



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

**CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL
51 PARA UN RÉGIMEN CONTROLADO DE TEMPERATURA EN EL
RANGO 40 A 55 °C EN EL CANTÓN LA MANÁ**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO
DE
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

AUTORES:

Erick Steve Arroyo Rovalino
David Josue Villacreses Chusin

TUTOR:

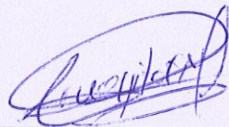
Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, Ms.C

LATACUNGA, MARZO, 2025

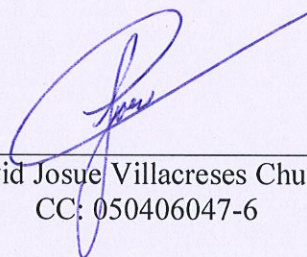
DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Erick Steve Arroyo Rovalino y David Josue Villacreses Chusin declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN CONTROLADO DE TEMPERATURA EN EL RANGO 40 A 55 °C EN EL CANTÓN LA MANÁ”**, siendo el Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Erick Steve Arroyo Rovalino
CC: 100370164-4

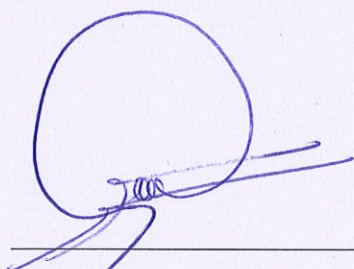


David Josue Villacreses Chusin
CC: 050406047-6

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título: **“CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN CONTROLADO DE TEMPERATURA EN EL RANGO 40 A 55 °C EN EL CANTÓN LA MANÁ”**, de Erick Steve Arroyo Rovalino y David Josue Villacreses Chusin, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de lectores de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 25 de febrero del 2025



Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc.

CC: 050311373-0

TUTOR


APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe del Proyecto de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas por cuanto, los postulantes: Erick Steve Arroyo Rovalino y David Josue Villacreses Chusin con el título de Proyecto de titulación: **“CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN CONTROLADO DE TEMPERATURA EN EL RANGO 40 A 55 °C EN EL CANTÓN LA MANÁ”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

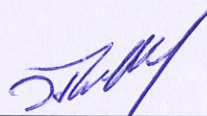
Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 25 de febrero del 2025

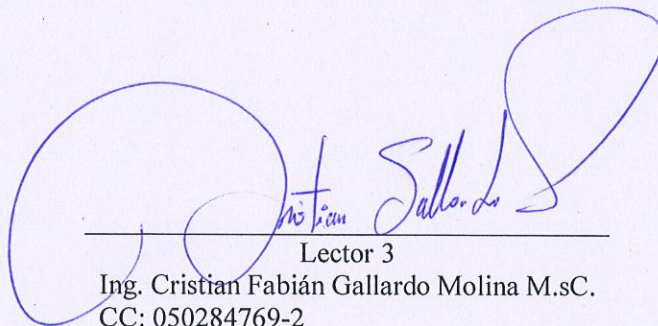
Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)
Ing. Enrique Torres Tamayo, Ph.D
CC: 175712194-0



Lector 2
Ing. Héctor Luis Laurencio, Ph.D
CC:175836725-2



Lector 3
Ing. Cristian Fabián Gallardo Molina M.s.C.
CC: 050284769-2

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y su confianza en mí. A mis hermanos, por ser mi inspiración y mi refugio en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. A mis amigos y compañeros de estudio, por hacer de este camino una experiencia enriquecedora, llena de aprendizaje y momentos inolvidables. Gracias por su apoyo y por compartir cada reto y cada triunfo conmigo.

Erick Arroyo

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y su confianza en mí. A mis hermanos, por ser mi inspiración y mi refugio en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. A mis amigos y compañeros de estudio, por hacer de este camino una experiencia enriquecedora, llena de aprendizaje y momentos inolvidables. Gracias por su apoyo y por compartir cada reto y cada triunfo conmigo.

Josue Villacreses

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO: “CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO
NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN CONTROLADO DE TEMPERATURA EN EL
RANGO 40 A 55 °C EN EL CANTÓN LA MANÁ”**

Autores

Erick Steve Arroyo Rovalino

David Josue Villacreses Chusin

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal analizar los modelos matemáticos de la cinética de secado del cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN51) bajo un régimen controlado de temperatura entre 40 y 55 °C, con el fin de encontrar el modelo más óptimo para cada uno de los regímenes de temperatura en el secado de cacao en el cantón La Maná. El problema radicó en la necesidad de encontrar un modelo de cinética de secado del cacao. Para ello, se realizó una investigación experimental que permitió evaluar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo para el secado. El método consistió en la selección de cacao por 3 distintos tamaños, los cuales se realizó un de proceso de secado en un horno. Se registraron los parámetros de pérdida de humedad, tiempo de secado, y se analizó el comportamiento cinético mediante modelos matemáticos de secado. Se emplearon herramientas estadísticas para comparar los modelos más adecuados para cada régimen de temperatura. Este estudio proporciona la validación de modelos matemáticos para describir la cinética de secado que puede ser replicada en diferentes lugares de producción de cacao. Como resultado se obtuvo dos modelos matemáticos que se adaptaron mejor a la cinética de secado de cacao CCN5, que fueron el modelo de “Aproximación a la difusión” siendo más preciso especialmente en 55°C con un margen de error como mínimo en pequeñas de 0,999709536, medianas de 0,998613234 y como grandes de 0,998909409. El modelo de “Midilli” se adaptó mejor a la temperatura de 45°C siendo opimo para las 3 temperaturas, errores de 0,998535377 en pequeñas, en medianas 0,999147016 y en grandes de 0,998922321.

Palabras clave: Cinética, Secado, Cacao Castro Naranjal 51, Temperatura, Modelos matemáticos.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**THEME: " DRYING KINETICS OF THE "COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51"
CACAO FOR A CONTROLLED TEMPERATURE REGIME FROM 40 TO 55 °C IN
THE "LA MANÁ" CANTON"**

Authors:

Erick Steve Arroyo Rovalino

David Josue Villacreses Chusin

ABSTRACT

The main objective of this study was to analyze the mathematical models of the drying kinetics of the "Colección Castro Naranjal 51 - CCN51" cacao under a controlled temperature regime ranging from 40 to 55 °C, in order to determine the most optimal model for each temperature regime in the cocoa drying process in the "La Maná" canton. The core issue lay in the need to identify a suitable drying kinetics model for cocoa. To address this, an experimental investigation was conducted to evaluate the optimal temperature and time conditions for drying. The method involved selecting cocoa beans in three different sizes, followed by a drying process in an oven. Parameters such as moisture loss and drying time were recorded, and the kinetic behavior was analyzed using mathematical drying models. Statistical tools were employed to compare the most appropriate models for each temperature regime. This study provides the validation of mathematical models that describe drying kinetics, which can be replicated in various cocoa production areas. As a result, two mathematical models were found to best fit the drying kinetics of CCN51 cocoa. The "Diffusion Approximation" model proved to be the most accurate, especially at 55 °C, with minimal error margins: 0.999709536 for small beans, 0.998613234 for medium beans, and 0.998909409 for large beans. The "Midilli" model, on the other hand, fit best at 45 °C and was optimal across the three temperature levels, with error values of 0.998535377 for small beans, 0.999147016 for medium beans, and 0.998922321 for large beans.

Key words: Kinetics, Drying, Castro Naranjal 51 Cacao, Temperature, Mathematical models.

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|-------|--------------------------------|---|
| 1. | INFORMACIÓN GENERAL..... | 1 |
| 2. | INTRODUCCIÓN | 2 |
| 2.1 | SITUACIÓN PROBLEMÁTICA..... | 2 |
| 2.2 | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 2.3 | OBJETO DE CAMPO Y ACCIÓN | 3 |
| 2.3.1 | Objeto de investigación..... | 3 |
| 2.3.2 | Campo de acción | 3 |
| 2.4 | BENEFICIARIOS | 3 |
| 2.4.1 | Directos | 3 |
| 2.4.2 | Indirectos..... | 4 |
| 2.5 | JUSTIFICACIÓN..... | 4 |
| 2.6 | OBJETIVOS | 4 |
| 2.6.1 | General..... | 4 |
| 2.6.2 | Específicos | 4 |
| 2.6.3 | Sistemas de tareas..... | 5 |
| 3. | FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 6 |
| 3.1 | ANTECEDENTES | 6 |
| 3.2 | CACAO ECUATORIANO | 6 |
| 3.2.1 | Cosecha del cacao..... | 6 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.2.2 | Fermentación del cacao..... | 7 |
| 3.2.3 | Secado del cacao..... | 8 |
| 3.3 | CINÉTICA DE SECADO | 8 |
| 3.4 | MODELOS DE CINÉTICA DE SECADO..... | 9 |
| 3.4.1 | Modelo de Page | 9 |
| 3.4.2 | Modelo de Newton | 9 |
| 3.4.3 | Modelo de Henderson & Pabis..... | 10 |
| 3.4.4 | Modelo Logarítmico | 11 |
| 3.4.5 | Aproximación a la Difusión | 11 |
| 3.4.6 | Modelo de Midilli..... | 12 |
| 3.4.7 | Modelo de Dos Términos..... | 13 |
| 3.4.8 | Modelo de Dos Términos Exponenciales | 13 |
| 3.4.9 | Modelo Modificado de Henderson & Pabis..... | 14 |
| 3.4.10 | Modelo de Verma | 14 |
| 4. | HIPÓTESIS | 15 |
| 5. | PRESUPUESTO REFERENCIAL | 15 |
| 6. | MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS..... | 16 |
| 6.1 | VARIABLES | 17 |
| 6.1.1 | Variables independientes | 17 |
| 6.1.2 | Variables dependientes | 17 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.1.3 | Variables aleatorias..... | 18 |
| 6.1.4 | Condiciones para realizar el experimento..... | 18 |
| 6.2 | MATERIALES..... | 19 |
| 6.2.1 | Estación meteorológica WS-2553-IP | 19 |
| 6.2.2 | Computadora | 19 |
| 6.2.3 | Calibrador pie de rey..... | 19 |
| 6.2.4 | SOKO Analizador de humedad halógeno..... | 20 |
| 6.3 | PROCESO DE LA CINÉTICA DE SECADO | 21 |
| 6.3.1 | Selección de mazorcas de cacao..... | 21 |
| 6.3.2 | Selección de almendras de cacao | 22 |
| 6.3.3 | Pesaje de almendras de cacao según su tamaño | 22 |
| 6.3.4 | Calibración del medidor de humedad halógeno | 22 |
| 6.3.5 | Pesaje de almendras de cacao..... | 23 |
| 6.3.6 | Selección de temperatura | 24 |
| 6.3.7 | Obtención de datos del secado | 24 |
| 6.3.8 | Medición de humedad residual final..... | 24 |
| 6.3.9 | Inspección residual de las almendras..... | 25 |
| 6.4 | MODELOS MATEMÁTICOS | 25 |
| 6.4.1 | Modelo de Page | 25 |
| 6.4.2 | Modelo de Newton | 26 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6.4.3 | Modelo de Henderson & Pabis..... | 26 |
| 6.4.4 | Modelo Logarítmico | 26 |
| 6.4.5 | Modelo Aproximación a la difusión | 27 |
| 6.4.6 | Modelo de Midilli..... | 27 |
| 6.4.7 | Modelo de Dos Términos..... | 27 |
| 6.4.8 | Modelo de Dos Términos Exponenciales | 28 |
| 6.4.9 | Modelo modificado de Henderson & Pabis | 28 |
| 6.4.10 | Modelo de Verma | 28 |
| 6.5 | FÓRMULAS | 29 |
| 6.5.1 | Diámetro equivalente..... | 29 |
| 6.5.2 | Cálculo masa de agua | 29 |
| 6.5.3 | Cálculo del porcentaje de agua restante para lograr la masa seca..... | 29 |
| 6.5.4 | Cálculo de masa seca | 30 |
| 6.5.5 | Cálculo de porcentaje de humedad..... | 30 |
| 6.5.6 | Cálculo del error..... | 30 |
| 6.5.7 | Suma de cuadrados del error | 31 |
| 6.5.8 | Suma de cuadrados totales | 31 |
| 6.5.9 | Ajuste del R cuadrado..... | 31 |
| 7. | ANÁLISIS Y RESULTADOS | 32 |
| 7.1 | GRÁFICAS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS..... | 32 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 7.1.1 | Aproximación a la Difusión | 32 |
| 7.1.2 | Midilli | 41 |
| 7.2 | GRÁFICAS COMPARATIVAS | 46 |
| 7.2.1 | Almendras pequeñas | 47 |
| 7.2.2 | Almendras medianas | 49 |
| 7.2.3 | Almendras grandes | 51 |
| 8. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 52 |
| 8.1 | CONCLUSIONES..... | 52 |
| 8.2 | RECOMENDACIONES..... | 53 |
| 9. | REFERENCIAS..... | 53 |

ÍNDICE DE FIGURA

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 3.1 | Cosecha del cacao [11]. | 7 |
| Figura 3.2 | Modelo matemático de Page [24]. | 9 |
| Figura 3.3 | Modelo matemático de Newton [25]. | 10 |
| Figura 3.4 | Modelo matemático de Henderson & Pabis [26]. | 10 |
| Figura 3.5 | Modelo matemático Logarítmico [27]. | 11 |
| Figura 3.6 | Modelo matemático Aproximación a la Difusión [29]. | 12 |
| Figura 3.7 | Modelo matemático de Midilli [30]. | 12 |
| Figura 3.8 | Modelo matemático de dos términos exponenciales [31]. | 13 |
| Figura 3.9 | Modelo matemático modificado de Henderson & Pabis [32]. | 14 |
| Figura 3.10 | Modelo matemático de Verma [33]. | 15 |
| Figura 6.1 | Variables de la cinética de secado. | 17 |
| Figura 6.2 | Estación meteorológica WS-2553-IP | 19 |
| Figura 6.3 | Computadora. | 19 |
| Figura 6.4 | Calibrador pie de rey. | 20 |
| Figura 6.5 | Analizador de humedad halógeno. | 20 |
| Figura 6.6 | Analizador de humedad Amtast155. | 21 |
| Figura 6.7 | Selección de mazorcas de cacao. | 21 |
| Figura 6.8 | Selección de almendras de cacao. | 22 |
| Figura 6.9 | Pesaje de almendras de cacao. | 22 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 6.10 | Pesaje de almendras de cacao. | 23 |
| Figura 6.11 | Obtencion de datos del secado. | 24 |
| Figura 6.12 | Medición de humedad residual. | 25 |
| Figura 6.13 | Inspección residual de las almendras. | 25 |
| Figura 7.1 | Curva de secado de almendra pequeña a 40°C, modelo “Aproximación a la difusión”. | 33 |
| Figura 7.2 | Curva de secado de almendra grande a 40°C, modelo “Aproximación a la difusión”. | 34 |
| Figura 7.3 | Curva de secado de almendra pequeña a 50°C, “Aproximación a la difusión”. | 35 |
| Figura 7.4 | Curva de secado de almendra mediana a 50°C, “Aproximación a la difusión”. | 36 |
| Figura 7.5 | Curva de secado de almendra pequeña a 55°C, modelo “Aproximación a la difusión”. | 37 |
| Figura 7.6 | Curva de secado de almendra mediana a 55°C, modelo “Aproximación a la difusión”. | 38 |
| Figura 7.7 | Curva de secado de almendra grande a 55°C, modelo “Aproximación a la difusión”. | 39 |
| Figura 7.8 | Curva de secado de almendra mediana a 40°C, modelo “Midilli”. | 41 |
| Figura 7.9 | Curva de secado de almendra pequeña a 45°C, modelo “Midilli”. | 42 |
| Figura 7.10 | Curva de secado de almendra medianas a 45°C, modelo “Midilli”. | 43 |
| Figura 7.11 | Curva de secado de almendra grande a 45°C, modelo “Midilli”. | 44 |
| Figura 7.12 | Curva de secado de almendra grande a 50°C, modelo “Midilli”. | 45 |
| Figura 7.13 | Gráfica comparativa “Aproximación a la difusión” tamaño pequeño. | 47 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 7.14 | Gráfica comparativa “Midilli” tamaño pequeño. | 47 |
| Figura 7.15 | Gráfica comparativa “Aproximación a la Difusión” tamaño medianas. | 49 |
| Figura 7.16 | Gráfica comparativa “Midilli” tamaño medianas. | 49 |
| Figura 7.17 | Gráfica comparativa Aproximación a la difusión tamaño grandes. | 51 |
| Figura 7.18 | Gráfica comparativa Midilli tamaño grandes. | 51 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabla 1.1 | Campos de la Ciencia y Tecnología [1]..... | 1 |
| Tabla 2.1 | Sistemas de tareas..... | 5 |
| Tabla 3.1 | Tipos de fermentación..... | 7 |
| Tabla 3.2 | Tipos de secado..... | 8 |
| Tabla 5.1 | Presupuesto económico..... | 15 |
| Tabla 6.1 | Variables independientes..... | 17 |
| Tabla 6.2 | Variables independientes..... | 17 |
| Tabla 6.3 | Variables aleatorias..... | 18 |
| Tabla 6.4 | Unidades de medida..... | 18 |
| Tabla 6.5 | Selección por tamaños..... | 22 |
| Tabla 7.1 | Resumen del modelo matemático “Aproximación a la difusión”..... | 40 |
| Tabla 7.2 | Resumen del modelo matemático “Midilli”..... | 46 |
| Tabla 7.3 | Tabla de coeficiente de correlación "R2" en almendras pequeñas..... | 48 |
| Tabla 7.4 | Tabla de coeficiente de correlación "R2" en almendras medianas..... | 50 |
| Tabla 7.5 | Tabla de coeficiente de correlación "R2" en almendras grandes..... | 52 |

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Cinética de secado del cacao Colección Castro Naranjal 51 para un régimen controlado de temperatura de rango 40 a 55°C en el cantón La Maná.

Modalidad de titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyecto de Investigación

Carrera: Ingeniería Electromecánica.

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación.

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Arroyo Rovalino Erick Steve

Villacreses Chusin David Josué

Ing. Albarracín Álvarez Mauro Darío, Ms.C.

Área de conocimiento:

Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología [1]

| | | |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 07 Ingeniería, Industria y Construcción | 071 Ingeniería y Profesiones Afines | 0714 Electrónica y automatización |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Eficiencia energética en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía.

