
	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 1

Pitalito, 22 de enero de 2020

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad: Neiva

El (Los) suscrito(s):

Daniela Vargas Cuéllar con C.C. No. 1080935902, Sebastián Tovar Guaca, con C.C. No. 1081516643,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado EVALUACIÓN DE UN SECADOR MECANICO ESTATICO MODIFICADO DE CAPA PROFUNDA PARA CAFÉ (Coffee arábica L.) Presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola; Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet: intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 1 1 de la Decisión Andina 351 de 1993, 'Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

DANIELA VARGAS CUELLAR

SEBASTIAN TOVAR GUACA

Firma: Daniela Vargas Cuéllar.

Firma: Sebastian Tovar Guaca.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: EVALUACIÓN DE UN SECADOR MECANICO ESTATICO MODIFICADO DE CAPA PROFUNDA PARA CAFÉ (*Coffee arábica L.*)

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Vargas Cuellar	Daniela
Tovar Guaca	Sebastián

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Gutiérrez Guzmán	Nelson
Collazos Escobar	Gentil Andrés

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Agrícola

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 74

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas ___ Fotografías Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general
 Grabados ___ Láminas ___ Litografías ___ Mapas Música impresa ___ Planos Retratos
 Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link

Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



SOFTWARE: Requerido y/o especializado para la lectura del documento: MatLAB, Excel, AutoCAD

MATERIAL ANEXO: Fotografías, planos

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS O Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. actividad de agua	water activity
2. humedad de equilibrio	equilibrium moisture
3. entalpia	enthalpy
4. requerimiento energético	energy requirement
5. isoterma	isotherm
6. calor isósterico	isosteric heat

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El secado es una de las operaciones imprescindibles para garantizar la estabilidad de los granos de café pergamino. El objetivo del presente trabajo fue determinar el requerimiento de energía y la eficiencia del proceso de secado de un secador mecánico estático modificado de capa profunda para café (Coffee arábica L.), mediante el modelado de la cinética de secado, de la aplicación de las isotermas y del calor de desorción a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C. Los resultados permitieron establecer que el modelo de Weibull represento satisfactoriamente las curvas de secado y los modelos de Yanniotis y Blahovec y Polynomial lograron una alta correspondencia a los datos experimentales de desorción ($R^2_{ajcs} > 0.98$ y $RMSE < 10\%$), además el calor isostérico de desorción aumento con la disminución del contenido de humedad de equilibrio mostrando la energía requerida para retirar el agua de los granos de café pergamino durante el proceso de secado. El secador a la temperatura experimental de 55 °C evidenció el menor consumo de energía, con una eficiencia del 36.17% siendo la temperatura óptima para reducir el tiempo de proceso y los costos asociados a esta operación.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link

Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Drying is one of the essential operations to ensure the stability of parchment coffee beans. The objective of the present work was to determine the energy requirement and the efficiency of the drying process of a modified static mechanical coffee dryer (Coffee Arabica L.), by modeling the kinetics of drying, of the a lication of Isotherms and desor tion heat at ex erimental tem eratures of 55 and 60 ° C. The results allowed us to establish that the Weibull model successfully represented the drying curves and the Yanniotis and Blahovec and Polynomial models achieved a high correspondence to the experimental desorption data (R^2_{aj} > 0.98 and RMSE in addition to the isosteric heat of desorption increased with the decrease in the moisture content of equilibrium showing the energy required to remove water from parchment coffee beans during the drying process. The dryer at the experimental temperature of 55 0 C showed the lowest energy consumption, with an efficiency of 36.17% being the optimum temperature to reduce the process time and the costs associated with this operation

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Néstor Enrique Cerquera Pena

Firma:

Nombre Jurado: Joel Girón Hernández

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link

Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

**EVALUACIÓN DE UN SECADOR MECANICO ESTATICO MODIFICADO DE
CAPA PROFUNDA PARA CAFÉ (*Coffee arábica* L.)**

**SEBASTIAN TOVAR GUACA
DANIELA VARGAS CUELLAR**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
PITALITO, 2019**

**EVALUACIÓN DE UN SECADOR MECANICO ESTATICO MODIFICADO
DE CAPA PROFUNDA PARA CAFÉ (*Coffee arábica L.*)**

SEBASTIAN TOVAR GUACA

DANIELA VARGAS CUELLAR

Proyecto de grado presentado a la facultad de ingeniería como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Agrícola.

DIRECTOR

NELSON GUTIERREZ GUZMAN

PhD Tecnología de alimentos

CO-DIRECTOR

GENTIL ANDRES COLLAZOS ESCOBAR

Ing. Agrícola

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRÍCOLA
PITALITO-HUILA 2019**

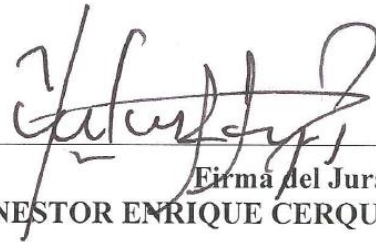
Nota de aceptación



**Firma del Director
NELSON GUTIERREZ GUZMAN**



**Firma del Jurado
JOEL GIRÓN HERNÁNDEZ**



**Firma del Jurado
NESTOR ENRIQUE CERQUERA PEÑA**

Pitalito, Diciembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Dios, Principalmente a Dios que nos permitió alcanzar nuestros sueños, llenándonos de sabiduría, paciencia, conocimiento, salud y fortaleza, durante estos últimos cinco años; en los que nos hemos encontrado diferentes personas que de una u otra forma han aportado para que nuestro proyecto y meta se haga realidad

También a nuestros padres y hermanos por su apoyo incondicional, dedicación y cariño, por estar presentes en esta etapa tan importante de nuestras vidas, aportando a nuestra formación como personas integrales, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

Agradecemos a la Universidad Surcolombiana por permitirnos formar parte de ella, también a cada uno de los docentes que nos brindaron sus conocimientos, a nuestros compañeros por su amistad y apoyo durante la carrera, también agradecemos a el Ingeniero Oliver Galíndez Cerón por permitirnos conocer, evaluar y colocarnos a nuestra disposición su secador mecánico; A nuestro director de tesis; Nelson Gutiérrez Guzmán y nuestro Co-Director Gentil Andrés Collazos Escobar, por la dedicación y apoyo que nos han brindado en este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que nos han facilitado a las mismas. Gracias por guiarnos, apoyarnos y acogernos para nuestra formación como profesionales; al Centro de Investigación Cesurcafé por facilitarnos sus instalaciones, equipos necesarios para llevar a cabo el proyecto.

Gracias a nuestros amigos, que siempre nos han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión.

DEDICATORIA

DANIELA VARGAS CUELLAR

Dedico este proyecto principalmente a Dios, por darme la oportunidad de vivir, por darme salud y bendiciones para alcanzar esta meta que es personal y profesional. A mis padres Reinaldo Vargas Garzón y Amalia Cuéllar Calderón por su amor, trabajo y apoyo incondicional en este tiempo, por ser mi motivación día a día y sobre todo por sus valiosos consejos y ejemplo que siempre me dieron, por su comprensión y sobre todo por estar ahí para mí en cada momento, velando por mi bienestar y educación en todo momento; gracias por el sacrificio que han hecho para que hoy pueda cumplir este logro.

A mis hermanas, Alejandra Vargas Cuéllar y Juliana Vargas Cuéllar, por estar conmigo y apoyarme siempre, a mi compañero de trabajo de grado Sebastián Tovar por su apoyo y lucha hasta último día.

A mi familia en general por querer siempre lo mejor para mí.

Finalmente agradezco a Milagros por su oportunidad.

DEDICATORIA

SEBASTIAN TOVAR GUACA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados; ser profesional.

A mis padres Concepción Guaca Reyes y Efrén Tovar Chavarro, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que hoy soy. Ha sido un orgullo y un privilegio ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanas (os) , mi sobrino Martin y mi compañera de tesis Daniela Vargas Cuellar por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis compañeros de clases y a todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Solo queda por decir Gracias ...

RESUMEN

El secado es una de las operaciones más importantes después del proceso de beneficio del café para garantizar la estabilidad de los granos; reduce la actividad de agua y la probabilidad de desarrollo de reacciones de deterioro cuando el producto es almacenado por largos periodos de tiempo. El objetivo del presente trabajo fue determinar el requerimiento de energía y la eficiencia del proceso de secado de un secador mecánico estático modificado de capa profunda para café, mediante el modelado de la cinética de secado, de la aplicación de las isothermas y del calor de desorción a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C. Los datos experimentales fueron modelizados matemáticamente; la cinética de secado mediante los modelos de secado de Newton, Weibull, Henderson-Pabis, Henderson-Pabis Modificado, Peleg, Logarithmic, Wang–Singh, Lewis, Thomson, Valcam, Midilli, Page y las isothermas de desorción con los modelos de GAB, Oswin, Halsey, Smith, Chung-Pfost, Caurie, Iglesias and Chirife, White and Eiring, Peleg, DLP, Kuhn, Polynomial, Yanniotis and Blahovec que vinculan la dependencia del contenido de humedad de equilibrio y la actividad de agua con la temperatura. Los resultados permitieron establecer que el modelo de Weibull representó satisfactoriamente las curvas de secado y los modelos de Yanniotis y Blahovec y Polynomial lograron una alta correspondencia ($R^2_{ajs} > 0.98$ y $RMSE < 10\%$), a los datos experimentales de desorción de 55 y 60 °C respectivamente, además, resultaron ser herramientas valiosas para la predicción del contenido de humedad de equilibrio en función del tiempo de proceso y la actividad de agua del grano. El calor isoterico de desorción aumento con la disminución del contenido de humedad de equilibrio mostrando la energía requerida para retirar el agua de los granos de café pergamino durante el proceso de secado, en adición, la temperatura experimental de 55 °C evidenció el menor consumo de energía de proceso, con una eficiencia

del 36.17% representando la mejor condición para reducir los costos asociados a esta operación.

Palabras clave: actividad de agua, humedad de equilibrio, entalpia, requerimiento energético

ABSTRACT

Drying is one of the most important operations after the coffee benefit process to ensure the stability of the beans; It reduces the activity of water and the probability of development of deterioration reactions when the product is stored for long periods of time. The objective of this work was to determine the energy requirement and the efficiency of the drying process of a modified static mechanical coffee dryer with a deep layer for coffee, by modeling the kinetics of drying, the application of isotherms and desorption heat at experimental temperatures of 55 and 60 ° C. The experimental data were modeled mathematically; drying kinetics using the drying models of Newton, Weibull, Henderson-Pabis, Modified Henderson-Pabis, Peleg, Logarithmic, Wang – Singh, Lewis, Thomson, Valcam, Midilli, Page and desorption isotherms with GAB models, Oswin, Halsey, Smith, Chung-Pfost, Caurie, Iglesias and Chirife, White and Eiring, Peleg, DLP, Kuhn, Polynomial, Yanniotis and Blahovec that link the dependence of equilibrium moisture content and water activity with temperature. The results allowed us to establish that the Weibull model satisfactorily represented the drying curves and the Yanniotis and Blahovec and Polynomial models achieved high correspondence ($R^2_{adj} > 0.98$ and $RMSE < 10\%$), to the experimental desorption data of 55 and 60 °C, in addition, proved to be valuable tools for predicting the equilibrium moisture content based on the process time and the water activity of the grain. The isotonic heat of desorption increased with the decrease of the equilibrium moisture content showing the energy required to remove the water from the parchment coffee beans during the drying process, in addition, the experimental temperature of 55 ° C evidenced the lower consumption of process energy, with an efficiency of 36.17% representing the best condition to reduce the costs associated with this operation.

Keywords: water activity, equilibrium moisture, enthalpy, energy requirement

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo general.....	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
3. MARCO REFERENCIAL.....	19
3.1. Secado del café.....	19
3.1.1. Definición.....	19
3.1.2. Generalidades.....	19
3.1.3. Métodos de secado de café.....	20
3.1.4. Secado mecánico.....	20
3.2. Componentes de secador mecánico.....	22
3.2.1. Ventiladores.....	22
3.2.2. Perdidas de presión en el sistema.....	24
3.2.3. Generador de aire caliente.....	25
3.2.4. Modelos matemáticos para el secado mecánico de granos.....	25
3.3. Estimación de los requerimientos energéticos.....	29
3.3.2. Isotermas de sorción y actividad de agua.....	29
3.3.3. Tipos de isotermas.....	30

3.3.4. Modelización de datos de sorción.....	30
3.4. Estudios relacionados.....	31
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
4.1. Ubicación	33
4.2. Especificaciones del equipo de secado.....	34
4.3.1. Determinación experimental de las curvas de secado e isothermas	36
4.3.2. Estimación de los parámetros de los modelos y estadísticos de ajuste.....	39
4.3.3. Estimación de los requerimientos energéticos.....	39
5. RESULTADOS Y DISCUSION.....	42
6. CONCLUSIONES.....	55
7. RECOMENDACIONES.....	56
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un secador mecánico, Cenicafé	21
Figura 2. volutas y rotores de ventiladores centrífugos	23
Figura 3. Curva General del Sistema de Secado Mecánico de Café	24
Figura 4. Esquema de un generador de aire caliente o intercambiador de calor	26
Figura 5. Esquema del modelo de simulación de secado en capa delgada	28
Figura 6. Mapa de Pitalito por corregimientos	33
Figura 7. Secador mecánico vista frontal y Dirección del flujo de aire	34
Figura 8 . Modelización de cinética de secado	45
Figura 9. Isotermas de desorción experimental	50
Figura 10. Variación del calor isósterico neto de sorción	51
Figura 11. Vista lateral izquierda de Secador mecánico	67
Figura 12. Vista trasera de Secador mecánico	68
Figura 13. Vista lateral derecha de Secador mecánico	69
Figura 14. Vista en planta de Secador mecánico	70
Figura 15. Corte vista frontal y lateral; detalle de malla.	71
Figura 16. Vista frontal de secador mecánico para café	72
Figura 17. Vista en planta de Malla de descargue de secador mecánico	72
Figura 18. Vista de corte lateral de malla de descarga.....	72
Figura 19. Intercambiador de Calor	73
Figura 20. Entrada de aire al intercambiador de Calor	73
Figura 21. Cisco utilizado en el proceso de secado.....	73
Figura 22. Tolva y motor para alimentación de cisco.....	73

Figura 23. Ventilador centrifugo	74
Figura 24. Panel de control para la Temperatura de operación.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Expresiones matemáticas para la modelización de las curvas de secado en granos de café pergamino húmedo.....	37
Tabla 2. Expresiones matemáticas para la modelización de las isotermas de desorción en granos de café pergamino húmedo	38
Tabla 3. Ajuste y parámetros de modelos a curvas de secado	42
Tabla 4. Ajuste y parámetros de modelos para las isotermas de desorción	47
Tabla 5. Consumo específico de energía y eficiencia del sistema de secado a 55 y 60°C	52

1. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos más importantes del mundo, esta condición le ha otorgado un puesto significativo en el listado de los productos más populares e importantes en el ámbito de la economía a nivel mundial (Quintero *et al*, 2014). El cultivo de café provee una economía sostenible a los agricultores (Poltronieri *et al*, 2016), El cultivo del café (*Coffea arábica* L.) en Colombia, es considerado el más importante de la región andina; representa el 2 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y el 22% del PIB agrícola (Ciro *et al*, 2011).

El proceso de secado de café (*Coffea arábica* L.) consiste en reducir la humedad de un producto, hasta alcanzar condiciones de estabilidad, en el caso de los granos de café, hasta un contenido de humedad entre 10%-12% (Patiño *et al*, 2016). Este proceso implica la transferencia de masa y energía con el aire de secado (alta temperatura y baja humedad relativa), con el objetivo de reducir el contenido de humedad del producto, capturando el vapor de agua liberado (Ekechukwu & Norton, 1999). Según Alves *et al*, (2013) el aumento de la temperatura del aire, aumenta la velocidad de secado, el coeficiente de difusividad efectivo y en consecuencia se reduce el tiempo de secado de los granos de café. Bon *et al*, (2012) afirma que el contenido de humedad de equilibrio disminuye cuando la temperatura aumenta con la actividad constante del agua; pues este fenómeno se debe a que el calor de sorción isósterico, disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad, si está cerca de la entalpía de evaporación del contenido de humedad del agua.

