



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

MODALIDAD: PROYECTO DE DESARROLLO

Título:

Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en
Electromecánica

Autor:

Ing. Carguachi Caizatoa Jose Bolívar

Tutor:

PhD. Enrique Torres Tamayo

**LATACUNGA – ECUADOR
2023**

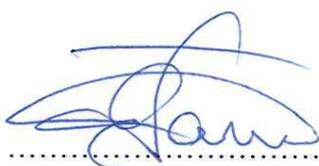
AVAL DEL TUTOR

“En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura.” presentado por Carguachi Caizatoa Jose Bolívar para optar por el título magíster en Electromecánica.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, marzo 22, 2023



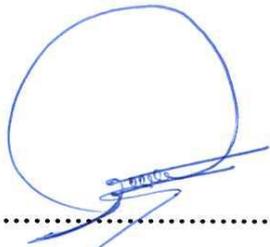
.....
PhD. Enrique Torres Tamayo

CC: 1757121940

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación “Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electromecánica, el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, marzo 22, 2023



.....
Mg. Mauro Darío Albarracín Álvarez

CC: 0503113730

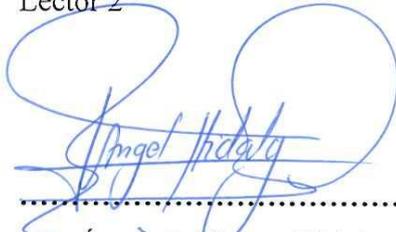
Presidente del tribunal



.....
Mg. Cristian Fabian Gallardo Molina

CC: 0502847692

Lector 2



.....
Mg. Ángel Guillermo Hidalgo Oñate

CC: 0503257404

Lector 3

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres,
con amor y admiración.

José Carguachi

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia: TODOS son mi sustento y la razón por la que quiero seguir creciendo, profesional y personalmente.

Asimismo, mi gratitud eterna a la Universidad Técnica de Cotopaxi, a su personal académico y administrativo, por la mística que imponen a sus acciones, por sus inestimables aportes a la realización del presente estudio.

José Carguachi

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, marzo 22, 2023



.....
Ing. Jose Bolívar Carguachi Caizatoa

CC: 1717010977

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, marzo 22, 2023



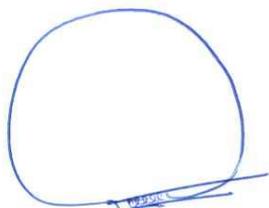
.....
Ing. Jose Bolívar Carguachi Caizatoa

CC: 1717010977

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación “Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, marzo 22, 2023



.....
Mg. Mauro Darío Albarracín Álvarez

CC: 0503113730

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Título: Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura.

Autor: Ing. Carguachi Caizatoa Jose Bolívar

Tutor: PhD. Enrique Torres Tamayo

RESUMEN

El cacao es un producto altamente requerido por el mercado internacional; muchas son las inversiones realizadas en investigación y desarrollo, para obtener nuevos productos, pero muy pocas investigaciones se enfocan en la cinética de secado del cacao. El tratamiento del cacao, es un proceso que toma tiempo y esfuerzo, por esta razón se ve la necesidad de realizar procesos que permitan acelerar su secado cumpliendo estándares de calidad, de manera que pueda ponerse en el mercado de manera rápida.

El estudio tiene como objetivo obtener las variables de los modelos matemáticos de cinética de secado de cacao nacional en función de la temperatura en régimen controlado, a través de un enfoque experimental y matemático.

La propuesta se basa en pruebas experimentales de secado contrastadas con modelos matemáticos previamente propuestos en la bibliografía. Los resultados indican que las temperaturas óptimas de secado para mantener el equilibrio de humedad y las propiedades organolépticas del cacao se encuentran entre los 50 y 70 grados Celsius con períodos entre 17 y 24 horas. El modelo de Page mostró un mejor ajuste con un coeficiente de correlación de 0.90, 0.91, 0.96 y 0.95 para las cuatro temperaturas utilizadas (50, 60, 70 y 80°C). Se obtiene que el modelo de Page para la cinética de secado del cacao que considera un modelo matemático acertado para su aplicación.

PALABRAS CLAVE: Secado artificial, Grano de cacao, Cinética de secado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Topic: "COCOA DRYING KINETICS ANALYSIS AS A TEMPERATURE FUNCTION".

Author: Carguachi Caizatoa Jose Bolívar

Tutor: PhD. Enrique Torres Tamayo

ABSTRACT

Cocoa is a product highly required by the international market; many are the made investments into research and development, to get new products, but very few researchs focus onto cocoa drying kinetics. The cocoa treatment is a process, which takes time and effort, for this reason, there is a need to make processes, what allow it to accelerate its drying, by complying with quality standards, so that, it can be placed on the market, from quickly manner. The study has as aim to get the national cocoa drying kinetics mathematical models' variables as a temperature function into a controlled regime, through an experimental and mathematical approach. The proposal is based onto experimental tests drying contrasted with mathematical models, previously proposed in the bibliography. The results indicate, what the optimal drying temperatures to maintain the moisture balance and the cocoa organoleptic properties are found between 50 and 70 degrees celsius with periods between 17 and 24 hours. The Page model showed a better fit with a 0.90, 0.91, 0.96 and 0.95 correlation coefficient for the used four temperatures (50, 60, 70 and 80°C). It is got, which the Page model for the cocoa drying kinetics that considers a correct mathematical model for its application.

KEYWORDS: artificial drying, cocoa bean, drying kinetics.

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número: 0502666514 Magíster en Lingüística Aplicada en la enseñanza del Idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT ; 1020-2021-2354162: **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "**ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE CACAO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**", de Carguachi Caizatoa José Bolívar, aspirante a Magíster en Electromecánica.



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS -UTC



**CENTRO
DE IDIOMAS**

Latacunga, Marzo, 2023

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
1 CAPÍTULO I.....	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
1.1 Introducción y objetivo del capítulo.....	6
1.2 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte..	6
1.3 Fundamentación teórica	8
1.3.1 Historia del cacao	8
1.3.2 Variedades del cacao en Ecuador.....	8
1.3.2.1 Cacao CCN-51	8
1.3.3 Proceso de producción del cacao	9
1.3.4 Importancia del Proceso de secado	10
1.3.5 Proceso de secado de granos en la industria y agroindustria	11
1.3.6 Modelos matemáticos utilizados para evaluar el ajuste de diferentes cinéticas de secado	18
2 CAPÍTULO II	24
2.1 Introducción y objetivo del capítulo.....	24
2.2 Metodología de cálculo	24
2.2.1 Método Inductivo	25
2.2.2 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	25
2.2.3 Modelos matemáticos usados para la cinética de secado de alimentos	26
2.2.4 Método de recolección de datos de la investigación.....	26
2.2.5 Secado a temperatura controlada	28
2.2.6 Equipos utilizados	29
3 CAPÍTULO III.....	32

3.1	Introducción y objetivo del capítulo.....	32
3.2	Datos obtenidos	33
3.3	Datos obtenidos del contenido de humedad	33
3.3.2	Resultados aplicando el modelo Newton	38
3.3.3	Resultados aplicando Page	43
3.4	Discusión de resultados	47
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1	Conclusiones	50
4.2	Recomendaciones	50
	Bibliografía	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales productores de cacao en el mundo.....	7
Figura 2. Proceso de producción del cacao en Ecuador.....	10
Figura 3. Cadena de producción de cacao en Ecuador.....	11
Figura 4. Método Rohan	14
Figura 5. Método esterillas.....	14
Figura 6. Secadero tipo Elba	15
Figura 7. Secado de cacao en pisos de cemento.....	15
Figura 8. Secado del cacao en piso de plástico	16
Figura 9. Método marquesina y túneles	16
Figura 10. Horno de secado de granos.	17
Figura 11. Fruto maduro cosechado en la Provincia de Esmeraldas.....	27
Figura 12. Proceso de separación de granos.	28
Figura 13. Proceso de fermentación mediante sacos de yute.....	28
Figura 14. Horno con doce muestras de diez unidades cada una.....	29
Figura 15 Horno con un rango de temperatura de 0 a 1000°C.	30
Figura 16. Balanza Zeus modelo SF-400.....	30
Figura 17. Termohigrómetro modelo LDS-1G, con rangos de medición desde 40% hasta 0.0%, un margen de error 0.2%	31
Figura 18. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 50°C.....	35
Figura 19. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 60°C.....	36
Figura 20. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 70°C.....	36
Figura 21. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 80°C.....	37
Figura 22. “k” obtenidos de manera bibliográfica, trabajo realizado por Buñay y Rosales mediante el modelo de Newton	39
Figura 23. Comparación de resultados obtenidos de manera experimental aplicando el ajuste mediante el método de mínimos cuadrados.	40

Figura 24. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 50 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.....	41
Figura 25. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 60 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.....	41
Figura 26. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 70 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.....	42
Figura 27. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 80 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.....	42
Figura 28. Comparación de resultados a las diferentes temperaturas, según los datos obtenidos en el proceso investigativo.	44
Figura 29. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 50 grados Celsius.	45
Figura 30. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 60 grados Celsius.	46
Figura 31. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 70 grados Celsius.	46
Figura 32. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 80 grados Celsius.	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de tareas con relación a los objetivos específicos.	3
Tabla 2. Principales métodos de secado del cacao aplicando luz solar	13
Tabla 3. Datos de humedad obtenidas a temperaturas de 50 a 60 grados Celsius. 34	
Tabla 4. Datos de humedad obtenidas a temperaturas de 70 a 80 grados Celsius. 34	
Tabla 5. Datos de humedad obtenidas a temperaturas de 40 a 60 grados Celsius. 38	
Tabla 6. Cinética de secado en la variación de tiempo a temperaturas de 50 a 80 grados Celsius.	39
Tabla 7. Valores comparativos de “k”.	43
Tabla 8. Valor de” k” y “n” de fuentes bibliográficas en el modelo de Page.	43
Tabla 9. Valores de humedad obtenidas en las muestras de cacao al ser sometidas a diferentes temperaturas y tiempos determinados de manera experimental y aplicando el modelo de Page.....	44
Tabla 10. Comparativa de factores “k” y “n” que intervienen en el modelo de Page, obtenidas de manera calculada y Bibliográfica.....	47

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El cacao es la materia prima para la preparación de diversos ejemplares de chocolates a nivel mundial y nacional, resaltando las características organolépticas vinculadas en el proceso de fermentación y secado del producto. En Ecuador fue un referente de la economía del país, en el siglo XIX, en donde se produjo el boom cacaotero que aportó al incremento financiero a través de la exportación a nivel local, regional, nacional e internacional. Asimismo, el país ha producido dos tipos de cacao, el Fino de Aroma conocido como Nacional y el CCN-51, con estos productos es considerando un exportador principal. Según la Revista Económica (RVE) en un estudio realizado en enero del 2023, el cacao ocupa el tercer lugar en productos de exportación tradicional, alcanzado el 11% del total de las exportaciones.

El presente proyecto se sustenta en trabajos de investigación desarrollados con anterioridad, donde se analiza las variables que intervienen en el proceso de secado de cacao, por lo que los experimentos se realizaron de manera controlada en un horno manteniendo así el grano de análisis en estado estático, por medio de los modelamientos se obtienen las curvas de secado y la velocidad con la que el grano de cacao se seca de manera artificial.

Planteamiento del problema

Ecuador un país que exporta cacao desde 1780, se caracteriza por la calidad del cacao que produce, esto le ha permitido ser en la actualidad el cuarto país con mayor exportación de cacao y el primero en exportar su famoso cacao fino, abarcando el 65% del mercado a nivel mundial. (González, 2020)

Además, los productores tienen el compromiso de ir mejorando los métodos y técnicas en el proceso de producción del cacao, mientras la calidad es uno de los factores que mantiene en el auge al cacao ecuatoriano y está estrechamente vinculada con las características de la materia prima, en donde el productor debe tener un control riguroso de todas las etapas de producción, desde la cosecha hasta el almacenaje.

Los granos de cacao para cumplir con los estándares internacionales de calidad, tiene que distinguir el adecuado tratamiento al momento de fermentar el grano, el secado del cacao, estar libre de olores extraños, limpio e íntegro y un tamaño uniforme.

La investigación está enfocada en el análisis del secado del grano de cacao de manera controlada, según un método forzado o secado artificial se hará un análisis comparativo de los factores que intervienen en los modelos matemáticos propuestos por Newton y Page, donde se obtendrán las curvas características y se evaluará la cinética de secado del producto, para garantizar la eliminación de la humedad del grano hasta el 7.5 %, de esta manera evitar que se generen organismos microbianos las cuales comprometan la calidad del producto, permitiendo facilitar el almacenaje y transporte del cacao.

Objeto y campo de acción

Objetivo General

Obtener las variables de los modelos matemáticos de cinética de secado de cacao nacional en función de la temperatura en régimen controlado.

Objetivos específicos

- Establecer los fundamentos teóricos relacionados con la cinética del secado de cacao.
- Realizar el diseño experimental que permita la obtención de las curvas de comportamiento del secado de cacao en función de la temperatura.

- Analizar los resultados obtenidos aplicando el método de los mínimos cuadrados que permitan la obtención del mejor ajuste en los modelos de la cinética de secado de cacao.

