science and Technology International*, 24(7), 637-648. <https://doi.org/10.1177/1082013218782217>
10. Cárcel, J.A., Garcia-Perez, J.V., Riera, E., Mulet, A.: Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound-influence of mass load density. *Drying Technology* 29(2), 174-182 (2011). DOI 10.1080/07373937.2010.483032
11. Chaves-López, C., Caggiano, G., & Cardillo, D. (2017). Ultrasound in food processing and preservation: An overview. *Food Control*, 75, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.12.007>

12. Chia, T. S., & Vigneswaran, S. (2019). Ultrasound-assisted drying technologies in food processing: A review. *Journal of Food Engineering*, 256, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.004>
13. Delfiya, D.S.A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P.V., Samuel, M.P., Pandiselvam, R.: Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering* 45(6) (2021). DOI 10.1111/jfpe. 13810
14. Deng, L.Z., Mujumdar, A.S., Zhang, Q., Yang, X.H., Wang, J., Zheng, Z.A., Gao, Z.J., Xiao, H.W.: Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 59(9), 1408-1432 (2017). DOI 10.1080/10408398.2017.1409192
15. Dixon, J. L., & Marshall, M. R. (2016). Osmotic dehydration: A review of recent developments. *Food Research International*, 84, 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.02.023>
16. Estrada, H.H., Restrepo, C.E., Saumett, H.G., Pérez, L. 2018. Deshidratación Osmótica y Secado por Aire Caliente en Mango, Guayaba y Limón para la Obtención de Ingredientes Funcionales. *Rev. Inf. tecnol., Chile*. 29(3):197-204.
17. FAO. (2020). Informe sobre la producción y comercio mundial de nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
18. Fernández, D., Muñiz, S., García, A., Cervantes, R., Fernández, D. 2015. Cinética de secado de fruta bomba (Carica papaya L., cv. Maradol Roja) mediante los métodos de deshidratación osmótica y por flujo de aire caliente. *Rev. Cie. Téc. Agr., Cuba*. 24(1):22-28.
19. Frutas Olivar. (2020, 28 octubre). La Manzana, propiedades, beneficios y curiosidades. <https://frutasolivar.com/fruta/manzana/>
20. Gálvez, A., Uribe, E., Perez, M.A., Tabilo, G., Vergara, J., Garcia, P., Lara, E., Di-scala, K. 2011. Effect of high hydrostatic pressure pretreatment on drying kinetics, antioxidant activity, firmness and microstructure of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel. *Rev. LWT - Food Science and Technology, Chile*. 44(1):384-391 43.

21. Gamboa, D., Báñez, D., Meléndez, M., Paredes, E., Siche, R. 2014. Secado de lúcumá (*Pouteria obovata*) empleando la técnica de Ventana Refractante. *Rev. Scientia Agropecuaria*, Perú. 5(2):103-108.
22. GARCÍA, C., SIERRA, M., MIRANDA, L. 2016. Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. *Inf. tecnol.*, Chile. 27(1):61-68.
23. García-Pérez, J.V., Ozuna, C., Ortuño, C., Cárcel, J.A., Mulet, A.: Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant. *Drying Technology* 29(13), 1499-1509 (2011). DOI 10.1080/07373937.2011.576321
24. Geankoplis CJ. 2016. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4a ed. México: PATRIA. 589-591 p.
25. González, F., Díaz, E., & Salazar, L. (2021). Innovaciones en la conservación de alimentos: El uso de ultrasonido en la deshidratación. Universidad de Tecnología Alimentaria.
26. González, P., & Pérez, D. (2018). *Optimización de la deshidratación mediante convección forzada*. *Food Science and Technology*, 15(2), 145-153.
27. Hernández, L., & López, M. (2016). *Aplicación de ultrasonido en la deshidratación de frutas y vegetales*. *Food Processing Journal*, 39(5), 512-520.
28. Iglesias, R., Grimaldi, R.V., Villanueva, B.E., Hernández, J.M., Pascual, P., Lastres O. 2018. Cinética de secado de Moringa oleífera. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, México. 9(5):935-947.
29. Iriarte, A., Bistoni, S. 2018. Secado de manzana en secadero túnel de laboratorio y en secadero solar en convección natural. modelización de la cinetica de secado. *Rev. Asades*, Argentina. 6(1):97-107.
30. Jiang, J., Dang, L., Yuensin, C., Tan, H., Pan, B., Wei, H. 2017. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. *Chemical Engineering Science*. Beijing, China. 162(1): 69-76.
31. Jones, A., Smith, B., & Pérez, C. (2017). *Control de la calidad sensorial en productos deshidratados*. *International Journal of Food Quality*, 58(6), 499-507.
32. Kaveh, M., Rasooli, V., Chayjan, R., Taghinezhad, E., Abbaspour, Y., Golpour, I. 2018. ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific

- energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer. *Rev. Info Proc Agri., Irán.* 5(3):372-387.
33. Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K., Lenart, A.: Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. *Food Science and Biotechnology* 27(3), 799-807 (2018). DOI 10.1007/s10068-018-0304-6
 34. Kudra, T.: Instantaneous dryer indices for energy performance analysis. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* (1998)
 35. Kumar, S., Kandasamy, A., & Khurana, S. (2017). Empirical modeling of drying kinetics of fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 185, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.024>
 36. Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models* (5^a ed.). McGraw-Hill.
 37. Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models* (5^a ed.). McGraw-Hill.
 38. Lebovka, N. I. (2018). *Osmotic dehydration of food products: Fundamentals and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66273-6>
 39. Li, X., & Wang, L. (2020). Mathematical modeling and simulation of food drying processes: A review. *International Journal of Food Engineering*, 16(9), 923-933. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0104>
 40. Liu, X., Sun, D., & Zhang, L. (2018). Modeling and optimization of heat and mass transfer in food dehydration processes. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), e12802. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12802>
 41. Liu, Y., Zhang, M., & Sun, J. (2016). Effect of ultrasound on drying characteristics and quality of food products. *Journal of Food Engineering*, 186, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.023>
 42. Liu, Y., Zhang, M., & Sun, J. (2016). Effect of ultrasound on drying characteristics and quality of food products. *Journal of Food Engineering*, 186, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.023>
 43. Liu, Y., Zhang, M., & Sun, J. (2017). Ultrasonic-assisted drying of food products: A review. *Journal of Food Engineering*, 201(1), 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.019>

44. López, E., Martínez, L., & Cruz, J. (2019). *Uso de energía solar en procesos de deshidratación por convección forzada*. Renewable Energy in Food Processing, 23(1), 68-75.
45. Lopez, N., Andrade, M.M., Martínez, H.A. 2019. Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (Cucurbita moschata). Rev. U.D.C.A., Colombia. 22(1):1-11.
46. Ma, X., Zhang, M., & Zhan, J. (2016). Effects of ultrasound-assisted drying on the quality of food: A review. Food Science and Technology International, 22(5), 404-415. <https://doi.org/10.1177/1082013216644518>
47. Magalhães, M.L., Cartaxo, S.J.M., Gallão, M.I., García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Rodríguez, S., Fernandes, F.A.N.: Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. Journal of Food Engineering 215, 72-77 (2017). DOI 10.1016/j.jfoodeng.2017.07.027
48. Malvandi, A., Nicole Coleman, D., Loo, J.J., Feng, H.: A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG). Ultrasonics Sonochemistry 85, 105982 (2022). DOI 10.1016/j.ultsonch.2022.105982
49. Martínez, F., & Rodríguez, G. (2021). *Efectos del ultrasonido en la conservación de la textura de los alimentos*. Food Quality and Safety, 7(4), 315-322.
50. Méndez-López, M. A., & Pérez-Gálvez, A. (2014). Beneficios del nopal como suplemento alimenticio. Journal of Food Science and Technology, 8(2), 135-145.
51. Menon, A., Stojceska, V., Tassou, S.A.: A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. Trends in Food Science & Technology 100, 67-76 (2020). DOI 10.1016/j.tifs.2020.03.014
52. Miranda, P.J., Martínez, K.A., Torres, R., Mendoza, J.M., Gómez, R.D. 2018. Evaluación experimental del secado de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire. Rev. chil. ing., Chile. 26(2):329-338.
53. Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments (9ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.