En Colombia el secado del café se ha realizado tradicionalmente mediante dos métodos: el secado solar y el secado mecánico; en el primero se aprovecha la entalpía del

aire y la radiación solar para sustraer la humedad del grano, sin embargo es un método totalmente dependiente del clima, con la ventaja de ser económico, pero con dos grandes desventajas debido a que la época de cosecha coincide con la época de lluvias incrementando el tiempo de secado y que sólo puede utilizarse en fincas de pequeña producción (Oliveros *et al*, 2006). En el secado mecánico se utiliza una fuente externa de calentamiento para aumentar la temperatura del aire, e impulsarlo por un ventilador, a través de la capa de grano, este método tiene como ventaja la disminución de tiempo de secado, sin embargo, un aspecto negativo es la gran cantidad de energía que consume (Váquiro,2009). En consecuencia, la estimación del requerimiento energético del proceso se hace necesario.

Es ampliamente aceptado que, a una actividad de agua constante, un aumento de la temperatura causa disminución en la cantidad de agua adsorbida (Domian *et al.*, 2018), este hecho puede ser explicado a que un aumento en la temperatura provoca aumento del grado de desorden molecular de agua presente en la superficie del absorbente que conduce a inestabilidad de las moléculas de agua del sistema, facilitando la ruptura intermolecular de conexiones entre el agua y los sitios activos de sorción, permitiendo la vaporización del agua, y en consecuencia, disminución del contenido de humedad de equilibrio (Zeymer *et al.*, 2019). Se ha reportado este fenómeno en diferentes productos agrícolas: Mango (Bon *et al*, 2012), semillas de Pepino (Corrêa, et al, 2015), Plátanos enteros (Pereira da Silva *et al*, 2014), Arroz Paddy (Zeymer *et al*, 2019), Arroz de malasia (Mousa *et al*, 2014), hojas y tallos de Menta (Taoufik et al, 2017), hoja de Menta (Doymaz, 2006), Algarroba (Prokopiuk *et al*, 2010) y Pepino (Uribe *et al*, 2011).

Corrêa *et al.* (2014); expone que debido a que el incremento de la temperatura promueve menores contenidos de humedad, mediante la activación de las moléculas de agua lo

que les permite separarse de sus sitios de sorción; este comportamiento se debe a que las fuerzas atractivas entre las moléculas disminuyeron con el aumento en la energía cinética de las moléculas de agua a más altas temperaturas, evidenciando un decremento en el contenido de humedad de los granos de café pergamino. Por tanto, con el aumento de la temperatura el tiempo de secado disminuye (Bastioğlu *et al*, 2017).

El contenido de agua en equilibrio de los frutos de café aumenta con la humedad relativa para una temperatura dada y disminuye con el aumento de la temperatura para una humedad relativa dada, tanto en desorción como en adsorción (Corrêa *et al*, 2014). Las isotermas de desorción son importantes en el análisis y diseño de diversos procesos alimentarios, como la conservación, el secado, el envasado y la mezcla. El calor isósterico neto de sorción se puede usar para estimar los requerimientos de energía de los procesos de deshidratación (Noshad *et al*, 2012).

El presente trabajo tuvo como objetivo la evaluación de un secador mecánico estático modificado de capa profunda para café; mediante el modelado matemático de las curvas de secado e isotermas de desorción, la estimación del calor isósterico de sorción, y del cálculo del requerimiento energético durante el secado del café pergamino húmedo a las temperaturas experimentales de 55 °C y 60 °C.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar el requerimiento de energía y la eficiencia del proceso de secado de un secador mecánico estático modificado de capa profunda para café (*Coffea arábica* L.), mediante el modelado de la cinética de secado, de la aplicación de las isothermas y del calor de desorción a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C.

2.2. Objetivos específicos

1. Determinar las curvas de secado y las isothermas de desorción a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C.
2. Modelizar matemáticamente la cinética de secado y las isothermas de desorción, mediante los modelos de secado: Newton, Weibull , Henderson-Pabis, Henderson-Pabis Modificado, Peleg, Logarithmic, Wang–Singh, Lewis, Thomson, Valcam, Midilli, Page; y los modelos de sorción: GAB, Oswin, Halsey, Smith, Chung-Pfost, Caurie, Iglesias and Chirife, White and Eiring, Peleg, DLP, Kuhn, Polynomial, Yanniotis and Blahovec y evaluar su bondad de ajuste mediante los estadísticos R^2_{ajs} y RMSE.
3. Determinar el calor isósterico de desorción a partir de los datos experimentales de sorción, la estimación de los requerimientos energéticos y eficiencia de proceso.
4. Recomendar posibles mejoras para la eficiencia del secador mecánico estático modificado de capa profunda para café.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. Secado del café

3.1.1. Definición

La fase del secado del grano de café es compleja, después de que el café en estado cereza es despulpado, fermentado y lavado, queda con un contenido de humedad muy elevado, entre 50% y 55% base humedad. Durante el proceso de secado el pergamino, por ser un material celulósico se endurece; mientras la almendra toma una coloración verdosa y reduce su tamaño (Espinoza *et al*, 2018).

En los sistemas de secado mecánico de café se logra reducir la humedad del grano hasta llevarlo de un 10% a un 12% en base húmeda; en un periodo de 18 a 32 h, dependiendo del secador y el tipo de operación con que funcione el sistema (Parra *et al*, 2017).

3.1.2. Generalidades

Cuando se habla de secar el café de forma artificial o secado por aire caliente el principal principio de estos equipos es secar el grano calentándolo a temperaturas no mayores a 50°C. Existen cuatro tipos de secadores mecánicos: Wiken, Guardiola, Torres y Moreira. Todos ellos se basan en el principio de aventar aire caliente al grano. Entre estos secadores uno de los más usados es el secador Guardiola, este secador consiste en un cilindro perforado en el cual se coloca el café al aire se hace circular desde el centro del cilindro a través de la masa de café, es un secador discontinuo cada carga se seca entre 30 y 36 horas, la capacidad es de 2.25 toneladas de café (Gonzales, 2014).

3.1.3. Métodos de secado de café

Existen, básicamente, dos formas para secar el café: la forma natural y la mecánica. Se puede realizar también de forma combinada, unas etapas del secado con una alternativa y el resto de etapas con el otro método. Si el secado es totalmente solar, se obtiene el denominado café secado al sol; y si, por el contrario, es totalmente secado mecánicamente, se obtiene café convencional. Saber cuáles son las mejores condiciones para procesar y almacenar es una forma de aumentar la disponibilidad de este producto, es ahí donde el secado surge como un método útil de conservación. Tradicionalmente, se ha llevado a cabo por exposición al sol. Sin embargo, el secado solar depende demasiado del clima y la calidad final del producto puede no ser satisfactoria. En consecuencia, el uso de secadores por convección podría ser una decisión exitosa (Espinoza *et al*, 2018).

3.1.4. Secado mecánico

El secado mecánico del café se realiza en sistemas constituidos por una fuente de calor, un intercambiador de calor, un ventilador y un secador con uno o más compartimientos con piso de malla sobre el cual es depositado el grano; para el calentamiento del aire se han diseñado equipos que emplean la electricidad, gas, el carbón y otros materiales como la cascarilla de café. (Oliveros & Saenz, 2011)

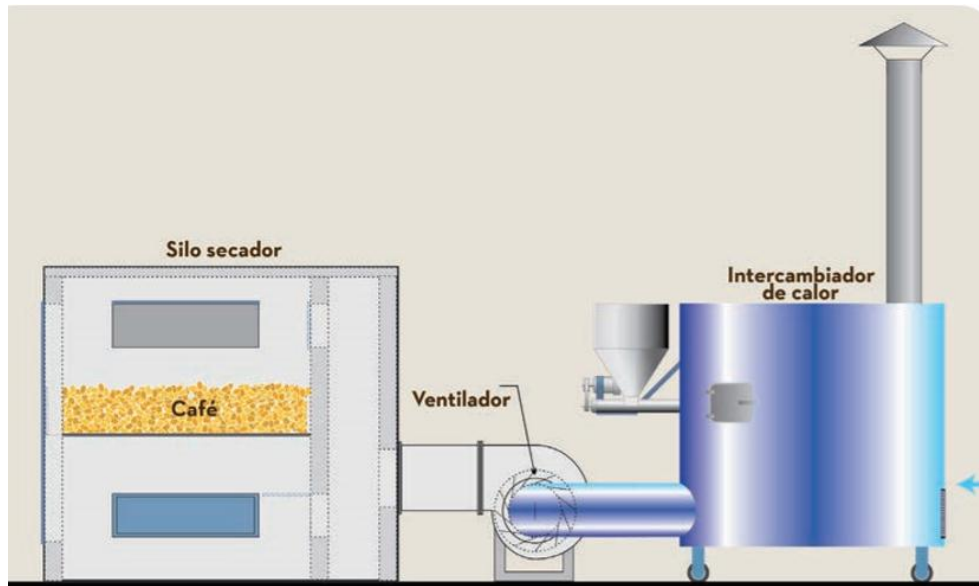


Figura 1. Componentes de un secador mecánico, Cenicafé (Parra *et al*, 2017)

El secado mecánico es realizado principalmente en secadores de capa fija como el silo tipo alberca, que ha sido construido en mampostería. La mayoría de ellos constan de dos cámaras llamadas de secado y presecado dependiendo de la entrada del aire de secado. Existen varios modelos, como el tipo CENICAFE que trabaja con una capa fija media de 0,40 m con una temperatura del aire de secado de 50°C y un caudal de aire recomendado de 60 a 80 m³ /min.ton C.P.S. (Ospina et al, 1991).

3.1.5. Tipos de secadores mecánicos

Principalmente existen dos tipos de secadores mecánicos; los secadores de flujo concurrente y los secadores de capa estática:

A. *Secadores mecánicos de flujo concurrente*

Los secadores mecánicos intermitentes de flujos concurrentes (IFC) son aquellos secadores en los cuales el café está en constante movimiento durante el proceso de secado.

Los primeros secadores de flujo concurrente de café fueron los secadores rotatorios Tipo Guardiola (Espinoza *et al*, 2018).

B. Secadores Mecánicos de capa estática

En los secadores de capa estática el grano se coloca en un depósito (cámara de secado) provisto de un piso construido en lámina metálica perforada y el aire lo atraviesa en una o alternativamente en dos direcciones. El aire debe ser calentado en un intercambiador de calor y luego impulsarlo con una determinada presión por un ventilador, generalmente centrífugo, el cual debe vencer la resistencia al paso del aire que produce la masa de café (Espinoza *et al*, 2018).

3.2. Componentes de secador mecánico.

Un sistema de secado mecánico comprende un ventilador, un dispositivo para el calentamiento del aire, el cuerpo del secador donde se encuentran las cámaras que contienen el café mientras pierde humedad y una serie de accesorios como ductos y compuertas, entre otros, que conducen y direccionan el aire (Parra *et al*, 2017).

3.2.1. Ventiladores

Un ventilador es el componente más importante del sistema de secado mecánico, porque es el dispositivo encargado de entregar el aire a las condiciones requeridas en el proceso, con aprovechamiento eficiente de la potencia suministrada por la fuente de energía mecánica, casi siempre está constituido por un motor eléctrico (Gutiérrez *et al* , 2012) ; así mismo es una turbomáquina que convierte la energía mecánica de un motor en energía neumática (presión y caudal), a través de un rotor con aspas o álabes, que le imprimen energía cinética al aire; encargado de suministrar el aire con las condiciones de caudal y presión

estática requeridas, con aprovechamiento eficiente de la potencia suministrada por el sistema motriz (Parra *et al*, 2017).

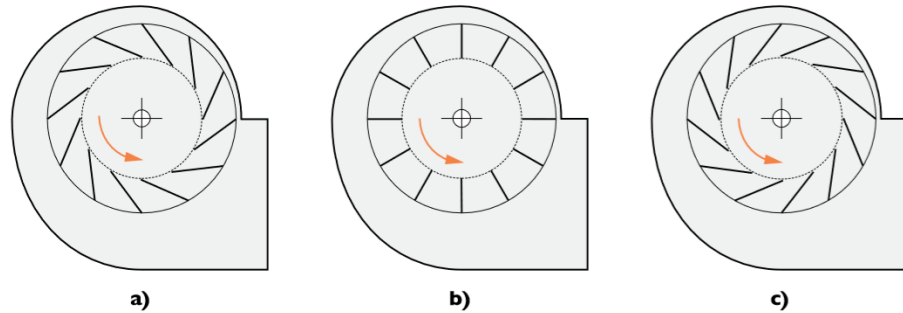


Figura 2. volutas y rotores de ventiladores centrífugos con: a) álabes inclinados hacia delante; b) álabes radiales; c) álabes inclinados hacia atrás (Gutiérrez *et al*, 2012)

Según Gutiérrez *et al* (2012) Los ventiladores centrífugos se clasifican según la curvatura y disposición de los álabes, en ventiladores centrífugos de álabes inclinados hacia adelante, de álabes radiales y de álabes inclinados hacia atrás, porque tienen la mayor eficiencia estática. Los de rotor con álabes radiales o inclinados hacia adelante se usan en menor medida porque presentan sobrecarga a altas presiones y mayor nivel de ruido.

Un ventilador centrífugo básicamente se comporta de la manera como se representa *figura 3*. Presenta su mayor presión cuando el caudal es prácticamente cero, lo que correspondería a tener la salida completamente cerrada y caudal cero, y el caudal aumenta a medida que disminuye la resistencia al paso del aire (Gutiérrez *et al*, 2012).

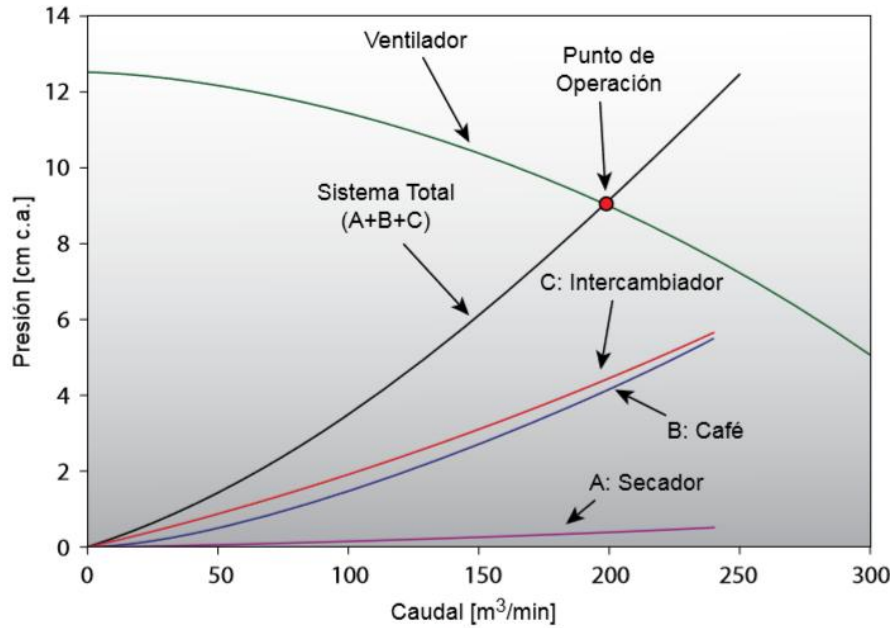


Figura 3. Curva General del Sistema de Secado Mecánico de Café (Gutiérrez et al, 2012)

3.2.2. Pérdidas de presión en el sistema

Presentan un comportamiento cuadrático, que depende del caudal que pasa a través de los elementos que conforman el sistema de secado, de la manera que se presenta en la Figura 3. y es igual a la suma de las pérdidas de las partes que lo conforman, en este caso el generador de aire caliente o intercambiador de calor, la capa de café que tiene que atravesar y el secador como tal. El café presenta mayor resistencia al paso de aire cuando está húmedo que cuando está seco (Gutiérrez et al, 2012). Las pérdidas de presión ocasionadas por los componentes del sistema de circulación del aire en los secadores presentan un comportamiento no lineal, que depende del caudal que pasa a través de ellos (Parra *et al*, 2017).

3.2.3. Generador de aire caliente

El generador de aire caliente o intercambiador de calor es un sistema mecánico por medio del cual el aire aumenta su temperatura al entrar en contacto con las superficies calentadas por la quema de un combustible, sea sólido, líquido o gaseoso (Parra *et al*, 2017).

Según Gutiérrez *et al*, (2012) el aire que se está calentando no debe entrar en contacto con los productos de la combustión, para que no haya contaminación del producto al secarse. El intercambio de calor debe ser lo más eficiente posible, con el fin de que el gasto de combustible y el ruido sean los menores posibles.

El generador de aire caliente y el ventilador figura 4, contribuyen con más del 70% del costo inicial de un secador mecánico de café (Gutiérrez *et al*, 2012). Por esta razón, buscando economía, los caficultores adquieren los intercambiadores de calor fabricados en talleres rurales, sin emplear metodologías que aseguren alta eficiencia térmica, baja resistencia al flujo del aire y larga vida útil (Gutiérrez *et al*, 2012).