Sistemas de tareas con relación a los objetivos específicos

Tabla 1. Sistema de tareas con relación a los objetivos específicos.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Establecer los fundamentos teóricos relacionados con la cinética del secado de cacao	Recabar información relevante que aporte al trabajo de investigación para la obtención de las variables que intervienen en los modelos propuestos por Newton y Page.	Se aplica la técnica de sistematización bibliográfica debido a que es necesario basarse en trabajos de investigación de fuentes oficiales, ya realizadas.
2	Plantear la metodología a partir de la experimentación para la obtención de los modelos de secado de cacao	Realizar un cuadro de datos con los valores obtenidos en las diferentes mediciones en el proceso de secado del grano de cacao.	Se aplica la técnica de observación experimental al obtener muestras en los centros de acopio para poder adquirir los datos relevantes de la investigación.
3	Analizar los resultados obtenidos aplicando el método de los mínimos cuadrados que permitan la obtención del mejor ajuste en los modelos de la cinética de secado de cacao.	Análisis de los datos obtenidos, para verificar la factibilidad de mejorar y optimizar el proceso de secado de cacao, con el uso de las curvas de comportamiento del secado en función de la temperatura.	Se aplica la técnica de sistematización bibliográfica debido a que es necesario basarse en trabajos de investigación de fuentes oficiales, ya realizadas.

Fuente: Alumno investigador.

Justificación y/o importancia de la investigación

La obtención de las variables que intervienen en los modelos matemáticos propuestos por Newton y Page ayuda a obtener las curvas de secado del cacao tiene como objetivo, lograr que en el proceso de secado el grano conserve sus características en el mayor tiempo mientras está almacenado. Durante el proceso del producto debe disminuir el contenido de agua hasta un máximo de 7.5%. Además, debe garantizar que el cacao no germine, no crezcan bacterias y hongos o el desarrollo de ácaros e insectos. (Zúñiga, 2016)

En este sentido un modelo matemático es una herramienta útil para la toma de decisiones, los modelos de Newton y Page, son ampliamente utilizados en la literatura científica en el tema de secado de granos y otros productos, por lo que aportan a la investigación y enriquecen el proceso investigativo.

Actualmente los pequeños productores realizan el proceso de secado de manera natural, lo que implica un tiempo de dos a tres días teniendo un clima favorable, una superficie adecuada y de una extensión física considerable.

El proceso de fermentado y secado son los aspectos más importantes en la calidad del cacao, este caso de estudio facilitará datos reales, para analizar la eliminación de la humedad del grano, considerando el tiempo de exposición a diferentes temperaturas controladas de manera artificial, se debe cumplir con este propósito sin comprometer la calidad requerida en el producto final.

Hipótesis

Es factible obtener las variables que ayudaran al análisis de los modelos matemáticos propuestos por Newton y Page, así obtener las curvas de la cinética del secado en función de la temperatura y otros parámetros físicos del grano como es la masa y el tipo de cacao mediante un ambiente artificial controlado para mejorar el proceso de secado a nivel de pequeños y medianos productores.

Variable independiente

- Tiempo, esta variable es importante debido a que, si se logra la reducción en el secado del producto, ayuda a mejorar el proceso y así aumenta las ganancias económicas a los pequeños medianos y grandes productores del cacao.
- Temperatura de secado, ayuda a optimizar recursos y mejorar los tiempos entrega del cacao, sin dejar de lado la calidad requerida para su exportación.
- Tipo de material a ser secado, en el caso del estudio se ha experimentado con el cacao nacional, debido a fácil obtención y sus características físicas.

Variable dependiente

- Contenido de humedad, para el caso de estudio y según requerimientos de calidad del cacao nacional, se analiza el secado hasta llegar a un 7 a 8 % de contenido de humedad.

1 CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 Introducción y objetivo del capítulo

El capítulo uno describe la investigación bibliográfica de los antecedentes teóricos y estado del arte, debido a su importancia se debe conocer de una manera breve el antecedente histórico, el origen y evolución de la producción del cacao en el Ecuador, además se detalla el proceso de investigación pertinente en la tesis.

El objetivo del presente capítulo es conocer los procesos de obtención del producto (cacao), también las variables principales que intervienen en los modelos matemáticos analizados, para el caso de estudio se evalúa los métodos de Newton y Page, que son los modelos matemáticos que, tanto en la literatura cuanto, en el proceso de secado realizado, son de gran importancia ya que enriquecen la percepción y comprensión del proceso realizado y ratifican los resultados obtenidos.

Además de obtener las curvas de la cinética del contenido de humedad en función de la temperatura, para el secado de cacao en régimen controlado, de esta manera ver la factibilidad de optimizar el tiempo del proceso de secado para los pequeños y medianos productores.

1.2 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte

El cacao y sus derivados es uno de los productos más apetecidos a nivel mundial, con los países productores bien posicionados en el mercado debido a la calidad y sabor del producto que cada país productor mantiene, a nivel de Latinoamérica Ecuador mantiene el primer lugar y tercero a nivel mundial, como exportador de cacao de fino aroma (Cobos, 2021), según Anecacao el país cultiva dos variedades de cacao, el CCN 51 y el cacao Nacional o cacao de fino aroma

(Republica del Cacao, 2019). La Figura 1 muestra los principales países productores de cacao.

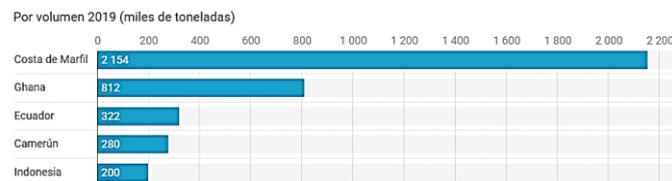


Figura 1. Principales productores de cacao en el mundo.
Fuente: (Chavéz, Carbo, Garcia, & Cobos, 2019)

Una de las ventajas del análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura usando los modelos matemáticos de Newton y Page, es mejorar el proceso y analizar la viabilidad de reducir los tiempos en el secado del grano de pequeños y medianos productores en las diferentes provincias del Ecuador, en esta etapa se aumentará la producción y venta del producto terminado, alcanzado un incremento en la economía de los sectores productores de cacao. Según el trabajo investigativo de Campoverde, N. y Zambrano, J. en su trabajo de titulación Optimización de la fermentación y secado de cacao (*Theobroma cacao L.*) variedad CCN-51, mediante la metodología de enfoque por procesos en la comunidad de Zhucay, hacen mención la manera artesanal como realizan el proceso de secado en los pequeños y medianos productores de la provincia del Cañar, realidad que tiene la mayoría de pequeños productores, en donde se destaca la reducción de un valor económico por el aumento del tiempo de secado (Zúñiga, 2016).

Mediante el análisis de las curvas de la cinética de secado del cacao se obtendrá las curvas de velocidad y temperatura de secado del grano, manteniendo activas las reacciones de oxidación de alcoholes y otros compuestos, que se forman en la etapa de fermentación dando el aroma y sabor característico. La humedad final de grano debe ser de 7-8% y un PH de 5.0 a 5.6 según la norma INEN 381 (Ecuador Patente nº 67.140.30, 2017), este análisis lo hace Teneda Wilian en su trabajo Cinética del secado en las almendras fermentadas de cacao variedad CCN51 (Cobos, 2021).

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Historia del cacao

El origen de la planta de cacao no consta de manera exacta, debido a que en la antigüedad la población era nómada, considerando que su origen viene del continente americano según estudios de Pound Cheesman, las zonas con mayor producción es América del sur, en áreas del Amazonas específicamente donde ahora es Colombia, Ecuador, Perú y Brasil, siendo el último país el lugar donde mayor número de variedades de cacao se han encontrado (Chavéz, Carbo, Garcia, & Cobos, 2019). El cacao trasciende a Europa por el año 1502, se lo conocía como árbol de *Theobroma*: alimento de los dioses, pasado 1625 España da a conocer al mundo exterior la bebida conocida como chocolate. En Ecuador el cacao empieza su historia antes del siglo XV, hasta la actualidad, donde está posicionado como uno de los mejores productos a nivel mundial, siendo una de las principales fuentes de ingresos económicos por exportación (Anecacao, 2019).

1.3.2 Variedades del cacao en Ecuador

A nivel mundial existe una gran variedad del cacao, cada región tiene su propia clasificación la cual se lo hace en función de sus características físicas y organolépticas que tiene cada variante.

En Ecuador según la normativa INEN 176:2018-2 (Ecuador Patente n° 67.140.30, 2017), se tiene dos especies predominantes las cuales son:

1.3.2.1 Cacao CCN-51

De las siglas Colección Castro Naranjal es un cacao creado por Homero Castro un Ambateño en 1965, es uno de los más cultivados a nivel local y mundial, debido a su adaptabilidad en diferentes condiciones climáticas y resistente a enfermedades propias del cacao. (Ganadería, 2019).

El cacao CCN-51 es una variedad caracterizada por su alto rendimiento y su alta resistencia a las variaciones climáticas y enfermedades, se lo cultiva para su uso en la industria del chocolate de calidad comercial.

1.3.2.2 *Cacao Nacional*

Elemento emblemático de producción ecuatoriana, que se lo conoce como cacao fino y aroma, a nivel mundial se produce un 5%, el cual Ecuador proporciona el 63% de la producción mundial, lo que es una ventaja para los pequeños productores que exportan esta variedad de cacao. (Anecacao, 2019).

El Cacao Nacional se caracteriza por su variación de sabores por lo cual, tiene una riqueza aromática y provee diferentes sensaciones a las personas que consumen los diferentes derivados elaborados con esta materia prima.

1.3.3 **Proceso de producción del cacao**

Las principales provincias productoras de cacao en Ecuador son: Los Ríos con un 35%, Guayas 25%, Manabí 14%, Esmeraldas 8% y El Oro con el 5% según los datos de Anecacao (Chavéz, Carbo, Garcia, & Cobos, 2019), en estos lugares se realiza el mismo método de producción, en la mayor parte de casos de manera artesanal.

Para detallar el proceso de secado es importante entender los pasos de producción, los mismo que comienzan desde la cosecha hasta el almacenado, cada etapa es importante para obtener el sabor, aroma y calidad del cacao y sus derivados, lo que ha posicionado en el mercado mundial y con ello la mejora económica del país. El proceso de producción del cacao es el siguiente:

Cosecha: Es el proceso de recolectar y abrir el cacao de su cubierta principal, se debe realizar únicamente cuando la coloración de la mazorca es la adecuada, debido a que carecen de suficiente azúcar en la pulpa y el proceso de fermentación es satisfactoria (Zúñiga, 2016).

Desgrane: Consiste en extraer los granos internos de su cubierta principal, por norma el proceso se debe realizar a mano para garantizar la calidad del grano (Guachamin Velásquez, 2008).

Fermentación: Tiene como objetivo desechar la mucilaginoso que rodea al grano, provocando la muerte del embrión para una adecuada conservación en el almacenado y así desencadena modificaciones bioquímicas en el interior del grano

el cual da el sabor y olor característico del producto final (Republica del Cacao, 2019).

Secado: A nivel industrial se disponen dos tipos de secado de cacao, uno natural mediante los rayos del sol y otro artificial o forzado, los mismos que tienen una variedad de elementos mediante equipos que intervienen en el proceso, el objetivo es reducir el tiempo de secado garantizando las características técnicas expuestas en la normativa ISO 2451-2017 (Ecuador Patente nº 67.140.30, 2017).

Almacenado: Este proceso tiene importancia debido a que al cuidado de no mezclar con otros productos que puedan variar el sabor u olor del producto, además debe mantener un aislamiento del piso (Guachamin Velásquez, 2008).

En la Figura 2 se muestra de manera gráfica cada proceso detallado con anterioridad.



Figura 2. Proceso de producción del cacao en Ecuador.
Fuente: (Samaniego, 2019)

1.3.4 Importancia del Proceso de secado

Es un proceso donde se reduce la cantidad de agua que tiene el grano de cacao hasta llegar a valores determinados, que permitan almacenar el grano por largos periodos de tiempo en condiciones ambientales normales, sin perder sus propiedades nutricionales y organolépticas (Guachamin Velásquez, 2008).

El conseguir un correcto nivel de humedad en el grano de cacao, permite que las cualidades propias del mismo, sean las óptimas para su almacenamiento y posterior comercialización, teniendo en cuenta que el cacao es un producto muy apetecido y en especial el cacao ecuatoriano que se lo comercializa en muchos

países a nivel mundial.

Un producto exportado de calidad significa mayor demanda por el consumidor e incremento en los ingresos económicos de los productores, en la fig. 3 muestra la cadena de producción de cacao en Ecuador, en donde se aprecia la importancia de la producción de la calidad del cacao, debido a que los consumidores mayormente son de América del Norte, Europa y Asia, siendo mercados exigentes, por lo cual es el compromiso de seguir mejorando la calidad desde la producción (Samaniego, 2019).



Figura 3. Cadena de producción de cacao en Ecuador.
Fuente: (Samaniego, 2019)

1.3.5 Proceso de secado de granos en la industria y agroindustria

La exigencia de productos de calidad obliga a los productores a mejorar las técnicas empleadas para la obtención del cacao. El Ecuador toma con importancia, el análisis del proceso que minimiza el tiempo ocupado durante el secado, también muestra recomendaciones para la realización de un adecuado fermentado y secado. Esto ha generado mayores ingresos al país, en especial a las personas involucradas directamente en este campo asegurando la permanencia del Ecuador en el mercado mundial.

La principal motivación para la elaboración de esta investigación es el extenso tiempo ocupado por los cacaoteros ecuatorianos, para la obtención de granos listos para almacenar, que en ocasiones llega a durar hasta siete días. Especialmente, por las condiciones climáticas adversas que complican y limitan la obtención de un producto de calidad. En donde el secado natural y artificial favorecen notablemente la extracción del exceso de agua del producto, logrando

obtener cacao con humedad del 7 al 8% en solo siete horas en el caso del secado artificial. Además, el uso de técnicas y equipos adecuados minimizan la intervención de la mano del hombre.