2. INTRODUCCIÓN

El cacao es uno de los productos más cultivados en el Ecuador, ya que tiene una demanda grande por su aroma, sabor y sobre todo su buena calidad. Dadas las condiciones climáticas del país el cacao es uno de los productos más sembrados en la región del Litoral, Guayas siendo la principal productora del mismo [2]. Con los estudios de los años pasados hoy en día existen varios tipos de cacao como es el cacao nacional que es uno de los más sembrados por su baja tolerancia a enfermedades o plagas, este lo usan para luego injertar otros tipos de cacao más productivos y de mejor calidad, como es el cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN-51) [3]. El cacao CCN51 es más productivo, tiene mejor aroma pero el cuidado debe ser exhaustivo. Existen otros tipos de cacao como el criollo, forastero, trinitario etc. [4]

En el cantón La Maná el cacao CCN-51 es cultivado ampliamente por las condiciones climáticas que ayuda a tener un producto de calidad.

La cinética de secado permite determinar la pérdida de humedad de un producto expuesto al flujo de aire caliente bajo condiciones controladas de temperatura, humedad relativa, tiempo y velocidad del aire [5].

Para describir el comportamiento de la cinética de secado, se emplean diferentes modelos matemáticos como por ejemplo, Newton, Page, Midilli y algunos más que son ampliamente utilizados en productos agrícolas debido a su facilidad de aplicación y su capacidad de ajuste. Cada uno de estos modelos matemáticos presenta diferentes ecuaciones con diferentes variables, que se validan experimentalmente y así se garantiza su aplicabilidad en condiciones específicas o particulares. En el presente estudio, se analiza la cinética de secado del cacao de la variedad Colección Castro Naranjal (CCN-51) bajo un régimen controlado de temperatura en un rango de 40 a 50°C. El objetivo principal es mediante hacer la comparación de modelos matemáticos de manera experimental y así identificar el modelo que mejor se ajuste o adapte a las condiciones de la cinética de secado del cacao CCN-51.

2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En nuestro país se exportan productos petroleros y no petroleros, en los productos no petroleros abarban varios, pero el cacao destaca como el tercer producto más exportado. Debido a eso su comercialización es bastante contribuyente económicamente al sector cacaotero del país, por eso el cantón La Maná se produce un cacao de calidad para su debido comercio al exterior [6].

El proceso de secado del cacao CCN-51 tiene varios problemas que afectan a la almendra ya que en La Maná la mayoría de productores realizan el secado de manera tradicional y dadas las condiciones ambientales el secado tiene más dificultades con esto lleva más tiempo de duración. La cinética de secado del cacao CCN-51 es el proceso más fundamental pero carece de modelos matemáticos que sean adaptados de mejor manera a las condiciones locales de las zonas productoras, como es el cantón La Maná. Sin tener un modelo confiable que sea preciso, se va a comprobar cual modelo matemático se adapta mejor a la cinética de secado para cada uno de los regímenes de temperatura del cacao en el cantón La Maná.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Como la aplicación de un régimen controlado de temperatura en un intervalo de 5°C entre 40 a 55°C influye en la cinética de secado del cacao CCN-51, considerando la necesidad de ajustar y verificar modelos matemáticos que especifiquen con precisión el comportamiento del secado bajo estas condiciones controladas.

2.3 OBJETO DE CAMPO Y ACCIÓN

2.3.1 Objeto de investigación

Cinética de secado del cacao Colección Castro Naranjal 51(CCN-51)

2.3.2 Campo de acción

2.99 Otras – Cinética de secado

2.4 BENEFICIARIOS

Para establecer los beneficiarios se consideró que la realización de este proyecto de investigación contribuye a la ejecución del proyecto de investigación académico científico “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”, que es desarrollado por el grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, por lo que se establece los siguientes beneficiarios:

2.4.1 Directos

- Grupo de investigación del proyecto “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”.

2.4.2 Indirectos

- Productores locales del cacao en el cantón La Maná.

2.5 JUSTIFICACIÓN

La investigación sobre la cinética de secado del cacao CCN-51 bajo un régimen controlado de temperatura en el rango de 40 a 55°C en el cantón La Maná tiene motivaciones académicas, personales y sociales. En el ámbito personal del proyecto nos representa como una oportunidad para desarrollar habilidades en el modelado matemático y análisis de datos experimentales, fortaleciendo mi información profesional en el área de la ingeniería. En el ámbito académico nos contribuye directamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi, al generar conocimiento relevante al análisis de la cinética vinculado al proyecto “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”. Los resultados obtenidos podrán ser de utilidad como base para futuros modelos matemáticos para el manejo del cacao, colocando a la Universidad como un referente en la aplicación de modelos matemáticos. En el ámbito social contribuye a los productores de cacao del cantón La Maná y a los investigadores que deseen tener más conocimientos de la cinética de secado y modelos matemáticos.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General

Comparar 10 modelos matemáticos de cinética de secado bajo un régimen controlado de temperatura de 40 a 55°C, estableciendo cual se adapta mejor al comportamiento del cacao CCN-51.

2.6.2 Específicos

- Analizar los fundamentos teóricos asociados a la cinética de secado del cacao proporcionando el soporte necesario para el desarrollo del presente estudio.
- Diseñar una metodología que facilite el estudio de la cinética de secado del cacao, considerando la relación entre el contenido de humedad y el tiempo con un régimen de temperatura 40, 45, 50 y 55°C.
- Evaluar los resultados de la cinética de secado de la variedad de cacao CCN-51 mediante un diseño experimental, controlado las variables de temperatura y tiempo.

2.6.3 Sistemas de tareas

Tabla 2.1 Sistemas de tareas.

| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | ACTIVIDADES (TAREAS) | RESULTADOS ESPERADOS | TÉCNICAS, MEDIOS E INSTRUMENTOS |
|--|---|---|---|
| Analizar los fundamentos teóricos asociados a la cinética de secado del cacao proporcionando el soporte necesario para el desarrollo del presente estudio | Revisión bibliográfica. | Obtención teórica de la cinética de secado del cacao. | <ul style="list-style-type: none"> • Análisis, • Sitios web |
| | Definición de variables. | Determinación de variables de entrada, salida, aleatorias | <ul style="list-style-type: none"> • Identificación • Sitios web |
| | Información de modelos matemáticos. | Listado de modelos matemáticos. | <ul style="list-style-type: none"> • Comparación • Análisis • Sitios web |
| | Revisión de estudios previos. | Información sobre cinética de secado de productos similares al cacao. | <ul style="list-style-type: none"> • Investigación • Sitio web • Revistas • Artículos científicos |
| Diseñar una metodología que facilite el estudio de la cinética de secado del cacao, considerando la relación entre el contenido de humedad y el tiempo con un régimen de temperatura de 40, 45, 50 y 55°C- | Selección de equipos. | Equipos adecuados para realizar el secado del cacao CCN-51 | <ul style="list-style-type: none"> • Estación meteorológica • WS.1553-IP • Computadora • Calibrador pie de rey • Analizador de humedad halógeno. • Medidor de humedad Amtast AMT155 |
| | Selección de modelos matemáticos. | Modelos matemáticos para usar con cada una de sus coeficientes. | <ul style="list-style-type: none"> • Análisis • Comparación • Sitios web |
| | Selección de variables. | Definición de variables de la cinética de secado | <ul style="list-style-type: none"> • Análisis • Sitios web |
| | Selección y preparación de muestras. | Almendras de cacao en tamaños: pequeño, mediano, grande. | <ul style="list-style-type: none"> • Medición • Cálculos • Excel • Pie de rey |
| Evaluar los resultados de la cinética de secado del cacao CCN-51, mediante un diseño experimental controlando las variables de temperatura y tiempo durante el proceso | Registro y análisis de datos obtenidos. | Datos exactos del secado de cacao. | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de replica • Monitoreo • Recolección de datos • Excel |
| | Comparación de modelos matemáticos | Identificación del modelo matemático que mejor se adapte. | <ul style="list-style-type: none"> • Comparación • Ajuste • Excel |

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ANTECEDENTES

El tema se enmarca dentro de la línea de investigación Energía alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, y esto corresponde a la sublínea de Eficiencia energética en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía, cuyo eje de temática se atribuye a la cinética de secado mediante modelos matemáticos.

Estudios anteriores han abordado el tema de cinética de secado con el objetivo de encontrar un modelo matemático que mejor se adapte a las condiciones climáticas y al tipo de cacao como el Latacunga se desarrolló una investigación sobre el análisis de la cinética de secado del cacao nacional y mejorado CCN-51, con eso se determina el comportamiento de humedad en función del tiempo y temperatura en un rango de 40 a 55°C. Utilizando un deshidratador de granos y modelos matemáticos para describir la cinética de secado [7]. En la presente investigación se utilizó un analizador de humedad halógeno lo cual aporta mayor fiabilidad para el “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”. Sus estudios demostraron que los modelos matemáticos que mejor se adaptaron a sus condiciones fueron el modelo de Newton y Page dando una curva convergente óptima. El grupo de investigación observó la falta de información sobre el tema, lo que resalta la necesidad de profundizar en su estudio para optimizar y mejorar las técnicas del secado [8].

3.2 CACAO ECUATORIANO

En el Ecuador el cacao es un producto que lo emplean los indígenas hace siglos para la elaboración de una bebida amarga, con la llegada de los europeos esta debida la mejoraron y hoy lo conocemos como chocolate en sus diferentes formas o versiones [9].

El cacao Colección Castro Naranjal 51 con los años transcurridos es uno de los productos más sembrados en el Ecuador, en la última década es el tercer producto más exportados debido a la calidad. El cacao ecuatoriano por condiciones climáticas es muy productivo y poco propenso a enfermarse de plagas fácilmente. Se creó en el año 196 por Homero Castro de forma experimental con varios tipos de injertos en su propia finca la cual se llama “Theobroma” [10].

3.2.1 Cosecha del cacao

La cosecha del cacao se debe realizar de manera diaria, las mazorcas tienen diferentes tonos de color y eso se produce debido a su maduración ya que no se madura de manera uniforme. Para

la cosecha se debe verificar que la mazorca este madura viendo la tonalidad del color o haciendo un pequeño corte y si el color es amarillo esta lista para la cosecha [11].

El corte se lo realiza en el pedúnculo como se visualiza en la figura 3.1, con esto nos aseguramos de no afectar a la mazorca y el corte se lo hace con tijeras o con navaja, se evita cosechar mazorcas con enfermedades, hongos o golpes que se distinguen por manchas o colores no comunes [11].



Figura 3.1 Cosecha del cacao [11].

3.2.2 Fermentación del cacao

La fermentación es un proceso muy importante ya que es este paso se mejora el producto en aroma y sabor, por esta razón Ecuador es uno de los países más exportadores del cacao [12].

Existen distintos tipos de fermentación en la Tabla 3.1 se muestran los más importantes

Tabla 3.1 Tipos de fermentación.

| Tipos de fermentación | |
|-----------------------|--|
| Cajones de madera | Tiene un intervalo de 4 a 6 días de fermentación, se voltea cada 24 a 48 horas una vez iniciado el proceso [5]. |
| Pilas | Se apila el cacao y se cubre con hojas de plátano u otro material vegetal, con esto se mantiene el calor, el proceso dura de 3 a 5 días [13]. |
| Sacos o costales | Se coloca las almendras en sacos o costales, se con material vegetal o plástico y se cierran. En el proceso se sacuden los sacos [14]. |
| Tambor rotatorio | Son tambores cilíndricos que rotan, este diseño facilita la remoción de las almendras y la fermentación es uniforme. Dura entre 5 a 7 días [15]. |

3.2.3 Secado del cacao

El secado de cacao es importante por los beneficios que le da al grano como es el aroma y olor.

La humedad final del cacao debe ser del 7% para que se puede almacenar durante varios meses y así evitar enfermedades como hongos u otras.

En la tabla 3.2 se muestran los tipos de secado de cacao.

Tabla 3.2 Tipos de secado

| Tipos de secado | |
|------------------|---|
| Al sol | Es uno de los más usados en el Ecuador, por su facilidad y no tiene inversión económica, pero el proceso es largo dura de 5 a 7 días si el clima es bueno [16]. |
| Flujo de aire | El Sistema consta de ventilación de aire hacia la almendra y así se acelera el secado [17]. |
| Lecho fluidizado | La almendra es suspendida por el flujo de aire caliente y el secado se da en un corto tiempo [18]. |
| Microondas | Funciona como radiación electromagnética, esta energía provoca que el porcentaje de humedad de la almendra menor [19]. |
| Cámaras de vacío | La humedad de la almendra se reduce debido a la baja presión atmosférica, el secado se realiza a bajas temperaturas [20]. |
| Tambor rotatorio | Debido a la transferencia de calor uniforme se elimina la humedad de la almendra del cacao [21]. |
| Bandeja | En bandejas se coloca la almendra de manera uniforme y se coloca en una cámara de calor y pérdida humedad [22]. |
| Horno | Debido a la circulación de aire caliente la almendra de cacao pierde humedad [23]. |

3.3 CINÉTICA DE SECADO

La cinética de secado analiza los cambios de que transcurren durante la eliminación de humedad de un material, observando cómo estos cambian según las condiciones ambientales y el tiempo. El estudio abarca aspectos importantes como la velocidad del cacao influenciada por las características de la almendra de cacao y las condiciones ambientales, así como la curva convergente del secado que se representa gráficamente por cada etapa del proceso. En la cinética de secado son muy importante los modelos matemáticos que tiene un papel muy importante que es la predicción y optimización del comportamiento del material durante el secado, con eso la eficacia de alta en el proceso de secado. Los factores internos como es la estructura de material, porosidad y junto a elementos externos como la temperatura y la

humedad relativa, afectan directamente la eficiencia y calidad del secado, siendo muy importante para preservar y procesar alimentos y productos agrícolas [22].

3.4 MODELOS DE CINÉTICA DE SECADO

3.4.1 Modelo de Page

Este modelo es ampliamente empleado para la descripción de la cinética de secado de materiales alimenticios y productos agrícolas, como principal fortaleza se enfoca en su buena capacidad de adaptarse con precisión a datos experimentales, lo que para muchos es una herramienta útil para distintos productos, como vegetales, granos, futas entre otros. También, permite predecir el comportamiento del secado bajo diferentes condiciones, ayudándonos a la optimización del proceso de secado. Pero al ser un modelo empírico carece de un sustento físico directo, lo que esto limita en algunos procesos para ciertos casos de cinética de secado [24].

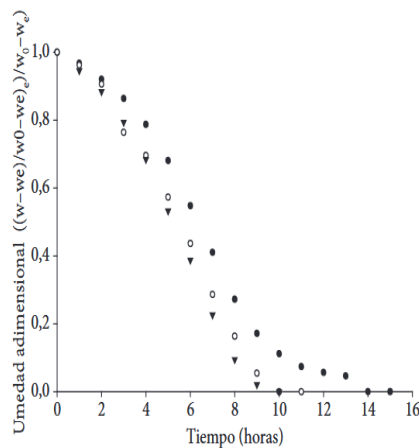


Figura 3.2 Modelo matemático de Page [24].

3.4.2 Modelo de Newton

El modelo de Newton tiene un beneficio que es la simplicidad y es uno de los más comunes para estudiar la cinética de secado. En este modelo se utiliza una ecuación exponencial que tiene relación entre la disminución de humedad del material con el tiempo. Por su sencillez matemática, este modelo es útil para el ajuste de datos experimentales y se puede analizar las primeras etapas del proceso de secado, en el cual el comportamiento del material va a ser más uniforme. Este modelo sí contiene limitaciones al no considerar cambios en la velocidad del secado como tampoco las resistencias internas al flujo de humedad [25].

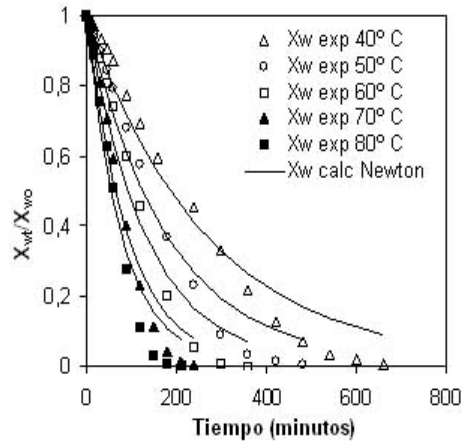


Figura 3.3 Modelo matemático de Newton [25].

3.4.3 Modelo de Henderson & Pabis

Este modelo es muy reconocido en el estudio de la cinética de secado de productos alimenticios y productos agrícolas, este modelo surge como una mejora del modelo matemático de Newton, pero en este modelo se añade un término que nos ayuda a optimizar el ajuste de datos experimentales. El modelo tiene como objetivo describir la pérdida del contenido de humedad de un material u objeto a medida que se realiza el proceso de secado. Este modelo nos facilita analizar el comportamiento del material u objeto en diferentes factores ambientales como por ejemplo el cambio de temperatura o el cambio de la velocidad de aire, aportando información importante para mejorar el proceso de secado. La principal fortaleza del modelo es la capacidad de adaptarse a materiales de propiedades variadas pero en base a su simplicidad también nos implica ciertas limitaciones, como la ausencia de consideración de factores internos del material o fluctuaciones en la velocidad del secado [26].

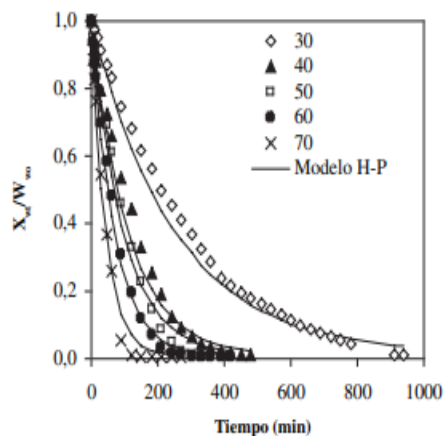


Figura 3.4 Modelo matemático de Henderson & Pabis [26].

3.4.4 Modelo Logarítmico

El modelo logarítmico es muy utilizado para el análisis de cinética de secado por su capacidad de describir las variaciones en el contenido de humedad con presión de diferentes materiales o productos incluyendo productos alimenticios y productos agrícolas. El modelo se fundamenta en una ecuación en el cual esta añadió una variable adicional a diferencia de otros modelos matemáticos y esto permite un mejor ajuste de datos experimentales bajo diferentes condicione. Es modelo es muy útil en escenarios en donde el secado no sigue un comportamiento exponencial estricto, debido a que el termino adicional nos ayuda a reflejar mejor las variaciones en las instancias finales del proceso de secado [27].

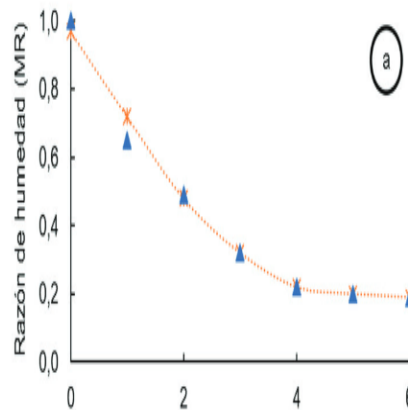


Figura 3.5 Modelo matemático Logarítmico [27].