3.2.4. Modelos matemáticos para el secado mecánico de granos

Los modelos matemáticos propuestos para predecir el comportamiento del secado de granos este clasificado como: de no equilibrio, de equilibrio y de tipo logarítmico (Parra *et al*, 2017); teniendo en cuenta que los modelos de secado de granos de no-equilibrio son más exactos y más precisos En estos se desarrolla el modelo de secado como un sistema de ecuaciones diferenciales parciales a partir de los balances de transferencia de calor y de masa.

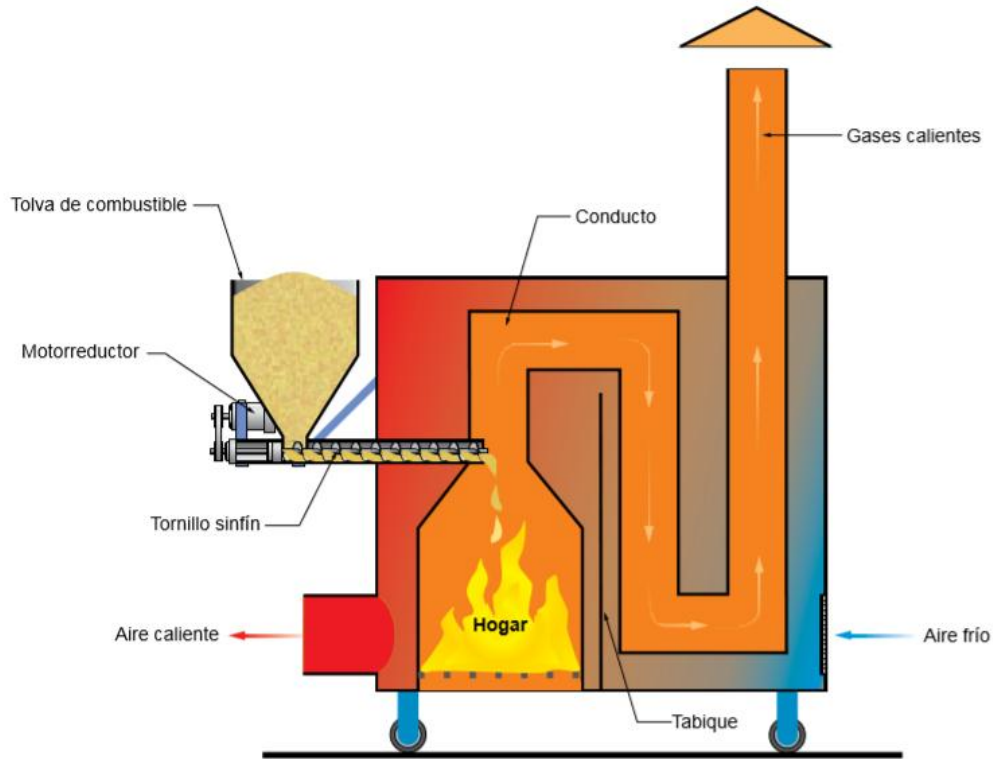


Figura 4. Esquema de un generador de aire caliente o intercambiador de calor para el secado de Café (Parra et al, 2017)

En los modelos de equilibrio para el secado de granos o modelos simplificados, el enfoque básico para la simulación consiste en calcular el secado en una capa delgada de granos por medio de balances de calor y masa (modelo de equilibrio), y mediante un proceso iterativo, se combinan muchas capas delgadas para formar la capa gruesa (Parra et al, 2017).

Los modelos logarítmicos de secado de granos se basan en la relación directa entre la tasa de secado de una capa de grano y el gradiente de temperatura del aire que la atraviesa (Parra *et al*, 2017). En este contexto, tener un modelo matemático podría ser muy útil; se han propuesto más de 200 ecuaciones para modelar los datos de equilibrio de isotermas, difiriendo en su carácter empírico o teórico, y en el número de parámetros involucrados. Entre los modelos reportados con mayor frecuencia en la literatura para vegetales, granos y frutas están,

los de GAB, modificados por Oswin, modificados por Henderson, modificados por Halsey y Ratti (Mulet *et al*, 2002).

3.2.4.1. Modelo de Thompson

Según Parra *et al* (2008) el modelo de Thompson es semiempírico de equilibrio, el cual fue desarrollado para la simulación del secado del maíz desgranado . Básicamente en este modelo se considera la capa gruesa de granos constituida de capas de 2,5 cm de espesor cada una, colocadas una sobre otra. su enfoque básico para la simulación consiste en calcular el secado en una capa delgada de granos por medio de balances de calor y masa o mejor llamado *modelo de equilibrio* figura 5, y por medio de un proceso iterativo extenderlo a más capas delgadas para formar la capa gruesa de dimensiones iguales a las del producto en el secador.

El modelo predice el secado final de la capa de grano mediante el uso de ecuaciones de equilibrio, las cuales tienen en cuenta balance de antes y después del secado y de ecuaciones semiempírica tales como las del contenido de humedad en equilibrio, calor específico, calor latente de vaporización del agua contenida en el grano y la ecuación de secado en capa delgada, para lo cual deben considerarse las condiciones iniciales del aire y del grano. El balance de calor se completa al predecir las condiciones finales del aire y del grano. El modelo es flexible y permite integrar en él todas las variables y parámetros necesarios para simular el proceso de secado. Una vez se dispone del modelo completo es especialmente útil para el estudio de los diferentes sistemas de secado y para el diseño de equipos (Parra et al, 2017)

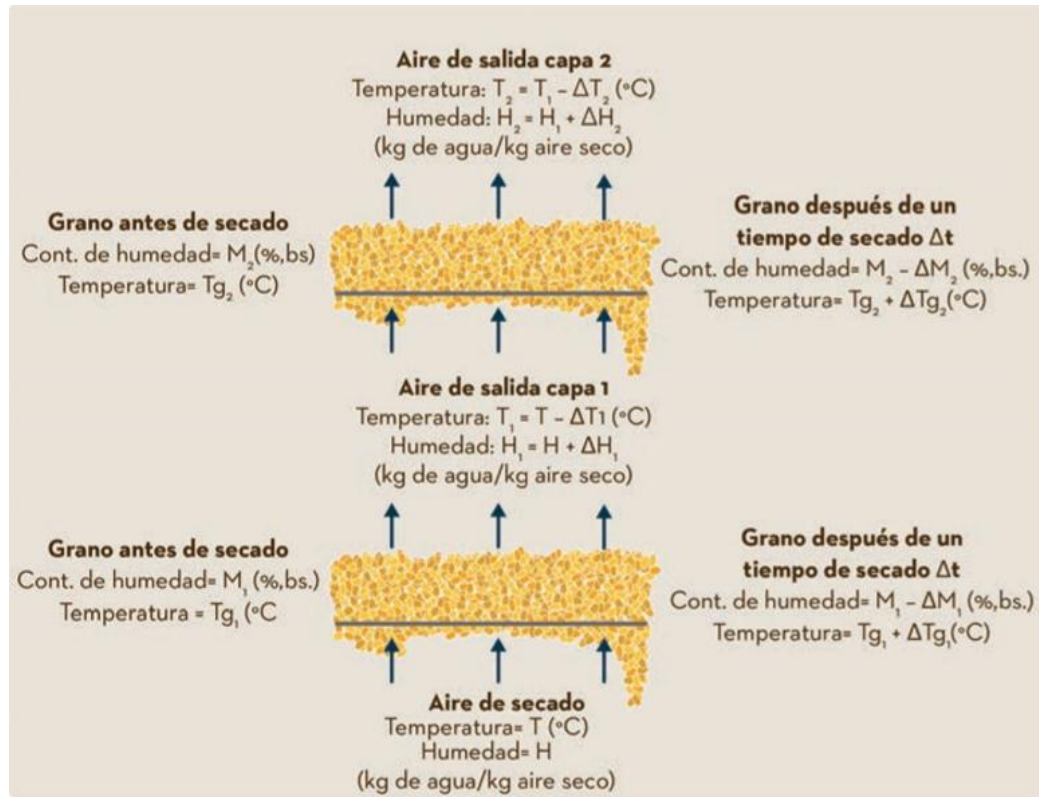


Figura 5. Esquema del modelo de simulación de secado en capa delgada de Thompson (Parra et al, 2017)

En el balance antes del secado El modelo de Thompson se realiza un balance de calor sensible antes de iniciar el proceso de secado, el cual consiste en la determinación de la temperatura de equilibrio entre el aire y el grano. Del mismo modo el Balance después del secado, de una capa delgada consiste en determinar la temperatura del aire y del grano (T_f) una vez haya transcurrido el intervalo de tiempo (Δt) (Parra et al, 2017).

La simulación del secado de la capa de grano se realiza utilizando las ecuaciones de contenido de humedad de equilibrio y de secado en capa delgada; además, se realizan los balances psicrométricos del aire de secado.

3.3. Estimación de los requerimientos energéticos

3.3.1. Calor isósterico de sorción

El calor isósterico de sorción representa la adición del calor isósterico neto de sorción a la entalpía de vaporización del agua (λ_{vp}) (Bon *et al*, 2012), además, proporciona información clave sobre el requerimiento de energía para diferentes procesos secado y del estado del agua en los productos alimenticios (Tadapaneni, *et al.*, 2017) y representa la energía necesaria para vaporizar la humedad del material biológico y es superior a la energía requerida para vaporizar la humedad de una superficie de agua libre.

3.3.2. Isotermas de sorción y actividad de agua

La dependencia del contenido de agua de equilibrio de un producto dado de la humedad relativa y la temperatura de equilibrio puede expresarse mediante ecuaciones matemáticas, que se denominan isotermas de sorción o curvas de equilibrio higroscópicas (Corrêa *et al*, 2014). Según Mulet *et al* (1999) en la literatura hay más de doscientas ecuaciones propuestas para representar el fenómeno de equilibrio higroscópico de los productos agrícolas. Estos modelos difieren en su base teórica o empírica y en la cantidad de parámetros involucrados.

Las Isoterma de sorción de agua, relaciona a una temperatura constante, el contenido de humedad (o ya sea otro componente) de equilibrio ; es decir kg de agua / kg de materia seca con la actividad termodinámica del agua (o del componente correspondiente) en el producto, en un intervalo dado de humedad o actividad; teniendo en cuenta que si está en equilibrio la actividad del agua es igual a la humedad relativa del aire que rodea al producto a una temperatura determinada; por lo tanto la actividad a_w de agua se expresa como humedad relativa de equilibrio (Prokopiuk *et al*, 2010).

La mejor forma de medir la disponibilidad de agua es mediante la actividad de agua (a_w). La a_w de un alimento se puede reducir aumentando la concentración de solutos en la fase acuosa de los alimentos mediante la extracción del agua o mediante la adición de solutos (Prokopiuk, 2010).

3.3.3. Tipos de isothermas

Según Brunauer et al., (1940) existen 5 tipos de isothermas:

- Tipo I: corresponde a fenómenos de quimisorción que ocurren en una sola capa, específicamente en los puntos activos de la superficie.
- Tipo II y III: Frecuentes en alimentos no porosos.
- Tipo IV y V: corresponde a isothermas de los productos porosos, en los que su curva está asociada a la saturación capilar; presentan dos características fundamentales: Saturación e histéresis.

3.3.4. Modelización de datos de sorción

Han sido propuestas más de 200 ecuaciones de isothermas para materiales biológicos (Van der Berg & Bruin, 1981), algunas de ellas están basadas en modelos de absorción como la ecuación de BET; otras son solamente con ecuaciones empíricas con dos o más parámetros que se pueden ajustar. Estas ecuaciones son útiles en la predicción de las propiedades de adsorción del agua en un producto alimenticio (Prokopiuk *et al*, 2010).

3.4. Estudios relacionados

Se diseñó y construyó un prototipo de secado convectivo a escala de laboratorio, para evaluarlo mediante la modelización de las isotermas de desorción de los granos de café pergamino húmedo y la estimación del requerimiento de energía del proceso. Los datos experimentales fueron modelizados con tres expresiones empíricas que vinculan la dependencia del contenido de humedad de equilibrio y la actividad de agua con la temperatura. El calor isósterico neto de sorción fue estimado mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron. El modelo de Iglesias y Chirife logro representar satisfactoriamente el efecto de la temperatura en las isotermas de los granos de café pergamino húmedo; presento un coeficiente de determinación ajustado mayor a 0.97 y un error cuadrático medio menor a $0.1 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ base seca, indicando buen ajuste para fines prácticos. El calor isósterico neto de sorción disminuyo con incrementos del contenido de humedad indicando el gasto energético neto del proceso de secado (Ordoñez & Campos, 2018).

Henaó *et al* (2009); Con el fin de mejorar el proceso de secado del café, diseñaron un equipo mecánico tipo silo, el cual tiene ventajas como: menor requerimiento de espacio para secar, es desarmable, reduce la mano de obra, disminuye el tiempo de secado y conserva la calidad del producto. El silo consta de dos cámaras de secado y el flujo de aire puede circular a través de estas realizando secado o presecado dependiendo de la dirección del flujo empleada (sistema de compuertas), con lo cual se logra homogeneidad en la humedad final del grano. Además, presenta un mecanismo práctico para el descargue del grano seco, utilizando una inclinación en las camas de secado de 38° . El dimensionamiento del silo secador obtenido fue: Capacidad total = 2340 K., volumen de aire = 4540.61 CFM, pérdidas de presión (ΔP) = 2.066 pulg. c.a., motor eléctrico monofásico de 2.5 HP. La construcción y

evaluación de un prototipo a escala 1:5 del silo secador, sirvió como parámetro para obtener la siguiente información sobre la cinética del secado: humedad inicial (50.61%), humedad final (10.09%), temperatura promedio del aire de secado (46.67 °C), caudal ($Q = 0.08\text{m}^3/\text{s}$.) y tiempo de secado (28 horas). Además, permitió corroborar las condiciones de operación del sistema.

Así mismo el sistema de secado intermitente de flujos concurrentes para café pergamino es un sistema válido y será competitivo con otros sistemas mecánicos si se logran disminuir los costos de construcción, especialmente en el sistema de transporte.

Según los resultados obtenidos se recomienda no utilizar temperaturas de aire de secado mayores a 80 °C y un flujo de grano dentro del secador entre $0,037\text{ m}^3/\text{min. m}^2$ y $0,042\text{ m}^3/\text{min. m}^2$ (Ospina *et al*, 1991).

Por otra parte, Se han implementado en lenguaje de programación Microsoft Visual Basic 6.0, dos programas de simulación matemática para el secado de café pergamino, tomando como base los modelos de Thompson y de la Universidad del Estado de Michigan (MSU), para lo cual se utilizaron los parámetros determinados en Cenicafé para la simulación matemática del secado de café pergamino. Los programas estiman el funcionamiento de cada uno de los secadores mecánicos de café existentes en Colombia. Se compararon los resultados obtenidos mediante simulación para cada uno de los secadores, con los resultados experimentales obtenidos en Cenicafé, concluyéndose que éstos predicen adecuadamente el secado del café pergamino. Con base en los buenos resultados de la evaluación de los programas, se implementó un único programa de simulación para el secado de café pergamino (Parra *et al*, 2008).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación

La presente investigación se realizó en la vereda la Cristalina en la finca la Primavera del Corregimiento de Bruselas (Figura 6), del municipio de Pitalito, ubicado en el sur del departamento del Huila a 1519 msnm. con una temperatura media de 20 °C.