Este proceso reduce el porcentaje de humedad de la semilla hasta un 7% aproximadamente, porcentaje requerido por los grandes importadores, para poder desarrollar de mejor manera la refinación.

1.3.5.1 Secado Natural.

El secado natural se basa en el aprovechamiento de la radiación solar, que suministra una temperatura para la continuación de algunos cambios en el grano de cacao, que no han finalizado durante la fermentación. El secado es indispensable para facilitar el transporte, manejo, almacenamiento y comercialización del grano de cacao. (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021).

En la Tabla 2 se describe de manera concisa los diferentes métodos de secado del cacao de manera natural, describe además las características físicas del proceso y las condiciones principales que debe cumplir el método de secado.

El secado natural del grano de cacao, como ya se mencionó, se lo realiza aprovechando el clima y la radiación solar, pero para ello existen muchos métodos, como los que se detallan a continuación:

Tabla 2. Principales métodos de secado del cacao aplicando luz solar

Método de secado	Características	Condiciones
Método Rohan	Consiste en colocar y extender los granos de cacao fermentados en camillas o bandejas Rohan de madera que se ponen al sol sobre largueros acomodados a una altura aproximada de 50 cm, para que no haya influencia de la humedad del suelo. Ver Figura 4.	-La madera debe estar libre de olores, sabores y colores que se absorban en el cacao. -La temperatura no debe superar los 50°C
Esterillas	Consiste en colocar el cacao fermentado en tendales o esterillas, hechas de bambú expuestas al sol en manera organizada, de modo que se pueda envolver y desenvolver para secar o guardar, según el caso. La operación se hace sobre largueros a buena altura del suelo. Ver Figura 5	-La temperatura no debe superar los 50°C.
Secadero tipo Elba	Cuando se trata de plantaciones relativamente grandes, es recomendable la instalación del secadero tipo Elba, que consiste en colocar el cacao fermentado en varios carros o camillas de madera corredizos mediante rieles, protegidos con techo fijo o rodante. Ver Figura 6.	-La madera debe estar libre de olores, sabores y colores que se absorban en el cacao. -La temperatura no debe superar los 50°C.
Secado en piso de cemento	Consiste en colocar los granos de cacao fermentados en patios de cemento, ladrillos o de madera, expuestos al sol con o sin techos rodantes. Este método es muy utilizado por Venezuela. Ver Figura 7 y 8.	Los patios de secado del cacao no deben emplearse para secar otros productos de olores fuertes como el coco o pescados etc.
Marquesinas y túneles de secado	Son estructuras en madera o metal con cubierta de plástico especial o policarbonato, que permite el paso de la radiación solar. Las superficies de secado la constituyen mesones levantados generalmente esterillas, entramados de caña brava y en algunos casos de mallas plásticas con apertura de 0,4 x 0,4 cm. Ver Figura 9.	En marquesinas y túneles de secado es crítico el control de la ventilación, la temperatura y la humedad relativa que puede hacerse parcialmente subiéndolo o bajando las cortinas laterales.

Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.1.1 Secado de cacao método Rohan

Es el método de secado y fermentación, que se lo realiza en bandejas o camillas, generalmente de madera, que cuentan con bordes de 10 cm de alto; éstas permiten realizar el proceso de una manera adecuada y se obtiene una rápida fermentación, es importante destacar que los elementos usados para el proceso de

secado deben estar libres de olores y sabores que pueda absorber el producto. Se puede apreciar de manera gráfica en la Figura 4.



Figura 4. Método Rohan
Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.1.2 Secado de cacao en esterillas

Es un método de secado al sol, en el que se utilizan esteras de bambú, en las que se acomoda el grano de cacao, de manera que se pueda envolver y desenvolver las esteras; esto que permite guardar el producto, en caso de ser necesario, por ejemplo, en climas adversos, y ponerlo a secar nuevamente. La Figura 5 muestra la forma de estirar y mover los granos de cacao en esteras usadas para el propósito, garantizando que no tenga contacto con algún material o elemento que pueda agregar impurezas, olores o sabores extraños al cacao.



Figura 5. Método esterillas
Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.1.3 Secado de cacao en secadero tipo Elba

Este método es utilizado en plantaciones grandes, consiste en el uso de camillas de madera con un sistema corredizo implementado por rieles, que cuentan con techos que pueden ser fijos o móviles, para una correcta protección del producto. En la Figura 6 evidenciamos el método de secado tipo Elba, la cual garantiza la integridad del cacao en caso de variaciones del clima como lluvia o viento que intervenga el proceso de secado del grano de cacao.



Figura 6. Secadero tipo Elba
Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.1.4 Secado de cacao en pisos de cemento

Este método consiste en el secado del grano en patios de cemento o ladrillo moviendo con rastrillos específicos constantemente para tener un secado homogéneo, mismo que es utilizado cuando existen buenas condiciones climáticas. Como se aprecia en la Figura 7. Este método puede tener variantes como techos corredizos.

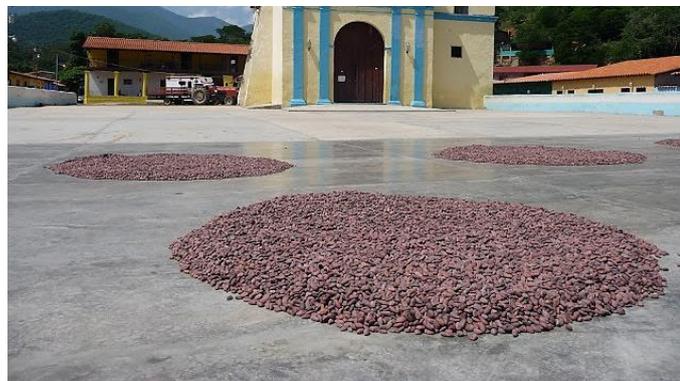


Figura 7. Secado de cacao en pisos de cemento
Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.1.5 Secado de cacao en pisos de plástico

Método de secado que se lo realiza, esparciendo el producto sobre láminas de plástico, lo que permite su movilización y guardado, si las condiciones climáticas así lo requieren. Como se ve en la Figura 8, donde puede tener variaciones del tendido del plástico, puede ser en el piso o sobre bancas con circulación de aire.



Figura 8. Secado del cacao en piso de plástico
Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.1.6 Secado de cacao en marquesinas y túneles

Método de secado del grano, que se lo realiza en estructuras fabricadas con madera o metal, que poseen una cubierta de plástico especial o policarbonato como se muestra en la Figura 9; este método es muy útil en zonas productoras donde las precipitaciones son continuas durante el periodo de cosecha del cacao.



Figura 9. Método marquesina y túneles
Fuente: (Jibaja Soria & Peñaherrera González, 2021)

1.3.5.2 Secado Artificial

Es el método que se utiliza para secar el grano, sin el aprovechamiento de las condiciones climáticas o ambientales, en éste se utiliza corrientes de aire caliente

que se aplica con el cuidado de no producir contaminaciones, mediante la utilización de hornos fabricados para tal efecto. Como fuente de calor se puede usar leña, carbón mineral, diésel, gas natural o electricidad.

En el secado artificial la temperatura no debe exceder de los 80 °C, la cual se regula por medio de un termostato acoplado a la entrada de aire caliente. Todo el proceso puede durar unas 24 horas, luego de las cuales estará el producto listo para su comercialización.

Se utilizan distintas fuentes de calor en el secado artificial, principalmente las generadas a partir de la combustión de carburantes como el gas natural. Para el beneficiado del cacao en Ecuador se utilizan mayoritariamente secadores artificiales estacionarios, como el que se muestra en la Figura 10, tienen algunos tipos de secadores artificiales como: estufas, secadoras con leña, secadoras de combustión, secadoras eléctricas y la secadora de cacao tipo Samoa. Según Quishpe Bravo, la mayor parte de la producción de cacao proviene de países en donde el secado es mayormente natural, sin embargo en algunas regiones geográficas los períodos de cosecha coinciden con épocas de lluvia y humedad alta, en ese caso se recurre al secado artificial. (Quispe Bravo, 2022)

El proceso de sado es muy importante en la industria, por lo que se le ha dado una especial atención y se han realizado muchas investigaciones al respecto, sobre todo para determinar las temperaturas ideales a las que el cacao se seca, pero mantiene un nivel de humedad adecuado para la correcta manipulación, acopio y procesamiento industrial.

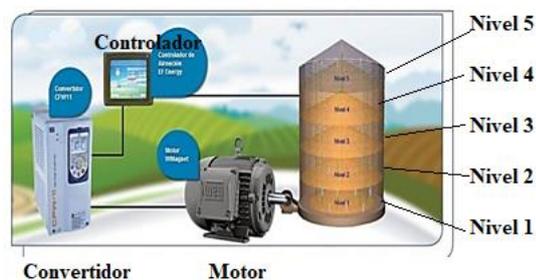


Figura 10. Horno de secado de granos.
Fuente: (WEG, 2014)

1.3.5.3 Parámetros asociados al proceso del secado

1.3.5.3.1 Humedad de Equilibrio

La humedad de equilibrio en cualquier material higroscópico es la humedad que contiene el material y el vapor de agua que contiene el aire que está en contacto, es la humedad que se mueve del grano al aire o viceversa hasta que alcance al equilibrio entre la humedad que contiene el grano y el aire (Noroña, 2018).

1.3.5.3.2 Humedad Libre

La humedad libre es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire a condiciones controladas. (UTN, 2022)

1.3.5.3.3 Humedad crítica

Es la humedad que se encuentra en el punto de transición entre el periodo de velocidad constante y el periodo decreciente (Noroña, 2018).

1.3.5.3.4 Curvas de secado

El secado es el fenómeno que consiste en reducir el contenido de humedad de un material en un tiempo determinado, para este proceso se consideran ciertos parámetros como la temperatura expuesta, contenido de humedad, humedad de equilibrio, tipo de secador y la velocidad del aire empleado (Noroña, 2018).

1.3.6 Modelos matemáticos utilizados para evaluar el ajuste de diferentes cinéticas de secado

Los modelos matemáticos son representaciones simplificadas de fenómenos o de relaciones entre dos o más variables, por medio de ecuaciones, funciones o fórmulas matemáticas.

Para controlar y optimizar el proceso del secado y mejorar la eficiencia de secado es necesario utilizar ecuaciones matemáticas, para simulación la cinética

de transferencia de materia (agua) ocurrida durante esta operación, en función de las condiciones de secado utilizadas.

Se cuenta con dos grupos de modelos matemáticos que analizan este proceso; los más usados en la formulación del fenómeno de secado, se basan en relaciones semi empíricas de capa fina. Estos realizan una simplificación de las ecuaciones que describen el proceso. También existen modelos de cinética de secado que emplean la analogía con la transferencia de calor.

En esta investigación, haremos referencia a dos teorías de secado de alimentos, las mismas que son:

1.3.6.1 Segunda ley de Fick

Esta ley fue derivada por el médico y fisiólogo alemán Adolf Fick en el año de 1855; y, hace referencia a (Bolívar, 2020) “La ley de Fick establece lo siguiente: el flujo másico que se difunde a través de una superficie es proporcional al gradiente de concentración (C_2-C_1/L) y a una constante D llamada coeficiente de difusión o difusividad. Esta ley posee dos formas: una en función del espacio (x) , y otra en función del espacio y tiempo (x, t) . La primera aplica para sistemas en condiciones estacionarias, mientras que la segunda para sistemas reales, no estacionarios.”

La fórmula de esta ley corresponde a la ecuación 1:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = -DA \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

$\frac{\Delta m}{\Delta t}$: es la variación de la masa del soluto que difunde a lo largo de esa dirección por la variación de la unidad de tiempo;

A es el área de la sección transversal;

C es la concentración del soluto (que se supone constante sobre cualquier sección transversal del tubo);

D es el coeficiente de difusión; y,

$\frac{\Delta C}{\Delta x}$ se llama variación de gradiente de concentración. (Canaria, 2003)

1.3.6.2 Investigación realizada por Glen E. Page

El investigador Glen Page, en su tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Mecánica, publicada en febrero de 1949, que en su parte fundamental buscaba (Page, 1949) "... determinar el efecto de la temperatura y humedad relativa del aire de secado, y el contenido inicial de humedad de una capa delgada de maíz sin cáscara en su tasa de secado", encontró que:

El secado de granos en capas delgadas puede ser representado por la fórmula constante en la ecuación 2. (Giraldo, 2010)

$$\frac{W-W_e}{W_o-W_e} = MR = \exp(-KT^n) \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

MR = coeficiente adimensional de humedad.

W = humedad media en el instante t (g/g);

W_e = humedad de equilibrio (g/g);

W_o = humedad inicial (g/g);

T = tiempo; y,

K y n = parámetros del modelo.

Y una de sus conclusiones mayores fue (Page, 1949) "El aire de secado no tuvo ningún efecto sobre la forma de la ecuación, pero sí afectan a la unidad de tiempo. Ya sea una disminución en la humedad original contenido o una disminución en la temperatura del aire de secado aumentado la unidad de tiempo".

1.3.6.3 Modelo matemático de Newton

La transferencia de calor se relaciona con los cuerpos y su temperatura, a los cuerpos calientes se los denomina fuente y a los fríos receptor, por lo que se obtienen procesos de condensación, vaporización, cristalización, reacciones químicas, entre otros.

La transferencia de calor vital en los procesos, ya que, es un tipo de energía que se encuentra en movimiento. Por tanto, es importante la determinación experimental de la ecuación empírica que relaciona la temperatura de enfriamiento de una cantidad de sustancia con respecto al medio.