54. Mosquera, E.S., Ayala, A.A., Serna, L. 2019. Ultrasonido y Deshidratación Osmótica como Pretratamientos a la Liofilización de Melón (*Cucumis melo* L.). *Rev. Información Tecnológica, Colombia*. 30(3):179-188.
55. Mujumdar, A.S. (ed.): *Handbook of industrial drying*. CRC Press (2006). DOI 10.1201/9781420017618
56. Müller, S. (2018). Ultrasonics in air: Principles and applications. *Journal of Applied Acoustics*, 137, 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.japac.2018.01.004>
57. NatGeo, 2022. Manzana - EcuRed. <https://www.ecured.cu/Manzana> National Geographic España. (2022, 18 noviembre).
58. Ochoa, A., & Ortiz, R. (2020). Deshidratación de alimentos utilizando ultrasonido y sus efectos en la calidad nutricional: Una revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(3), 467-484. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.2610>
59. Ochoa, M. (2003). Estrategias adaptativas del nopal y su cultivo en zonas áridas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 47-56.
60. Pandiselvam, R., Aydar, A.Y., Kutlu, N., Aslam, R., Sahni, P., Mitharwal, S., Gavahian, M., Kumar, M., Raposo, A., Yoo, S., Han, H., Kothakota, A.: Individual and interactive effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and biochemical qualities of food: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry* 92, 106261 (2023). DOI 10.1016/j.ultsonch.2022.106261
61. Panić, M., & Jovanović, J. (2017). Effect of ultrasound on food drying: A review. *Drying Technology*, 35(11), 1334-1345. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1281090>
62. Pardoe, I. (2012). *Excel 2010 for Business Statistics: A Guide to Solving Practical Problems*. Wiley Publishing.
63. Pérez, A., & Martínez, B. (2019). *Técnicas avanzadas en la conservación de alimentos: Deshidratación por ultrasonido*. Ediciones Técnicas Alimentarias.
64. Pérez, J., & Gómez, V. (2019). *Técnicas combinadas de deshidratación: convección forzada y ultrasonido*. *Journal of Food Technology*, 21(3), 203-211.
65. Pérez, M., Lemus, R., Tabilo, G., Pizarro, S., Noma, S., Igura, N., Shimoda, M. 2016. Modelling of red abalone (*Haliotis rufescens*) slices drying process: Effect of osmotic

- dehydration under high pressure as a pretreatm. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. Rev. La Serena, Chile. 34(1):127-134.
66. Ravichandran, S., Suganthi, R., & Rajendran, S. (2020). Effect of ultrasonic pre-treatment on drying of foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 125-138. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.009>
 67. ROBERTI, D.E. 2011. Cinética del secado convectivo del camarón dulceacuícola (*Macrobrachium jelskii*) a dos temperaturas y dos velocidades de aire. *Rev. Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Venezuela*. 2 (1): 158-172.
 68. Roberts, P., González, A., & Sánchez, T. (2020). *Mejora de los tiempos de secado con el uso combinado de ultrasonido y aire forzado*. *Food Engineering Reviews*, 18(2), 143-155.
 69. Rodríguez, J., López, A., & Hernández, M. (2020). Aplicaciones del ultrasonido en la deshidratación de alimentos. Editorial Científica.
 70. Rodríguez, R., López, J., & Hernández, P. (2022). *Preservación de nutrientes durante la deshidratación: un enfoque integral*. *Nutritional Science*, 5(1), 42-49.
 71. Ruiz, L., Castro, L., Quicazán, M. 2015. Influencia de las condiciones de secado en el color de fresas variedad. *Rev. chilena de nutrición, Colombia*. 1(1): 17-22.
 72. Sánchez, R., & Rodríguez, T. (2022). Procesos industriales en la deshidratación de alimentos: Nuevas tecnologías. Editorial Agroindustrial.
 73. Sánchez-Moreno, C., & Cano, M. P. (2002). El contenido antioxidante del nopal y sus aplicaciones. *Food Research International*, 35(7), 712-719.
 74. Sánchez-Torres, E.A., Abril, B., Benedito, J., Bon, J., Toldrà, M., Parés, D., García-Pérez, J.V.: Airborne ultrasonic application on hot air-drying of pork liver. intensification of moisture transport and impact on protein solubility. *Ultrasonics Sonochemistry* 86, 106011 (2022). DOI 10.1016/j.ultsonch.2022.106011
 75. Sandoval, M., Luna, J., & García, A. (2007). Propiedades antioxidantes y digestivas del nopal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 38(2), 105-112.
 76. Sandoval, M., Luna, J., & García, A. (2007). Propiedades antioxidantes y digestivas del nopal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 38(2), 105-112.
 77. Santacatalina, A., et al. (2016). "Modeling of moisture diffusion in garlic slices during hot-air drying." *Journal of Food Engineering*, 193, 97-103.