3.4.5 Aproximación a la Difusión

El modelo de Aproximación a la difusión se basa en la transferencia de humedad dentro del grano durante el proceso de secado. Se considera una geometría esférica para representar la difusión interna de agua, en respuesta en la superficie ocurre la evaporación esto siguiendo la segunda ley de Fick. Enfocados en esto la reducción de humedad se modela mediante una ecuación exponencial decreciente, donde el coeficiente de difusividad efectiva va a sr un parámetro clave para describir la velocidad del secado [28]. El modelo de aproximación a la difusión aplicado a la cinética de secado presenta ventajas y desafíos, el principal beneficio es poder optimizar el proceso de secado al predecir con mayor precisión la reducción de humedad en función del tiempo, esto nos ayuda a el ahorro energético y a mejorar la eficiencia del proceso de secado, otra ventaja es que se realiza un secado uniforme y esto favorece a la calidad final del producto [29].

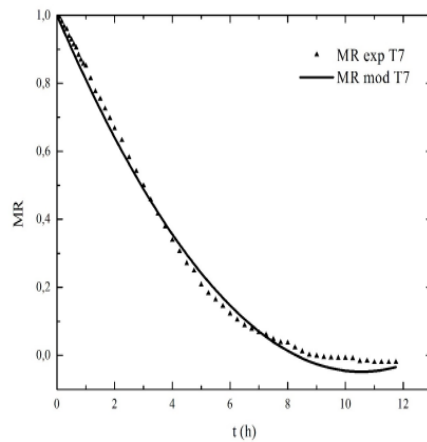


Figura 3.6 Modelo matemático Aproximación a la Difusión [29].

3.4.6 Modelo de Midilli

Este modelo combina un componente exponencial con uno no lineal, lo que nos permite describir con precisión las distintas etapas del secado, comenzando por las fases iniciales hasta la fase final que es más lenta. Este modelo tiene una versatilidad para la adaptación a diferentes condiciones climáticas y a distintos tipos de materiales u objetos. Nos ofrece resultados confiables ya que tiene altos valores de coeficientes de determinación y reducir errores, como el cuadrático medio y relativo medio. Por ello es una herramienta muy adaptable para optimizar procesos de secado y asegurando la calidad del producto. El modelo de Midilli es adaptable a una amplia variedad de productos como frutas, vegetales y tipos de granos siendo muy factible utilizarlo en estudios experimentales. La capacidad de predecir el comportamiento bajo condiciones variadas como condiciones climáticas o flujo de aire lo hacen uno de los más usados [30].

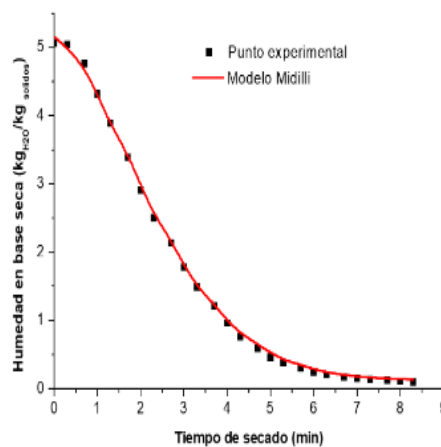


Figura 3.7 Modelo matemático de Midilli [30].

3.4.7 Modelo de Dos Términos

El modelo de dos términos se usa para describir la cinética de secado de diversos materiales, este modelo combina dos componente uno exponencial y otro lineal. Debido a la combinación de os componentes este modelo permite capturar diferentes fases del proceso de secado, comenzando con una etapa rápida y finalizando con una lenta, en este proceso el material o producto pierde humedad. El modelo refleja cómo se disminuye la tasa de evaporación de agua a lo largo del proceso de secado por esto es más útil modelar productos con características físicas y condiciones variadas. Una de las ventajas del modelo es que se ajusta a modelos experimentales de manera efectiva, por lo tanto lo hace bueno para estudios científicos como para el secado industrial. Este modelo se puede representar las fases rápidas como las lentas del secado debido a esto es una importante ya que se optimiza el proceso de secado [31].

3.4.8 Modelo de Dos Términos Exponenciales

El modelo de dos términos exponenciales es utilizado para la cinética de secado que se describe como se elimina la humedad de un material. El modelo como el nombre lo dice emplea dos términos exponenciales en su ecuación, esto permite tener una mayor exactitud en el proceso largo del secado. Es útil principalmente en materiales que no tiene un secado constante, se ajusta cambio de velocidad de deshidratación. Este modelo es más preciso en procesos de secado en donde la velocidad del secado no es estable, por el motivo nos permite capturar tanto las etapas iniciales rápidas como las más lentas. Debido a su capacidad se puede prever el contenido de humedad residual del material y así se optimiza el proceso de secado mejorando la calidad del producto [31].

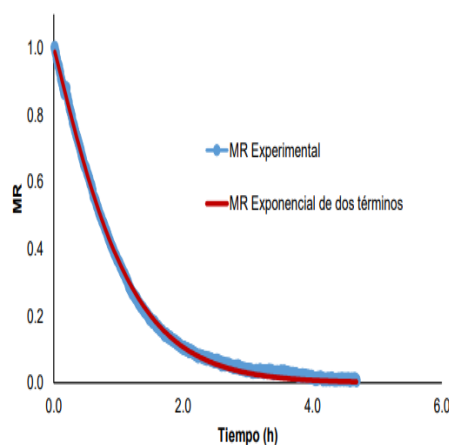


Figura 3.8 Modelo matemático de dos términos exponenciales [31].

3.4.9 Modelo Modificado de Henderson & Pabis

El modelo modificado de Henderson & Pabis es la versión actualizada en base al modelo clásico, se creó para la representación de mayor precisión de la cinética de secado en diversos productos. En la mejora se añade términos adicionales a la ecuación original, lo que permite obtener con mayor detalle las diferentes etapas del proceso de secado, en especial las condiciones heterogéneas o cuando existen múltiples mecanismos de secado. El modelo añade diferentes términos exponenciales que enseñan las diferentes fases del proceso, así dando como resultado un modelo más completo para el análisis. Uno de los beneficios principales es la flexibilidad debido a que se ajusta fácilmente a distintos tipos de materiales y distintas condiciones de secado [32].

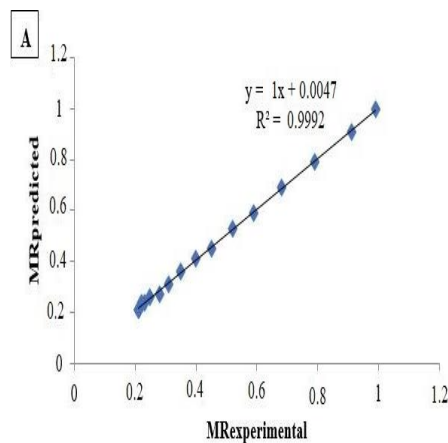


Figura 3.9 Modelo matemático modificado de Henderson & Pabis [32].

3.4.10 Modelo de Verma

El modelo de Verma es utilizado para la descripción del proceso en productos agrícolas alimenticio, si nos centramos en la fase de secado la velocidad disminuye gradualmente. Este modelo permite ver los cambios en condiciones de secado según factores como la temperatura, la velocidad del aire y características del material. La aplicación optimiza la eficiencia del proceso y reduce el tiempo necesario para secar el producto final, por ello es esencial en los entornos industriales y ayuda a ajustar la curva convergente y mejora la calidad final del producto [33].

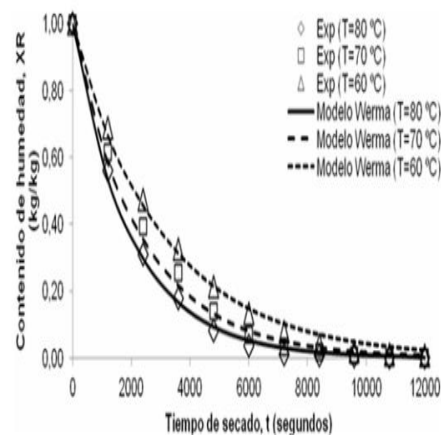


Figura 3.10 Modelo matemático de Verma [33].

4. HIPÓTESIS

La variación de temperatura en un régimen controlado entre 40 °C y 55 °C influye en el tiempo de secado y la pérdida de humedad de las almendras de cacao CCN-51 con diferentes diámetros equivalentes, permitiendo la validación de modelos matemáticos que describen con precisión su comportamiento durante el proceso de secado.

5. PRESUPUESTO REFERENCIAL

En la Tabla 5.1 se detalla el presupuesto económico de bienes y servicios con las respectivas cantidades, unidades de medida y valor económico. Reflejando un total de 6140,00 dólares.

Tabla 5.1 Presupuesto económico.

| Nº | CANTIDAD | UNIDAD DE MEDIDA | RUBRO | VALOR ECONÓMICO |
|--------------|----------|------------------|--------------------------------------|-----------------|
| 1 | 1 | Unidad | Estación meteorológica WS-2553-IP. | 632,50 |
| 2 | 2 | Unidad | Computadora. | 1650,00 |
| 3 | 2 | Unidad | Calibrador pie de rey. | 66,00 |
| 4 | 2 | Unidad | SOKO Analizador de humedad halógeno. | 1100,00 |
| 5 | 4 | Unidad | Batería 100 ah. | 1064,00 |
| 6 | 10 | Metros | Cables #8. | 17,00 |
| 7 | 1 | Unidad | Inversor. | 350,00 |
| 8 | 1 | Unidad | UPC. | 220,00 |
| 9 | 1 | Unidad | Generador. | 270,00 |
| 10 | 4 | Galones | Gasolina | 10,60 |
| 11 | 45 | Día/Hombre | Mano de obra. | 1350,00 |
| 12 | 144 | Unidad | Mazorcas de cacao CCN-51. | 43,20 |
| TOTAL | | | | 6140,80 |

El análisis del listado de bienes y servicios revela un total de 6140,80 distribuida principalmente en equipos, herramientas y mano de obra. En la cual la mayor parte del presupuesto se destina en equipos como principal el analizador de humedad SOKO entre otros, la mano de obra representa aproximadamente el 22% del costo total, en otros insumos como cable, gasolina, tiene un gasto menor resaltando el costo de equipos y mano de obra.

6. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Para el proyecto de investigación el procedimiento para identificar el modelo matemático que mejor se adapte a la cinética de secado del cacao CCN-51 bajo un régimen controlado de temperatura en el rango de 40 a 55°C en el cantón La Maná se muestra a continuación.

Se seleccionaron y clasificaron las almendras de cacao según el tamaño con la ayuda de un calibrador pie de rey, con esto se asegura la uniformidad de las almendras. Este procedimiento fue importante para que las variaciones que se observen el proceso de secado estén únicamente relacionadas con los parámetros de temperatura y no por diferencias en los tamaños de las almendras.

Después de la clasificación las muestras de almendra se sometieron a un régimen controlado de temperatura, con intervalos de 5°C establecidos entre 40 y 55°C. En el proceso, se tomaron mediciones periódicas cada 5 minutos del contenido de humedad y por último se tomó la medición en un analizador de humedad, el cual no ayudo a que los resultados sean confiables y precisos. Los datos del secado del cacao se registraron y con la ayuda de Excel se graficaron las curvas convergentes en las que se visualiza la relación entre la perdida de humedad y el tiempo.

Con los datos obtenidos, se realizó el análisis de la cinética de secado utilizando 10 modelos matemáticos más comunes para el estudio del secado. Cada uno de los modelos matemáticos fueron ajustados a los datos experimentales mediante métodos estadísticos, como el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio, para evaluar la capacidad de describir el comportamiento del secado en las condiciones que están establecidas.

La validación de los modelos nos permite hacer una comparación e identificar el modelo matemático que más se adapte al comportamiento real del secado de caco CCN-51 por cada uno de los regímenes de temperatura. Los modelos no proporcionaron herramientas útiles para describir la cinética de secado de manera concreta y precisa, ayudadnos al análisis técnico y su posible implementación en futuros estudios.

Esta investigación se enfocó exclusivamente en los aspectos matemáticos y físicos del secado del cacao, manteniendo un enfoque riguroso en la cinética de secado y modelos matemáticos.

6.1 VARIABLES

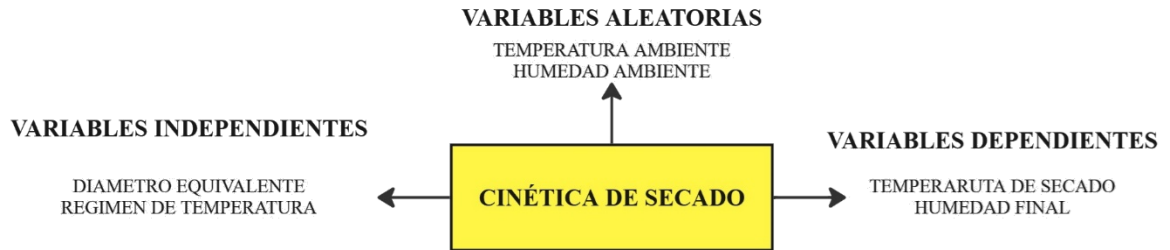


Figura 6.1 Variables de la cinética de secado.

6.1.1 Variables independientes

Tabla 6.1 Variables independientes.

| Variables Independientes | |
|--------------------------|---|
| Diámetro equivalente | El diámetro equivalente se realizó teniendo en cuenta el largo, ancho y espesor (l , a , e) donde se obtuvo las medidas de 16 a 21,999 mm en la cual se seleccionaron pequeñas (16 a 17,99), medianas (18 a 19,99) y grandes (20 a 21,999). |
| Régimen de temperatura | La temperatura que se utilizó fue de 40, 45, 50 y 55 °C. |

6.1.2 Variables dependientes

Tabla 6.2 Variables dependientes.

| Variables dependientes | |
|------------------------|--|
| Tiempo de secado | <p>El tiempo de secado de la almendra de cacao es variable ya que en temperaturas de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40°C tiene un tiempo de secado de 22 horas a 37 horas dependiendo el tamaño de la semilla. • 45°C tiene un tiempo de secado 17 horas a 28 horas dependiendo el tamaño de semilla. |

| | |
|----------------------------|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • 50°C tiene un tiempo de secado de 15 horas a 21 horas dependiendo el tamaño de la semilla. • 55°C tiene un tiempo de secado 17 horas a 20 horas dependiendo el tamaño de semilla. |
| Contenido de humedad final | Se tiene un factor de humedad final de en un intervalo de 5% a 8% con lo cual se obtuvo la curva convergente. Se midió la humedad final de las almendras de cacao al finalizar el secado y posteriormente 10 minutos después otra medida en donde las muestras mostraban un factor de humedad de 4% a 8%. |

6.1.3 Variables aleatorias

Tabla 6.3 Variables aleatorias

| | |
|------------------------------|---|
| Variables dependientes | |
| Contenido de humedad inicial | El contenido de humedad inicial va de 43,54% a 54,51%. |
| Temperatura ambiente | Se trabajó con la temperatura ambiente en un rango de 22,1°C hasta un máximo de 32°C y la temperatura variaba de acuerdo al transcurso del día. |

6.1.4 Condiciones para realizar el experimento

Tabla 6.4 Unidades de medida.

| Descripción | Unidad de medida |
|-----------------------|------------------|
| Diámetro equivalente | <i>mm</i> |
| Temperatura de secado | <i>°C</i> |
| Humedad inicial | % |
| Humedad final | % |
| Pérdida de masa | <i>g</i> |

6.2 MATERIALES

6.2.1 Estación meteorológica WS-2553-IP

Nos ayudó en el lugar de experimentación para registrar las condiciones ambientales, se tomó datos de temperatura y humedad ambiente. Las medidas tomadas por la Figura 6.2 fueron muy importantes para el analizar en qué condiciones climáticas trabajamos en el proceso de secado.



Figura 6.2 Estación meteorológica WS-2553-IP

6.2.2 Computadora

Se utilizó para la recolección de datos de la cinética de secado de todas las variables, con la ayuda de la figura 6.3 se comparó el R cuadrado para ver qué modelo se adapta mejor a la cinética de secado.



Figura 6.3 Computadora.

6.2.3 Calibrador pie de rey

Se utilizó para la clasificación de las almendras de cacao en 3 diferentes tamaños pequeñas, medianas y grandes, asegurando la igualdad de las muestras seleccionadas para el secado. La resolución de la Figura 6.4 que se utilizó de 5mm.

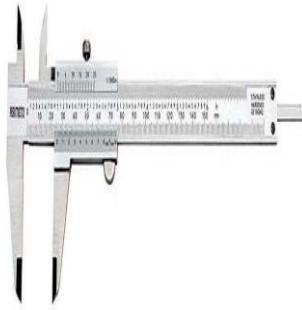


Figura 6.4 Calibrador pie de rey.

6.2.4 SOKO Analizador de humedad halógeno

El analizador de humedad se lo utilizo para la medición con exactitud de pérdida de humedad del cacao CCN-51 en todo el proceso de secado. El equipo nos permitió registrar los datos del secado de una manera confiable, la alta precisión del analizador fue muy importante para la comparación de los modelos matemáticos.

El diseño de la Figura 6.5 facilita el análisis de las muestras asegurándose una distribución uniforme del calor gracias a su sistema de lámparas halógenas.

Se utilizaron dos máquinas trabajando simultáneamente bajo las mismas condiciones ambientales es decir trabajando con una experimentación de réplica.



Figura 6.5 Analizador de humedad halógeno.

6.2.5 MEDIDOR DE HUMEDAD AMTAST AMT155

Se utilizó para registrar el contenido de humedad del cacao CCN-51. La figura 6.6 está diseñada para medir humedad en materiales sólidos, dándonos resultados precisos al momento.

Las mediciones de humedad se tomaron en dos ocasiones, la primera inmediatamente al finalizar el secado y la segunda después de 10 minutos.



Figura 6.6 Analizador de humedad Amtast155.

6.3 PROCESO DE LA CINÉTICA DE SECADO

El proceso se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná.

6.3.1 Selección de mazorcas de cacao

Para la selección de las mazorcas de cacao se cosechan diariamente alrededor de 100 mazorcas como se mira en la figura 6.7 y de manera aleatoria se selecciona 6 de diferentes tamaños que estén en perfectas condiciones, sin daos a la vista, de color uniforme y que no contenga existencia de plagas. Esto nos ayudara a que tengamos una muestra de calidad.



Figura 6.7 Selección de mazorcas de cacao.

6.3.2 Selección de almendras de cacao

Con la selección de las 6 mazorcas anteriores procedemos con la medición de la almendra de cacao tomando en cuenta la necesidad de 3 medidas: pequeñas, medianas y grandes (Figura 6.8). Se calculó con la ecuación del diámetro equivalente (6.11).



Figura 6.8 Selección de almendras de cacao.