La ley de enfriamiento de Newton determina que, (Carrillo) “cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido por unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo por conducción, convección y radiación, es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y dicho medio externo, siempre y cuando este último mantenga constante su temperatura durante el proceso de enfriamiento.”

Newton utilizó un horno de carbón, calentó al rojo vivo un bloque de hierro, luego lo colocó en un lugar frío y observó el proceso de enfriamiento en el tiempo. (Carrillo) “Esta ley describe que la razón de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y el medio ambiente que lo circunda.” (Gutierrez, y otros, 2011)

Su fórmula se manifiesta conforme la ecuación 3:

$$MR = \exp(-kt) \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

MR = coeficiente adimensional de humedad.

k = parámetros de ajuste del modelo.

t = tiempo

1.3.6.4 Modelo matemático de Henderson-Pabis

La ecuación de Henderson-Hasselbalch es una expresión matemática que permite el cálculo del pH de un amortiguador o solución amortiguadora. Se basa en el pKa del ácido (pKa: es una medida de acidez calculada mediante el logaritmo negativo de la constante de disociación ácida Ka) y la relación entre las concentraciones de la base conjugada o sal y del ácido, presentes en la solución amortiguadora.

La ecuación fue inicialmente desarrollada por Lawrence Joseph Henderson (1878-1942) en el año 1907. Este químico estableció los componentes de su ecuación con base del ácido carbónico como una solución amortiguadora o tampón. La fórmula de Henderson se manifiesta de acuerdo a la ecuación 4. (Gutierrez, y otros, 2011)

$$MR = a \exp(-kt) \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

MR = coeficiente adimensional de humedad.

a, k = parámetros de ajuste del modelo.

t = tiempo

1.3.6.5 Modelo Matemático Logarítmico.

En el año 1917, Karl Albert Hasselbach (1874-1962) introduce el uso de los logaritmos para complementar la ecuación de Henderson. El químico danés estudió las reacciones de la sangre con el oxígeno y el efecto sobre su pH. Una solución amortiguadora es capaz de minimizar los cambios de pH que sufre una disolución al añadirle un volumen de ácido o base fuertes. Está formada por un ácido débil y su base conjugada fuerte el cual se disocia rápidamente, su fórmula es aplicada conforme la ecuación 5. (Ozdemir, 1999)

$$MR = a \exp(-kt) + b \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde:

MR = Proporción de humedad.

a = Constante de secado exponencial.

k = constante de secado.

t = Tiempo.

b = coeficiente de la fórmula.

1.3.6.6 Modelo matemático de Midilli-Kucuk.

Es un modelo empírico de una relación directa entre el contenido de humedad y se obtiene el tiempo de secado, su fórmula es la constante en la ecuación 6:

$$MR = a \exp(-k t^n) + bt \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

k = constante de velocidad de secado;

t = tiempo; y,

las constantes (a , b y n) son propias del modelo.

2 CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MODELOS DE CINÉTICA DE CACAO NACIONAL

2.1 Introducción y objetivo del capítulo

Mediante el avance se mencionará la información destacable para la implementación de este proyecto. En donde se relacione el levantamiento generado por la fundamentación teórica, junto a los antecedentes ya implementados en los procesos de producción.

Cuando se manifiesta el alcance de una investigación no se toma en cuenta las tipologías, lo importante es alcanzar el resultado que se espera obtener del estudio, por lo cual identifique las necesidades que ameritan una respuesta del proyecto.

El objetivo del presente capítulo es conocer los diferentes modelos matemáticos que se utilizan para el cálculo de la humedad del cacao, sometido a secado artificial, además del proceso, materiales y metodología utilizados en la realización de la investigación.

2.2 Metodología de cálculo

Mediante el análisis directo de la disgregación de las causas y efectos que se ocasionan en los fundamentos básicos, se toma en cuenta los requerimientos del secado de cacao, garantizando la calidad y eficiencia de la cinética de secado, así como estableciendo su proceso de producción deseado.

También aplicando la investigación previa sobre el proceso, se establecerá las partes que influyen como: la velocidad de aumento de temperatura, la temperatura de carga, la temperatura de apagado del horno, paso de aire, entre otros.

2.2.1 Método Inductivo

A través del proceso analítico-sintético se ejecutará la preparación de los materiales y métodos para la obtención de las variables que intervienen en los modelos propuestos por Newton y Page y posterior la construcción de las curvas de la cinética de secado, la instrumentación y mecanismos adecuados para su tabulación.

2.2.2 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Al recopilar los datos de manera bibliográfica, se procede con el análisis de una forma dialéctica y sencilla, por medio de instrumentos de tabulación, obtenidos en gráficos, Tablas estadísticas y porcentajes, en donde se alcance las conclusiones acertando la aclaración. A continuación, se describen de manera teórica los métodos y modelos matemáticos que serán aplicados junto los datos experimentales para la obtención de las variables deseadas según el modelo aplicado.

2.2.2.1 Método de los mínimos cuadrados usado para el análisis del modelo matemático.

A través del método de mínimos cuadrados se calcula la recta de regresión lineal que minimiza los valores errados o residuales en una serie de datos en forma de puntos en un plano, esto es, la diferencia entre los valores reales y la estimación de la recta (Hurtado Cruz, 2017).

Se puede usar los siguientes pasos para encontrar la ecuación de la recta que mejor se ajusta para un conjunto de parejas ordenadas.

- Calcular la media de los valores de “x” y la media de los valores de “y”.
- Realizar la suma de los cuadrados de los valores de “x”.
- Realizar la suma de cada valor de “x” multiplicado por su valor correspondiente “y”.
- Calcular la pendiente de la recta usando la ecuación 7:

$$m = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde

m = pendiente de la recta.

n = número total de puntos de los datos.

- Calcular la intercepción en “y” de la recta usando la fórmula:

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

Donde:

\bar{y} y \bar{x} son las medias de las coordenadas de “x” y “y” de los puntos de datos respectivamente.

- Usar la pendiente y la intercepción en “y” para formar la ecuación de la recta (Varsitytutors, 2023).

2.2.3 Modelos matemáticos usados para la cinética de secado de alimentos

Los modelos matemáticos usados para el análisis del proyecto propuesto son de Newton y Page que son importantes tanto en la literatura como en el proceso de secado, para enriquecer la percepción y comprensión del proceso y confirmar los resultados obtenidos.

2.2.4 Método de recolección de datos de la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación, se ha utilizado la variedad de cacao denominada nacional, que es la más común y que tiene ventajas de robustez y cantidad de producción, frente a otras variedades; la cosecha se la obtuvo en la provincia de Esmeraldas.

El proceso de la cosecha está determinado, por ciertas precauciones de manejo del producto, entre ellas se tiene:

- La coloración del fruto: Es importante reconocer adecuadamente los frutos maduros, por medio de la percepción visual del cambio de coloración de los mismos, las variaciones de color son muy ligeras, lo que acarrea el riesgo de una cosecha prematura. Es adecuado realizar la recolección de los frutos, en el caso de la variedad que se está utilizando en la presente investigación, cuando ellos han tomado una tonalidad anaranjada y/o rojiza – anaranjada. Como se aprecia en la Figura 11.
- Cosecha manual: El proceso de recolección de los frutos debe ser realizado manualmente, con especial atención y cuidado en no lastimar o dañar las vainas en las que crecerán otros frutos el siguiente año, situación que explican con mucho énfasis las personas dedicadas a esta actividad.



Figura 11. Fruto maduro cosechado en la Provincia de Esmeraldas

Una vez realizado el proceso de recolección de los frutos, estos son llevados al área de separación de granos lo que se muestra en la Figura 12. En este lugar se extrae la pulpa del cacao y se analiza la calidad del producto, separando la pulpa idónea, de aquella que se encuentra en un estado de madurez avanzado, ya que los granos muy maduros reducen la calidad del producto final. La pulpa separada según su calidad se transporta en carretillas para iniciar el proceso de fermentado.



Figura 12. Proceso de separación de granos.

Existen varias maneras para realizar el proceso de fermentación, entre ellos: en montones, en sacos (como se observa en la Figura 13), en cajas, y el empleo de secaderos. Consiste básicamente en colocar la pulpa idónea, en cualquiera de los métodos indicados y permitir el paso del tiempo que no debe ser menor a 3 ni mayor a 8 días para obtener buenos resultados.

En el sector en el que se realizó el presente proyecto de investigación, se utilizó el proceso de fermentación con el uso de sacos de yute durante aproximadamente 6 días, rotando el producto contenido en los sacos para que la transformación interna del producto sea la óptima.



Figura 13. Proceso de fermentación mediante sacos de yute.

2.2.5 Secado a temperatura controlada

Una vez finalizado el proceso de fermentación del cacao, se procedió a realizar el proceso de secado a temperatura controlada, se ha considerado el

método de secado indirecto a flujo natural debido a la disponibilidad de los equipos de laboratorio, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se colocan en el horno 12 muestras, de 10 unidades de cacao cada una, con el fin de monitorear el secado de los granos en cada punto del horno en el que se los ubicó. Es necesario señalar que el horno cuenta con un controlador PID, que permite que la temperatura interna sea constante y precisa. Este procedimiento, se lo realizó a diferentes temperaturas, a saber: 50, 60, 70 y 80 grados Celsius. Como se puede ver en la Figura 14.



Figura 14. Horno con doce muestras de diez unidades cada una.

2. Se tabularon las medidas obtenidas de temperatura, peso y humedad de cada muestra, con un período de tiempo de 2 horas, para cada temperatura antes indicada. Se repite el proceso, hasta llegar a obtener una humedad de grano de 7%, que es la humedad requerida en contexto real de producción de cacao para la exportación y consumo.

2.2.6 Equipos utilizados

En el proceso de secado de los granos de cacao, se utilizó un horno con tres resistencias eléctricas de 1000 kW cada uno. Ver Figura 15, la misma que se pueden obtener hasta una temperatura de 1000 °C; cuenta con un controlador PID y un cronómetro para garantizar el proceso en temperatura y tiempo.

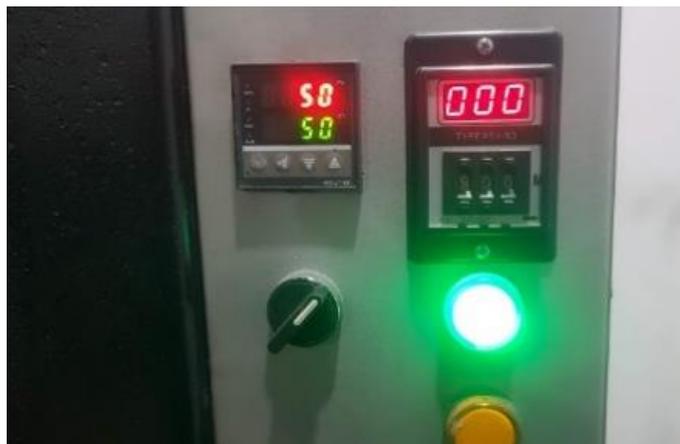


Figura 15 Horno con un rango de temperatura de 0 a 1000°C.

Para el proceso de pesado de los granos, se utilizó una balanza marca Zeus modelo SF 400, Figura 16, que permite medir hasta 10000 g, con un margen de error de 0,0012%.



Figura 16. Balanza Zeus modelo SF-400

Para el proceso de medición de humedad se usó un termohigrómetro modelo LDS-1G, con rangos de medición desde 40% hasta 0.0%, un margen de error 0.2% y una velocidad de respuesta de 10 segundos. Ver la Figura 17. Como dato importante se debe aclarar que las mediciones realizadas con el termohigrómetro van desde el 40% de humedad hasta cero, como la humedad del grano de cacao es mayor al inicio de la parte experimental y al no poder medirlo directamente con el equipo en mención se han hecho los cálculos respectivos con ayuda de la Ec. 2

para poder obtener los valores referencias de perdida de humedad y poder realizar una grafica completa con los valores medidos y calculados.



Figura 17. Termohigrómetro modelo LDS-1G, con rangos de medición desde 40% hasta 0.0%, un margen de error 0.2%

3 CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE NEWTON Y PAGE EN LA CINÉTICA DE SECADO DE CACAO

3.1 Introducción y objetivo del capítulo

La presente investigación pretende encontrar el mejor ajuste de las variables usadas en los modelos matemáticos propuestos por Newton y Page, se evaluó la calidad de ajuste sobre los datos experimentales con el coeficiente de regresión lineal, la suma de los errores cuadrados, la raíz media de los errores cuadrados, de los datos obtenidos se Gráficán las curvas de comportamiento del contenido de humedad en función de la temperatura para el secado de cacao en régimen controlado; en este sentido, en este capítulo se presentan los resultados de las experiencias desarrolladas y el análisis de los resultados del proceso de secado del cacao en condiciones controladas.

La presentación de los resultados y su análisis permite determinar las ventajas y desventajas del proceso en diferentes condiciones de temperatura, tomando medidas de tiempo transcurrido y nivel de humedad obtenido; de esta manera, se obtuvieron los resultados que se presentan en este apartado. Cabe resaltar que, tras la presentación de los resultados, se desarrolla un análisis y discusión tomando como base estudios previos realizados por otros autores, con el fin de cotejar los obtenidos en esta investigación.

El objetivo del presente capítulo es analizar y discutir los resultados obtenidos en el proceso de secado controlado de los granos de cacao en diferentes condiciones de temperatura y tiempo, ajustado con los modelos matemáticos de Newton y Page.

3.2 Datos obtenidos

Una vez concluida la tabulación de datos se obtuvieron los resultados y curvas características que se muestran a continuación, como dato importante a considerar la Tabla 3 se ha considerado lapsos de tiempo de dos horas por facilidad de tabulación y realizar la gráfica respectiva, se debe considerar que en la parte experimental se tomó las mediciones cada hora.