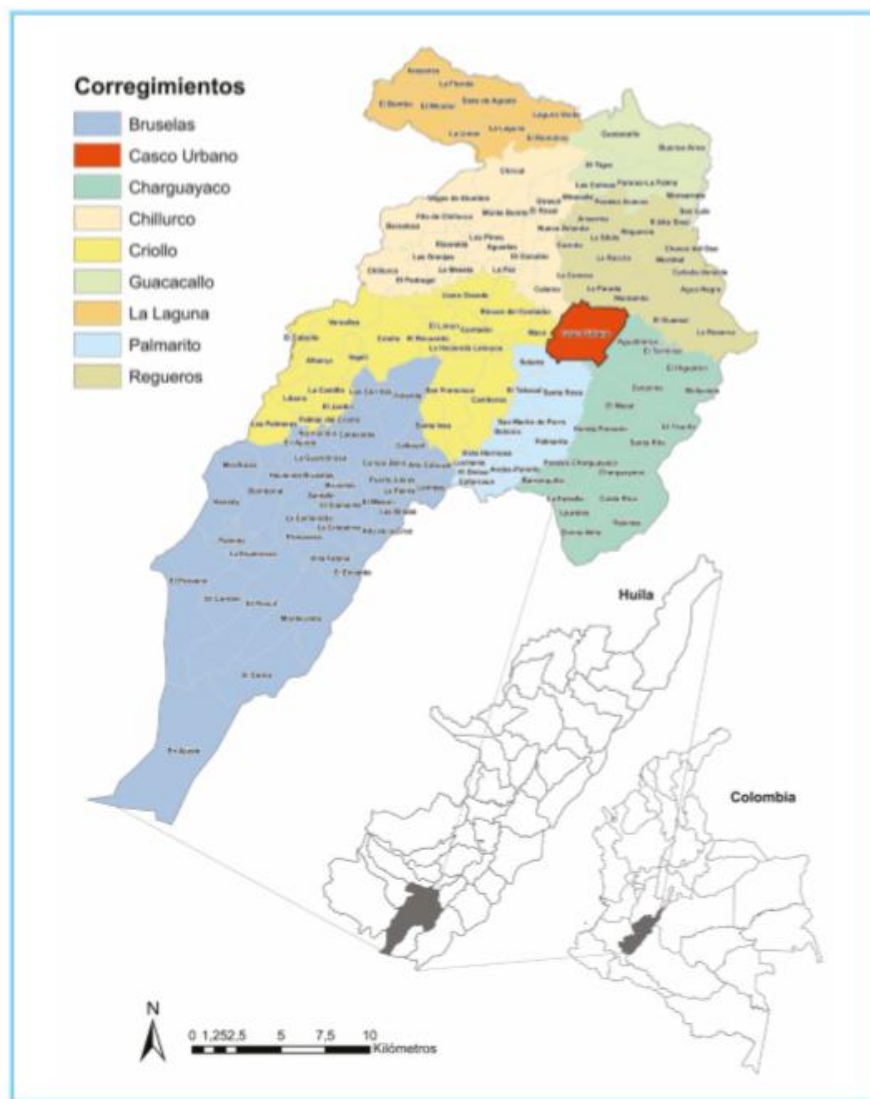


Figura 6. Mapa de Pitalito por corregimientos (Silva et al., 2015)

4.2. Especificaciones del equipo de secado

El equipo de secado mecánico se compone de un sistema de movimiento de aire ascendente, que atraviesa la capa, el aire caliente es impulsado por un ventilador centrífugo ubicado en dirección perpendicular al Plenum; un intercambiador de calor alimentado por pisco y una cámara de secado compuesta por la malla de descarga; ubicada de forma lateral y con un giro de 45° y a una distancia de 7 cm entre cada una de las celdas.

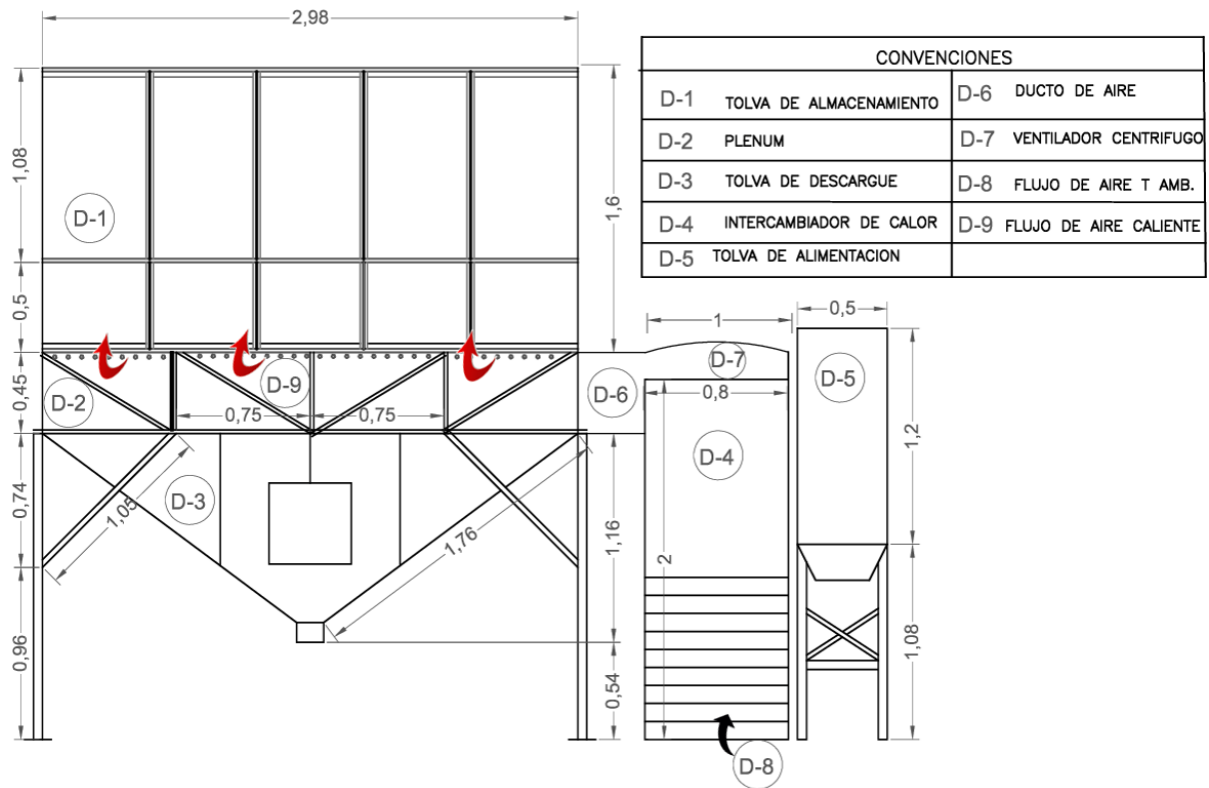


Figura 7. Secador mecánico estático modificado de capa profunda de café vista frontal y Dirección del flujo de aire para el secado mecánico de café

4.3. Metodología

Se realizaron dos jornadas de secado con diferentes isotérmicas (55 °C y 60 °C); 5,000 kg de café húmedo obtenido directamente de los productores de café del corregimiento de Bruselas, Pitalito-Huila, la procedencia de las muestras de café se observa en la tabla 1. Posteriormente fueron deshidratadas con el secador mecánico estático como se observa en la figura 7. Los datos experimentales fueron obtenidos durante el proceso de secado en intervalos de media hora durante la primera hora, intervalo de una hora en las dos horas siguientes y posteriormente mediciones en intervalos de dos horas hasta terminar el proceso de secado.

Tabla 1. Procedencia de las muestras de Café

Municipio	Pitalito
Corregimiento	Bruselas
Sector	Lotes y Fincas del sector
Materia Prima	(<i>Coffee arábica</i> L.)
A.s.n.m.	1400m- 2000m
Variedades	– Caturra – Colombia – Castillo

4.3.1. Determinación experimental de las curvas de secado e isothermas de desorción

Para las determinaciones experimentales de las curvas de secado y las isothermas de desorción; las muestras obtenidas durante el proceso de secado a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C, fueron equilibradas durante 24 horas, acorde con lo reportado por Goneli *et al* (2013). Los contenidos de humedad de equilibrio fueron determinados acorde a lo reportado por Rendón *et al* (2014); muestras de 10 g de café pergamino fueron deshidratados en estufa a $105 \pm 1^\circ\text{C}$ (IPP-55, Mermert, Germany) durante 24 h hasta peso constante. La actividad de agua fue medida mediante el Vapor Sorption Analyzer (VSA, Aqualab Decagon-Device), previa calibración del sensor de punto de rocío con cuatro soluciones acuosas saturadas 13.41 molal LiCl ($0.250 \pm 0.003 a_w$), 8.57m LiCl ($0.50 \pm 0.003 a_w$), 6.0 m NaCl ($0.760 \pm 0.003 a_w$) y 2.33m NaCl ($0.92 \pm 0.003 a_w$) (Schimdt y Lee, 2012). Las curvas de secado se obtuvieron mediante la relación del contenido de humedad de equilibrio frente al tiempo del proceso y su modelización se realizó mediante las ecuaciones matemáticas que se observan en la tabla 1; donde la razón de humedad (MR) fue determinada con la ecuación.

$$\text{MR} = \frac{X_{et} - X_{ef}}{X_{ei} - X_{ef}} \quad (1)$$

Donde X_{et} es el contenido de humedad en un tiempo determinado (kg kg^{-1} b.s), X_{ef} es el contenido de humedad final (kg kg^{-1} b.s) y X_{ei} es el contenido de humedad inicial (kg kg^{-1} b.s).

Tabla 2. Expresiones matemáticas para la modelización de las curvas de secado en granos de café pergamino húmedo

Modelo	Referencia	Expresión	Ecuación
Newton	(Resende <i>et al</i> , 2009)	$MR = \exp(-b_0t)$	(2)
Weibull	(Uribe <i>et al</i> , 2011)	$MR = \exp[-(\frac{t}{b_0})^{b_1}]$	(3)
Henderson-Pabis	(Uribe <i>et al</i> , 2011).	$MR = b_0 \exp(-b_1t)$	(4)
Henderson-Pabis Modificado	(Uribe <i>et al</i> , 2011)	$MR = b_0 \exp(-b_1t) + b_2 \exp(-b_3t) + b_4 \exp(-b_5t)$	(5)
Peleg	(Pereira da silva <i>et al</i> , 2014)	$MR = \left(\frac{1-t}{b_0 + b_1t}\right)$	(6)
Wang-Singh	(Resende <i>et al</i> , 2009)	$MR = 1 + b_0t + b_1t^2$	(7)
Logarithmic	(Resende <i>et al</i> , 2009)	$MR = b_0 \exp(-b_1t) + c$	(8)
Lewis	(Pereira da silva <i>et al</i> , 2014)	$MR = \exp(-b_0t)$	(9)
Thompson	(Alves <i>et al</i> , 2013)	$MR = \left(\frac{-b_0 - (b_0^2 + 4b_1t)^{0.5}}{2b_1}\right)$	(10)
Valcam	(Resende <i>et al</i> , 2009)	$MR = b_0 + b_1t + b_2t^{1.5} + b_2t^2$	(11)
Midilli	(Resende <i>et al</i> , 2009)	$MR = b_0 \exp(-b_1t^{b_2}) + b_2t$	(12)
Page	(Alves <i>et al</i> , 2012)	$MR = \exp(-b_0t^{b_1})$	(13)

En la tabla 2, t es el tiempo de secado y b_i son los parámetros empíricos de los modelos.

Tabla 3. Expresiones matemáticas para la modelización de las isotermas de desorción en granos de café pergamino húmedo

Modelo	Referencia	Expresión	Ecuación
GAB	(Corrêa et al, 2010)	$X_e = \frac{X_m KC(a_w)}{[1 - K(a_w)][1 - K(a_w) + K(a_w)]}$	(14)
Oswin	(Monte et al, 2018)	$X_e = b_1 \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^{b_2}$	(15)
Halsey	(Oliveira et al, 2016)	$X_e = \left[\frac{\exp(b_1 - b_2)}{-\ln a_w} \right]^{\frac{1}{b_3}}$	(16)
Smith	(Shigehisa et al, 2015)	$X_e = b_1 + b_2 \ln(1 - a_w)$	(17)
Chung-Pfost	(Mousa et al, 2014)	$X_e = b_1 + b_2 \ln(-\ln a_w)$	(18)
Caurie	(Sormoli and Langrish, 2015)	$X_e = \exp(b_1 + b_2 a_w)$	(19)
Iglesias y Chirife	(Sormoli and Langrish, 2015)	$X_e = b_1 + b_2 \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)$	(20)
White y Eiring	(Sormoli and Langrish, 2015)	$X_e = \frac{1}{(b_1 + b_2 a_w)}$	(21)
Peleg	(Sormoli and Langrish, 2015)	$X_e = b_0 a_w^{b_1} + b_2 a_w^{b_3}$	(22)
DLP	(Shittu, et al, 2015)	$X_e = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3$ $x = \ln(-\ln a_w)$	(23)
Kuhn	(Domian, et al, 2018)	$X_e = \left(\frac{b_1}{\ln a_w} + b_2 \right)$	(24)
Polynomial	(Mousa, et al, 2014)	$X_e = b_0 + b_1 a_w + b_2 a_w^2 + b_3 a_w^3$	(25)
Freundlich	(Akmel et al., 2015)	$X_e = b_1 (a_w)^{\frac{1}{b_2}}$	(26)
Yanniotis y Blahovec	(Bensebia and Allia, 2016)	$X_e = \frac{a_w}{b_0 + b_1 a_w} + \frac{a_w}{b_2 + b_3 a_w}$	(27)

Donde X_m , K y C son los parámetros del modelo de GAB, a_w es la actividad de agua, T la temperatura absoluta (K) y b_i los parámetros empíricos de los modelos de sorción.

Las isotermas de desorción se representan mediante la relación del contenido de humedad de equilibrio y la actividad de agua a la misma temperatura y fueron modelizadas con las ecuaciones que se observan en la tabla 3.

4.3.2. Estimación de los parámetros de los modelos y estadísticos de ajuste

Para el ajuste de los modelos matemáticos empleados para representar las curvas de secado y las isothermas de desorción, se realizó análisis de regresión no lineal con la herramienta Curve Fitting de Matlab® R2017a (The MathWorks Inc., Natick, MA, USA), para identificar los parámetros del modelo y calcular los intervalos de confianza del 95%. El coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajs}) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se utilizaron para evaluar la bondad de ajuste de los modelos. Acorde con lo reportado por Sormoli & Langrish (2015), es adecuado elegir el mejor ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales de acuerdo con el criterio de estadísticos (RMSE < 10% o 0.1 kg kg⁻¹ b.s.) y ($R^2_{\text{ajs}} > 0.98$); los valores más bajos de RMSE y más altos de R^2_{ajs} definen con éxito la bondad del modelo matemático y explican la variación de los datos experimentales (de Souza *et al*, 2014); bajo este criterio los mejores modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales fueron elegidos.

4.3.3. Estimación de los requerimientos energéticos

A. Calor isósterico de sorción

El calor isósterico de sorción se determinó mediante la siguiente ecuación (28).

$$Q_{\text{sn}} = q_{\text{sn}} + \lambda_{\text{vp}} \quad (28)$$

La adición de la entalpía de vaporización del agua al calor isósterico neto de sorción se realizó para cada temperatura, considerando la entalpía de 55 °C (2369.7 kJ kg⁻¹) y 60 °C (2357.5 kJ kg⁻¹)

B. Calor isósterico neto de sorción

La estimación del calor isósterico neto de sorción (q_{sn}) se determinó mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron (28).

$$q_{sn} = -R \left[\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_{x_e} \quad (29)$$

Donde a_w es la actividad de agua, T temperatura absoluta (K), R la constante universal de los gases ($8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y x_e contenido de humedad de equilibrio (% b.s.). El calor isósterico neto de sorción se calculó con la ecuación (28) utilizando la gráfica $\ln(a_w)$ frente a $1/T$ y calculando la pendiente a contenido de humedad constante (Bensebia & Allia, 2016); (Tadapaneni *et al.*, 2017); (Baptestini, *et al.*, 2017); (Taoufik, *et al.*, 2017); (Domian, *et al.*, 2018) y la pendiente resultante se multiplico por el valor de la constante universal de los gases (Bonner & Kenney, 2013).

C. Consumo específico de energía y eficiencia del sistema de secado

Se determinó la cantidad de agua a remover en el proceso de secado mediante balance de materia seca, como se observa en las siguientes ecuaciones.

$$P_i(1 - U_i) = P_f(1 - U_f) \quad (30)$$

$$\Delta_w = P_i - P_f \quad (31)$$

Donde P_i y P_f corresponden al peso inicial y final de la masa de granos de café (kg), U_i y U_f son los contenidos de humedad inicial y final (decimal, base húmeda) y Δ_w es la cantidad de agua removida durante el proceso de secado (kg). El consumo específico de energía (CEE) y la eficiencia del sistema de secado (μ), se determinaron con las siguientes ecuaciones.

$$CEE = \frac{E_s}{\Delta_w} \quad (32)$$

Donde E_s es la energía utilizada por el secador (kJ); se determinó a partir de la suma de la energía empleada por cada elemento del secador a la misma temperatura.

$$E_s = (E_v + E_m + E_{ic}) \quad (33)$$

Mediante las ecuaciones (34), (35) y (36), se estimó la energía empleada por el ventilador, el motor de alimentación de combustible y el intercambiador de calor del equipo.

$$E_v = (V_v I_v) t \quad (34)$$

$$E_m = (V_m I_m) t \quad (35)$$

$$E_{ic} = CC pC \quad (36)$$

Donde V_v y V_m son los voltajes (V) del ventilador y motor de alimentación de combustible; I_v y I_m es la corriente (A) del ventilador y motor de alimentación, t corresponde al tiempo de secado para cada temperatura (horas), CC es el consumo de cisco en la jornada y pC es el poder calorífico del cisco de café ($17,900 \text{ kJ kg}^{-1}$) (Ciro et al, 2011). El cálculo de la eficiencia del sistema de secado se realizó para cada temperatura, mediante la siguiente expresión.

$$\mu = \frac{E_{vp}}{E_s} * 100 \quad (37)$$

En la ecuación (36) E_{vp} representa la energía necesaria para la evaporación del agua en el producto; es igual al producto de la cantidad de agua removida del proceso de secado con la energía necesaria para vaporizar la humedad de los granos de café o calor isóterico de sorción ($\Delta_w * Q_{sn}$).