78. Schössler, K., Jäger, H., Knorr, D.: Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *Journal of Food Engineering* 108(1), 103-110 (2012). DOI 10.1016/j.jfoodeng.2011.07.018
79. Seber, G. A. F., & Wild, C. J. (1989). *Nonlinear Regression* (1^a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
80. Shiao, Z.: Hot-blast food drying device that unites of ultrasonic wave with samming structure (2017). URL [https://patents.google.com/patent/CN206207935U/en?q=CN206207935+\(U\)](https://patents.google.com/patent/CN206207935U/en?q=CN206207935+(U))
81. Taher, A., Meda, V., Naderloo, L. 2018. Artificial neural Network–Genetic algorithm modeling for moisture content prediction of savory leaves drying 47 process in different drying conditions. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. Khorramabad, Irán. 11(4):232-238.
82. Tao, Y., et al. (2016). "Numerical modeling of moisture transport during drying of agricultural products." *International Journal of Food Science & Technology*, 51(3), 619-625.
83. Thompson T. L., P.R.M..F.G.H.: Matllematical simulation of corn drying a new model. *Transaction of the ASAE* (1968)
84. Toğrul, I.T., Pehlivan, D.: Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering* 55(3), 209-216 (2002). DOI 10.1016/s0260-8774(02)00065-1
85. Torres, G., & Pérez, D. (2019). *Impacto del ultrasonido en la conservación de nutrientes y vitaminas en frutas*. *International Journal of Agricultural Science*, 33(4), 415-423.
86. Villarreal, M. L., et al. (2013). Efectos del nopal sobre el control de la glucosa en sangre. *Journal of Ethnopharmacology*, 150(3), 933-939.
87. Walkenbach, J. (2013). *Excel 2013 Bible: The Comprehensive Tutorial Resource*. Wiley Publishing.
88. Wang, Z., Yang, X., & Zhao, J. (2020). Application of mathematical models to improve the efficiency of food dehydration processes. *Food Research International*, 137, 109480. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109480>

89. Xie, Y., & Zhang, M. (2020). Ultrasonic-assisted convective drying of fruits and vegetables: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1616-1627. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14552>
90. Yang, X., Tan, C., & Chen, Y. (2020). Effect of ultrasound-assisted drying on the quality of food products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 65, 105097. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105097>
91. Yuan, Y., & He, X. (2018). *Mathematical and Statistical Methods for the Analysis of Experimental Data*. Springer.
92. Yuan, Y., Wang, Z., & Liu, H. (2020). Application of ultrasound in the drying process of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104828. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104828>
93. Zhang, L., Li, S., & Wu, T. (2020). *Control de las propiedades organolépticas en la deshidratación de alimentos*. *Journal of Food Chemistry*, 16(5), 256-263.
94. Zhang, M., & Xu, B. (2017). Recent advances in osmotic dehydration of food: A review. *Food Science and Technology Research*, 23(3), 311-320. <https://doi.org/10.3136/fstr.23.311>
95. Zhang, Y., Abatzoglou, N.: Review: Fundamentals, applications and potentials of ultrasound- assisted drying. *Chemical Engineering Research and Design* 154, 21-46 (2020). DOI 10.1016/j.cherd.2019.11.025

ANEXOS

ANEXO 1

Cómo Funciona Solver en Excel

El Solver en Excel funciona bajo principios de optimización matemática, aplicando métodos para encontrar soluciones óptimas a problemas de optimización bajo ciertas condiciones y restricciones. En términos generales, Solver busca maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones.