3.3 Datos obtenidos del contenido de humedad

La parte experimental se inicia tabulando la cantidad de humedad inicial y como va reduciendo en el grano de cacao al exponer a temperaturas constantes de 50, 60, 70 y 80°C, además se mide y tabula el peso de cada muestra dividido para el número de granos de cacao expuestos a las diferentes temperaturas en lapsos de tiempo de una hora, se corrobora la pérdida de humedad calculando el contenido de humedad mediante la ecuación 8, para una mejor interpretación se ha dividido en dos Tablas por la variación de tiempo al secar el grano de cacao, ver Tablas 3 y 4.

$$\%H = \frac{m_o - m_f}{m_o} 100 \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

$\%H$: Humedad del producto en porcentaje.

m_o : Peso inicial de la muestra en gramos

m_f : Peso final de la muestra en gramos

Tabla 3. Datos de humedad obtenidas a temperaturas de 50 a 60 grados Celsius.

Tiempo en Horas	Temperatura					
	50°C			60°C		
	MASA (gr)	%H medida	%H calculada	MASA	%H medida	%H calculada
0	3.50	50.00	48.00	3.60	51.00	48.20
1	3.00	35.00	43.44	2.96	35.00	37.33
3	2.72	32.27	40.29	2.64	31.76	36.10
5	2.52	31.64	36.53	2.55	30.85	33.15
7	2.28	27.90	32.47	2.34	27.60	28.76
9	2.03	24.88	28.13	2.03	24.05	24.85
11	1.76	20.98	24.51	1.75	20.88	21.51
13	1.53	17.41	21.15	1.52	17.21	18.02
15	1.32	14.71	17.53	1.27	14.93	14.21
17	1.10	12.39	14.71	1.00	11.28	12.95
19	0.92	9.97	10.27	0.91	10.21	10.00
21	0.64	7.42	9.60	0.90	6.57	9.00
22	0.60	5.30	7.00	0.90	4.00	7.52
23	0.59	3.20	4.20	0.89	3.80	5.10
24	0.59	3.00	4.10	-	-	-

Nota: Tabla de datos obtenidos de manera experimental con el termohigrómetro y calculados según la ecuación 8.

La Tabla 4 muestra los valores de humedad obtenidos mediante el termohigrómetro y calculados, se observa la reducción del tiempo de secado exponiendo el grano de cacao a temperaturas altas.

Tabla 4. Datos de humedad obtenidas a temperaturas de 70 a 80 grados Celsius.

Tiempo en Horas	Temperatura					
	70°C			80°C		
	MASA (gr)	%H medida	%H calculada	MASA	%H medida	%H calculada
0	3.80	50.00	45.39	3.60	55	48.88
1	3.00	34.00	38.82	3.00	34.50	32.98
2	2.95	32.00	37.76	2.91	31.45	32.53
3	2.87	31.00	36.41	2.87	29.00	30.03
4	2.77	27.80	32.75	2.65	26.00	27.88
5	2.49	25.00	29.34	2.46	23.00	27.20
6	2.23	22.50	27.49	2.40	21.00	25.94
7	2.09	20.40	25.27	2.29	20.00	23.80
8	1.92	19.70	24.80	2.10	19.00	22.67
9	1.89	18.89	23.03	2.00	17.92	21.53
10	1.75	17.25	20.16	1.90	17.00	19.14
11	1.53	15.19	18.54	1.69	14.75	17.99
12	1.41	13.75	16.34	1.59	12.00	11.82
13	1.24	12.98	14.82	1.04	8.98	10.29

14	1.13	11.28	13.00	0.91	7.97	7.93
15	0.99	10.21	10.38	0.70	6.90	7.93
16	0.79	7.21	8.77	0.70	5.50	7.82
17	0.67	6.57	7.00	0.69	5.00	6.00

Nota: Tabla de datos obtenidos de manera experimental con el termohigrómetro y calculados según la ecuación 8.

3.3.1.1 Comparativa gráfica entre la humedad medida y calculada a 50, 60, 70 y 80°C

La Figura 18 muestra las mediciones realizadas con el termohigrómetro en función del tiempo a 50 °C, para la temperatura de análisis se tiene una reducción de humedad en 24 horas hasta llegar a la humedad de equilibrio, además se tiene una comparativa con valores calculados con ayuda del peso medido en una balanza.

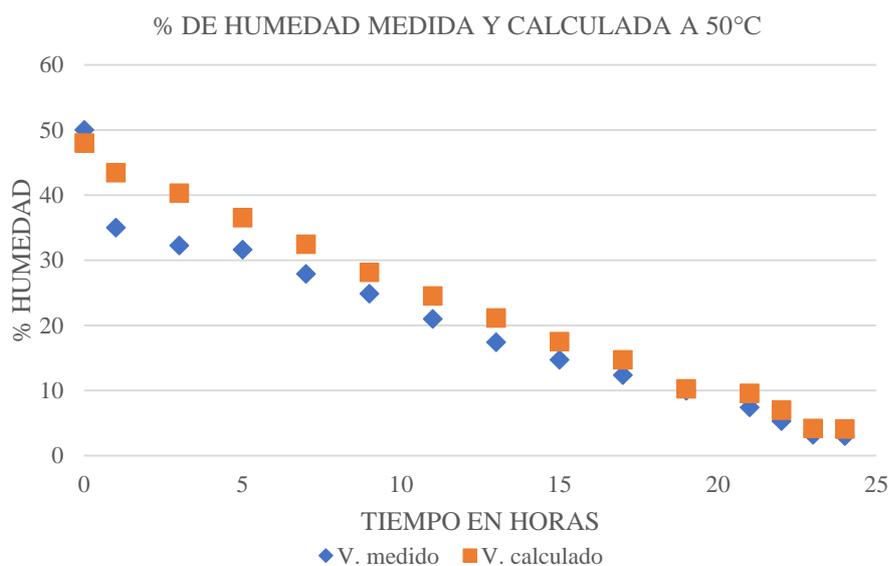


Figura 18. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 50°C

En la Figura 19 se muestra el comportamiento de la humedad en función de la temperatura a 60°C, al igual que el caso anterior se gráfica los valores medidos con los calculados con ayuda del peso medido.

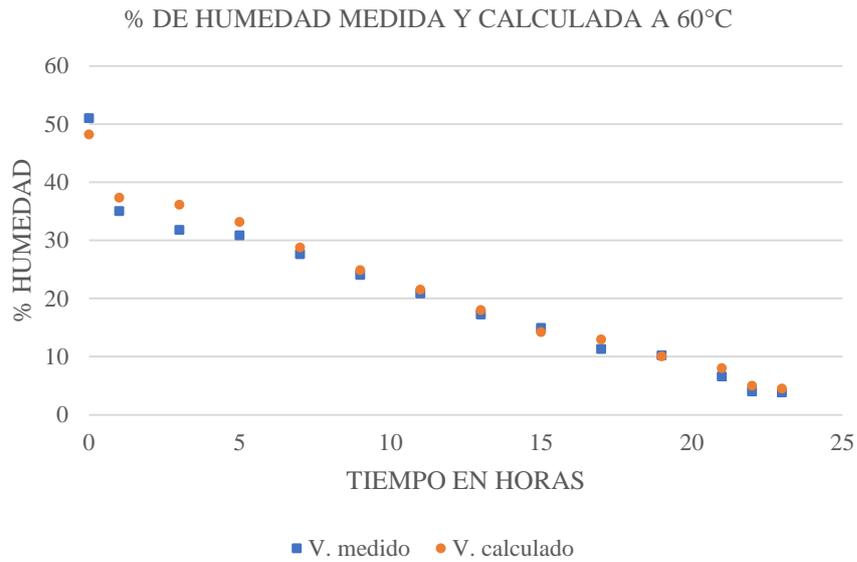


Figura 19. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 60°C

La Figura 20 muestra los valores de humedad y tiempo a una temperatura constante a 70°C, se puede ver una reducción notable de tiempo en el secado del grano de cacao.

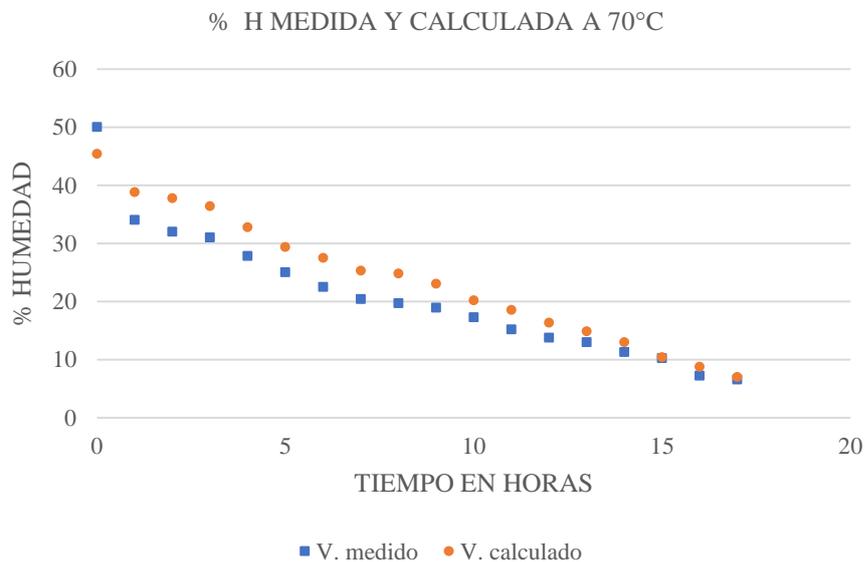


Figura 20. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 70°C

En la Figura 21 se muestra como varía el tiempo respecto a los casos anteriores, su secado es más rápido referente a la aplicación de temperatura de 50 y 60°C.

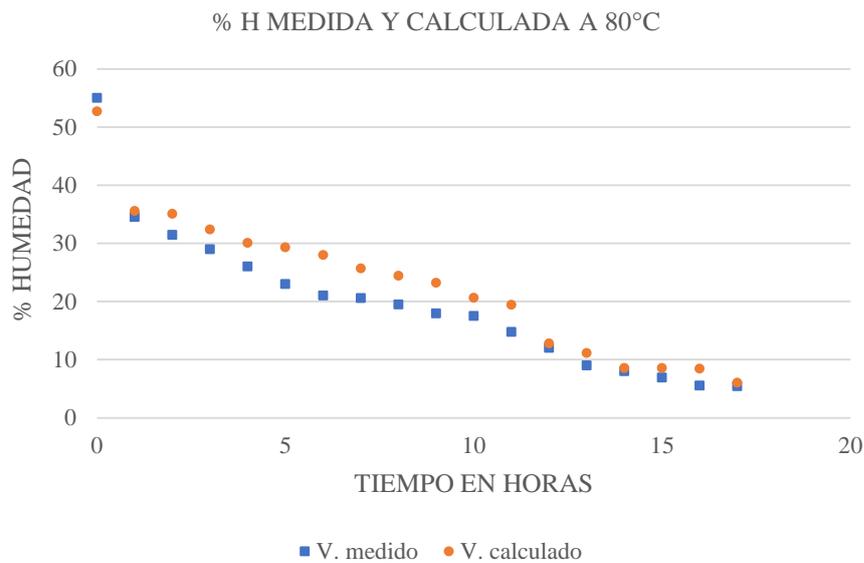


Figura 21. Gráfica comparativa de humedad medida con el equipo y la calculada a una temperatura de 80°C

En todos los casos se muestra que tanto la humedad medida como calculada existen variaciones mínimas en el proceso de secado, lo que denota que hay una analogía entre la teoría y la práctica.

En la presente investigación los datos obtenidos en el proceso de secado de los granos de cacao, realizados por el investigador, se han comparado con evidencias previas obtenidas en investigaciones realizadas con anterioridad y, se han realizado comparaciones con modelos matemáticos predefinidos por investigadores expertos. Con lo expuesto, los modelos matemáticos que mejor se ajustaron al secado de granos planteado en este trabajo, fueron los de Newton y Page, ya que la aproximación a la difusión, que dichos modelos obtienen, muestra incidencias significativas contrastadas con los datos experimentales obtenidos.

Por otro lado, es necesario indicar que la capacidad de germinación de las semillas de cacao sometidas a un proceso de secado artificial, reducen su capacidad germinativa ya que el secado con la utilización de hornos, producen un daño en la semilla que reduce su capacidad de germinación, tal como lo manifiesta. (Rangel, et al., 2011)

“El efecto del secado se reflejó en una reducción ($P \leq 0.05$) de la germinación y la muerte de la semilla cuando el secado fue inferior a 200 g

$H_2O \text{ kg}^{-1}$ pf. Con la humedad de cosecha ($617 \text{ g } H_2O \text{ kg}^{-1}$ pf) la germinación promedio fue de 94 %, la cual disminuyó en más de 50 % al reducir la humedad de la semilla a $300 \text{ g } H_2O \text{ kg}^{-1}$ pf y en 100 % cuando la humedad se redujo por abajo de $200 \text{ g } H_2O \text{ kg}^{-1}$ pf.

Por lo tanto, la capacidad germinativa de los granos de cacao sometidos a un proceso de secado acelerado, se reducen significativamente.

3.3.2 Resultados aplicando el modelo Newton

Para tener una referencia comparativa se ha considerado la investigación de Buñay y Rosales en su trabajo Diseño básico de un secador de bandejas para el tratamiento de la almendra de cacao CCN-51 y cacao fino de la Provincia del Guayas. en donde se tiene valores de temperatura similares desde 40 a 60°C, usando el modelo matemático propuesto por Newton, en la Tabla 5 se observa como el coeficiente de humedad aumenta de manera periódica según aumenta la temperatura.