5. RESULTADOS Y DISCUSION

La tabla 4 presenta el ajuste de los modelos matemáticos a las curvas de secado en las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C.

El modelo de Weibull fue el que mejor representó las curvas de secado para las dos temperaturas experimentales, debido a su alta bondad de ajuste $R^2_{\text{ajs}} = 0.997$ y bajo $RMSE = 0.018 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s}$ y $R^2_{\text{ajs}} = 0.989$ y bajo $RMSE = 0.034 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$, respectivamente, en adición los intervalos de confianza de los parámetros del modelo de Weibull fueron estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%; indicando un buen ajuste para fines prácticos (Baptestini, *et al.*, 2017); puede considerarse como la mejor expresión matemática para representar la cinética de secado de los granos de café pergamino. Los demás modelos resultaron con valores R^2_{ajs} inferiores al modelo de Weibull.

Tabla 4. Ajuste y parámetros de modelos a curvas de secado

Modelo	Parámetros	Intervalos de Confianza 95%	R^2_{adj}	RMSE
Newton	55 °C $b_0 = 2.2 \times 10^{-2}$	[2×10^{-2} , 2.4×10^{-2}]	0.946	0.073
	60 °C $b_0 = 2.3 \times 10^{-2}$	[2.2×10^{-2} , 2.5×10^{-2}]	0.973	0.052
Weibull	55 °C $b_1 = 1.653$ $b_0 = 45.470$	[1.571, 1.735] [44.850, 46.090]	0.997	0.018
	60 °C $b_1 = 1.392$ $b_0 = 42.070$	[1.261, 1.522] [40.920, 43.230]	0.989	0.034
Henderson- Pabis	55 °C $b_1 = 2.2 \times 10^{-2}$ $b_0 = 1.055$	[2×10^{-2} , 2.4×10^{-2}] [-2.569×10^{14} , 2.569×10^{14}]	0.944	0.074
	60 °C $b_1 = 0.023$ $b_0 = 1.3$	[2.2×10^{-2} , 2.5×10^{-2}] [-5.092×10^{13} , 5.092×10^{13}]	0.972	0.053

Henderson-Pabis modificado	55 °C		0.935	0.08
	$b_5 = 9 \times 10^{-3}$	$[-6.198 \times 10^{29}, 6.198 \times 10^{29}]$		
	$b_4 = -5.2 \times 10^{-2}$	$[-6.198 \times 10^{29}, 6.198 \times 10^{29}]$		
	$b_3 = 0.065$	$[-1.043 \times 10^{14}, 1.043 \times 10^{14}]$		
	$b_2 = 0.175$	$[-4.402 \times 10^{22}, 4.402 \times 10^{22}]$		
	$b_1 = 0.500$	$[-3.797 \times 10^{29}, 3.797 \times 10^{29}]$		
	$b_0 = 0.612$	$[-3.797 \times 10^{29}, 3.797 \times 10^{29}]$		
	60 °C		0.967	0.056
	$b_5 = -0.221$	$[-1.382 \times 10^{29}, 1.382 \times 10^{29}]$		
	$b_4 = -0.073$	$[-1.382 \times 10^{29}, 1.382 \times 10^{29}]$		
$b_3 = 0.317$	$[-1.607 \times 10^{13}, 1.607 \times 10^{13}]$			
$b_2 = 0.186$	$[-5.020 \times 10^{20}, 5.020 \times 10^{20}]$			
$b_1 = 0.433$	$[-3.571 \times 10^{20}, 3.571 \times 10^{20}]$			
$b_0 = 0.976$	$[-2.377 \times 10^{20}, 2.377 \times 10^{20}]$			
Peleg	55 °C		0.994	0.025
	$b_1 = -1.102$	$[-1.243, -0.960]$		
	$b_0 = 94.140$	$[88.340, 99.940]$		
	60 °C		0.987	0.036
$b_1 = -0.705$	$[-0.882, -0.529]$			
$b_0 = 70.730$	$[64.3, 77.160]$			
Wang-Singh	55 °C		0.997	0.018
	$b_1 = -4 \times 10^{-3}$	$[-4 \times 10^{-3}, -3 \times 10^{-3}]$		
	$b_0 = -6 \times 10^{-2}$	$[-4 \times 10^{-3}, -5 \times 10^{-3}]$		
	60 °C		0.988	0.034
$b_1 = -3 \times 10^{-3}$	$[-4 \times 10^{-3}, -2 \times 10^{-3}]$			
$b_0 = -0.011$	$[-0.014, -0.010]$			
Logarithmic	55 °C		0.942	0.075
	$b_2 = 0.803$	$[-1.684 \times 10^{14}, 1.684 \times 10^{14}]$		
	$b_1 = 0.022$	$[0.019, 0.024]$		
	$b_0 = -1.296$	$[-7.389 \times 10^{14}, 7.389 \times 10^{14}]$		
	60 °C		0.972	0.053
	$b_2 = -0.307$	$[-7.345 \times 10^{29}, 7.345 \times 10^{29}]$		
$b_1 = 0.023$	$[0.022, 0.025]$			
$b_0 = 2.461$	$[-1.285 \times 10^{30}, 1.285 \times 10^{30}]$			
Lewis	55 °C		0.946	0.073
	$b_0 = 0.022$	$[0.020, 0.024]$		
	60 °C		0.973	0.052
$b_0 = 0.023$	$[0.022, 0.024]$			
Thompson	55 °C		0.603	0.197
	$b_1 = 43.630$	$[15.55, 71.710]$		
	$b_0 = 87.430$	$[31.4, 143.500]$		
	60 °C		0.719	0.168
$b_1 = 32.55$	$[16.510, 48,580]$			
$b_0 = -0.202$	$[-0.321, -0.083]$			

Valcam	55 °C	$b_3 = -2 \times 10^{-3}$	$[-5 \times 10^{-3}, -1 \times 10^{-3}]$	0.996	0.019	
		$b_2 = -2 \times 10^{-2}$	$[-5 \times 10^{-2}, 2 \times 10^{-2}]$			
		$b_1 = -1 \times 10^{-2}$	$[-0.012, 9 \times 10^{-2}]$			
		$b_0 = 0.993$	$[0.974, 1.013]$			
	60 °C	$b_3 = -4.912 \times 10^{-5}$	$[-0.001, 0.0011]$	0.988	0.034	
		$b_2 = -3 \times 10^{-2}$	$[-0.009, 0.004]$			
		$b_1 = -6 \times 10^{-2}$	$[-0.024, 0.012]$			
		$b_0 = 1.005$	$[0.974, 1.036]$			
Midili	55 °C	$b_2 = -0.019$	$[-0.993, 0.956]$	0.918	0.090	
		$b_1 = 2 \times 10^{-3}$	$[-0.968, 0.969]$			
		$b_0 = 1.014$	$[0.937, 1.091]$			
		60 °C	$b_2 = -0.022$	$[-1.111, 1.067]$	0.971	0.054
			$b_1 = 1 \times 10^{-3}$	$[-1.053, 1.053]$		
			$b_0 = 1.039$	$[1.004, 1.074]$		

Los modelos de Wang–Singh Valcam y Peleg, mostraron un buen ajuste a las curvas de secado; el modelo de Valcam en 55 °C tuvo un alto valor de $R^2_{ajs} = 0.996$ y bajo $RMSE = 0.019$ $kg\ kg^{-1}$ b.s, y para 60 °C un $R^2_{ajs} = 0.988$ y bajo $RMSE = 0.034$ $kg\ kg^{-1}$ b.s.; mostrando una muy poca diferencia con el modelo de Weibull; el modelo de Wang–Singh en 55 °C tuvo un alto valor de $R^2_{ajs} = 0.994$ y bajo $RMSE = 0.018$ $kg\ kg^{-1}$ b.s y para 60 °C un $R^2_{ajs} = 0.988$ y bajo $RMSE = 0.034$ $kg\ kg^{-1}$ b.s.; así mismo el modelo de Peleg en 55 °C tuvo un valor alto de $R^2_{ajs} = 0.994$ y bajo $RMSE = 0.025$ $kg\ kg^{-1}$ b.s y para 60 °C un $R^2_{ajs} = 0.987$ y bajo $RMSE = 0.036$ $kg\ kg^{-1}$ b.s; por otra parte el modelo de Henderson-Pabis arrojó los siguientes valores, para 55 °C: $R^2_{ajs} = 0.944$ y bajo $RMSE = 0.074$ $kg\ kg^{-1}$ b.s y para 60 °C un $R^2_{ajs} = 0.972$ y bajo $RMSE = 0.053$ $kg\ kg^{-1}$ b.s.

En cuanto a los modelos de Newton, Henderson-Pabis modificado, Logarithmic, Lewis no tuvieron un ajuste aceptable, es decir se podrían considerar para estos modelos predictivos en cuanto a la curva de secado, debido a sus bajos valores de R^2_{ajs} y $RMSE$. el modelo de Newton en 55°C tuvo un alto valor de $R^2_{ajs} = 0.946$ y bajo $RMSE = 0.073$ $kg\ kg^{-1}$ b.s, y para 60 °C un

$R^2_{ajs} = 0.988$ y bajo $RMSE = 0.034 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ Henderson-Pabis modificado en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ tuvo un alto valor de $R^2_{ajs} = 0.944$ y bajo $RMSE = 0.074 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.972$ y bajo $RMSE = 0.053 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$; Logarithmic en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ tuvo un alto valor de $R^2_{ajs} = 0.942$ y bajo $RMSE = 0.075 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$, y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.972$ y bajo $RMSE = 0.053 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y Lewis a $55 \text{ }^\circ\text{C}$ tuvo un alto valor de $R^2_{ajs} = 0.946$ y bajo $RMSE = 0.073 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$, y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.973$ y bajo $RMSE = 0.052 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$

En adición, los modelos de Midili y Thompson fueron los que tuvieron un menor ajuste a las curvas de secado, pues en el caso del modelo de Midili en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ tuvo un valor alto de $R^2_{ajs} = 0.918$ y bajo $RMSE = 0.090 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.971$ y bajo $RMSE = 0.054 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y el modelo de Thomson que fue el más alejado y menos ajustable, tuvo un valor en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ bajo de $R^2_{ajs} = 0.603$ y bajo $RMSE = 0.197 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.719$ y bajo $RMSE = 0.168 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ indicando que los modelos Midili y Thompson no se pueden considerar adecuados para representar la cinética de secado del producto.

La siguiente figura presenta las curvas de secado a las temperaturas de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ y $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

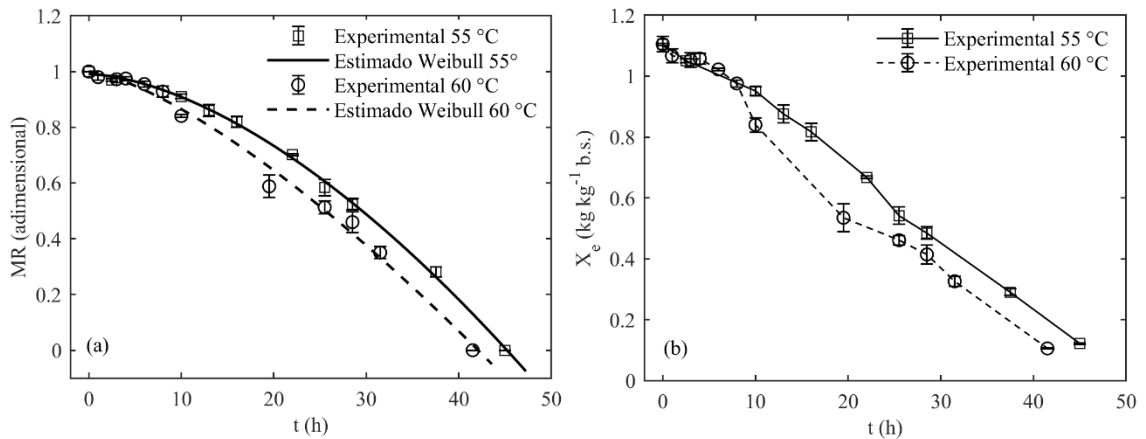


Figura 8 . Modelización de cinética de secado (a) y curvas de secado (b) a las temperaturas de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ y $60 \text{ }^\circ\text{C}$

En la figura 8 se observa el modelo de Weibull y su alta bondad de ajuste para representar la cinética de secado de los granos de café pergamino a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C; puede observarse que el efecto del incremento de la temperatura de secado promueve menores tiempos de proceso (Alves *et al*, 2013), (Corrêa *et al*, 2014) y atendiendo a lo reportado por Pereira da Silva *et al* (2014) en banano. En la figura 8b se observan diferencias estadísticamente significativas del contenido de humedad entre el rango que oscila entre las horas 9 (540 minutos) y 26 (1560 min.) del proceso, en los demás intervalos de tiempo, la humedad presentó una variación menor hasta culminar la deshidratación de los granos; estadísticamente fue significativa en función de la temperatura. El tiempo de secado para 55 °C (45 horas) 2700 min. Resultó ser mayor que el tiempo para 60 °C (41 horas) 2460 min, el resultado es acorde a lo reportado por Corrêa *et al*. (2014).

Las curvas de secado mostraron tendencia similar a lo reportado por Ciro *et al* (2011); Alves *et al* (2012) y Resende *et al* (2009) en granos de café y en el secado de otros productos agrícolas también tuvo una tendencia similar según lo reportado por Uribe *et al* (2011) y Pereira da silva *et al* (2014).

La tabla 5 presenta los modelos matemáticos de desorción para el ajuste de las isotermas de desorción de los granos de café pergamino para las temperaturas de 55 y 60 °C.

Tabla 5. Ajuste y parámetros de modelos para las isotermas de desorción

Modelo	Parámetros	Intervalos de Confianza 95%	R ² _{adj}	RMSE
GAB	55 °C		0.975	0.049
	K = 0.649	[-3.719, 5.017]		
	C = 0.039	[-13,870,13.950]		
	Xm = 6.004 kg kg ⁻¹ b.s.	[-2237, 225]	0.98	0.04
	60 °C			
	K = 0.835	[0.770, 0.900]		
C = 0.835	[-0.139,1.809]	0.983	0.037	
Xm = 0.218 kg kg ⁻¹ b.s.	[0.069, 0.367]			
Peleg	55 °C		0.999	0.010
	b ₃ = 3.180	[3.103, 3.256]		
	b ₂ = 1.074	[1.064, 1.083]		
	b ₁ = -14.890	[-21.740, -8.053]		
	b ₀ = -2.23×10 ⁻⁵	[-1×10 ⁻⁴ , 6.133×10 ⁻⁵]	0.983	0.037
	60 °C			
b ₃ = 2.910	[2.279, 3.542]	0.993	0.026	
b ₂ = 0.811	[0.653, 0.968]			
b ₁ = 21.960	[1.808, 42.110]			
b ₀ = 0.268	[0.107, 0.428]			
Freundlich	55 °C		0.963	0.055
	b ₂ = 0.295	[0.283, 0.307]		
	b ₁ = 1.089	[1.066, 1.113]	0.973	0.046
	60 °C			
b ₂ = 0.265	[0.283, 0.307]	0.982	0.042	
b ₁ = 1.007	[1.066, 1.113]			
Caurie	55 °C		0.973	0.046
	B ₂ = 4.087	[3.835, 4.339]		
	b ₁ = -3.978	[-4.208, -3.748]	0.999	0.006
	60 °C			
B ₂ = 4.484	[4.134,4.834]	0.979	0.04	
b ₁ = -4.452	[-4.776, -4.129]			
Yanniotis and Blahovec	55 °C		0.999	0.006
	b ₃ = -2.055	[-2.203, -1.907]		
	b ₂ = 2.914	[2.758 ,3.071]		
	b ₁ = -24.110	[-29.920, -18.300]		
	b ₀ = 11.360	[8.125, 14,600]	0.979	0.04
	60 °C			
b ₃ = -3.51×10 ⁴	[-6.65×10 ⁶ , 6.68×10 ⁶]	0.912	0.092	
b ₂ = 2.1×10 ⁴	[-3.962 ×10 ⁶ , 4×10 ⁶]			
b ₁ = -5.047	[-5.890, -4.205]			
b ₀ = 5.980	[5.148, 6.813]			
White and Eiring	55 °C		0.966	0.052
	B ₂ = -6.299	[-7,324, -5,273]		
	b ₁ = 7.166	[6.173, 8.159]	0.912	0.092
	60 °C			
B ₂ = -7.789	[-8.587, -6.990]	0.966	0.052	
b ₁ = 8.701	[7.922, 9.480]			