Tabla 6.5 Selección por tamaños

| Tamaño | Pequeña | Mediana | Grande |
|-------------|-----------|-----------|------------|
| Medida (mm) | 16– 17,99 | 18– 19,99 | 20 – 21,99 |

6.3.3 Pesaje de almendras de cacao según su tamaño

En la balanza incluida en el analizador de humedad halógeno se pesó las almendras de cacao de 40g por cada uno de los tamaños con una tolerancia de $\pm 3.70\%$ (Figura 6.9).



Figura 6.9 Pesaje de almendras de cacao.

6.3.4 Calibración del medidor de humedad halógeno

Se debe realizar la calibración del analizador de humedad halógeno utilizando la pesa incluida de 100gr, para calibrar se realiza los siguientes pasos

- Encender el equipo.
- Preparamos el masa estándar de 100 gr para la calibración
- Accedemos al modo calibración en el menú de configuración del analizador y seleccionamos la opción de “calibración”.
- Cuando el equipo solicite, colocamos la masa de 100gr en el centro de la plataforma de pesaje.
- El analizador compara la masa registrado y se ajustara automáticamente para garantizar precisión
- Una vez completamos el proceso el equipo mostrara un mensaje indicando que la calibración fue exitosa y se retira la pesa.
- Compruebe que el analizador registre correctamente la masa de prueba colocando nuevamente la pesa de 100 gr.

6.3.5 Pesaje de almendras de cacao

Ya que el analizador esta calibrado se selecciona las almendras de cacao CCN-51 dentro de un rango de 39 a 41,999 gramos (Figura 6.10). Las almendras se colocan cuidadosamente en la plataforma del analizador teniendo en cuenta que estén colocadas de manera uniforme.

Esto permite que el secado sea homogéneo y que las mediciones del contenido de humedad sean precisas y confiables, garantizando así la validez de los datos obtenidos.

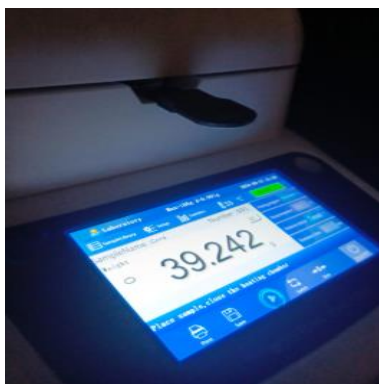


Figura 6.10 Pesaje de almendras de cacao.

6.3.6 Selección de temperatura

Para nuestro análisis se seleccionan cuatro temperaturas específicas que son: 40, 45, 50 y 55°C, utilizando el analizador de humedad halógeno. Los pasos para configurar cada temperatura es e siguiente

- Acceder al menú de configuración del equipo mediante el interfaz táctil.
- Seleccionar el rango de temperatura deseado y ajustarlo manualmente (40, 45, 50 y 55°C).
- Confirmar la configuración de temperatura e iniciar el secado.

6.3.7 Obtención de datos del secado

Los datos del secado del cacao CCN-51 se los tomo en un intervalo de 5 minutos de manera manual (Figura 6.11). Todos los datos se los guardo y organizo en un modelo de tabla Excel. Los datos se tomaron hasta llegar al rango de humedad mínimo que era el 7%.



Figura 6.11 Obtencion de datos del secado.

6.3.8 Medición de humedad residual final

Al finalizar el proceso de secado se realizó la primera medición de humedad como se visualiza en la Figura 6.12. Después de 10 minutos se llevó a cabo una segunda medición de humedad con el objetico de confirmar y garantizar los resultados obtenidos.



Figura 6.12 Medición de humedad residual.

6.3.9 Inspección residual de las almendras

Para evaluar la uniformidad del secado, se realizaron cortes transversales en las almendras de cacao y se analizó las condiciones internas de humedad. Ese procedimiento fue importante para identificar posibles diferencias en el secado entre superficie y el interior de las almendras (Figura 6.13).



Figura 6.13 Inspección residual de las almendras.

6.4 MODELOS MATEMÁTICOS

A continuación se muestra los 10 modelos matemáticos que se utilizara.

6.4.1 Modelo de Page

$$HR = \exp(-kt^n) \quad (6.1)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad

6.4.2 Modelo de Newton

$$HR = \exp(-kt) \quad (6.2)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

6.4.3 Modelo de Henderson & Pabis

$$HR = a \cdot \exp(-kt) \quad (6.3)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

a= constantes de ajuste

6.4.4 Modelo Logarítmico

$$HR = a \cdot \exp(-kt) + b \quad (6.4)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

a, b= constantes de ajuste

6.4.5 Modelo Aproximación a la difusión

$$HR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kbt) \quad (6.5)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad

a= constantes de ajuste

6.4.6 Modelo de Midilli

$$HR = \exp(-kt^n) + bt \quad (6.6)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad

b= constantes de ajuste

6.4.7 Modelo de Dos Términos

$$HR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) \quad (6.7)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad

a, b, g= constantes de ajuste

6.4.8 Modelo de Dos Términos Exponenciales

$$HR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kat) \quad (6.8)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo

6.4.9 Modelo modificado de Henderson & Pabis

$$HR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht) \quad (6.9)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad

a= constantes de ajuste

6.4.10 Modelo de Verma

$$HR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-gt) \quad (6.10)$$

Donde:

HR= contenido de humedad

Exp= número de Euler (exponencial)

K= Constante de ajuste

t= variable de tiempo

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad

a, g = constantes de ajuste

6.5 FÓRMULAS

6.5.1 Diámetro equivalente

Para establecer el diámetro equivalente del cacao en las mazorcas sin importar el tamaño se determina de la siguiente manera:

$$deq = \sqrt[3]{\left(\frac{6}{\pi}\right) \cdot l \cdot a \cdot e} \quad (6.11)$$

Donde:

deq = *diametro equivalente (mm)*

l = *largo (mm)*

a = *ancho (mm)*

e = *espesor (mm)*

6.5.2 Cálculo masa de agua

El porcentaje de agua perdido durante el proceso es importante ya que el grano de cacao habrá perdido la masa en agua.

$$M_{h2o} = Mt - Mf \quad (6.12)$$

Donde:

M_{h2o} = *Masa de agua (g)*

Mt = *masa total humeda (g)*

Mf = *Masa final de la prueba (g)*

6.5.3 Cálculo del porcentaje de agua restante para lograr la masa seca

La masa completamente seca está en un porcentaje de humedad 0 y se calculara de acuerdo con la masa y la humedad finales del proceso.

$$M_{h20restamte} = \frac{M_f \cdot h_f}{100} \quad (6.13)$$

Donde:

$M_{h20restamte}$ = Masa de agua restante (g)

h_f = Humedad final de las pruebas a cualquier regimen de temperatura (%)

M_f = Masa final de la prueba sin inportar el regimen de temperatura(g)

6.5.4 Cálculo de masa seca

La masa seca nos ayudara a calcular el contenido de agua de las variables iniciales e intermedias en base a la masa inicial y la masa de agua contenedora total del grano de cacao.

$$Ms = M_f - M_{h20restamte} \quad (6.14)$$

Donde:

Ms = Masa seca (g)

M_f = Masa final de prueba (g)

$M_{h20restamte}$ = masa de agua restante en la prueba (g)

6.5.5 Cálculo de porcentaje de humedad

La humedad calculada será obtenida a base al grano de cacao completamente seco para tomar como referencia un valor 0 para la humedad.

$$h = \frac{Ms}{Mc} \cdot 100\% \quad (6.15)$$

Donde:

h = Porcentaje de humedad (%)

Ms = Masa seca (g)

Mc = Masa del cacao (g)

6.5.6 Cálculo del error

Este cálculo de error nos ayudara a determinar el error entre el cálculo del modelo experimental como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\mathbf{error} = (HR_{exp} - HR_{modelo})^2 \quad (6.16)$$

Donde:

error = diferencia de error (adimensional)

HR_{exp} = Contenido de humedad experimental (%)

HR_{modelo} = Contenido de humedad del modelo (%)

6.5.7 Suma de cuadrados del error

Suma de cuadrados del error para ajustar la curva de cinética de secado de cacao intercalando los valores de K y N mediante Solver.

$$\mathbf{SCR} = \sum (HR_{exp} - HR_{modelo})^2 \quad (6.17)$$

Donde:

\sum = sumatoria (N°)

SCR = suma de cuadrados del error. (adimensional)

HR_{exp} = Contenido de humedad experimental (%)

HR_{modelo} = Contenido de humedad del modelo (%)

6.5.8 Suma de cuadrados totales

El cálculo de la suma de cuadrados totales nos sirve para calcular la bondad de ajuste del error.

$$\mathbf{SCT} = \sum (HR_{exp} - \bar{HR}_{exp})^2 \quad (6.18)$$

Donde:

SCT = sumatoria de cuadrados totales. (N°)

HR_{exp} = Contenido de humedad experimental (%)

\bar{HR}_{exp} = Contenido de media de la humedad experimental (%)

6.5.9 Ajuste del R cuadrado

Se utiliza para saber qué tan eficiente fue el ajuste en relación con el ajuste experimental y el ajuste de page.

$$R^2 = \frac{SCT - SCR}{SCR} \quad (6.19)$$

Donde:

R^2 = Bondad de ajuste del error (adimensional)

SCT = suma de cuadrados totales (adimensional)

SCR = suma de cuadrados del error (adimensional)

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1 GRÁFICAS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Se ajustaron 10 modelos matemáticos para 3 tamaños de almendras de cacao (pequeñas, medianas y grandes) con regímenes de temperatura de 40, 45, 50 y 55°C; teniendo como resultado 2 modelos con mejor ajuste “Aproximación a la difusión” y “Midilli”. El detalle de los resultados se presenta en los numerales 7.1.1 y 7.1.2 del presente documento.

7.1.1 Aproximación a la Difusión

En la figura 7.1 se muestra que al minuto 1405 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 8 % en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño pequeño, utilizando una temperatura de 40 °C, con una masa final de 22,519 g. En la tabla Anexo B.1 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 40°C de un diámetro de 16 a 17,999 considerado para el grupo de investigación pequeña.

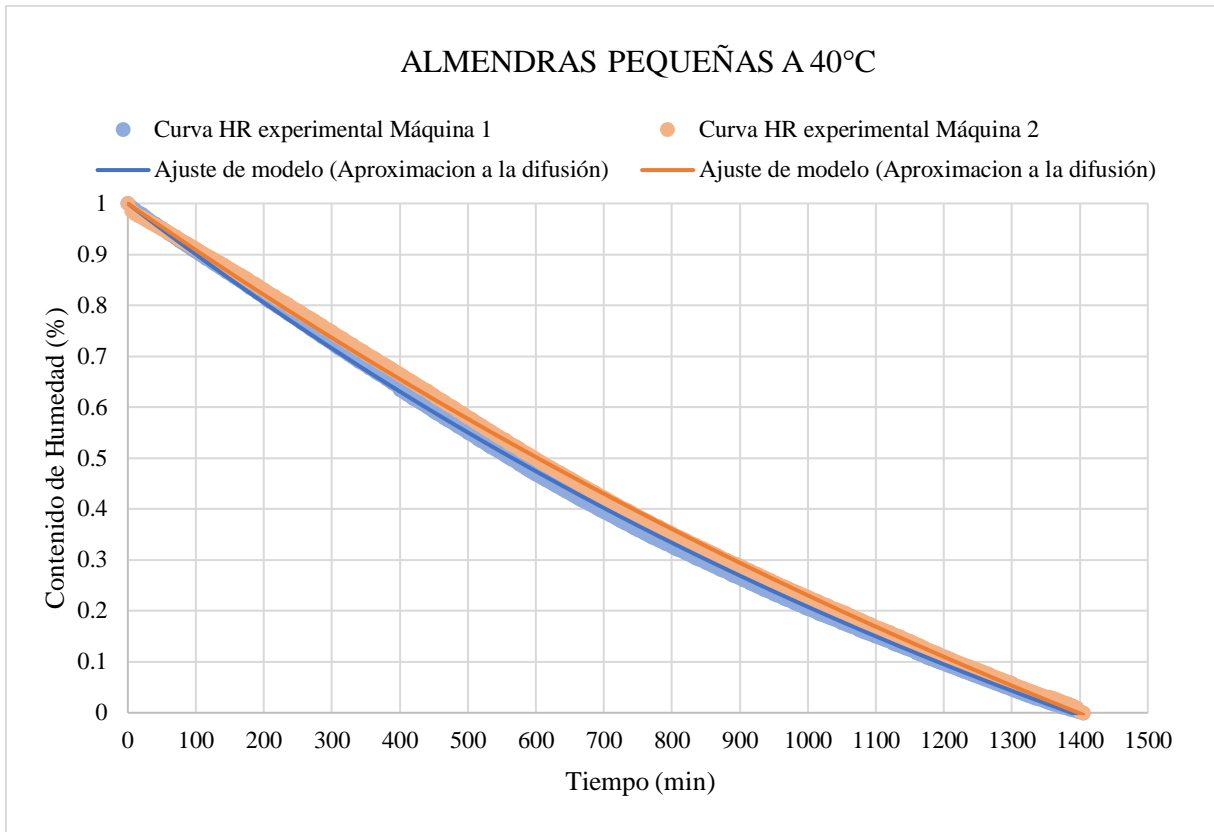


Figura 7.1 Curva de secado de almendra pequeña a 40°C, modelo “Aproximación a la difusión”.

En la figura 7.2 se muestra que Al minuto 1060 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño grandes, utilizando una temperatura de 40 °C, con una masa final de 23,134 g. En la Anexo B.9 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 40°C de un diámetro de 20 a 21,999 considerado para el grupo de investigación grandes.

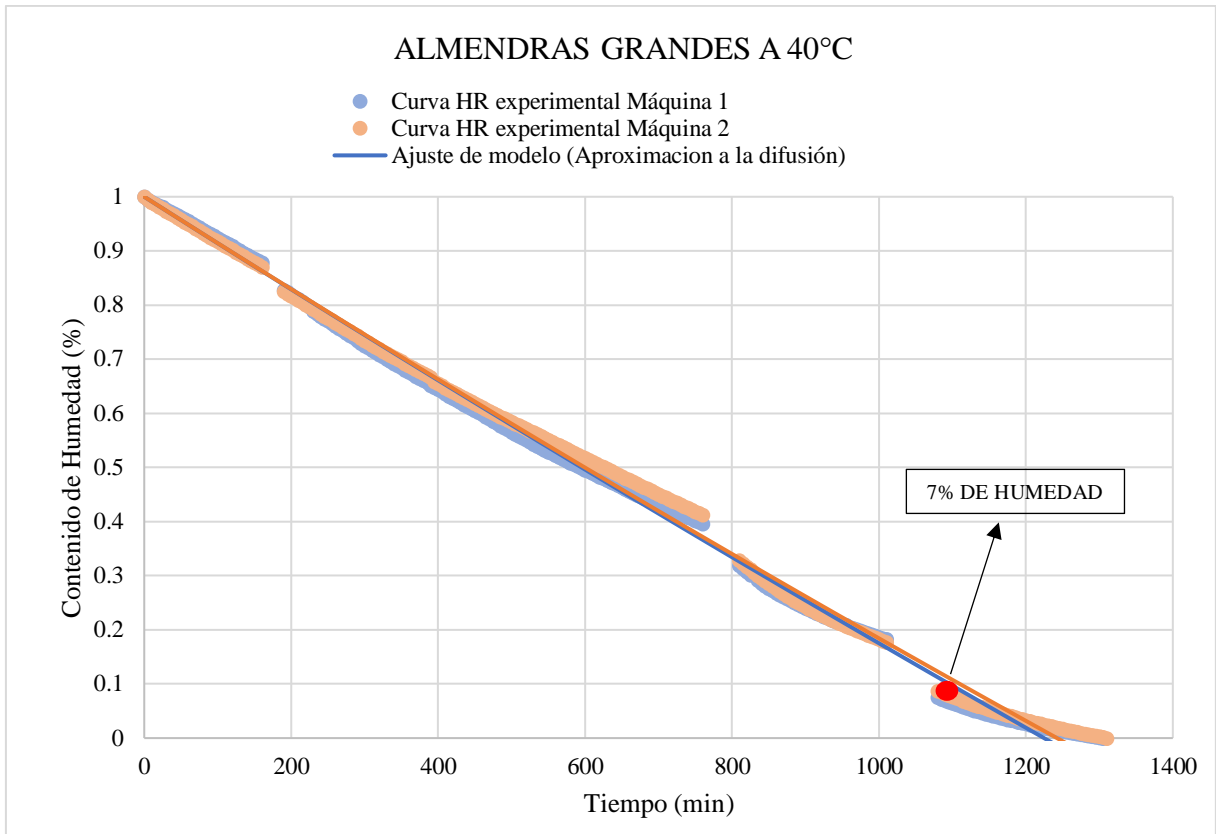


Figura 7.2 Curva de secado de almendra grande a 40°C, modelo “Aproximación a la difusión”.

En la figura 7.3 se muestra que al minuto 865 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7 % en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño pequeñas, utilizando una temperatura de 50 °C, con una masa final de 21,126 g. En la tabla anexo B.3 e visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 50°C de un diámetro de 16 a 17,999 considerado para el grupo de investigación pequeñas.