Principios Fundamentales en los que Funciona Solver en Excel

1. **Optimización Matemática:** Solver utiliza principios de optimización matemática para resolver problemas en los que se busca maximizar o minimizar una cantidad (como costos, ganancias, tiempo, etc.). Este proceso implica encontrar los valores de las variables de decisión que optimicen (maximicen o minimicen) la función objetivo bajo las restricciones definidas (Walkenbach, 2013).
2. **Métodos de Resolución de Problemas:** Solver en Excel implementa varios métodos matemáticos para resolver estos problemas:

Método Simplex (LP): Utilizado para problemas de programación lineal. Este método busca encontrar la mejor solución a un problema en el que tanto la función objetivo como las restricciones son lineales (Pardoe, 2012).

Método de Gradiente Reducido General (GRG Nonlinear): Es el método utilizado para resolver problemas no lineales. En este caso, las relaciones entre las variables de decisión y la función objetivo o las restricciones son no lineales, como términos elevados a potencias o funciones exponenciales (Anderson, Sweeney, & Williams, 2015).

Método Evolutivo (Evolutionary): Este método es adecuado para problemas no lineales complejos o aquellos que involucran restricciones enteras o de variables binarias (como sí/no) (Walkenbach, 2013).

3. **Función Objetivo y Variables de Decisión:** La función objetivo es una expresión matemática que se quiere maximizar o minimizar. En Excel Solver, esta función está representada en una celda específica y se formula como una relación entre las variables de decisión. Las variables de decisión son las celdas que Solver ajusta para

encontrar la solución óptima. Estas celdas se modifican dentro de los límites establecidos en las restricciones del modelo (Pardoe, 2012).

4. **Restricciones:** Las restricciones definen los límites o condiciones bajo las cuales la solución debe encontrarse. Pueden ser de tipo:

Desigualdad (por ejemplo $x \leq 100$)

Igualdad (por ejemplo $x + y = 10$)

Restricciones de no negatividad (por ejemplo $x \geq 0$) (Anderson et al., 2015).

Solver utiliza los métodos mencionados para ajustar las variables de decisión de manera que se maximice o minimice la función objetivo sin violar las restricciones definidas.

5. **Búsqueda Iterativa:** El funcionamiento de Solver se basa en una búsqueda iterativa para encontrar la solución óptima. Solver comienza con un conjunto inicial de valores para las celdas de decisión y realiza ajustes progresivos basados en el método seleccionado (por ejemplo, Simplex, GRG, o Evolutivo) hasta que encuentra la solución óptima dentro de los límites establecidos por las restricciones (Pardoe, 2012).
6. **Teoría de la Programación Matemática:** Solver se basa en principios de programación matemática, un campo de las matemáticas aplicadas que se centra en encontrar el mejor resultado posible para un conjunto de ecuaciones o relaciones bajo ciertas condiciones de restricción. La programación lineal es un subconjunto de la programación matemática en la que tanto la función objetivo como las restricciones son lineales (Anderson et al., 2015).

Pasos Básicos en el Uso de Solver en Excel

1. **Definir la Celda Objetivo:** Se establece la celda que contiene la función objetivo a maximizar o minimizar.
2. **Seleccionar las Celdas de Decisión:** Se eligen las celdas cuyos valores serán modificados por Solver para alcanzar la solución óptima.

3. **Establecer las Restricciones:** Se definen las restricciones en forma de ecuaciones o desigualdades que las celdas de decisión deben cumplir.
4. **Elegir el Método de Resolución:** Se selecciona el tipo de resolución, dependiendo de si el modelo es lineal o no lineal, y si hay restricciones enteras.
5. **Ejecutar Solver:** Finalmente, Solver realiza el cálculo y devuelve los valores de las celdas de decisión que optimizan la función objetivo según las restricciones definidas (Walkenbach, 2013).