Polynomial	55 °C		0.999	0.005
	$b_3 = 9.313$	[8.194, 10.430]		
	$b_2 = -20.010$	[-22.66, -17.36]		
	$b_1 = 16.080$	[14.020, 18.130]		
	$b_0 = -4.293$	[-4.816, -3.771]		
	60 °C		0.993	0.024
	$b_3 = 31.480$	[25.310, 37.640]		
	$b_2 = -71.140$	[-85.970, -56.310]		
$b_1 = 54.510$	[42.780, 66.250]			
$b_0 = -13.770$	[-16.83, -10.72]			
Kuhn	55 °C		0.943	0.075
	$B_2 = 1.009$	[0.956, 1.063]		
	$b_1 = 0.599$	[0.544, 0.656]		
	60 °C		0.896	0.091
$B_2 = 0.939$	[0.868, 1.009]			
$b_1 = 0.618$	[0.533, 0.703]			
Iglesias y Chirife	55 °C		0.998	0.016
	$B_2 = 1.579$	[1.549, 1.609]		
	$b_1 = -0.518$	[-0.537, -0.496]		
	60 °C		0.947	0.068
$B_2 = 1.468$	[1.322, 1.615]			
$b_1 = -0.511$	[-0.615, -0.407]			

La tabla 5. Presenta los modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de desorción para cada temperatura, como puede observarse, el modelo de mejor ajuste para la temperatura de 55 °C fue el modelo de Yanniotis and Blahovec, debido a representa de manera satisfactoria el comportamiento de sorción, debido a su alto valor de $R^2_{ajs} = 0.999$ y bajo $RMSE = 5.665 \times 10^{-3}$ kg kg⁻¹ b.s. los parámetros del modelo fueron estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

Sin embargo, el modelo Polynomial a pesar de tener valores inferiores de R^2_{ajs} a los del modelo de Yanniotis and Blahovec, presentó un buen ajuste para las dos temperaturas experimentales 55 °C y 60 °C debido a su alto valor de $R^2_{ajs} = 0.999$ y bajo $RMSE = 5 \times 10^{-3}$ kg kg⁻¹ b.s. y $R^2_{ajs} = 0.993$ y bajo $RMSE = 2.4 \times 10^{-2}$ kg kg⁻¹ respectivamente. Así mismo el modelo de peleg presento resultados muy similares al modelo polynomial, para 55 °C tuvo un

alto valor de $R^2_{ajs} = 0.999$ y bajo $RMSE = 1 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $R^2_{ajs} = 0.983$ y bajo $RMSE = 3.7 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$.

El modelo de GAB presento un buen ajuste a los datos experimentales de cada temperatura, sin embargo, los intervalos de confianza de parámetros del modelo X_m , K y C , ajustados a las isotermas de desorción de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ no son estadísticamente significativos. De igual forma el parámetro C del modelo de GAB ajustado a las isotermas de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, resulto no estadísticamente significativo, por lo tanto, no se pueden considerar para representar el proceso de desorción del producto.

Los modelos de Freundlich e Iglesias and Chirife presentaron un ajuste inferior a los ya mencionados, sin embargo mostraron un buen ajuste para las temperaturas experimentales; pues Freundlich en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ sus valores de $R^2_{ajs} = 0.993$ y bajo $RMSE = 2.6 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y en $60 \text{ }^\circ\text{C}$ $R^2_{ajs} = 0.963$ y bajo $RMSE = 5.5 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$, en el caso de Iglesias and Chirife en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ sus valores de $R^2_{ajs} = 0.998$ y bajo $RMSE = 1.6 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y en $60 \text{ }^\circ\text{C}$ $R^2_{ajs} = 0.947$ y bajo $RMSE = 6.8 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$.

Por otro lado, los modelos de Caurie y Kuhn fueron los más alejados y menos ajustables, en el caso de Caurie, tuvo un valor en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ bajo de $R^2_{ajs} = 0.982$ y bajo $RMSE = 4.2 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.973$ y bajo $RMSE = 4.6 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ El modelo de Kuhn tuvo un valor en $55 \text{ }^\circ\text{C}$ bajo de $R^2_{ajs} = 0.943$ y bajo $RMSE = 7.5 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ y para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ un $R^2_{ajs} = 0.896$ y bajo $RMSE = 9.1 \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$; indicando que los modelos Caurie y Kuhn no se consideran adecuados para representar las isotermas de sorción.

En la figura 9. se observan los datos experimentales y las estimaciones obtenidas con los modelos de Yanniotis and Blahovec a $55 \text{ }^\circ\text{C}$ y Polynomial a $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

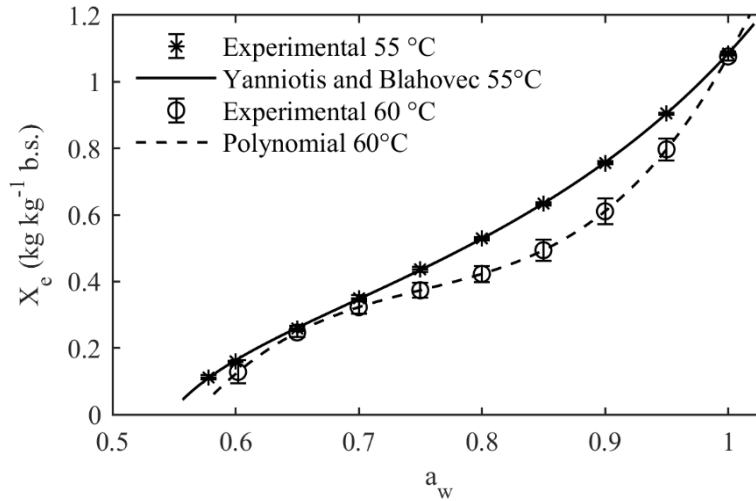


Figura 9. Isothermas de desorción experimental y modelizadas en granos de café pergamino a temperaturas de 55 °C y 60 °C

Las isothermas de desorción resultantes atendieron a la forma tipo II acorde a la clasificación de Brunauer et al. (1940), característica en alimentos no porosos y macro porosos (Inglezakis *et al*, 2019); fueron similares a las informadas en granos de café pergamino húmedo (Corrêa *et al*, 2010); café almendra verde (Iaccheri, et al., 2015), en adición, fueron similares a las reportadas en otros productos agrícolas; por ejemplo en el caso de semillas de pepino reportado por Corrêa, et al, (2015).

En el caso de arroz paddy representada por el modelo Chung Pfofost exhibió una forma sigmoidea, característica de la isoterma con una curva tipo II (Zeymer, et al., 2019); así mismo el comportamiento de sorción de humedad del arroz de Malasia exhibe el patrón sigmoideo común del Tipo II (Mousa et al, 2014). También las isothermas de sorción y desorción de vapor de agua por hojas y tallos de *Mentha viridis* mostró que las isothermas de sorción tienen una forma que corresponde a la clase de isothermas de tipo II (Taoufik, et al, 2017).

En el caso del secado en capa delgada de bananas enteras, Pereira Da silva et al, (2014), logró reportar en su estudio que el modelo de Peleg describió razonablemente el proceso, similar a como ocurrió en este caso.

En la figura 10. se observan la variación del calor isósterico neto y total de sorción para los granos de café pergamino.

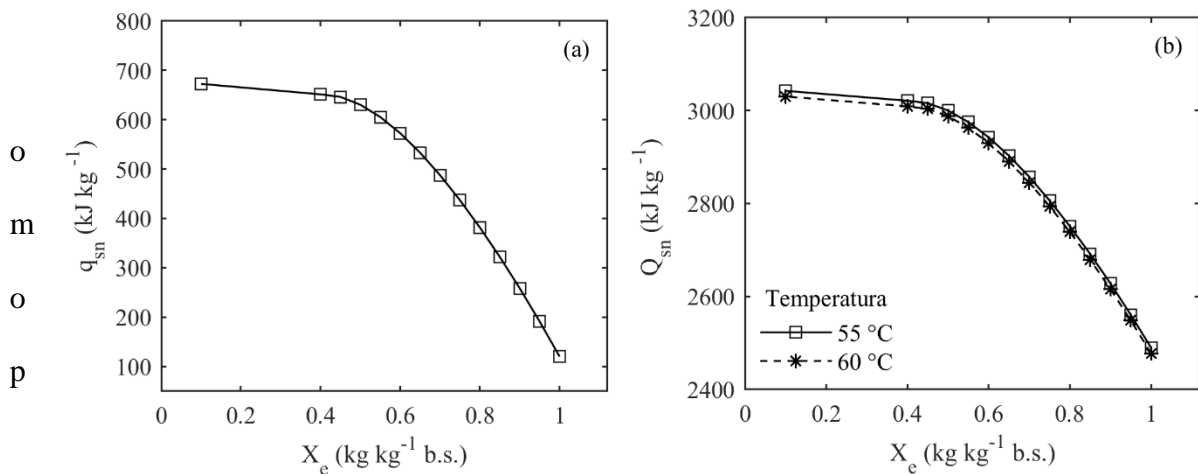


Figura 10. Variación del calor isósterico neto de sorción (a) y calor isósterico (b) de sorción a 55 y 60 °C como función del contenido de humedad de equilibrio

puede observarse en la figura 10, la energía requerida para vaporizar el agua contenido a en el producto aumenta con la disminución del contenido de humedad de equilibrio, esté hecho puede ser explicado debido a qué a bajos contenidos de humedad la sorción ocurre en los sitios disponibles más activos dando lugar a gran energía de interacción (Cano-Higueta et al, 2015). Las tendencias de los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por Ordoñez *et al* (2019) y Goneli *et al* (2013) en granos de café pergamino húmedo.

En la figura 10, puede observarse que la energía total requerida para eliminar el agua de los granos de café pergamino es menor con el aumento de la temperatura y con

disminución del contenido de humedad de equilibrio durante el proceso de secado se hace mayor, según Bon *et al*, (2012) el contenido de humedad de equilibrio disminuye cuando la temperatura aumenta con la actividad constante del agua. Pues este fenómeno se debe a que el calor de sorción isósterico, disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad, si está cerca de la entalpía de evaporación del contenido de humedad del agua. lo confirma Alves *et al*, (2013)

Además, mediante la misma figura se evidencio el requerimiento energético para la deshidratación de los granos de café pergamino húmedo durante el proceso de secado para cada temperatura experimental y puede ser usada para conocer los requerimientos energéticos a determinado contenido de humedad de equilibrio.

La tabla 6 presenta el consumo específico de energía y eficiencia del sistema de secado a las temperaturas experimentales de 55 y 60 °C.

Tabla 6. Consumo específico de energía y eficiencia del sistema de secado a 55 y 60°C

Temperatura (°C)	Δ_w (kg)	t (min)	E_s (kWh)	CCE (kJ kg ⁻¹)	Q_{sn} (kJ kg ⁻¹)	$\mu\%$
55	2335.79	2700	5457.19	8410.82	3042.332	36.17
60	2373.58	2460	5839.37	8856.56	3030.132	34.21

Se puede observar las diferencias en el consumo energético del secador mecánico estático modificado de capa profunda para café y su eficiencia en función de la temperatura de secado. La temperatura de 55 °C resultó con menor consumo de energía utilizada y menor consumo específico con una eficiencia del 36.17%; por otro lado, la temperatura de secado de

60 °C tuvo una diferencia de 3 h en el tiempo de secado con respecto a la de 55 °C pero con una eficiencia de 34.21% a la temperatura de 60 °C, estos resultados se pueden corroborar con lo dicho por Bon et al, (2012); el contenido de humedad de equilibrio disminuye cuando la temperatura aumenta con la actividad constante del agua. Pues este fenómeno se debe a que el calor de sorción isósterico, disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad, además la eficiencia fue mayor a menor temperatura, es acorde con lo reportado por Bon et al (2012); a menor temperatura permite que el agua se libere más fácil que a mayor temperatura, pues el aumento en el calor de sorción a bajos contenidos de humedad es explicado por la existencia de sitios polares altamente activos en la superficie del material; debido a que la temperatura activa las moléculas de agua lo que les permite separarse de sus sitios de sorción (Corrêa, et al., 2014), además la actividad de agua aumenta con un contenido de humedad constante, es decir el producto se vuelve menos higroscópico cuando aumenta la temperatura debido al aumento de la energía cinética asociada con las moléculas de agua del material (Bon et al, 2012). Bastioğlu et al (2017) mencionan que el comportamiento se debe a que las fuerzas atractivas entre las moléculas disminuyeron debido al aumento en la energía cinética de las moléculas de agua a más altas temperaturas, disminuyendo así el contenido de humedad de equilibrio.

El calor isósterico de sorción en altos contenidos de humedad, evidencia que es aproximado a la entalpia de vaporización del agua libre, lo que indica que disminuye la energía para vaporizar el agua contenida en los granos de pergamino; es decir que a al disminuir el contenido de humedad, aumenta el calor isósterico de sorción y cuando la temperatura disminuye el calor isósterico de sorción aumenta (Ordoñez et al, 2018), debido a

que el aumento de la temperatura promueve en el alimento, la velocidad entre las moléculas de agua, facilitando su evasión de la superficie del absorbente.

Así mismo, la eficiencia del secador mecánico es similar a lo reportado por Buitrago (1991), Parra *et al* (2008) .

6. CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que el requerimiento de energía y eficiencia del proceso secado con el equipo mecánico estático modificado de capa profunda para café, a la temperatura de 55 °C obtuvo menor consumo de energía con 8410.82 kJ kg⁻¹ y la eficiencia más alta del proceso con un valor de 36.17%.

El modelo Weibull representó con éxito el proceso de secado a las temperaturas de 55 y 60 °C, debido a su alta bondad de ajuste a los datos experimentales de secado; su alto valor de R²_{aj} de 0.997 y bajo RMSE 0.018 kg kg⁻¹ b.s., para 55 °C y R²_{aj} de 0.989 y bajo RMSE 0.034 kg kg⁻¹ b.s., para 60 °C.

El efecto del incremento de la temperatura fue notorio en la cinética de secado y el comportamiento de desorción; el contenido de humedad de equilibrio disminuyó con el aumento de la temperatura a un mismo nivel de actividad agua y tiempo de secado.

Entre los modelos matemáticos evaluados el modelo Yanniotis and Blahovec y Polynomial, representaron de manera satisfactoria las isotermas de desorción de los granos de café pergamino para las temperaturas de 55°C y 60 °C, además, las isotermas evidenciaron a forma típica y representativa en la matriz alimentaria y comparable con las reportadas en café pergamino de otros cultivares.

El calor isósterico de sorción disminuyó con incrementos del contenido de humedad, evidenciando la energía requerida para vaporizar el agua del material (~3036.232 kJ kg⁻¹) para deshidratar los granos en un rango de humedad de 1.151 a 0.126 kg·kg⁻¹ b.s.

7. RECOMENDACIONES

1. Una vez concluido el trabajo de grado , se considera interesante investigar sobre otros aspectos relacionados con el secador mecánico.
2. Extender los estudios de la tesis, al estudio de calidad del café, una vez culminado el proceso de secado, además llevar el equipo a la automatización que permitan mejorar las condiciones de operación
3. Dividir la tolva de almacenamiento en dos, ya que esta cuenta con una luz extensa, al trabajar el equipo a su máxima capacidad se produce una carga puntual sobre la malla de descargue ocurriendo una flexión en esta, que a su vez impide que el producto sea descargado uniformemente
4. Separar el Plenum de la tolva de descargue, esto permitirá una reducción del área, donde las pérdidas de presión de aire serán menores, debido a que será repartida uniformemente la carga del café en el secador.
5. Se recomienda operar el equipo a una temperatura de 55°C, debido que a esta condición se obtuvo el menor consumo energético y la mayor eficiencia.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, E. G., Isquierdo, P. E., Borém, M. F., Siqueira, C. V., Oliveira, D. P., Andrade, T. E., 2013. Drying kinetics of natural coffee for different temperature and low relative humidity. *Coffee Science*, Lavras 8(2):238-247. Consultado el 23 de abril de 2019. https://www.researchgate.net/publication/289327720_Drying_kinetics_of_natural_coffee_for_different_temperatures_and_low_relative_humidity
- Akmel, D. C., Kakou, K., Koné, K. Y., Assidjo, N., Kouamé, P., 2015. Desorption Isotherms and Isothermic Heats of Fermented Cocoa Beans (*Theobroma cocoa*), *Journal of Food Research*; Vol. 4, No. 3; 2015 ISSN 1927-0887 E-ISSN 1927-0895
- Bensebia, O., & Allia, K. (2016). Analysis of adsorption–desorption moisture isotherms of rosemary leaves. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 3(3), 79-86.
- Bastioğlu, A. Z., Koç, M., Ertekin, F. G., 2017. Moisture sorption isotherm of microencapsulated extra virgin olive oil by spray drying. *Food Measure*. DOI 10.1007/s11694-017-9507-4
- Baptistini, G. C., Matos, A. T., Martinez, M. A., Borges, A. C., & Matos, M. P. (2017). Hydraulic conductivity variability in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Engenharia Agrícola*, 37(2), 333-342.
- Bon, J., Vaquiro, H. A., Mulet, A., 2012. Modeling sorption isotherms and isosteric heat of sorption of mango pulp cv. tommy atkins. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. Vol 10 No. 2 (34 - 43). Consultado el 16 de marzo de 2019.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612012000200005

Bonner, I. J., & Kenney, K. L. (2013). Moisture sorption characteristics and modeling of energy sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Journal of Stored Products Research*, 52, 128-136.