Tabla 5. Datos de humedad obtenidas a temperaturas de 40 a 60 grados Celsius.

SECADO ARTIFICIAL CCN-51 (Velocidad aire 0.5-0.7 m/s)				
MODELO	PARÁMETROS	40 °C	50°C	60°C
Newton	k	0.07699	0.20423	0.29319
	RMSE	0.04104	0.03468	0.01737
	R2	0.97890	0.99126	0.99687

Nota: Tabla de “k, RMSE, R2” obtenidos de manera experimenta según el modelo de Newton (Buñay & Rosales, 2019).

En la Figura 22 se observa las curvas de secado con el valor de “k” obtenidos de manera bibliográfica, trabajo realizado por Buñay y Rosales mediante el modelo de Newton.

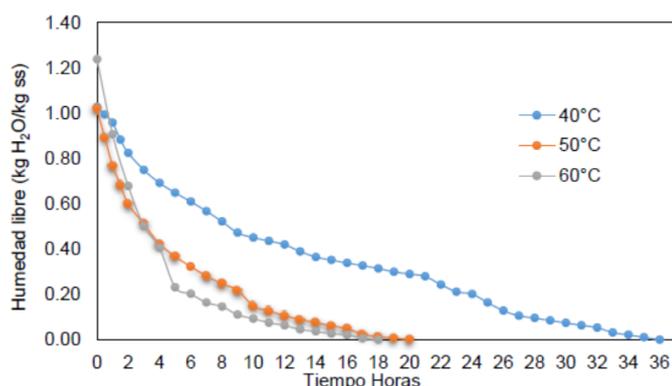


Figura 22. “k” obtenidos de manera bibliográfica, trabajo realizado por Buñay y Rosales mediante el modelo de Newton
Fuente: (Buñay & Rosales, 2019).

A partir de los datos obtenidos mediante la parte experimental y con ayuda del modelo matemático no lineal “Newton” $MR = \exp(-kt)$ se obtiene la Tabla 6, en donde se aplica el método de los mínimos cuadrados y con ayuda de la herramienta Solver se obtiene el valor de “k” con valores optimizados.

Tabla 6. Cinética de secado en la variación de tiempo a temperaturas de 50 a 80 grados Celsius.

TIEMPO EN HORAS	VALORES DE TEMPERATURA							
	50°C		60°C		70°C		80°C	
	EXPERIM.	AJUSTE	EXPERIM.	AJUSTE	EXPERIM.	AJUSTE	EXPERIM.	AJUSTE
2	0.500	0.697	0.510	0.691	0.500	0.628	0.550	0.579
3	0.350	0.582	0.350	0.574	0.340	0.498	0.345	0.440
5	0.323	0.406	0.318	0.396	0.310	0.313	0.230	0.255
7	0.316	0.283	0.309	0.274	0.250	0.196	0.195	0.148
9	0.279	0.197	0.276	0.189	0.197	0.123	0.175	0.085
11	0.249	0.138	0.241	0.131	0.189	0.077	0.120	0.049
13	0.210	0.096	0.209	0.090	0.152	0.049	0.080	0.029
15	0.174	0.067	0.172	0.062	0.130	0.031	0.055	0.017
17	0.147	0.047	0.149	0.043	0.102	0.019	0.054	0.010
19	0.124	0.033	0.113	0.030	0.066	0.012	-	-
21	0.100	0.023	0.102	0.021	-	-	-	-
22	0.074	0.019	0.066	0.017	-	-	-	-
23	0.053	0.016	0.040	0.014	-	-	-	-
24	0.032	0.013	0.038	0.012	-	-	-	-
25	0.030	0.011	-	-	-	-	-	-

Nota: Tabla de datos obtenidos de manera experimental y analizados según el modelo de Newton

La Figura 23 muestra las curvas obtenidas de manera experimental, la variación de humedad en función de la temperatura del secado del cacao a temperaturas de 50, 60, 70 y 80°C. Teniendo en cuenta la humedad inicial del

cacao y la temperatura aplicada, da como resultado una disminución considerable de tiempo, es importante considerar el control constante de la humedad final a temperaturas de 70 y 80°C.

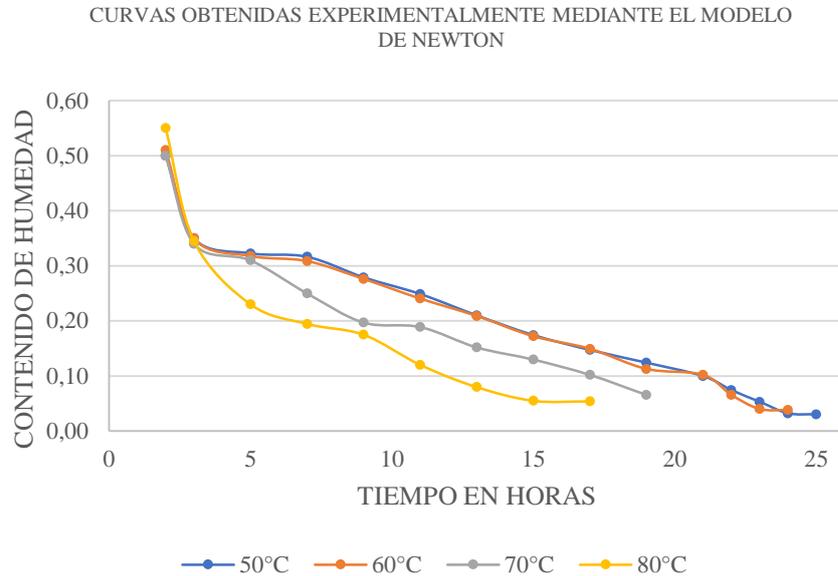


Figura 23. Comparación de resultados obtenidos de manera experimental aplicando el ajuste mediante el método de mínimos cuadrados.

En las Figuras 24, 25, 26 y 27 se aprecia el comportamiento del secado de cacao a 50, 60, 70 y 80°C de manera experimental, se tiene los puntos de dispersión sin ningún tipo de ajuste y también el modelo ajustado mediante el método de mínimos cuadrados.

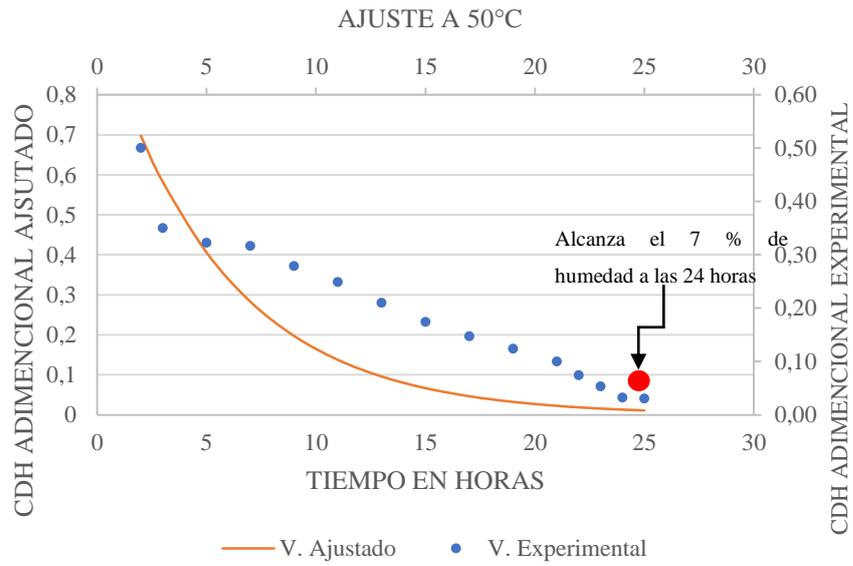


Figura 24. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 50 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.

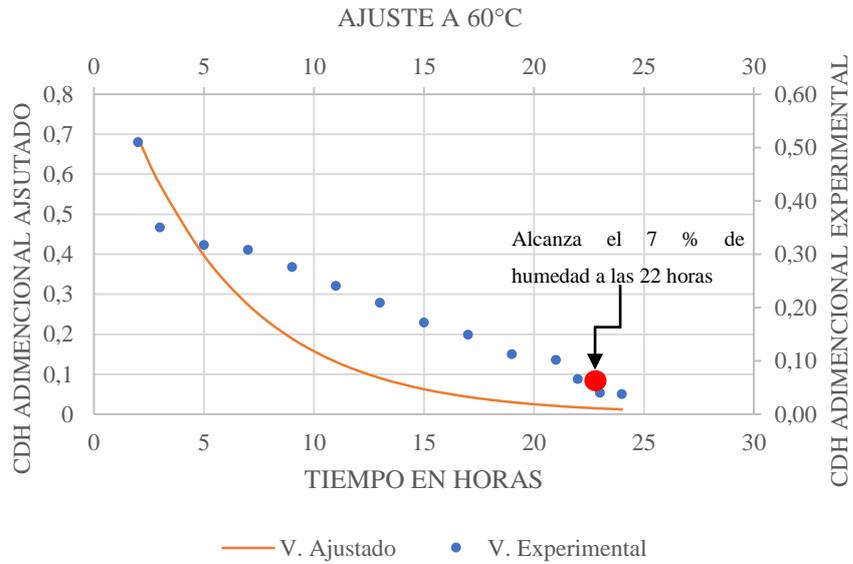


Figura 25. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 60 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.

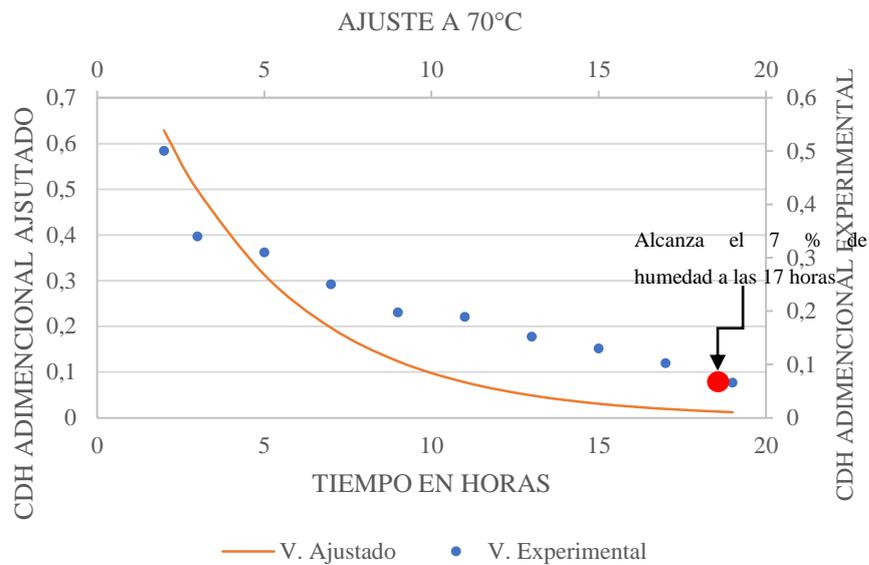


Figura 26. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 70 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.

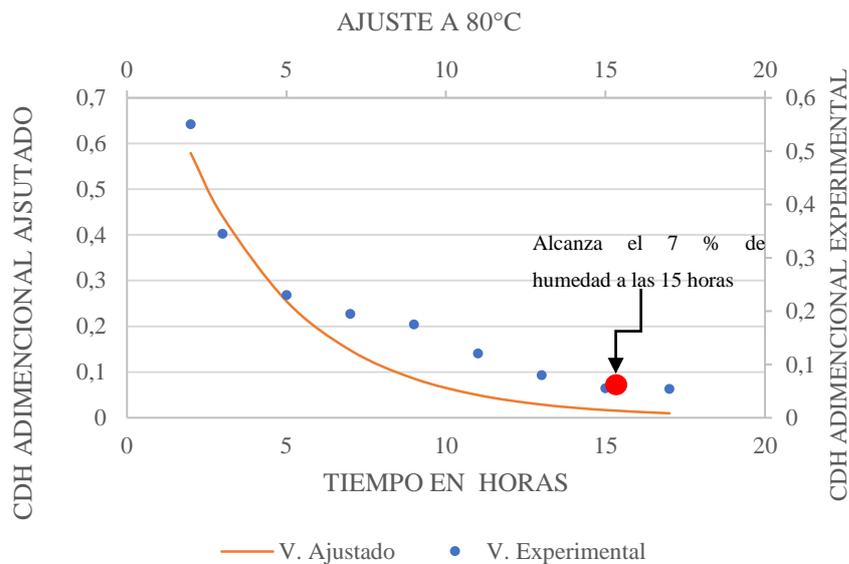


Figura 27. Comparación de resultados de humedad a una temperatura de 80 grados Celsius, según experimentos realizados y aplicando el mejor ajuste de optimización.

La Tabla 7 muestra valores comparativos de “k” entre la bibliografía y los valores obtenidos de manera experimental a diferentes temperaturas con ayuda de la herramienta solver, lo que nos genera el mejor ajuste para el modelo propuesto según los datos obtenidos de manera experimental, se aprecia un mejor ajuste y coeficiente de correlación es a 70°C.

Tabla 7. Valores comparativos de “k”.

T °C	“k” Bibliográfica	T °C	“k” experimental	R
40 °C	0.0769	50 °C	0.1803	
50 °C	0.2042	60 °C	0.1850	
60 °C	0.2932	70 °C	0.2325	0.8472
-	-	80 °C	0.2733	

Nota: Tabla comparativa del valor de “k” entre valores bibliográficos y los obtenidos mediante el ajuste de la parte experimental según el modelo de Newton.