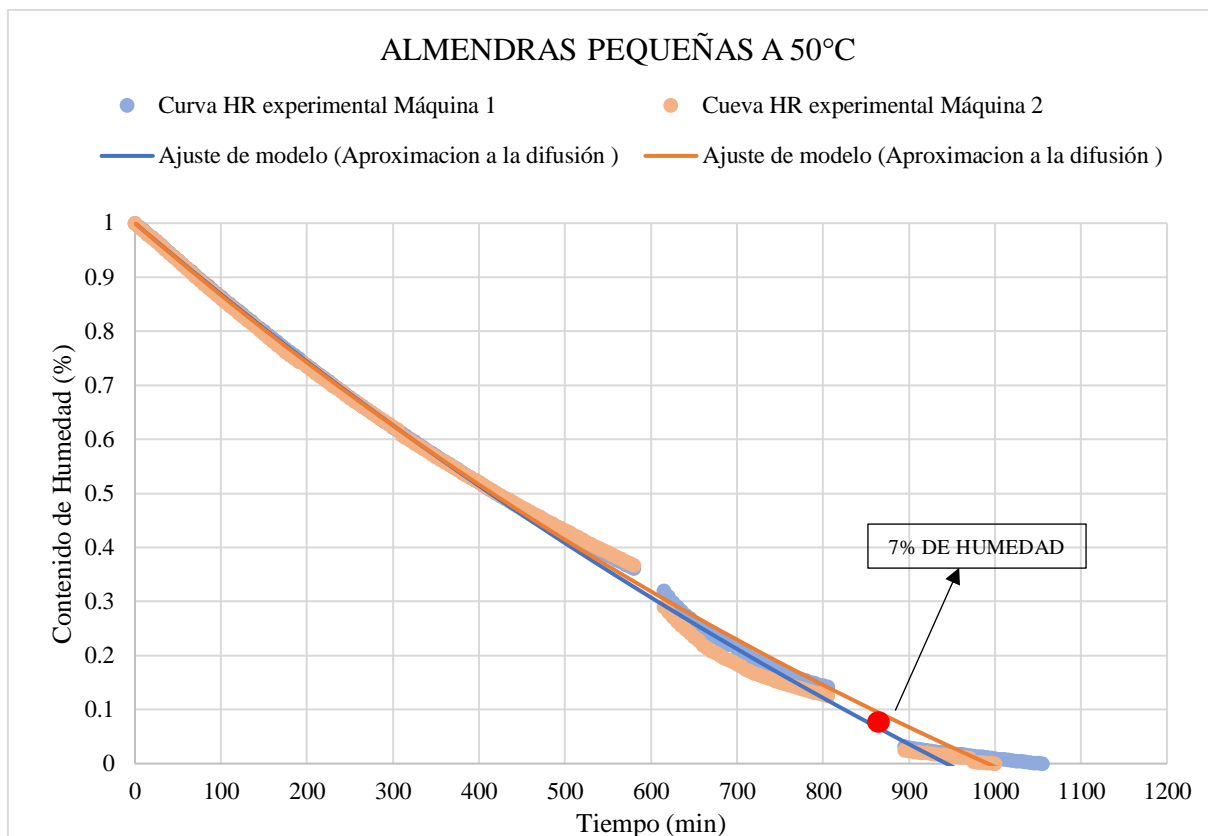


Figura 7.3 Curva de secado de almendra pequeña a 50°C, “Aproximación a la difusión”.

En la figura 7.4 se muestra que al minuto 1030 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño medianas, utilizando una temperatura de 50 °C, con una masa final de 19,555 g. En la Anexo B.7 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 50°C de un diámetro de 18 a 19,999 considerado para el grupo de investigación medianas.

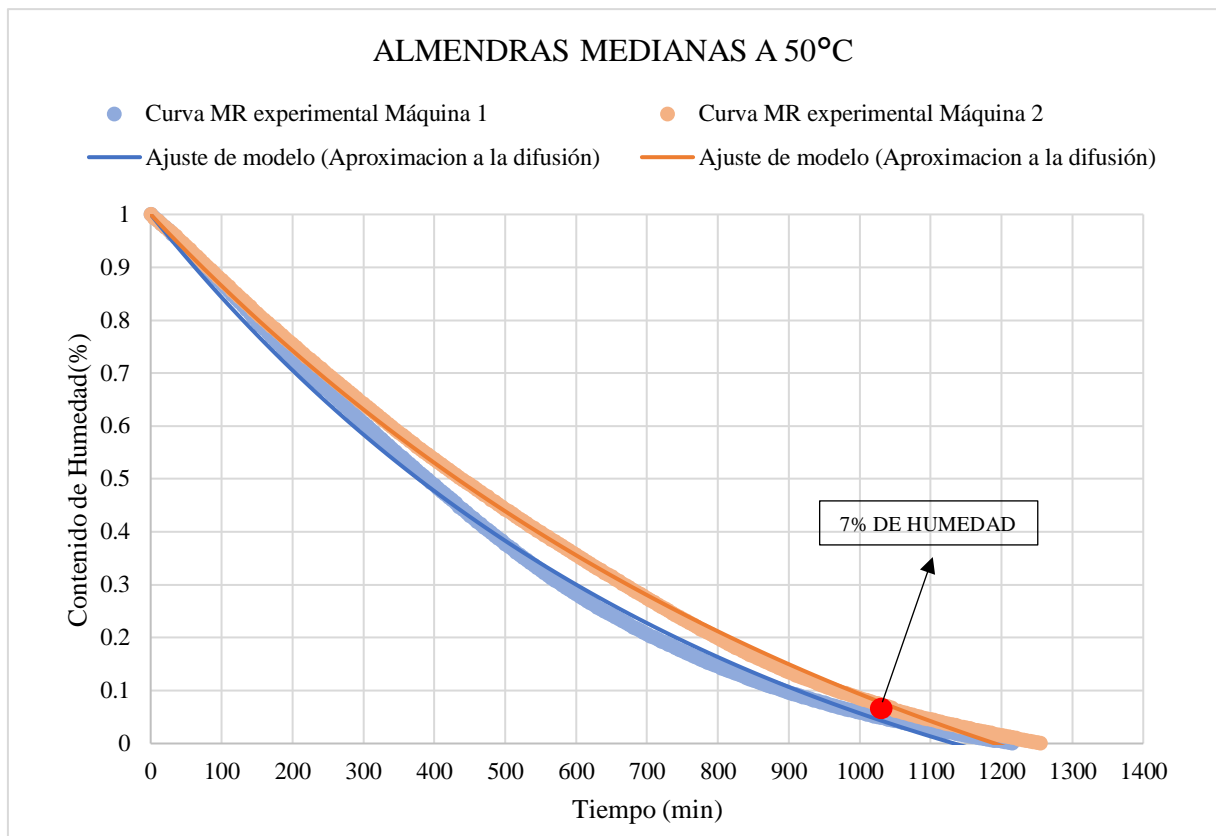


Figura 7.4 Curva de secado de almendra mediana a 50°C, “Aproximación a la difusión”.

En la figura 7.5 se muestra que al minuto 995 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño pequeñas, utilizando una temperatura de 55 °C, con una masa final de 21,181 g. En la anexo B.4 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 55°C de un diámetro de 16 a 17,999 considerado para el grupo de investigaciones pequeñas.

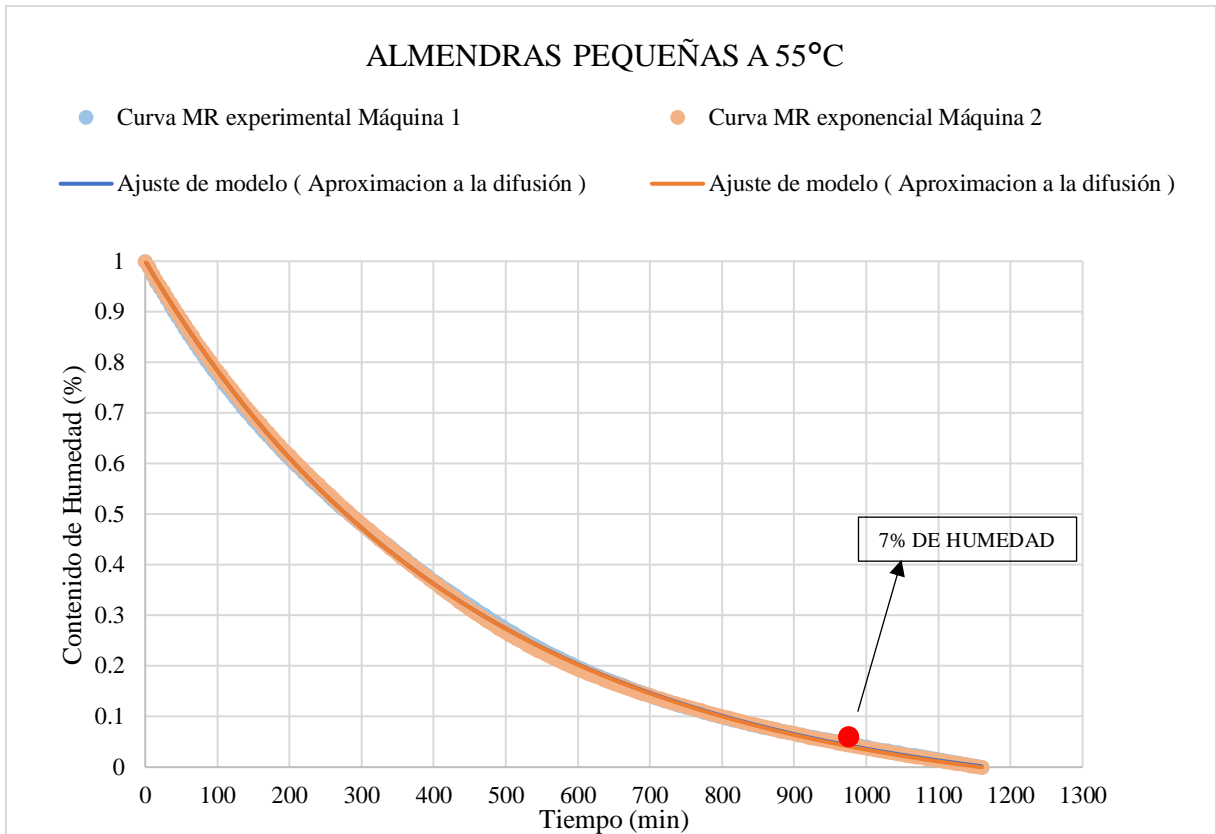


Figura 7.5 Curva de secado de almendra pequeña a 55°C, modelo “Aproximación a la difusión”.

En la figura 7.6 se muestra que al minuto 940 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño medianas, utilizando una temperatura de 55 °C, con una masa final de 20,487 g. En la Anexo B.8 se visualizan los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 55°C de un diámetro de 18 a 19,999 considerado para el equipo investigador medianas.

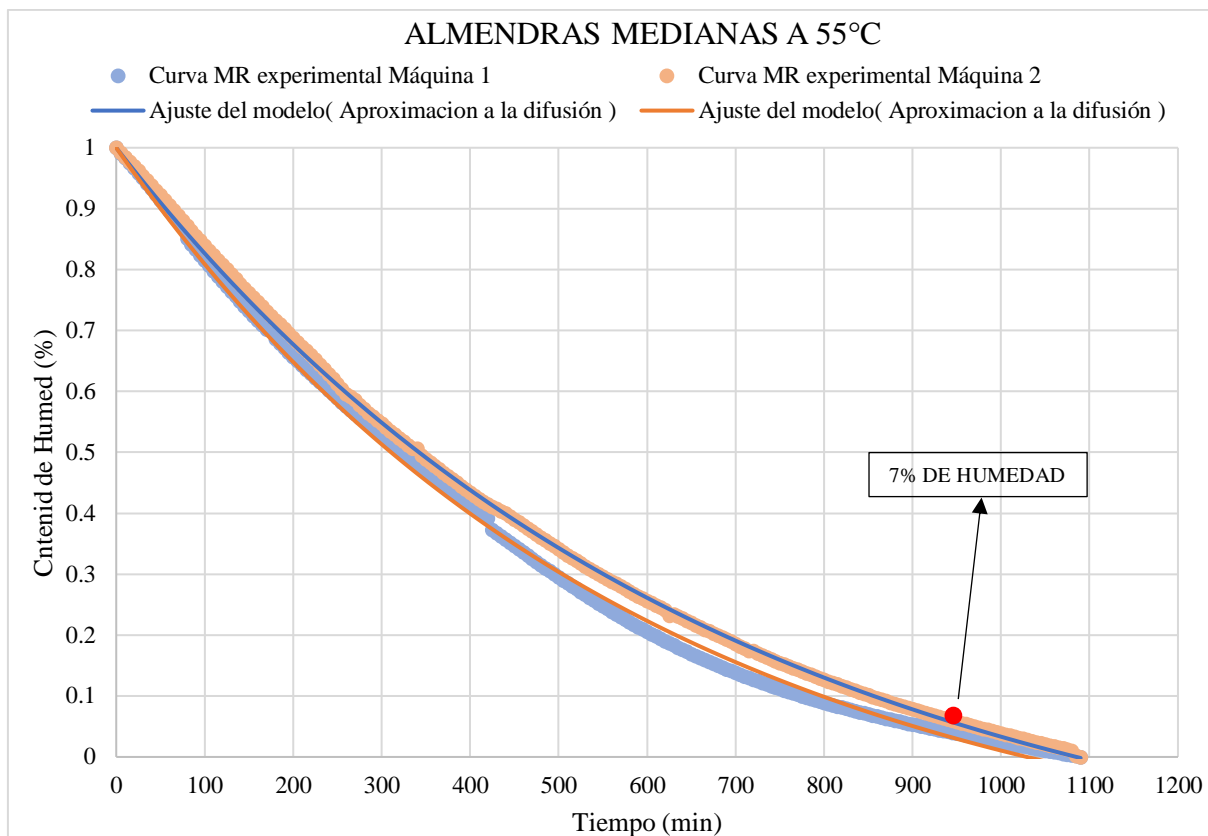


Figura 7.6 Curva de secado de almendra mediana a 55°C, modelo “Aproximación a la difusión”.

En la figura 7.7 se muestra que al minuto 965 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño grandes, utilizando una temperatura de 55 °C, con una masa final de 19,113 g. En la tabla Anexo B.12 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 55°C de un diámetro de 20 a 21,999 considerado para el grupo de investigación grandes.

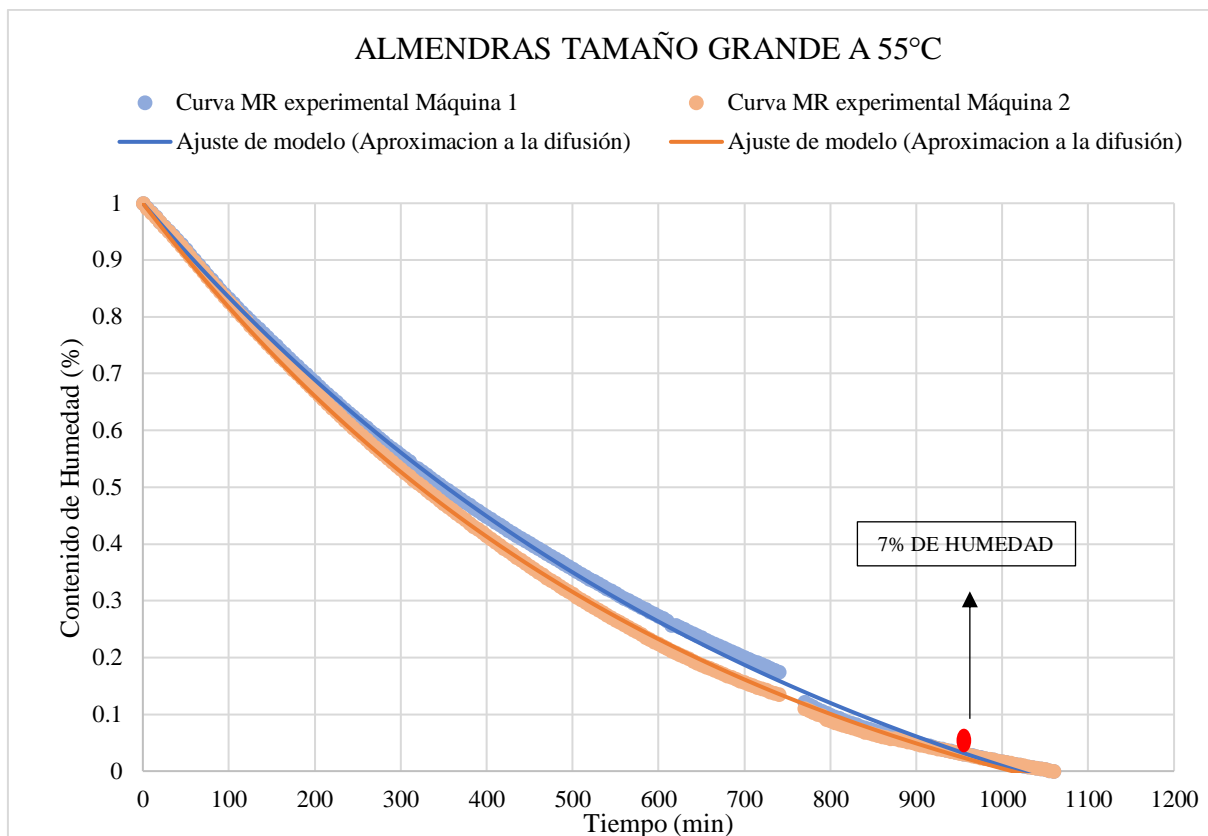


Figura 7.7 Curva de secado de almendra grande a 55°C, modelo “Aproximación a la difusión”.

A lo largo del proceso, desde la recolección de las mazorcas hasta la obtención de la almendra seca, se realizaron cálculos detallados y se analizó la curva convergente, lo que permitió identificar que uno de los modelos matemáticos más precisos es el de “Aproximación de Difusión”.

A una temperatura de 40 °C, y considerando las tres selecciones de almendras (pequeñas, medianas y grandes), se obtuvo un margen de error mínimo en las almendras de tamaño pequeño, con valores de 0,999625338 en la máquina 1 y 0,999504038 en la máquina 2. Para las almendras de tamaño grande, el margen de error mínimo fue de 0,997142482 en la máquina 1 y 0,99657771 en la máquina 2, como se muestra en la tabla 22.

Posteriormente, al incrementar la temperatura a 50 °C, los márgenes de error mínimos obtenidos fueron:

- Pequeñas: máquina 1 (0,997814536), máquina 2 (0,996804618)
- Medianas: máquina 1 (0,997218998), máquina 2 (0,999011281)

Finalmente, tras evaluar diez modelos matemáticos, se determinó que el modelo de “Aproximación de Difusión” es el más preciso a una temperatura de 55 °C, ya que presentó los menores márgenes de error en los 3 los tamaños de almendras:

- Pequeñas: máquina 1 (0,999709536), máquina 2 (0,999810706)
- Medianas: máquina 1 (0,998613234), máquina 2 (0,9996726)
- Grandes: máquina 1 (0,998909409), máquina 2 (0,99955287)

Estos resultados, reflejados en la tabla 7.1, confirman que la temperatura óptima para minimizar el error en el secado de las almendras de cacao CCN-51 es de 55 °C.