Buitrago, O. Implementación del secado mecánico de café en carros secadores. Bogotá: Departamento de Ingeniería Agrícola/Universidad Nacional de Colombia, 1991. 184p (Doctoral dissertation, Tesis Ingeniero).

Brunauer, S., Deming, LS, Deming, WE y Teller, E. (1940) Sobre una teoría de la adsorción de gases de van der Waals. *Revista de la American Chemical Society*, 62, 1723-1732. <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>

Cano-Higuita, D. M., Villa-Vélez, H. A., Telis-Romero, J., Váquiro, H. A., & Telis, V. R. N. (2015). Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. *Food and Bioproducts Processing*, 93, 19-28.

Ciro Velásquez, H. J., Cortés Rodríguez, M., & López Castaño, J. L. (2011). Secado de Café en Lecho Fijo con Intermitencia Térmica y Flujo de Aire Pulsado. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*.

Corrêa, P.C, Botelho, M. F., Botelho, C. Silva de C., Goneli, D. L. André., 2014. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. *Revista Brasileira de Engenharia*

Agrícola e Ambiental., Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1047-1052>

Corrêa, P. C., Reis, M. F. T., Oliveira, G. H. H. D., Oliveira, A. P. L. R. D., & Botelho, F. M. (2015). Moisture desorption isotherms of cucumber seeds: Modeling and thermodynamic properties. *Journal of Seed Science*, (AHEAD), 00-00.

Corrêa, P.C, Goneli, L. A., Junior, A. Oliveira, H. G., Valente, D., 2010. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. *International Journal of Food Science and Technology*. doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02373.x

Corrêa, P. C., Baptestini, F. M., Zeymer, J. S., Araujo, M. E. V. D., Freitas, R. C. P. D., & Leite, R. A. (2019). Dehydration of infrared ginger slices: heat and mass transfer coefficient and modeling. *Ciência e Agrotecnologia*, 43.

de Souza, S. J. F., Váquiro, H. A., Villa-Vélez, H. A., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2014). Physical, thermal and water-sorption properties of passion fruit seeds. *International journal of food engineering*, 10(4), 785-798.

Domian, E., Brynda-Kopytowska, A., Ciesla, J., Górska, A., 2018. Effect of carbohydrate type on the DVS isotherm-induced phase transitions in spray-dried fat-filled pea protein-based powders. *Journal of Food Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.012>

Doymaz, I. (2006). Comportamiento de secado de capa fina de las hojas de menta. *Revista de Ingeniería de Alimentos*, 74 (3), 370-375.

- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1997). Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. *Energy conversion and management*, 38(14), 1483-1500.
- Ekechukwu, O. V., Norton, B., (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00093-4)
- Espinoza Martínez, V. A., Menjívar Morales, A. G., & Najarro Salinas, Á. E. (2018). *Diseño, construcción y caracterización de secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Federación Nacional Cafeteros de Colombia. (2014). *Ensayos sobre Economía Cafetera*. Caficultura sostenible, moderna.
- Gonzales Sánchez, I. J. (2014). *Diseño y Prototipo de secador de café excelso automatizado con sistema scada*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., Júnior A. P. C. (2013) Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. *LWT - Food Science and Technology*, 50 (2013) 386 – 391, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.006>
- Gutierrez Florez, J. M., Sanz Uribe, J. R., Oliveros Tascón, C. E., & Orozco Hincapie, C. A. (2012). *Ventiladores para Secadores de Café: Diagnostico, diseño y construcción económica de ventiladores centrifugos*. Chinchiná: FNC:CENICAFÉ.

- Henao Arismendy, J. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. Medellín Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Henao Cuellar, J. D., Perdomo Centeno, L. A., & Cuellar Pérez, L. E. (2009). *Diseño de un Equipo para Secado Mecánico de Café y su Evaluación a Partir de la Construcción de un Modelo a Escala 1:5*. Neiva-Huila: Universidad Surcolombiana.
- Iaccheri, E., Laghi, L., Cevoli, C., Berardinelli, A., Ragni, L., Romani, S., & Rocculi, P. (2015). Different analytical approaches for the study of water features in green and roasted coffee beans. *Journal of food engineering*, 146, 28-35.
- Inglezakis, V., Tokmurzin, D., Aiyumbetov, B., Abylkhani, B., Yagofarova, A., Sarbassov, Y.... & Pouloupoulos, S. G. (2019). Fixed-bed gasification and pyrolysis of organic fraction of MSW blended with coal samples. *Chemical Engineering Transactions*, 72, 163-168.
- Mousa, W., Ghazali, FM, Jinap, S., Ghazali, HM y Radu, S. (2014). Isotermas de sorción y calores isostéricos de sorción de arroz de Malasia. *Revista de ciencia y tecnología de alimentos* , 51 (10), 2656-2663.
- Monte, F., Redding, S. J., & Rossi-Hansberg, E. (2018). Commuting, migration, and local employment elasticities. *American Economic Review*, 108(12), 3855-90.
- Mulet, A., García-Reverter, J., Sanjuán, R., & Bon, J. (1999). Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. *Journal of Food Science*, 64(1), 64-68.

- Mulet, A., Garcia-Pascual, P., Sanjuán, N., & García-Reverter, J. (2002). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering*, 53(1), 75-81.
- Noshad, M., Shahidi, F., Mohebbi, M., Mortazavi, S. A., (2012). Desorption isotherms and thermodynamic properties of fresh and osmotic–ultrasonic dehydrated quinces. *Journal of Food Processing and Preservation* ISSN 1745-4549. doi:10.1111/j.1745-4549.2011.00671.x
- Oliveros, C. E., & Saenz, J. R. (2011). Ingeniería y Café en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 99-114.
- Oliveira, A. S., Schlink, B. R., Hairston, W. D., König, P., & Ferris, D. P. (2016). Induction and separation of motion artifacts in EEG data using a mobile phantom head device. *Journal of neural engineering*, 13(3), 036014.
- Ordoñez Silva, A. M., & Campos Cerquera, A. S. (2018). *Desarrollo y evaluación de Prototipo (a escala) de laboratorio para secado de café con control manual de temperatura y flujo de aire*. Neiva-Huila: Universidad Surcolombiana.
- Ospina Machado, J. E., Alvarez Mejía , F., & Roa Mejia, G. (1991). Evaluacion de un secador intermitente de flujos concurrentes (ifc) para cafe. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 51-79.
- Parra Coronado, A., Roa Mejía , G., & Oliveros Tascon , C. E. (2008). SECAFÉ *Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 415-427.

- Parra Coronado, A., Roa Mejía , G., & Oliveros Tascón, C. E. (2008). *SECAFÉ Parte II: Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino*. Bogotá: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.
- Parra Coronado, A., Roa Mejía, G., Oliveros Tascón, C. E., & Sanz Uribe, J. R. (2017). *Optimización Operacional de secadores Mecánicos para café pérgamino*. Colombia: Cenicafé.
- Patiño-Velasco, M. M., Pencue-Fierro, E. L., Vargas-Cañas, R., 2016. Determinación del contenido de humedad en granos de café pergamino seco utilizando speckle dinámico. *Biología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. DOI:10.18684/BSAA(14)84-91
- Pereira da silva, W., Cleide, M. D. P. S, Gama, F. J. A., Gomes, P. J., 2014. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.003>
- Pérez-Alegria, L. R., Ciro-Velásquez, H. J., 2001. Mathematical simulation of parchment coffee drying in a deep bed with airflow reversal. *American Society of Agricultural Engineers* ISSN 0001-2351. Consultado el 23 de Agosto de 2018. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=6415&t=2&redir=&redirType>
- Poltronieri, P., Rossi, F., 2016. Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance. *Journal Challenges*. DOI: 10.3390/challe7020019

- Prokopiuk, D., Martínez-Navarrete, N., Andrés, A., Chiralt, A., & Cruz, G. (2010). Influence of Roasting on the Water Sorption Isotherms of Argentinean Algarroba (*Prosopis alba* Griseb) Pods. *International Journal of Food Properties*, 13(4), 692-701.
- Quintero, M. L., Rosales, M., 2014. El mercado mundial del café: tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad. *Visión Gerencial* (Julio-Diciembre). ISSN 1317-8822. Consultado el 23 de agosto de 2019. <http://www.redalyc.org/pdf/4655/465545897005.pdf>
- Ramírez, C. A., Oliveros, C. E., Sanz, J. R., Acosta, R., & Buenaventura, J. D. (2006). Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café Descafé.
- Resende, O., Arcanjo, V. R., Siqueira, C. V., Rodrigues, S., 2009. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*. DOI: 10.4025/actasciagron.v31i2.588
- Rendón, M. Y.; Garcia, S. TJ.; Bragagnolo, N. Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage, *Food Chemistry*, 147, 279-286, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.123>
- Silva, P. M., Garavito, S., Figueroa, C., Natlollo, P., Hammer, T., & Cuéllar, C. (Octubre de 2015). *RUTA DE CAMBIO DE PITALITO 2030 Consciente y comprometido con el cambio climático*. Obtenido de RUTA DE CAMBIO DE PITALITO 2030 Consciente y comprometido con el cambio climático: <http://www.alcaldiapitalito.gov.co/publicaciones/Ruta-Cambio-Pitalito.pdf>
- Shigehisa, T., Inoue, T., & Kumagai, H. (2015). Mathematical model of water sorption isotherms of UBC. *Fuel Processing Technology*, 131, 133-141.

- Shittu, TA, Idowu-Adebayo, F., Adedokun, II y Alade, O. (2015). Características de adsorción de vapor de agua del polvo de almidón-albúmina y comportamiento reológico de su pasta. *Nigerian Food Journal* , 33 (1), 90-96.
- Sormoli, M. E., & Langrish, T. A. (2015). Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 875-882.
- Schmidt, S. J., & Lee, J. W. (2012). Comparison between water vapor sorption isotherms obtained using the new dynamic dewpoint isotherm method and those obtained using the standard saturated salt slurry method. *International Journal of Food Properties*, 15(2), 236-248.
- Taoufik, F., El Hadek, M., Hnini, M. C., Benchanaa, M. B., El Hammioui, M., & Hassani, L. M. I. (2017). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of mint variety (*Mentha viridis*) leaves and stems: Experimental and mathematical investigations. *The European Physical Journal Special Topics*, 226(5), 993-1000.
- Tadapaneni, R. K., Yang, R., Carter, B., & Tang, J. (2017). A new method to determine the water activity and the net isosteric heats of sorption for low moisture foods at elevated temperatures. *Food research international*, 102, 203-212.
- Uribe, L., Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Oyanadel, R., Torrico, S. J., Miranda, M., 2011. Characteristics of Convective Drying of Pepino Fruit (*Solanum muricatum* Ait.): Application of Weibull Distribution. *Food Bioprocess Technol.* DOI 10.1007/s11947-009-0230-y

- Váquiro, H A., 2009. Contribución al estudio y optimización del secado intermitente: aplicación al secado de mango (*Mangifera indica* L var. Tommy Atkins). Thesis for: Doctor, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Tecnología de Alimentos. Valencia, España Advisor: José Bon Corbín, Antonio Mulet Pons. DOI: 10.4995/Thesis/10251/6062
- Van den Berg, C. (1981). Vapour sorption equilibria and other water-starch interactions: a physico-chemical approach (Doctoral dissertation, Van den Berg).
- Zeymer, J. S., Corrêa, P. C., de Oliveira, G. H. H., Baptestini, F. M., & Campos, R. C. (2019). Mathematical modeling and hysteresis of sorption isotherms of paddy rice grains. *Engenharia Agrícola*, 39(4).

ANEXOS

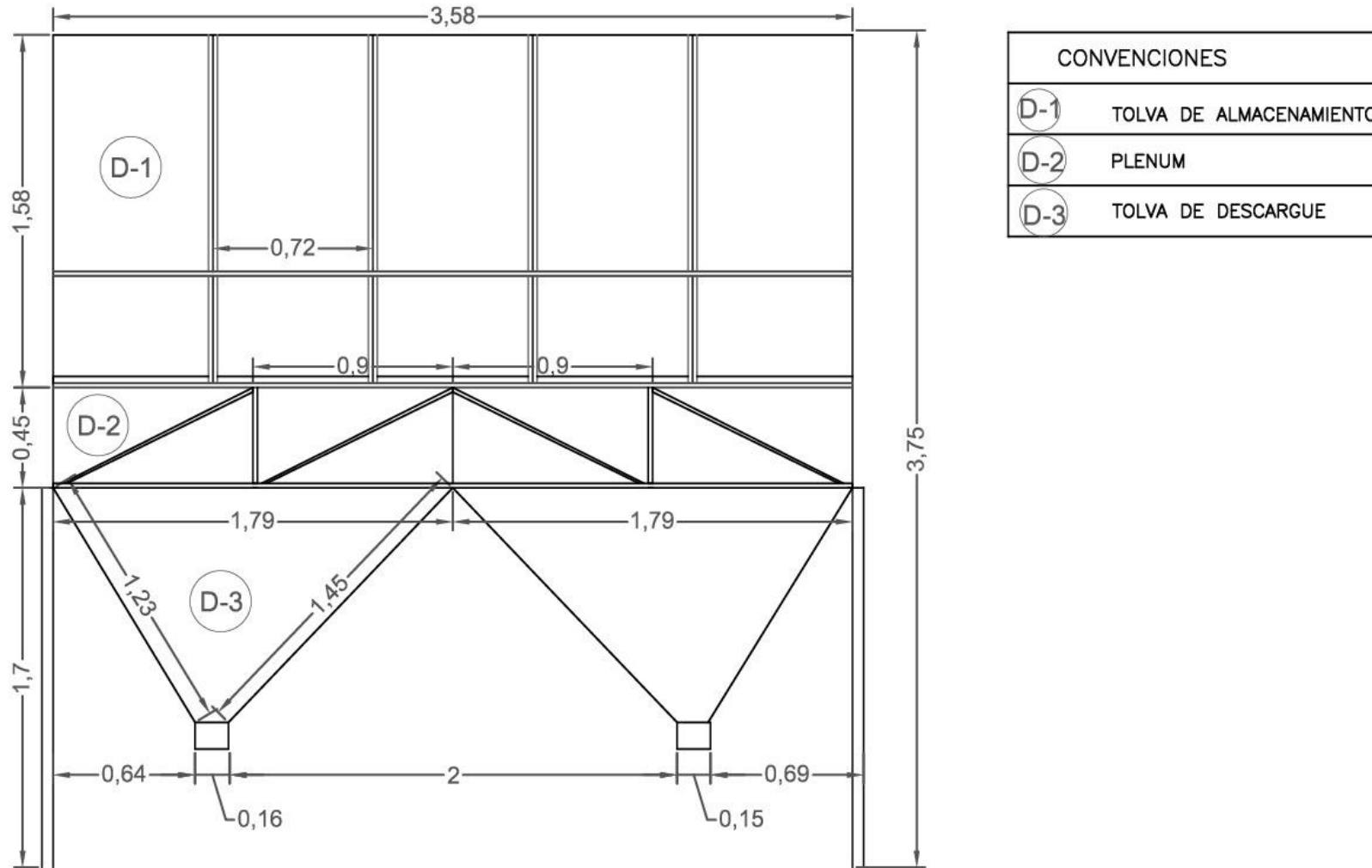


Figura 11. Vista lateral izquierda de Secador mecánico estático modificado de capa profunda de café.