3.3.3 Resultados aplicando Page

Al igual que el modelamiento propuesto por Newton se toma como referencia la investigación de Buñay y Rosales en su trabajo Diseño básico de un secador de bandejas para el tratamiento de la almendra de cacao CCN-51 y cacao fino de la Provincia del Guayas. en donde se tiene valores de temperatura similares desde 40 a 60°C. Según el modelo matemático propuesto por Page se obtiene los valores de “k”, “n”, “RME” y “R2” lo que se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Valor de “k” y “n” de fuentes bibliográficas en el modelo de Page.

SECADO ARTIFICIAL CCN-51 (Velocidad aire 0.5-0.7 m/s)				
MODELO	PARÁMETROS	40 °C	50°C	60°C
Page	k	0.09476	0.26606	0.32207
	n	0.92415	0.85131	0.93500
	RMSE	0.03986	0.02191	0.01585
	R2	0.98222	0.99540	0.99714

Nota: Tabla comparativa del valor de “k” y “n” entre valores bibliográficos a diferentes temperaturas mediante el ajuste según el modelo de Page.

Los datos obtenidos de manera experimental se tabularon y mediante el modelo de Page que esta expresado como: $MR = \exp(-kt^n)$ se obtiene la Tabla 9 donde se muestra la optimización del modelo mediante el método de mínimos cuadrados.

La Tabla 9 muestra los datos de humedad obtenidos de manera experimental y usando el modelo de Page con la ecuación 3, se tiene el valor de “k” y “n” mediante el promedio del error entre el valor obtenido de manera experimental, se usa la herramienta solver la cual ayuda a encontrar el mejor ajuste del valor de “k” y “n” que cumpla con las condiciones de un mínimo error entre el valor experimental y el modelo de Page.

Tabla 9. Valores de humedad obtenidas en las muestras de cacao al ser sometidas a diferentes temperaturas y tiempos determinados de manera experimental y aplicando el modelo de Page.

TIEMPO EN HORAS	VALORES DE TEMPERATURA							
	50 °C		60 °C		70 °C		80 °C	
	EXPERIMENTAL	AJUSTADO	EXPERIMENTAL	AJUSTADO	EXPERIMENTAL	AJUSTADO	EXPERIMENTAL	AJUSTADO
2	0.5000	0.4968	0.5100	0.4950	0.5000	0.4578	0.5500	0.4950
3	0.3500	0.4253	0.3500	0.4240	0.3400	0.3771	0.3450	0.3960
5	0.3230	0.3326	0.3180	0.3320	0.2500	0.2754	0.2300	0.2690
7	0.3160	0.2725	0.3090	0.2720	0.1970	0.2122	0.1950	0.1920
9	0.2790	0.2294	0.2760	0.2300	0.1890	0.1688	0.1750	0.1410
11	0.2490	0.1967	0.2410	0.1970	0.1520	0.1373	0.1200	0.1060
13	0.2100	0.1710	0.2090	0.1720	0.1300	0.1136	0.0800	0.0800
15	0.1740	0.1502	0.1720	0.1510	0.1020	0.0951	0.0550	0.0620
17	0.1470	0.1330	0.1490	0.1340	0.0660	0.0805	0.0540	0.0490
19	0.1240	0.1187	0.1130	0.1200	-	-	-	-
21	0.1000	0.1065	0.1020	0.1080	-	-	-	-
22	0.0740	0.1011	0.0660	0.1020	-	-	-	-
23	0.0530	0.0961	0.0400	0.0970	-	-	-	-
24	0.0320	0.0914	0.0380	0.0930	-	-	-	-
25	0.0300	0.0871	-	-	-	-	-	-

La Figura 28 representa las curvas de la cinética de secado de cacao con los datos obtenidos de manera experimental y los valores de “k” y “n” propios obtenidos de manera experimental.

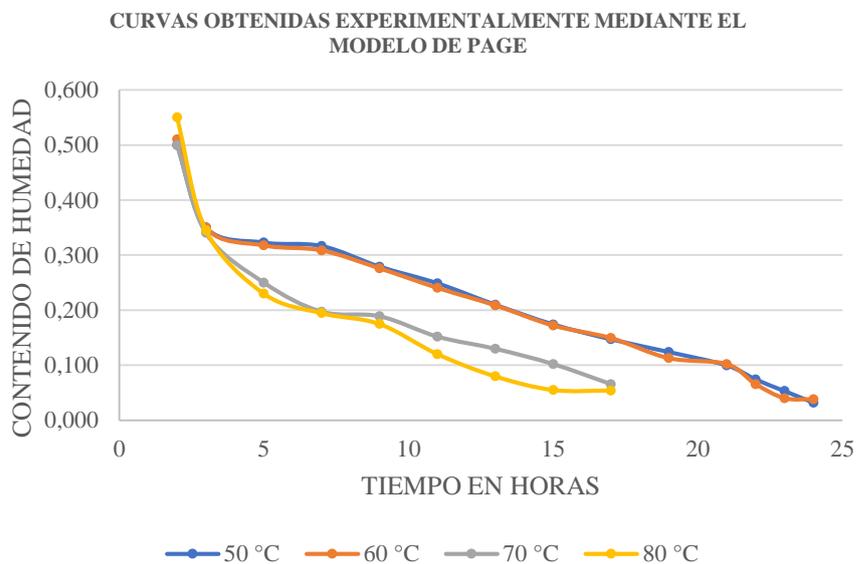


Figura 28. Comparación de resultados a las diferentes temperaturas, según los datos obtenidos en el proceso investigativo.

En la Figura 29 se aprecia la comparativa de las curvas de secado a una temperatura de 50°C, consta de las curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados, se aprecia de manera visual el margen mínimo de error existentes entre los dos casos.

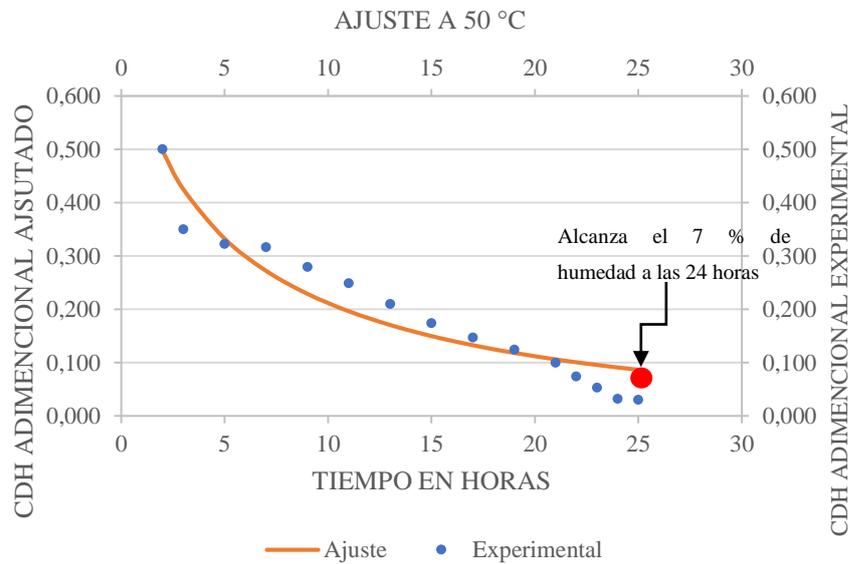


Figura 29. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 50 grados Celsius.

En la Figura 30 se ve la relación de humedad en función de la temperatura a 60°C, de manera experimental y realizado los ajustes de optimización mediante el método de mínimos cuadrados usando el modelo de Page.

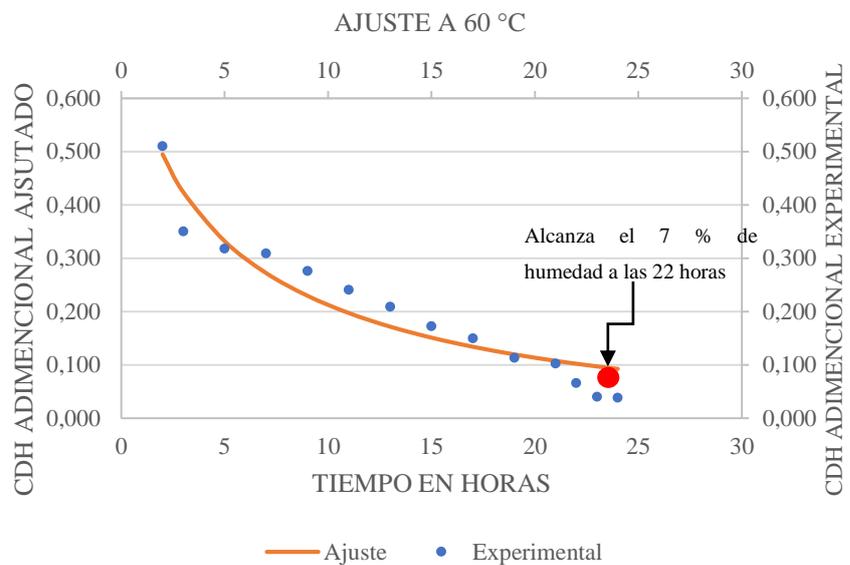


Figura 30. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 60 grados Celsius.

En la Figura 31 se ve la comparativa a una temperatura de 70°C de los valores obtenidos de manera experimental y realizado el ajuste.

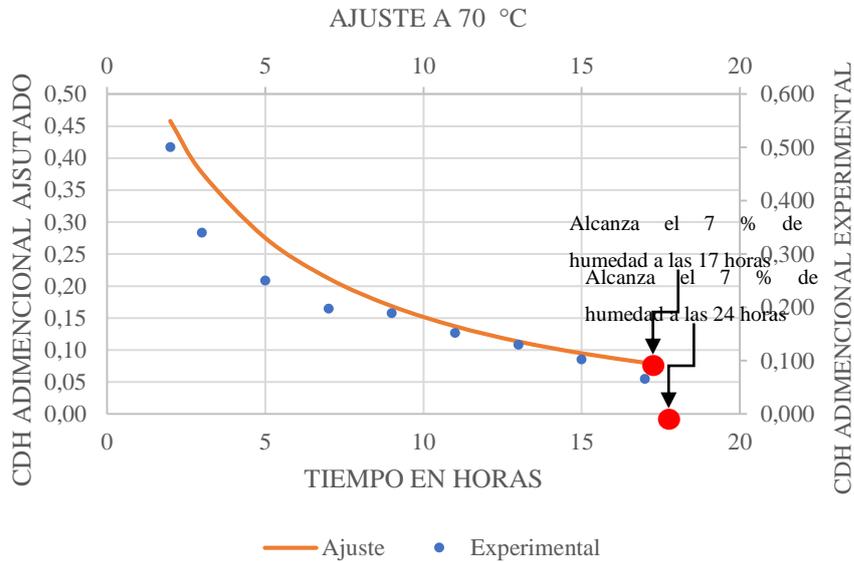


Figura 31. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 70 grados Celsius.

La Figura 32 muestra las curvas de la cinética de secado de cacao a 80°C, se aprecia un error mínimo entre los datos obtenidos entre lo experimental y ajuste realizado.

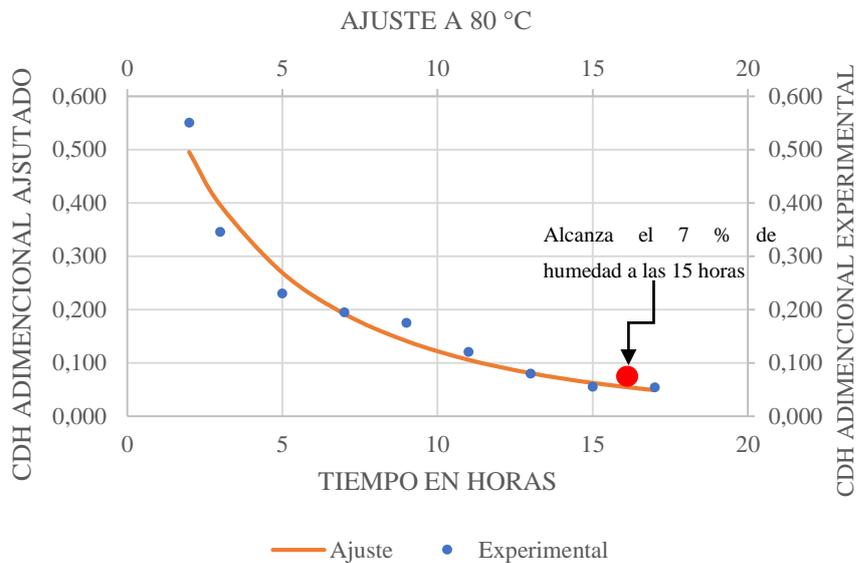


Figura 32. Comparación de curvas según información obtenida de manera experimental y con los ajustes realizados según el método de los mínimos cuadrados en el modelo de Page, a una temperatura de 80 grados Celsius.

Para la aplicación del modelo de Page, es necesario contar con el cálculo de regresión no lineal, en la cual se obtienen “k” y “n” con la obtención del error con la suma de mínimos cuadrados y la herramienta Solver, se tabulan además los valores que son propuestos por autor de investigaciones similares.

En la Tabla 10 se muestra los valores de “k” y “n” calculados de manera experimental y bibliográfica, se obtienen valores aceptables lo que refleja un mejor ajuste del error de los datos obtenidos mediante la parte experimental.

Tabla 10. Comparativa de factores “k” y “n” que intervienen en el modelo de Page, obtenidas de manera calculada y Bibliográfica.