Tabla 7.1 Resumen del modelo matemático “Aproximación a la difusión”

| EL MEJOR MODELO MATEMATICO PARA LA CINETICA DE SECADO DEL CACAO CCN-51 "APROXIMACION DE DIFUSION" | | | | | | | |
|---|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE | PEQUEÑAS | | MEDIANAS | | GRANDES | | |
| | DATOS | MÁQUINA 1 | MÁQUINA 2 | MÁQUINA 1 | MÁQUINA 2 | MÁQUINA 1 | MÁQUINA 2 |
| 40°C | C HUMEDAD | | | | | | |
| | INICIAL | 46,6662891 | 48,25457928 | | | 43,54261891 | 44,70476719 |
| | C HUMEDAD FINAL | 8 | 9 | | | 4 | 6 |
| | K | 9,6678E-05 | 8,41094E-05 | | | 0,000192306 | 0,000120119 |
| | A | 7,951156912 | 9,005871337 | | | 4,703777424 | 7,181657642 |
| | B | 2,616595026 | 2,049687614 | | | 0,002169408 | 0,000837918 |
| | R2 | 0,999625338 | 0,999504038 | | | 0,997142482 | 0,99657771 |
| 45°C | C HUMEDAD | | | | | | |
| | INICIAL | 48,72070796 | 49,31100797 | 53,34714896 | 52,06630334 | | |
| | C HUMEDAD FINAL | 4 | 6 | 5 | 6 | | |
| | K | 0,000125886 | 0,000566573 | 0,000103457 | 0,000117501 | | |
| | A | 8,520099063 | 2,396792255 | 8,993549364 | 7,631994688 | | |
| | B | 2,421153273 | 0,000878616 | 6,893798751 | 4,286220275 | | |
| | R2 | 0,997814536 | 0,996804618 | 0,997218998 | 0,999011281 | | |
| 50°C | C HUMEDAD | | | | | | |
| | INICIAL | 49,57798769 | 51,33260266 | 52,68823703 | 53,4622407 | 54,5103263 | 53,34895646 |
| | C HUMEDAD FINAL | 6 | 8 | 6 | 7 | 7 | 8 |
| | K | 0,001745267 | 0,000462696 | 0,000115944 | 0,000201227 | 0,001288521 | 0,000155316 |
| | A | 1,14541693 | 2,357933603 | 8,817051308 | 5,051498064 | 1,36750464 | 6,832433395 |
| | B | 0,226378692 | 2,741307156 | 8,788214432 | 4,089145255 | 0,001067871 | 5,697059514 |
| | R2 | 0,999709536 | 0,999810706 | 0,998613234 | 0,9996726 | 0,998909409 | 0,99955287 |

7.1.2 Midilli

En la figura 7.8 se muestra que al minuto 1980 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño medianas, utilizando una temperatura de 40 °C, con una masa final de 20,341 g. En la anexo B.5 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 40°C de un diámetro de 18 a 19,999 considerado para el grupo de investigación medianas.

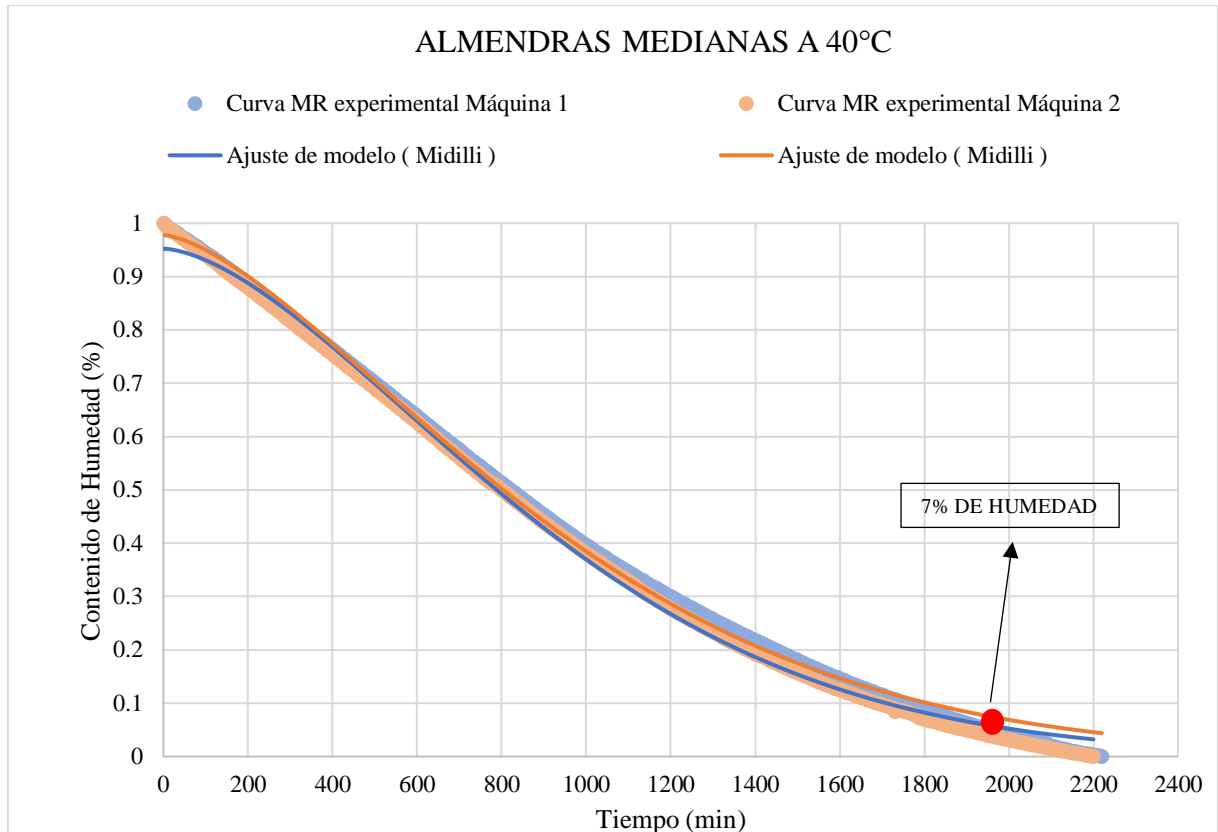


Figura 7.8 Curva de secado de almendra mediana a 40°C, modelo “Midilli”.

En la figura 7.9 se muestra que al minuto 895 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño pequeñas, utilizando una temperatura de 45 °C, con una masa final de 21,635 g. En la tabla Anexo B.2 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 45°C de un diámetro de 16 a 17,999 considerado para el grupo de investigación pequeña

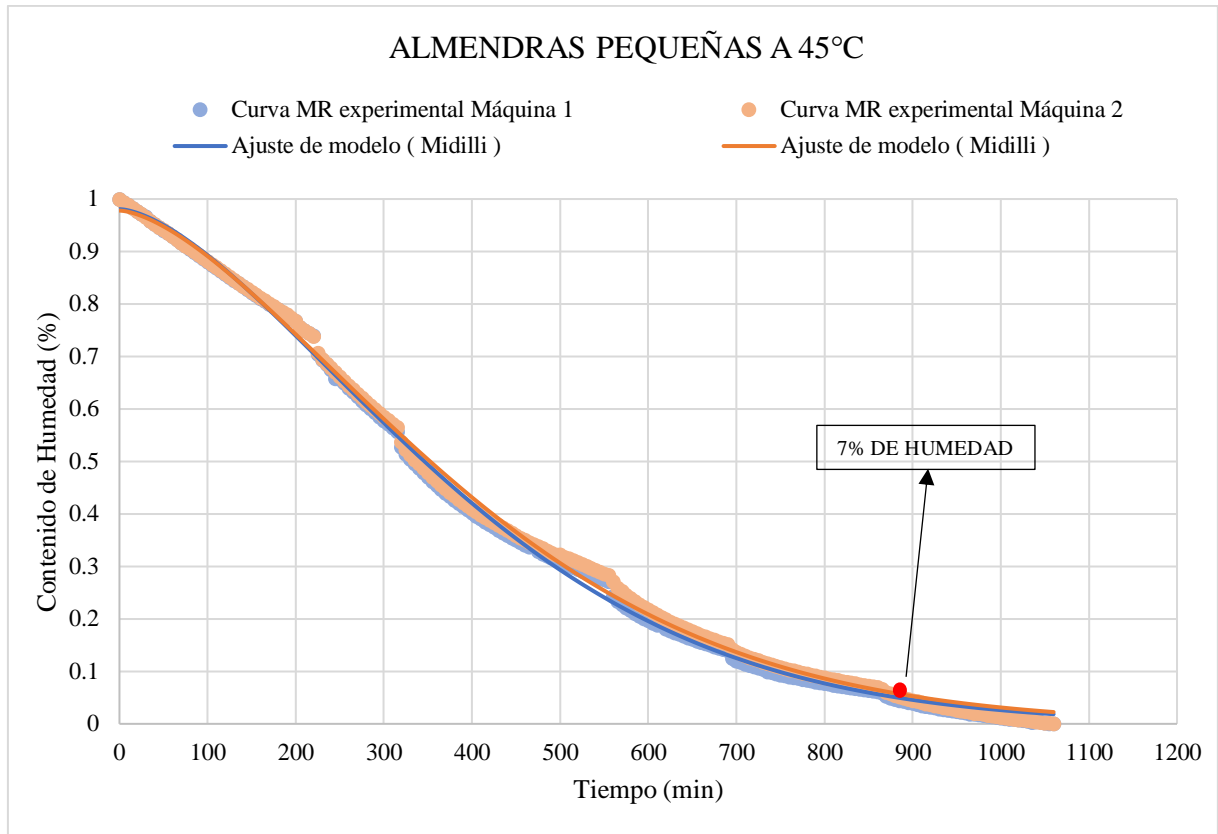


Figura 7.9 Curva de secado de almendra pequeña a 45°C, modelo “Midilli”.

En la figura 7.10 se muestra que al minuto 1320 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño medianas, utilizando una temperatura de 45 °C, con una masa final de 21,055 g. En la Anexo B.6 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 45°C de un diámetro de 18 a 19,999 considerado para el grupo de investigación medianas.

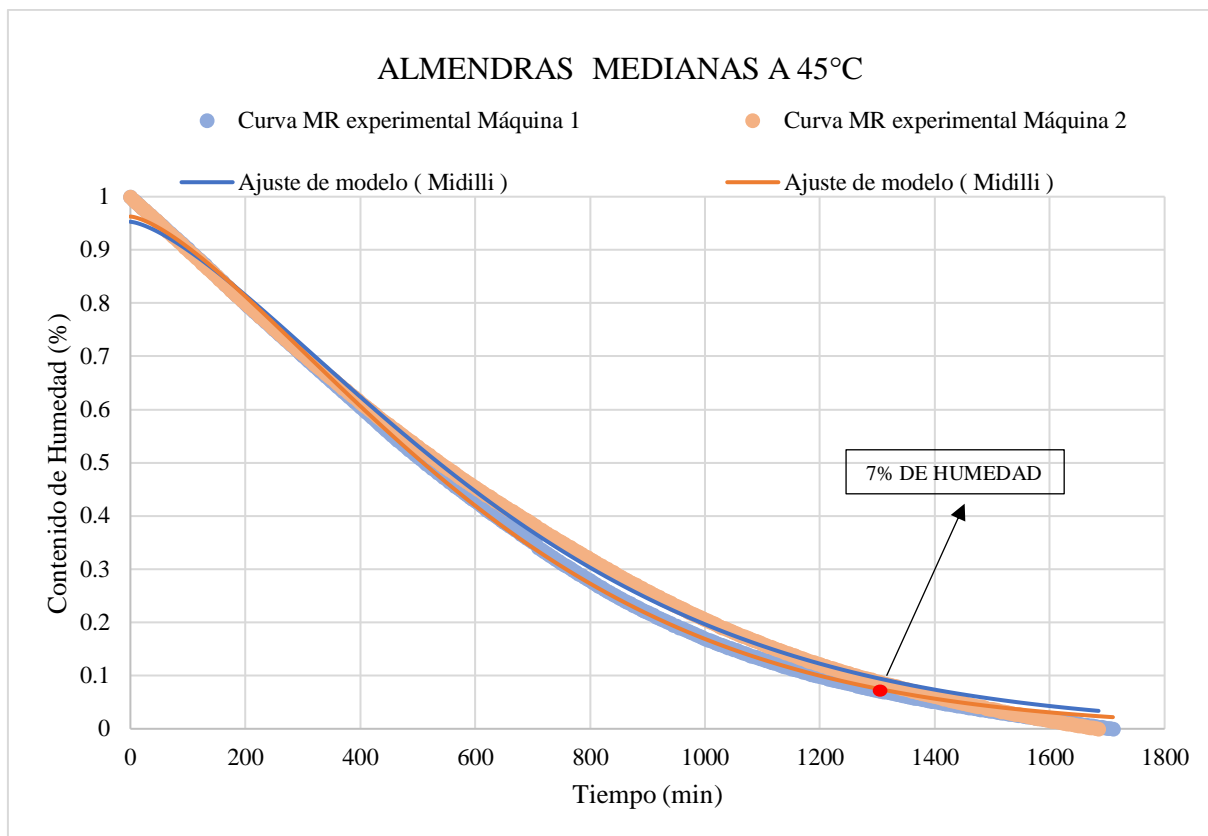


Figura 7.10 Curva de secado de almendra medianas a 45°C, modelo “Midilli”.

En la figura 7.11 se muestra que al minuto 865 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 7% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño grandes, utilizando una temperatura de 45 °C, con una masa final de 21,841 g. En la anexo B.10 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 45°C de un diámetro de 20 a 21,999 considerado para el grupo de investigación grandes.

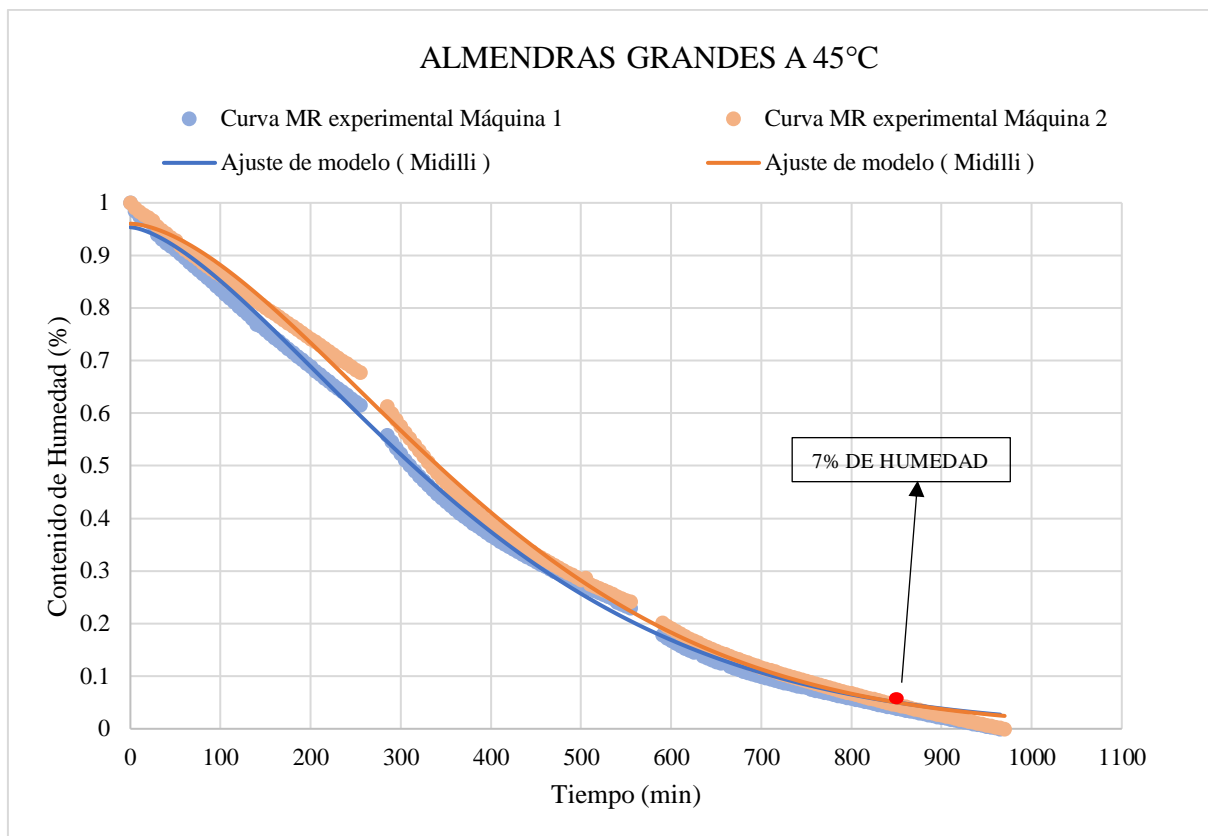


Figura 7.11 Curva de secado de almendra grande a 45°C, modelo “Midilli”.

En la figura 7.12 se muestra que al minuto 970 de secado, se alcanzó un contenido de humedad del 8% en las almendras de cacao CCN-51 de tamaño grandes, utilizando una temperatura de 50 °C, con una masa final de 19,952 g. En la tabla Anexo B.11 se visualiza los 10 modelos matemáticos con sus respectivas variables y su error con un régimen de temperatura de 50°C de un diámetro de 20 a 21,999 considerado para el grupo de investigación grandes.

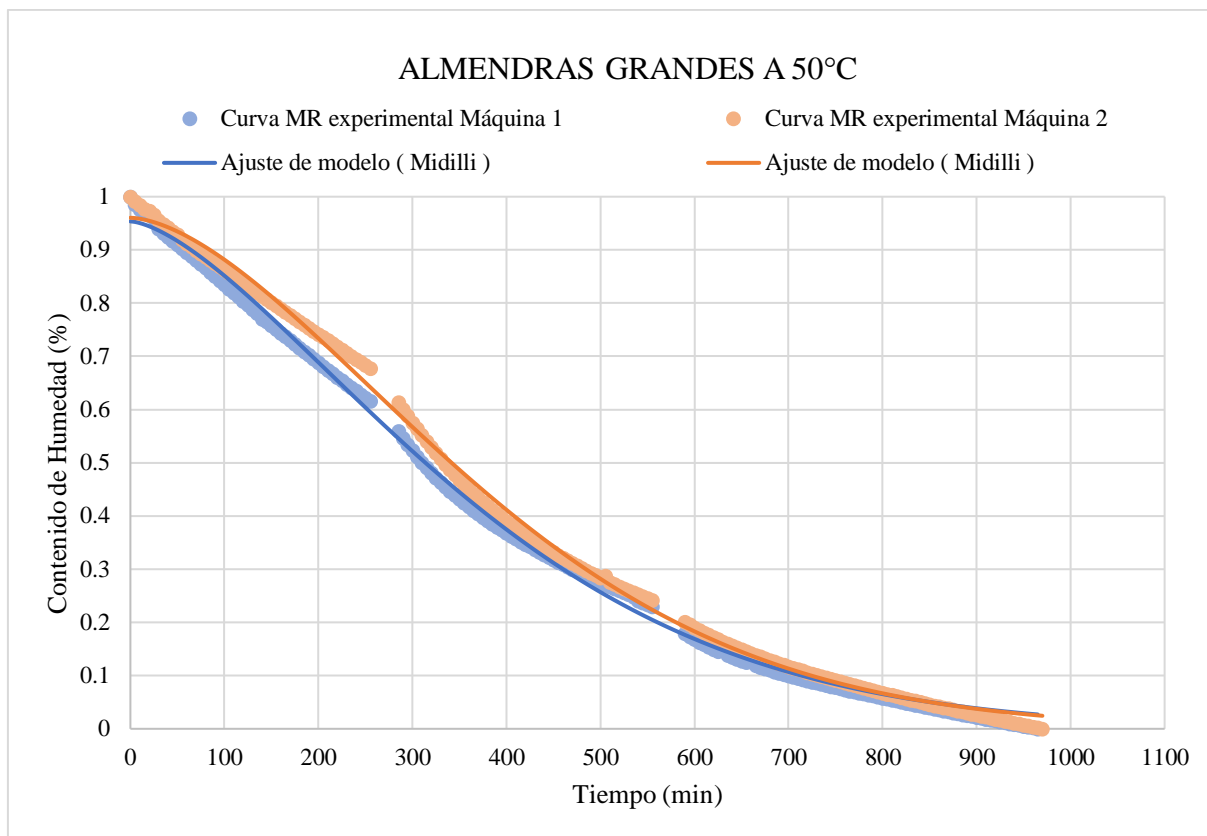


Figura 7.12 Curva de secado de almendra grande a 50°C, modelo “Midilli”.