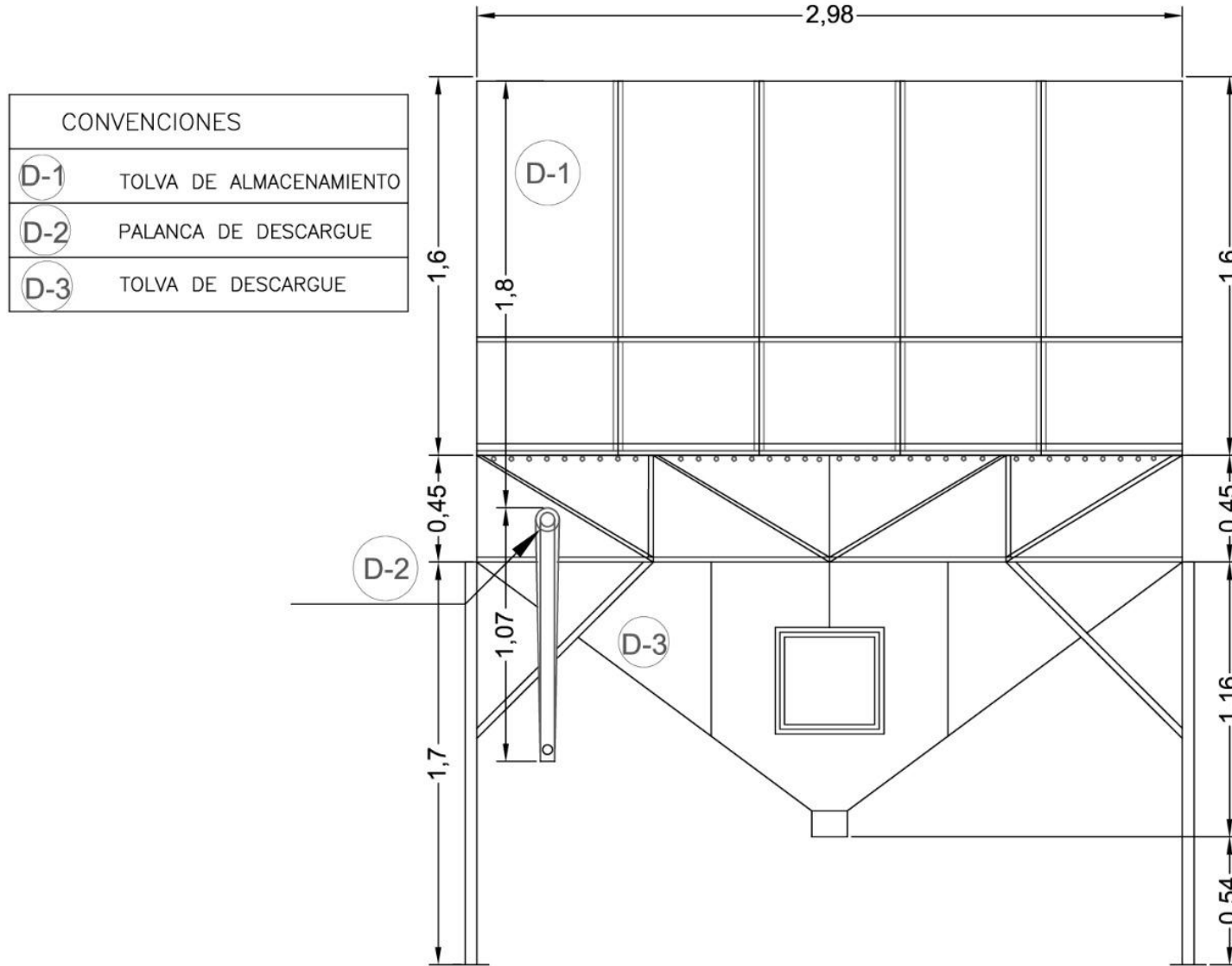


Figura 12. Vista trasera de Secador mecánico estático modificado de capa profunda de café.

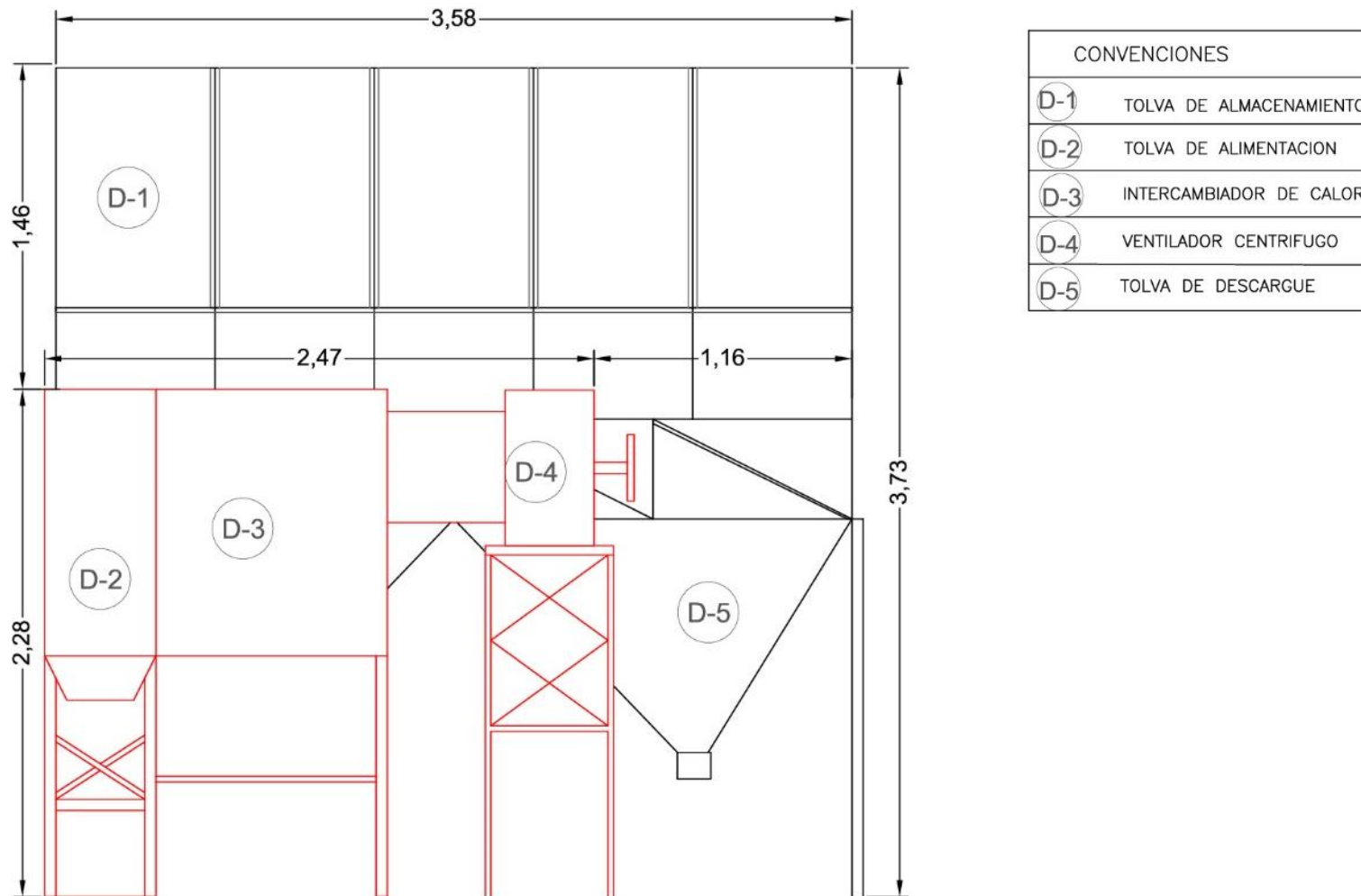


Figura 13. Vista lateral derecha de Secador mecánico estático modificado de capa profunda de café

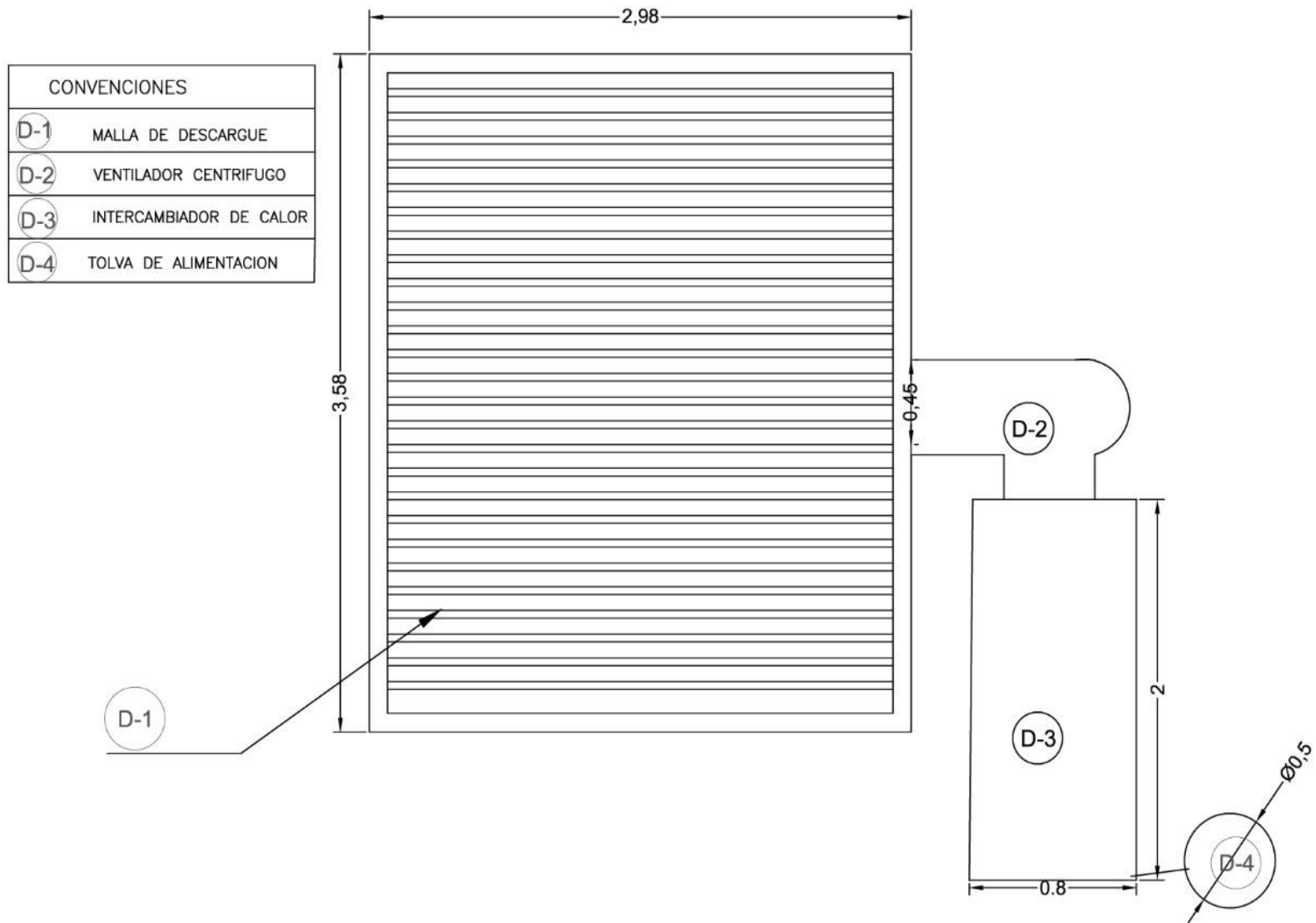
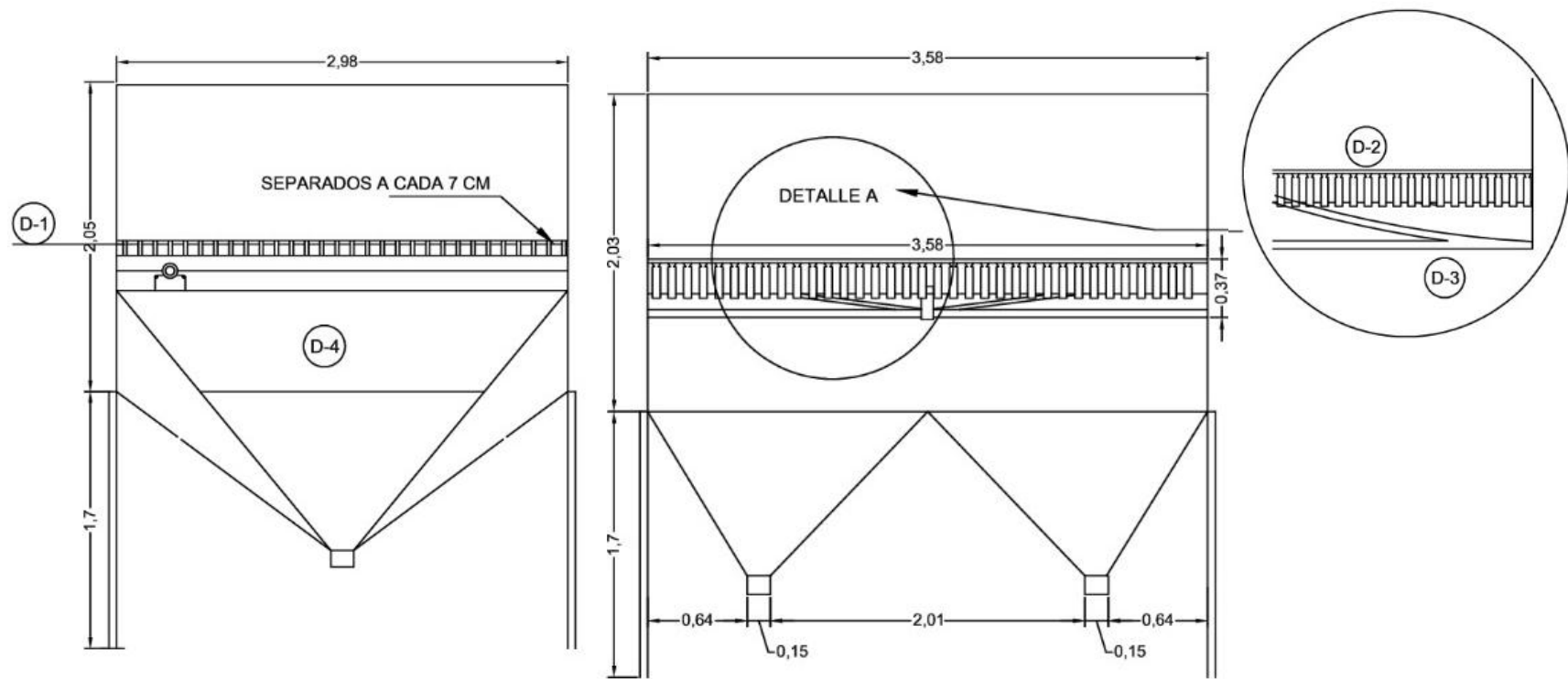


Figura 14. Vista en planta de Secador mecánico



CONVENCIONES	
D-1	MALLA DE DESCARGUE
D-2	MALLA CORTE DETALLE A
D-3	ANGULO DE SOPORTE
D-4	TOLVA DE DESCARGUE

Figura 15. Corte vista frontal y lateral; detalle de malla.



Figura 16. Vista frontal de secador mecánico para café

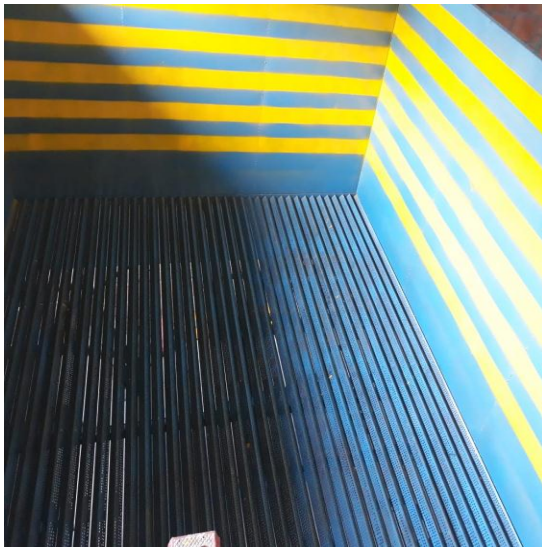


Figura 17. Vista en planta de Malla de descargue de secador mecánico para café



Figura 18. Vista de corte lateral de malla de descarga



Figura 19. Intercambiado Calor



Figura 20. Entrada de aire al intercambiador de Calor



Figura 21. Tolva y motor par alimentación de cisco



Figura 22. Cisco utilizado en el proceso de secado



Figura 23. Ventilador centrifugo



Figura 24. Panel de control para la Temperatura de operación