Bibliográfica			Experimental			R (coeficiente de correlación)
T °C	K	n	T °C	k	n	
40	0.0947	0.9241	50 °C	0.4964	0.4949	0.9066
50	0.2660	0.8513	60 °C	0.5007	0.4904	0.9133
60	0.3220	0.9350	70 °C	0.5347	0.5471	0.9644
			80 °C	0.4384	0.6818	0.9588

3.4 Discusión de resultados

De los resultados obtenidos, se puede colegir que se obtienen efectos óptimos de secado del cacao, a las temperaturas de 50 a 80 grados Celsius, en las 24 horas del proceso, lo que es coherente con investigaciones previas en las que se ha demostrado que los tiempos y temperaturas óptimas se encuentran en temperaturas superiores a los 50 grados Celsius y tiempos superiores a las 12 horas de secado.

Como lo manifiestan (Jiménez F., Ortegón C. y Ortega D., 2016) “En el secado de cacao la humedad de equilibrio fue alcanzada más rápidamente a 60°C y 20 m s-1. Este tipo comportamiento ha sido evidenciado en otros estudios, donde la diferencia en la cinética de secado radica en la rapidez en la que se

alcanza la humedad de equilibrio, lo cual varía de acuerdo al tipo de secador y las condiciones propias del proceso”.

De igual manera manifiestan (Ndukwu MacManus Chinenye, A.S. Ogunlowo, 2010) “La gráfica de datos de contenido de agua (en db) con el tiempo (en h) mostraron un comportamiento exponencial; por lo tanto, se corrió una regresión exponencial para las temperaturas aplicadas usando Microsoft Excel. el coeficiente de correlaciones para las cuatro temperaturas de secado de 50, 60, 70 y 80° C utilizados fueron 0.90, 0.91, 0.96 y 0.95. Este mostró un alto grado de asociación para las dos variables considerado y destaca el comportamiento de la curva que mostró una disminución del contenido de agua con el tiempo”.

Por otro lado, de las comparaciones realizadas entre los datos experimentales obtenidos y los datos de fuentes bibliográficas, de los modelos contrastados, es decir Newton y Page, se colige que la presente investigación arroja resultados muy similares a las investigaciones realizadas por Page, sin dejar de lado las pocas variaciones encontradas con el modelo de Newton, lo que corrobora la efectividad de las mediciones realizadas en campo.

Cálculos adicionales que se pueden analizar, en especial cuando nos encontramos frente a una producción industrial de cacao son por un lado el parámetro watts/gramo, que corresponde a la cantidad de energía expresada en watts, dividido para la cantidad de gramos obtenidos de producto; y por otro el parámetro de dólares/gramo, que corresponde a los costos totales de producción, divididos para la cantidad de gramos obtenidos de producto final. Se debe anotar que este tipo de cálculos tienen una gran importancia en la industria, pero dentro de la presente investigación en la que se busca determinar el proceso de secado óptimo para los granos de cacao en hornos, no tienen representatividad significativa, considerando el equipo usado que tiene 3 resistencias de 1000 watts y un tiempo de experimentación de 83 horas a las cuatro temperaturas diferentes da un consumo de 249 kWh, sabiendo que el valor de cada kWh está a nueve centavos de dólar, lo que nos da un consumo de 22.9 dólares, en tiempo que duro el experimento. Calculando el precio por gramo resulta 19centavos de dólar por gramo de cacao secado.

En adición existe el método de secado con la utilización de hornos microondas, como lo manifiesta (Nelson, 1986):

“La difusión de la energía por microondas para el calentamiento y cocción de alimentos, que se ha expandido por todo el mundo, ha predispuesto a probar el sistema para el secado de granos. Las experiencias realizadas han sido promisorias en cuanto a la mayor velocidad de secado, pero han ocasionado algunos problemas de deterioro de la calidad de los granos, similares a los del secado convencional. Por otro lado, el alto costo de este procedimiento lo limita por ahora, solamente, a experiencias de laboratorio”

En este sentido, si bien la utilización de la microonda permite una aceleración considerable en el secado de granos y uniformidad en el proceso, esta tecnología, a diferencia de los hornos eléctricos, no permite un adecuado control de temperatura; por otro lado debido a la capacidad y costos que representa, hasta la actualidad se mantiene como un proceso a nivel de laboratorio, sin usos a nivel industrial.

Por tanto, los resultados obtenidos en la presente investigación, son válidos y representan un apoyo a la obtención de granos secos de cacao que favorecen el acopio, movilización y todo el proceso de industrialización posterior del producto, manteniendo niveles de calidad óptimos que permiten una adecuada transformación y comercialización de los productos elaborados en base a este grano; todo esto apoyado, además, por investigaciones anteriormente realizadas, sobre la cinética del secado del grano de cacao.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Para el proceso de secado artificial del grano de cacao, a temperaturas controladas, realizado en la presente investigación, los valores de las constantes usados en el modelo se encuentra en rangos aceptables: para el modelo de Newton el valor de “k” obtenido de manera experimental aplicadas al modelo matemático nos da un coeficiente de correlación de 0.9644, los valores de “k” y “n” obtenidos y aplicados para el modelo de Page es 0.5347 y 0.5471 respectivamente.

Se obtiene como resultado que la opción más eficiente de secado de cacao es el uso de mayor temperatura a 80 °C, ya que se reduce el tiempo de secado, no obstante, el presente estudio no evaluó variaciones en las propiedades organolépticas del producto final.

El proceso de la cinética de secado, ayuda a los productores nacionales, a conseguir en ambientes controlados y en períodos cortos de tiempo, un producto adecuado y de óptimas características para su exportación y consumo, reduciéndose el proceso de secado a tiempos de entre 15 y 17 horas, lo que les permitirá acortar ser más competitivos en el mercado nacional e internacional y obtener granos con una cantidad de humedad reducida que favorece a su transporte y transformación de los mismos.

Los resultados obtenidos en la presente investigación, muestra que el proceso de secado arrojó valores muy útiles para ser utilizados en la estandarización de procesos de secado, que permitan la industrialización y aprovechamiento de estos procesos, en bien de un mayor aprovechamiento de los productos y de la comercialización de un grano seguro y de óptima calidad.

4.2 Recomendaciones

Es importante tener en cuenta que la parte experimental se realice en contexto real, es decir, que la variable de humedad del ambiente donde se desarrolla el experimento tenga la misma humedad que en los sectores donde se produce y procesa el cacao, para, de esta manera considerar la absorción de

humedad al momento de realizar las mediciones necesarias en la cinética de secado de cacao.

Evaluar el consumo energético al momento de realizar el proceso de secado de cacao de manera artificial, para considerar los gastos en función de la cantidad de cacao secado, de esta manera constatar la optimización de recursos sin sacrificar la calidad del producto.

En caso de replicar el proceso se recomienda mantener las mediciones en periodos de tiempo más cortos, aproximadamente cada media hora, para evitar saltos muy bruscos en las gráficas obtenidas en la cinética de secado del cacao.

Al existir varias tecnologías para la eliminación de humedad y al contrastar con información bibliográfica se puede aplicar la tecnología de microondas para aplicar a la cinética de secado de cacao de manera experimental.

Bibliografía

- Academy, K. (2018). <https://es.khanacademy.org/>. Obtenido de <https://es.khanacademy.org/math/differential-equations/first-order-differential-equations/exponential-models-diff-eq/v/applying-newtons-law-of-cooling-to-warm-oatmeal>
- Anecacao. (01 de 05 de 2019). *Anecacao*. (Anecacao) Recuperado el 03 de 05 de 2022, de <http://www.anecacao.com/es/quienes-somos/historia-del-cacao.html>
- Bolívar, G. (2020). *Ley de Fick*. Lidefer.
- Buñay, J., & Rosales, B. (2019). Diseño básico de un secador de bandejas para el tratamiento de la almendra de cacao CCN-51 y cacao fino de la Provincia del Guayas. *Diseño básico de un secador de bandejas para el tratamiento de la almendra de cacao CCN-51 y cacao fino de la Provincia del Guayas*. Escuela Superior Politecnica Del Litoral, Guayaquil.
- Canaria, U. d. (02 de 2003). <http://www.ulpgc.es>. Obtenido de http://www2.ulpgc.es/descargadirecta.php?codigo_archivo=5206
- Carrillo, A. R. (s.f.). *Ley de enfriamiento de Newton*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/belcebott/ley-de-enfriamiento-de-newton>
- Chavéz, R., Carbo, C., Garcia, E., & Cobos, X. (2019). Estudio socio-económico del cultivo de cacao (theobroma cacao l.) En la parroquia Febres Cordero, cantón Babahoyo los ríos-Ecuador”. *Observatorio de la Economía Latinoamericana, En Linea*, 16.
- Cobos, E. (2021). Ecuador tiene en el cacao una oportunidad de oro. *Gestion*, 2(1), 2.
- Ganadería, M. d. (01 de 02 de 2019). *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. (Ministerio de Agricultura y Ganadería) Recuperado el 03 de 05 de 2022, de <https://www.agricultura.gob.ec/cacao-hibrido-ccn-51-cuenta-con-certificacion-de-calidad/>

- Giraldo, A. (2010). *Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum) en rodajas*. Campinas.
- González, M. (2020). La competitividad del sector cacaoero en el Ecuador y su incidencia en la comercialización del cacao ecuatoriano a nivel internacional período 2015-2018. *V congreso científico internacional*. Guayaquil.
- Guachamin Velásquez, C. D. (2008). *Diseño de un secador de granos de cacao fino*. Escuela Politecnica Nacional.
- Gutierrez, F., Arias, S., Garzon, D., Martinez, F., Osorio, A., & Restrepo, S. (2011). Modelamiento de la operación unitaria de deshidratación bajo diferentes esquemas de secado. *Vector*, (págs. 100-110). Caldas.
- Hurtado Cruz, E. R. (1 de 1 de 2017). *Calculo Diferencial e Integral III*. Obtenido de UNAM: https://sistemas.fciencias.unam.mx/~erhc/calculo3_20171/derivadas_parciales_direccionales_2016_12.pdf
- INEN, N. (11 de 07 de 2017). *Ecuador Patente n° 67.140.30*.
- Jibaja Soria, M. G., & Peñaherrera González, N. D. (2021). *Estudio de métodos de fermentación y secado del cacao*. Universidad Central del Ecuador.
- Jiménez F., Ortegón C. y Ortega D. (2016). *Análisis del proceso de deshidratación de cacao (Theobroma cacao L.) en túnel de secado continuo*. Villavicencio: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad de los Llanos.
- Kakaoforum. (21 de enero de 2021). Principales productores de cacao en el mundo. *El confinamiento aumentó el consumo de cacao en el mundo*, pág. 5.
- Ndukwu MacManus Chinenye, A.S. Ogunlowo. (2010). *COCOA BEAN (Theobroma cacao L.) DRYING KINETICS*. CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH.

- Nelson, S. O. (1986). Potential agricultural applications for RF and microwave energy. *ASAE, St. Joseph Michigan*, 11.
- Nogales, R. (01 de 08 de 2018). *Post cosecha cacao*. (Poscosecha Cacao) Recuperado el 28 de 04 de 2022, de <https://poscosechacacao.blogspot.com/2017/09/trazabilidad-en-la-cadena-productiva.html>
- Noroña, L. D. (2018). Cinética de secado de cereales provenientes de la Región Centro del Ecuador. *Cinética de secado de cereales provenientes de la Región Centro del Ecuador*. Universidad Tecnica de Ambato, Ambato.
- Ozdemir, M. (24 de Agosto de 1999). <https://www.researchgate.net/>. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/222014286_Thin_layer_drying_characteristics_of_hazelnuts_during_roasting
- Page, G. E. (1949). *FACTORS INFLUENCING THE MAXIMUM RATES OF AIR DRYING SHELLLED CORN IN THIN LAIERS*. Purdue University.
- Quispe Bravo, G. G. (2022). *Estudio de un modelo de horno para secado de Theobroma Cacao*. Universidad Catolica Santiago de Guayaquil.
- Rangel, A., Córdova, L., López, A., Delgado, A., Zavaleta, H., & al, e. (2011). Tolerancia a la desecación en semillas de tres orígenes genéticos de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Fitotécnica Mexicana*, 175 - 182.
- Republica del Cacao. (1 de Marzo de 2019). *Republica del Cacao*. (Republica del Cacao) Recuperado el 16 de 04 de 2022, de <https://republicadelcacao.com/es/blogs/news/cacao-nacional-in-the-motherland-of-cacao>
- Samaniego, S. (2019). *Gobernanza de la cadena de cacao en Ecuador*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.
- UTN. (02 de 02 de 2022). *utn.edu*. Obtenido de <https://frh.cvg.utn.edu.ar>
- Valle, C. F. (10 de 04 de 2014). *Fortaleza del Valle*. (Fortaleza del Valle) Recuperado el 17 de 04 de 2022, de <https://fortalezadelvalle.org/ecuador-tiene-dos-tipos-de-cacao/>

- Varsitytutors. (01 de 01 de 2023). *varsitytutors*. Obtenido de https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/line-of-best-fit
- Vásquez, G. (2017). *Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao*. Universidad de Piura.
- WEG. (05 de 11 de 2014). *www.weg.net*. Obtenido de <https://www.weg.net/institutional/KY/en/news/products-and-solutions/sistema-innovador-para-ventilacion-en-silos-reduce-el-consumo-de-energia-hasta-en-un-80>
- Wiliam, T. (2013). Cinética del secado en las almendras fermentadas de cacao variedad CCN51 . *Investigacion & Desarrollo*, 6(2), 65-67.
- Zúñiga, J. P. (2016). El Beneficiado del cacao: secado, transporte, almacenamiento y evaluacion de calidad. *Anecacao*, 10(1), 22.