De los diez modelos matemáticos evaluados, el modelo “Midilli” mostró un margen de error en el tamaño mediano a una temperatura de 40 °C, con valores de 0,997190225 en la máquina 1 y 0,998007647 en la máquina 2.

Al aumentar la temperatura a 45 °C, se determinó que el modelo “Midilli” es el más preciso, ya que presentó los menores márgenes de error en los tres tamaños de almendras:

- Pequeñas: máquina 1 (0,998535377), máquina 2 (0,998300529)
- Medianas: máquina 1 (0,999147026), máquina 2 (0,997490576)
- Grandes: máquina 1 (0,998922321), máquina 2 (0,997742107)

Finalmente, a una temperatura de 50 °C, se obtuvo un margen de error mínimo en el tamaño grande, con valores de 0,999042048 en la máquina 1 y 0,997994304 en la máquina 2, como se muestra en la Tabla 7.2.

Estos resultados sugieren que el modelo “Midilli”, a una temperatura de 45 °C se consolidó como el modelo más preciso, presentando los menores márgenes de error en los tres tamaños evaluados (pequeñas, medianas y grandes).

Tabla 7.2 Resumen del modelo matemático “Midilli”

EL MEJOR MODELO MATEMATICO PARA LA CINETICA DE SECADO DEL CACAO CCN-51 "MIDILLI"

| TEMPERATUR A AMBIENTE | PEQUEÑAS | | MEDIANAS | | GRANDES | | |
|--------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | DATOS | MÁQUINA 1 | MÁQUINA 2 | MÁQUINA 1 | MÁQUINA 2 | MÁQUINA 1 | MÁQUINA 2 |
| 40°C | C HUMEDAD INICIAL | | | 52,25707227 | 51,39540241 | | |
| | C HUMEDAD FINAL | | | 5 | 3 | | |
| | K | | | 2,77067E-05 | 1,33063E-05 | | |
| | N | | | 1,509016814 | 1,617290483 | | |
| | A | | | 0,977518073 | 0,952122678 | | |
| | B | | | 0 | 0 | | |
| | R2 | | | 0,997190225 | 0,998007647 | | |
| 45°C | C HUMEDAD INICIAL | 48,49070462 | 49,70740937 | 48,62284581 | 48,21820297 | 48,71211591 | 47,72292978 |
| | C HUMEDAD FINAL | 6 | 7 | 4 | 6 | 6 | 7 |
| | K | 6,32248E-05 | 6,77969E-05 | 7,88732E-05 | 7,70222E-05 | 0,000115477 | 8,00822E-05 |
| | N | 1,586077466 | 1,568601038 | 1,447948162 | 1,437267554 | 1,508108748 | 1,549170148 |
| | A | 0,980695237 | 0,97800406 | 0,962789289 | 0,952865203 | 0,982797507 | 0,981250972 |
| | B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R2 | 0,998535377 | 0,998300529 | 0,999147026 | 0,997490576 | 0,998922321 | 0,997742107 |
| 50°C | C HUMEDAD INICIAL | | | | | 54,5103263 | 53,34895646 |
| | C HUMEDAD FINAL | | | | | 7 | 8 |
| | K | | | | | 0,000139998 | 0,000300375 |
| | N | | | | | 1,434375403 | 1,332623904 |
| | A | | | | | 0,93857888 | 0,964909744 |
| | B | | | | | 0 | 0 |
| | R2 | | | | | 0,991684718 | 0,996507758 |
| 55°C | | | | | | | |

7.2 GRÁFICAS COMPARATIVAS

7.2.1 Almendras pequeñas

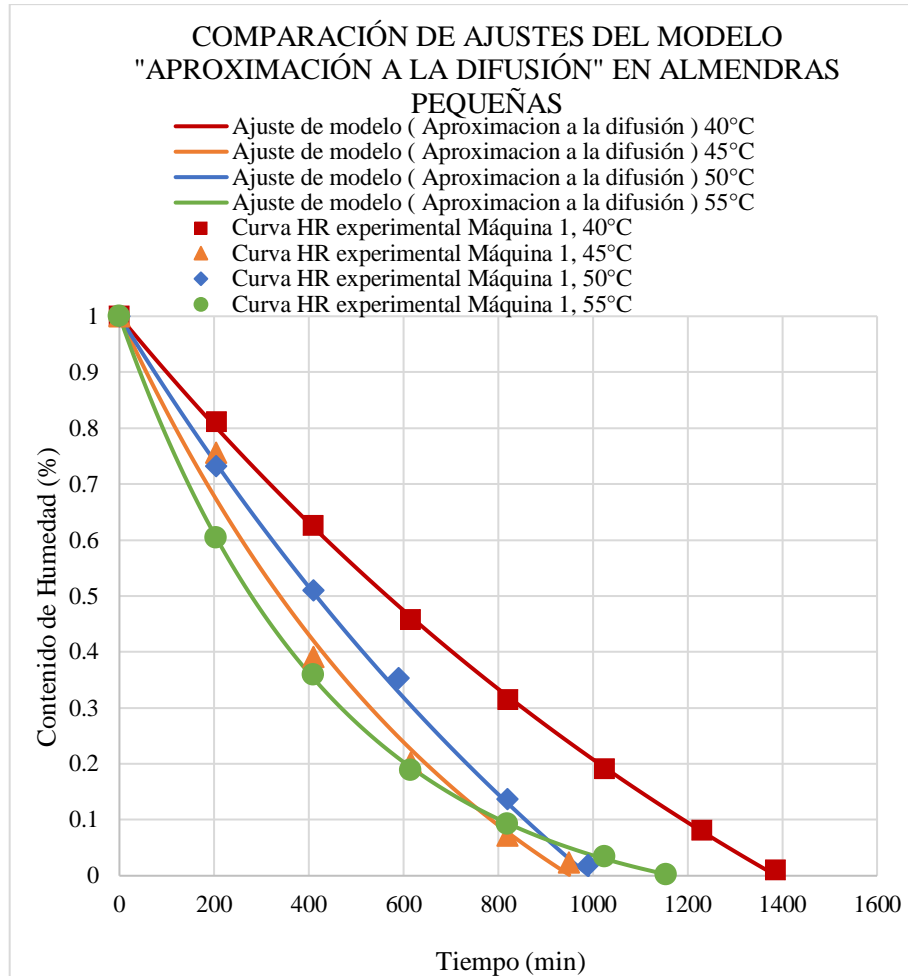


Figura 7.13 Gráfica comparativa "Aproximación a la difusión" tamaño pequeño.

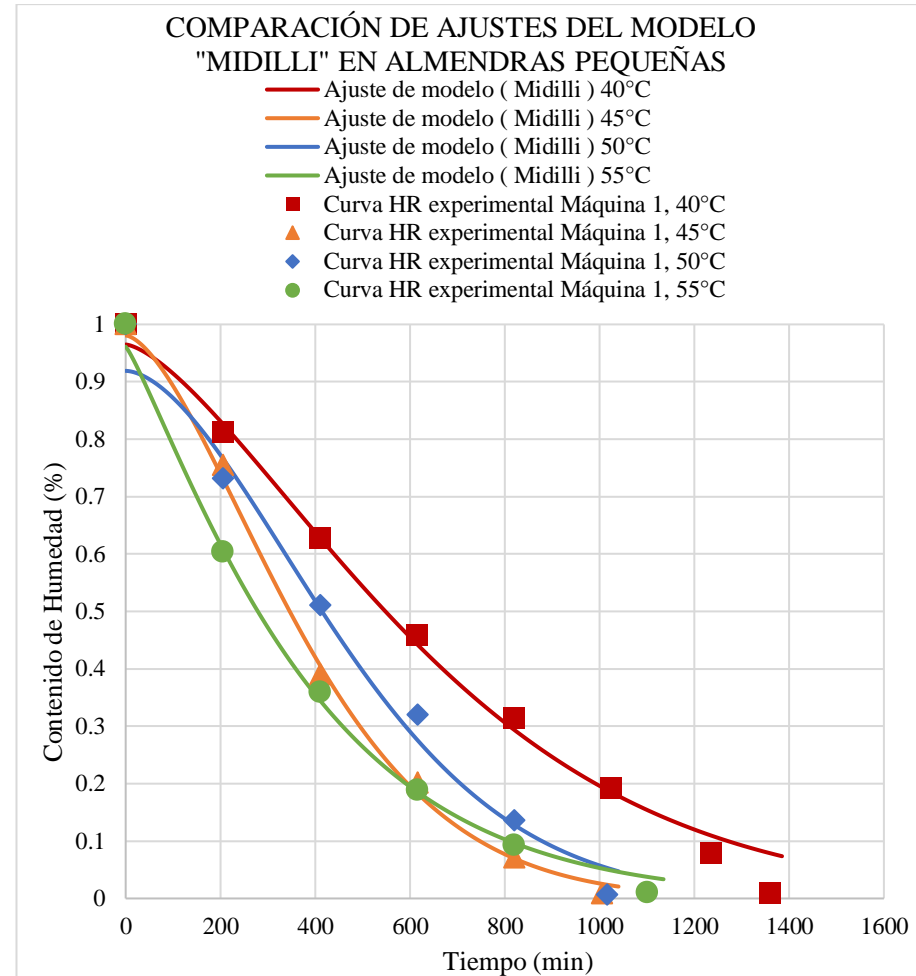


Figura 7.14 Gráfica comparativa "Midilli" tamaño pequeño.

En gráficas comparativas 7.13 y 7.14 se ilustra las curvas de contenido de humedad bajo diferentes temperaturas, que varían entre 40°C y 55°C. Para el análisis experimental, se decidió graficar los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas con puntos, triángulos, cuadrados y rombos lo que permite una visualización detallada de cada uno de los valores medidos en las distintas temperaturas. Por otro lado, la curva de los modelos matemáticos “Aproximación de difusión” (Figura 7.13) y “Medilli” (Figura 7.14), se representa mediante líneas continuas, lo que facilita la identificación de tendencias generales y la comparación con los datos experimentales, con diámetros comprendidos entre 16 y 17,99 mm, categorizándolas como pequeñas.

En la Tabla 7.3 se muestra los " R^2 " de los modelos matemáticos “Aproximación a la difusión” y “Midilli”; se colorea los modelos con mejor ajuste para cada nivel de temperatura en almendras pequeñas.

Tabla 7.3 Tabla de coeficiente de correlación " R^2 " en almendras pequeñas

| MODELO | TEMPERATURAS | | | |
|----------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | 40°C | 45°C | 50°C | 55°C |
| APROXIMACIÓN A LA DIFUSIÓN | 0,999625338 | 0,988067236 | 0,9978143536 | 0,999709536 |
| MIDILLI | 0,994970081 | 0,998535377 | 0,988635327 | 0,998075322 |

7.2.2 Almendras medianas

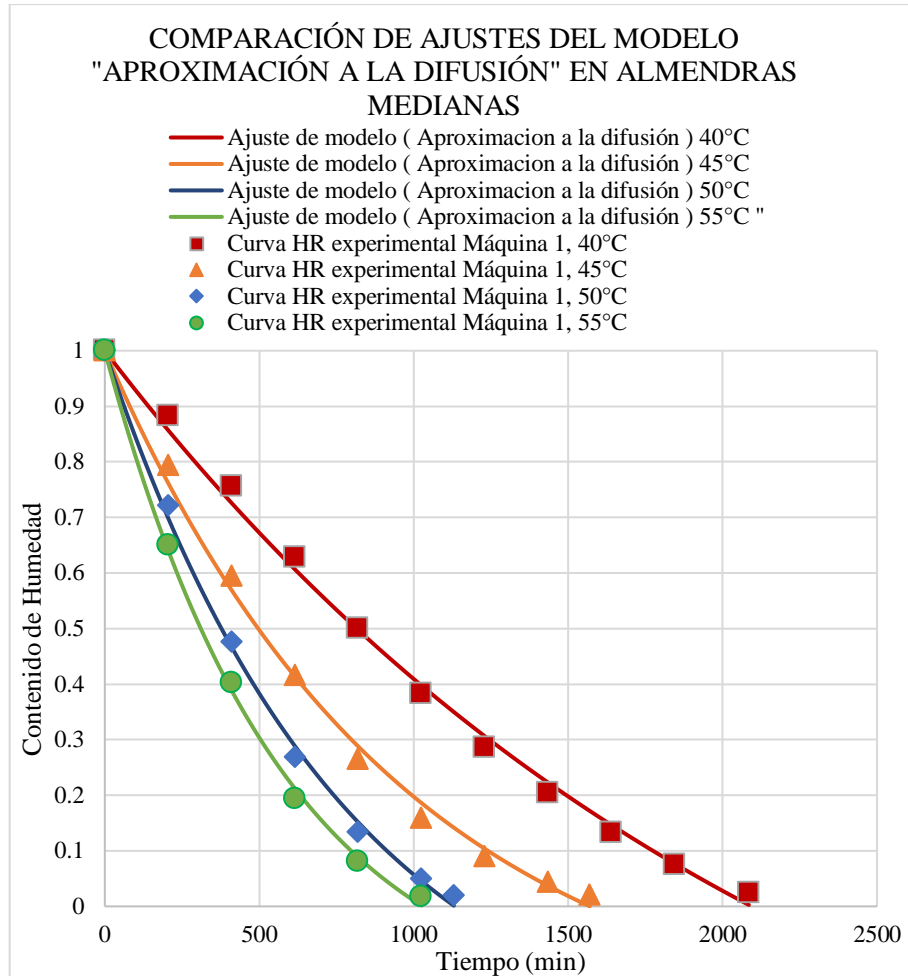


Figura 7.15 Gráfica comparativa “Aproximación a la Difusión” tamaño medianas.

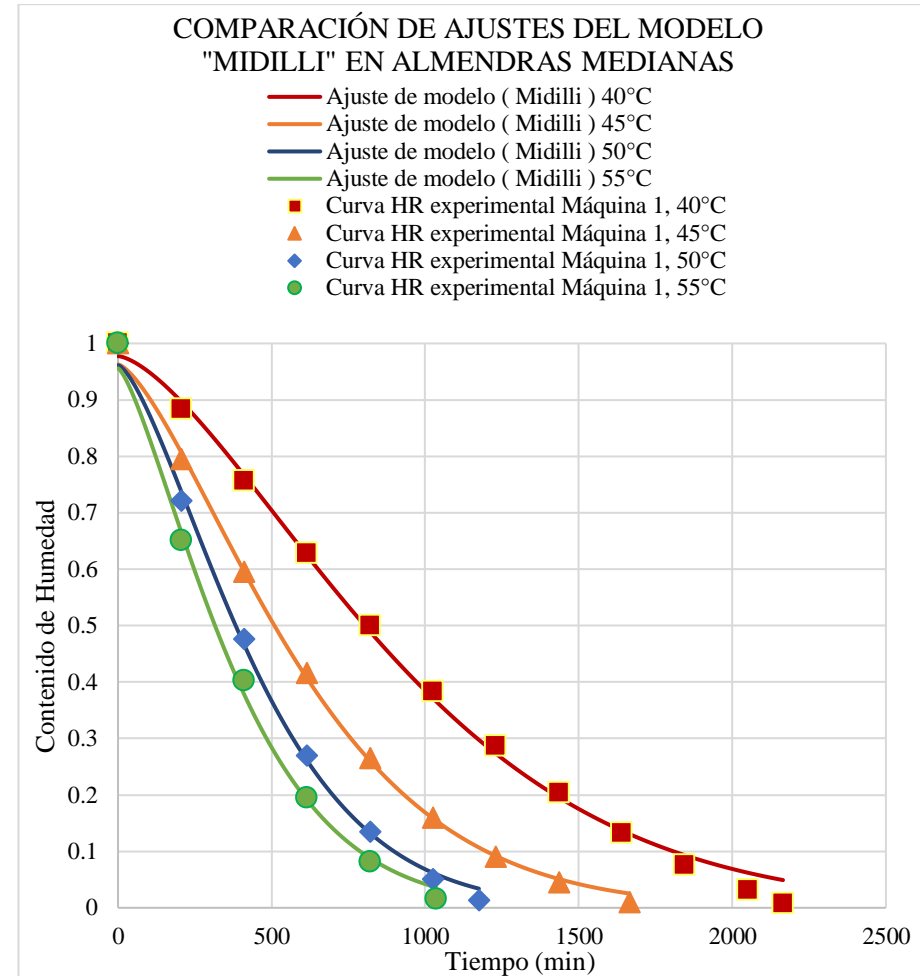


Figura 7.16 Gráfica comparativa “Midilli” tamaño medianas.

En este estudio, se presenta una gráfica comparativa que ilustra las curvas de contenido de humedad bajo diferentes temperaturas, específicamente en un rango que varía entre 40°C y 55°C. Para el análisis experimental, se optó por graficar los datos obtenidos a partir de mediciones realizadas, representándolos con puntos, triángulos, cuadrados y rombos. Esta metodología permite una visualización detallada y clara de cada uno de los valores medidos en las distintas temperaturas, siendo crucial para la interpretación de los resultados.

Además, se incluyen las curvas de los modelos matemáticos “Aproximación de difusión” (Figura 7.15) y “Medilli” (Figura 7.16), que se representan mediante líneas continuas. Esta elección de formato facilita no solo la identificación de tendencias generales, sino también la comparación directa con los datos experimentales obtenidos, con diámetros comprendidos entre 18 y 19,99 mm, clasificándolas así como medianas. Este enfoque permite una comprensión más profunda de las dinámicas involucradas en el contenido de humedad en función de la temperatura y las características de las máquinas utilizadas.

En la Tabla 7.4 se muestra los " R^2 " de los modelos matemáticos “Aproximación a la difusión” y “Midilli”; se colorea los modelos con mejor ajuste para cada nivel de temperatura en almendras medianas.

Tabla 7.4 Tabla de coeficiente de correlación " R^2 " en almendras medianas.

| MODELO | TEMPERATURAS | | | |
|----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | 40°C | 45°C | 50°C | 55°C |
| APROXIMACIÓN A LA DIFUSIÓN | 0,996493866 | 0,995681932 | 0,997218998 | 0,998613234 |
| MIDILLI | 0,997190225 | 0,999147026 | 0,988636327 | 0,997452258 |

7.2.3 Almendras grandes

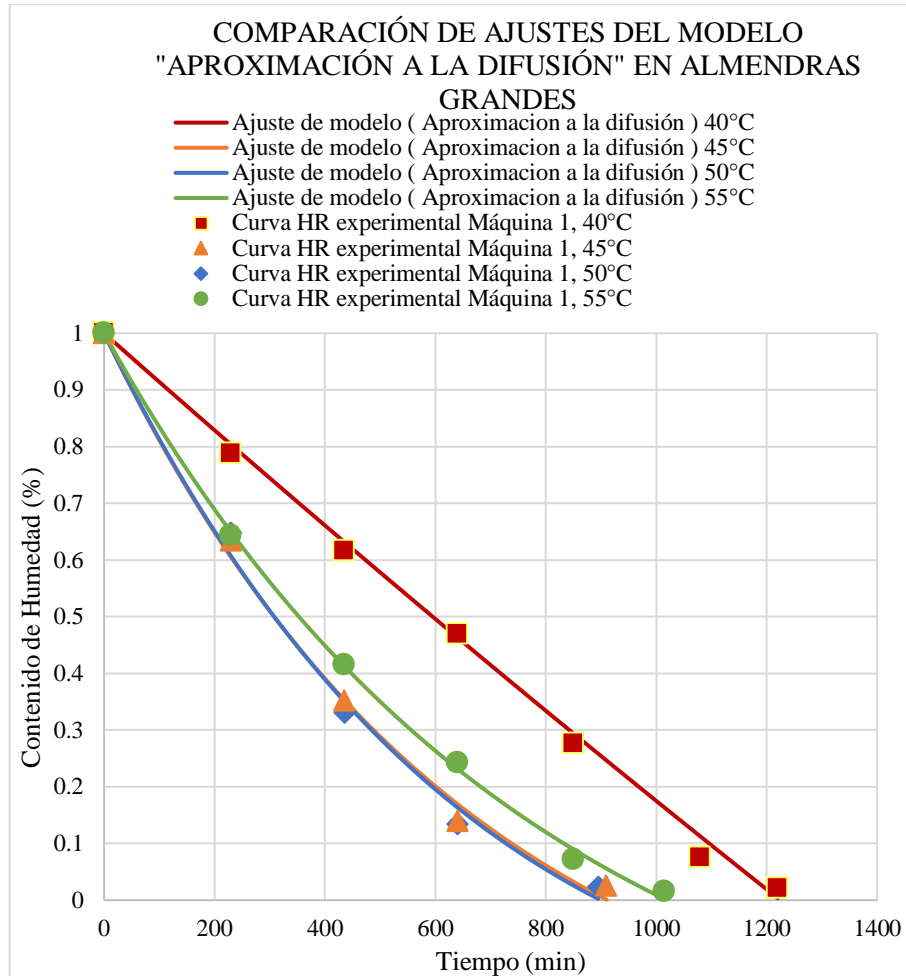


Figura 7.17 Gráfica comparativa Aproximación a la difusión tamaño grandes.

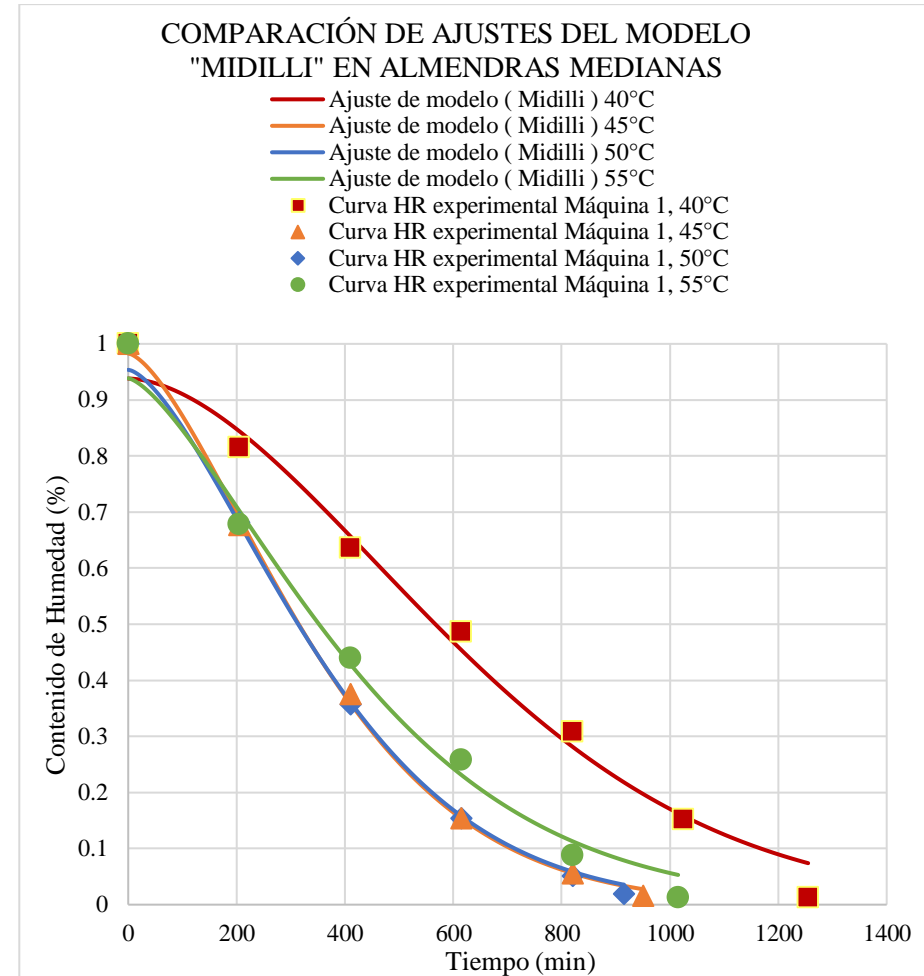


Figura 7.18 Gráfica comparativa Midilli tamaño grandes.

En este estudio, se presenta una gráfica comparativa que muestra las curvas de contenido de humedad bajo diferentes temperaturas, específicamente entre 40°C y 55°C. Los datos obtenidos se grafican con puntos, triángulos, cuadrados y rombos, lo que permite una visualización clara de los valores medidos. Se incluyen también las curvas de los modelos “Aproximación de difusión” (Figura 7.17) y “Medilli” (Figura 7.18), representadas por líneas continuas, facilitando la comparación con los datos experimentales, con diámetros de 20 a 21,99 mm (grande), lo que permite analizar cómo estas variables influyen en el contenido de humedad.

En la Tabla 7.5 se muestra los " R^2 " de los modelos matemáticos “Aproximación a la difusión” y “Midilli”; se colorea los modelos con mejor ajuste para cada nivel de temperatura en almendras grandes.

Tabla 7.5 Tabla de coeficiente de correlación " R^2 " en almendras grandes.

| MODELO | TEMPERATURA | | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 40°C | 45°C | 50°C | 55°C |
| APROXIMACIÓN A LA DIFUSIÓN | 0,997142482 | 0,990161603 | 0,997735881 | 0,998909409 |
| MIDILLI | 0,938114988 | 0,998922321 | 0,999042048 | 0,991684718 |

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- El presente estudio permitió establecer la relación entre la temperatura y el tiempo de secado para la variedad de cacao CCN-51, demostrando que el incremento de la temperatura acelera la eliminación de humedad. El ajuste de modelos matemáticos reveló que el modelo de “APROXIMACION DE DIFUSION y MEDILLI” describen mejor la cinética de secado del cacao en el rango de temperatura evaluado.
- El análisis detallado del proceso de secado de las almendras de cacao CCN-51 demostró que el modelo de “Aproximación de Difusión” es el más preciso a 55 °C, con márgenes de error mínimos en diferentes tamaños de almendras: Pequeñas: máquina 1 (0,999709536), máquina 2 (0,999810706) Medianas: máquina 1 (0,998613234), máquina 2 (0,9996726) Grandes: máquina 1 (0,998909409), máquina 2 (0,99955287). A 40 °C y 50 °C, también se obtuvieron resultados alentadores: Pequeñas a 40°C: máquina 1 (0,999625338), máquina 2 (0,999504038) Grandes a 40°C: máquina 1 (0,997142482), máquina 2 (0,99657771) Pequeñas a 50°C: máquina 1 (0,997814536), máquina 2 (0,996804618) Medianas a 50°C: máquina 1 (0,997218998), máquina 2 (0,999011281), pero fue a 55 °C donde se lograron las cifras más satisfactorias,

evidenciando que esta temperatura es óptima para minimizar el error en el secado de las almendras.

- El modelo “Midilli” se destacó como el más preciso entre los modelos evaluados, mostró un margen de error mínimo en el tamaño mediano a una temperatura de 40 °C Medianas: máquina 1 (0,997190225), máquina 2 (0,998007647) A 45 °C, donde mostró los menores márgenes de error para los tamaños de almendras pequeñas, medianas y grandes en ambas máquinas. Pequeñas: máquina 1 (0,998535377), máquina 2 (0,998300529) Medianas: máquina 1 (0,999147026), máquina 2 (0,997490576) Grandes: máquina 1 (0,998922321), máquina 2 (0,997742107). A 50 °C, también ofreció un margen de error mínimo en el tamaño grande Grandes: máquina 1 (0,999042048), máquina 2 (0,997994304), resaltando su efectividad en las evaluaciones realizadas.

8.2 RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo el proceso de fermentación, ya que durante esta etapa la almendra de cacao pierde humedad, lo que puede influir de manera positiva o negativa en la cinética de secado del cacao CCN-51.
- Evaluar otros modelos matemáticos no utilizados en la investigación para verificar si algún modelo existente se puede adaptar mejor a la cinética de secado del cacao CCN-51 en el cantón La Maná.
- Se recomienda realizar la toma de datos en intervalos de tiempo más extenso, dado que la curva convergente del proceso de secado generalmente sigue un patrón similar, para comparar con esta investigación registros obtenidos en intervalos de tiempo más cortos.

9. REFERENCIAS

[1] I. Castrillon, “CÓDIGO SUBÁREA CONOCIMIENTO UNESCO,” *CEAACES*, Sep 10, 2015. Available:

<https://vinculacion.utpl.edu.ec/sites/default/files/2018/documentosconsulta/anexo%20%C3%A1reas%20unesco.pdf>

[2] M. Sandra, “Producción de cacao en Ecuador y su impacto económico” *Del Monte AG*, May 19, 2023. Available: <https://delmonteag.com.ec/produccion-de-cacao-en-ecuador-y-su-impacto-economico/>

- [3] L. E. Armijos Herrera, "EVALUACIÓN DE DOS TIPOS DE INJERTOS UTILIZANDO VARETAS DE CACAO (Theobroma cacao L.) CCN51 Y CLON 801" May 20 , 2021. Available:
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ARMIJOS%20HERRERA%20LUIS%20ENRIQUE.pdf>
- [4] L. Quintero and K. Diaz, "El mercado mundial del cacao," *Scielo-Agroalimentaria*, Jun 26, 2024, Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-03542004000100004
- [5] J. Atiaga and E. Tarco, "Análisis de la cinética del secado de cacao nacional ecuatoriano y mejorado," *Universidad Tecnica de Cotopaxi*, Sep. 09, 2022. Available: <https://repositorio.utc.edu.ec/items/4141e931-dce9-4ec3-9abe-83eca00a7418>
- [6] Banco Central del Ecuador, "ANÁLISIS TRIMESTRAL DE COMERCIO EXTERIOR," Aug 23. 2024. Available: <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/Analisis-trimestral-de-comercio-exterior-ene-jun-2024.pdf>
- [7] W. Chiguano and L. Chimarro, "Análisis de la cinética del secado de cacao nacional ecuatoriano y mejorado ccn-51.," *Universidad Tecnica de Cotopaxi*, Mar. 03, 2023. Available: <https://repositorio.utc.edu.ec/>
- [8] G. Burgos, L. Menéndez, and V. Bedón, "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL SECADO DE CACAO CCN 51 DE UNA FINCA INTEGRAL," *Scielo-Centro Azúcar*, Oct 01.2022, Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S222348612022000400024&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [9] A. Valenzuela, "EL CHOCOLATE, UN PLACER SALUDABLE," *Scielo-Revista chilena de nutrición*, Jun 20. 2017, Available: <https://doi.org/10.4067/s0717-75182007000300001>.
- [10] G. Chavez, R. Olaya, and J. Maza, "Costo de producción de cacao clonal ccn-51.," *Scielo-Revista Universidad y Sociedad*, Sep 2. 2018, Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202018000400179&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [11] M. Campos, "Aprendiendo e innovando sobre la cosecha, fermentación y secado del cacao," Jun 5. 2013. Available: https://cadenacacaoca.info/CDOC_Deployment/documentos/19_Guia_8_Beneficiado.pdf
- [12] L. Morales, "Fermentación asistida de cacao (Theobroma cacao) y participación de Zamorano en la investigación e innovación de derivados de este cultivo.," *Escuela Agrícola*

Panamericana Zamorano Honduras, Jun. 15, 2022. Available: <https://bdigital.zamorano.edu/items/bf80ad9f-e571-4b93-9970-7a48a54709d9>

[13] A. Salous, A. Angulo, and L. Solis, “Aceleración de la fermentación del cacao mediante la acción de bacterias (*Acetobacter aceti*) y levadura (*Saccharomyces cerevisiae*),” *Redalyc-Universidad Agraria del Ecuador*, Jan 15. 2019, Available:https://www.redalyc.org/journal/5732/573263327001/?utm_source=chatgpt.com

[14] S. Gonzales, “REVISIÓN DE MÉTODOS PARA LA FERMENTACIÓN DE CACAO Y ANÁLISIS DE LA FERMENTACIÓN COMBINADA DE CACAO CRIOLLO Y FORASTERO,” May 12, 2021. Available: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/22265/Trabajo%20de%20grado%20cacao%20Santiago%20Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[15] W. Teneda, “Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao,” Dec 16, 2016. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/223061502.pdf>

[16] J. Nogales, L. Graziani, and L. Ortiz, “Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera,” *Scielo-Agronomía Tropical*, Oct 21, 2014, Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000100001

[17] B. Badilla, G. Vargas, S. Rojas, L. Salas, K. Zúñiga, and W. Lea, “Secado de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) a baja temperatura en tres secadoras con diferentes flujos de aire,” *CONBEA*, Oct. 29, 2022. Available: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/56f15d82-b259-4c5b-b766-6a0c65395956>

[18] T. Angulo, W. Ávila, and L. Bonilla, “Diseño de un Secador Piloto de Lecho Fluidizado,” *Universidad de Guayaquil*, Dec 30, 2016, Available: <https://doi.org/10.53591/iti.v8iEE.1316>.

[19] F. Gutiérrez, R. Artos, and A. Portilla, “Influencia del método de secado (horno con convección vs horno microondas), sobre la composición nutricional de diferentes forrajes,” *Revista Politécnica Colombiano*, Feb 17. 2023, Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=607874723008>

[20] F. Arboleda and C. Jimbo, “Diseño mecánico y construcción de un secador de cacao (*Theobroma cacao* L.) al vacío para medianos y grandes productores en la provincia de

Manabí,” May 30, 2016. Available:
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/34444/1/D-CD88304.pdf>

[21] J. Orna, N. Chuquín, L. Saquinga, and O. Cueva, “Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg,” *Scielo-Enfoque UTE*, Jun 19, 2018, Available:
<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.185>.

[22] J. Montes, R. Torres, R. Andrade, O. Perez, J. Marimon, and I. Meza, “Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada,” *Redalyc-Ingeniería e Investigación*, Jun 27, 2018, Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64328207>

[23] R. Nevares, “Influencia del método de secado.,” *Repositorio UCE-Revista Politécnica*, vol. Volmen 19, Numero 37, pp. 111–118, Jul. 2023, Available:
<https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/4668cb28-2935-4661-ac35-42fd207f2e7f>

[24] A. D. Giraldo Zuniga, A. Arévalo Pinedo, A. Ferreira, P. Ferreira Silva, J. C. Valdes Serra, and M. M. Menezes, “Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas,” *Scielo-Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Mar 30, 2020, Available: <https://doi.org/10.1590/s0101-20612010000100027>.

[25] A. Vega and R. Lemus, “Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea pubescens*),” *Scielo-Información tecnológica*, Jan. 2016, Available:
<https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000300005>.

[26] A. Vega, C. Tello, and R. Lemus, “SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SECADO DE LA GRACILARIA CHILENA (*GRACILARIA CHILENSIS*),” *Scielo-Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, Available: <https://doi.org/10.4067/s0718-33052007000100008>.

[27] M. Andrade , H. Martínez , and N. Lopez, “Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (*Cucurbita moschata*),” *Scielo-Revista U D C A Actualidad & Divulgación Científica*, Jun. 2019, Available: <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1151>.

[28] C. García, A. Torregroza, and M. Sierra, “Drying Kinetics of Cassava Chips (*Manihot esculenta crantz*) in Microwave,” *Scielo-Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 39, no. 3, pp. 098-103, Apr. 2016, Available:

https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0254-07702016000300001&script=sci_abstract&lng=en

[29] X. Keqing, “OPTIMIZACIÓN DEL SECADO POR AIRE CALIENTE DE PERA (Variedad BLANQUILLA),” Mar. 2015. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1834/tesisupv2195.pdf?sequence=1>

[30] D. Vivanco and D. Nieto, “Uso de la metodología de superficie de respuesta para la optimización del secado de láminas de jengibre (*Zingiber Officinale*) en microondas y determinación de las condiciones de humedad de equilibrio,” *Repositorio Universidad Nacional de Trujillo*, Aug. 25, 2021. Available: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/3817/4443>

[31] H. Joan and T. Pereda, “MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE LAS HOJAS DE SACHACULANTRO (*Eryngium foetidum* L.) POR CONVECCIÓN FORZADA,” Nov. 2019. Available: <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f97ac2a7-0836-4171-aad7-656ba26d86fb/content>

[32] P. Kapila and H. Silungwe, “Drying and colour characteristics of *Cleome gynandra* L. (spider plant) leaves,” *SciELO-Food Science and Technology*, vol. 39, no. suppl 2, pp. 588–594, Dec. 2019, Available: <https://doi.org/10.1590/fst.27118>.

[33] J. Michalewicz, J. Henriquez, and J. Charamba, “Secado de Cajuil (*anacardium occidentale* l.): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado,” *SciELO-Información tecnológica*, vol. 22, no. 6, pp. 63–74, Oct. 2021, Available: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000600007>.