

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“PROCESO DE SECADO DE PITUCA (*Colocasia esculenta*) EN UN  
SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

LAURA FABIOLA OBANDO MORENO

ELIZABETH VEGA VEGA

Callao, 2019

PERÚ

**“PROCESO DE SECADO DE PITUCA (*Colocasia  
esculenta*) EN UN SECADOR ROTATORIO  
DISCONTINUO”**

## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por la señorita Bachiller **ELIZABETH VEGA VEGA** y la señorita Bachiller **LAURA FABIOLA OBANDO MORENO** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Ing. OSCAR JUAN RODRIGUEZ TARANCO : Presidente

Ing. CARMEN MABEL LUNA CHAVEZ : Secretaria

Ing. CESAR GUTIERREZ CUBA : Vocal

Ing. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS : Asesor

Tal como está asentado en el Libro de Actas N°2 de Tesis sin Ciclo de Tesis Folio N° 132 y Acta N° 315 de fecha **DIECINUEVE DE AGOSTO DE 2019**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis sin Ciclo de Tesis, de conformidad establecida por el reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 309-2017-CU de fecha 24 de octubre de 2017 y en su Cuarta Disposición Transitoria, norma los requisitos de los expedientes para la Obtención del Grado Académico de Bachiller.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darnos la vida, la fortaleza de seguir adelante y nunca dejarnos rendir para alcanzar nuestros sueños; a nuestro asesor de tesis el Ing. Luis Carrasco Venégas, por su apoyo durante todo el proceso del proyecto de tesis.

Y en especial a nuestros padres: Francisco Daniel Obando De La Cruz y Eda Elsa Moreno León; Melquiades Vega Mego y Edisa Vega Gonzales, por su apoyo incondicional, dedicación, sus sabios consejos que nos inspiran a ser mejores profesionales y seres humanos.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios, por iluminarnos durante toda la vida, por cuidarnos y darnos la dicha de vivir esta gran experiencia universitaria.

Gracias a mi asesor de tesis Luis Carrasco Venégas por su paciencia, dedicación, por haber podido contar con su ayuda y sus sabios consejos.

Gracias a todas las personas de la Universidad Nacional del Callao, por su atención y amabilidad durante todo el trayecto del desarrollo de la tesis, a la Facultad de Ingeniería Química por darnos las facilidades para poder investigar como: habilitar sus instalaciones para los alumnos, contar con equipos en buen estado y brindarnos horarios flexibles para poder usar el laboratorio de investigación.

A nuestros padres por apoyarnos, guiarnos, creer en nosotros, ser el soporte en nuestras vidas, porque cada vez que nos sentíamos cansados ellos estaban ahí con palabras de aliento para continuar y no darnos por vencidos.

## ÍNDICE

PRÓLOGO DEL JURADO .....	1
DEDICATORIA .....	2
AGRADECIMIENTO .....	3
TABLAS DE CONTENIDO .....	7
TABLA DE GRÁFICOS .....	10
TABLA DE FIGURAS.....	11
RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. Descripción de la realidad problemática.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Formulación del problema .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.1. Problema general .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.2. Problemas específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. Objetivos de la investigación.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1. Objetivo General.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4. Limitantes de la investigación.....</b>	<b>17</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Antecedentes de estudio.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.1. Antecedentes Internacionales.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2. Antecedentes Nacionales.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. Bases teóricas.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1. La Pituca .....</b>	<b>20</b>
a. Tubérculo: Pituca en el Perú. ....	20
b. Origen.....	21
c. Taxonomía.....	22
d. Requerimiento del cultivo.....	23
e. Valor nutricional.....	24
f. Usos de la Pituca .....	27
g. Composición química .....	27
h. Criterios fisicoquímicos.....	28
<b>2.2.2. Proceso de secado .....</b>	<b>30</b>

a.	Contenido de humedad .....	30
b.	Factores involucrados en el Secado.....	33
c.	Clasificación de los secadores .....	34
d.	Secador rotatorio discontinuo .....	36
e.	Diseño de secadores rotatorios .....	41
f.	Tiempo de secado .....	43
g.	Generalidades de las curvas de secado .....	43
h.	Efecto de las variables del proceso sobre la velocidad del secado.....	45
i.	Modelos matemáticos de la cinética del secado .....	47
2.3.	<b>Definiciones de términos básicos .....</b>	<b>49</b>
<b>III.</b>	<b>HIPÓTESIS Y VARIABLES.....</b>	<b>50</b>
3.1.	<b>Hipótesis general e hipótesis específicas.....</b>	<b>50</b>
3.1.1.	<b>Hipótesis General .....</b>	<b>50</b>
3.1.2.	<b>Hipótesis Específicas .....</b>	<b>50</b>
3.2.	<b>Definición conceptual de variables .....</b>	<b>50</b>
3.3.	<b>Operacionalización de variables .....</b>	<b>51</b>
<b>IV.</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>52</b>
4.1.	<b>Tipo y diseño de la investigación .....</b>	<b>52</b>
4.1.1.	<b>Tipos de investigación.....</b>	<b>52</b>
4.1.2.	<b>Diseño de Investigación .....</b>	<b>53</b>
4.2.	<b>Método de la investigación .....</b>	<b>54</b>
4.3.	<b>Población y Muestra .....</b>	<b>54</b>
4.4.	<b>Lugar de estudio y periodo desarrollo .....</b>	<b>54</b>
4.5.	<b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....</b>	<b>55</b>
4.5.1.	<b>Equipos, materiales e Insumos a utilizar .....</b>	<b>55</b>
4.5.2.	<b>Métodos.....</b>	<b>59</b>
4.6.	<b>Análisis y procesamiento de datos .....</b>	<b>65</b>
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
5.1.	<b>Resultados descriptivos .....</b>	<b>66</b>
5.1.1.	<b>Cálculo del Flujo del aire .....</b>	<b>66</b>
5.1.2.	<b>Resultado de las corridas experimentales .....</b>	<b>70</b>
5.1.3.	<b>Punto optimo.....</b>	<b>108</b>
5.2.	<b>Resultados inferenciales .....</b>	<b>109</b>
5.3.	<b>Otro tipo de resultados estadísticos.....</b>	<b>110</b>
<b>VI.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>114</b>

<b>6.1. Contratación de hipótesis con los resultados</b> .....	114
<b>6.2. Contratación de resultados con otros estudios similares</b> .....	115
<b>CONCLUSIONES</b> .....	116
<b>RECOMEDACIONES</b> .....	117
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	118
<b>ANEXOS</b> .....	122
ANEXO N°1 .....	123
ANEXO N°2 .....	124
ANEXO N°3 .....	126
ANEXO N°4 .....	135

## TABLAS DE CONTENIDO

Tabla 1: Análisis fraccionario del contenido de hidratos de carbono en la Pituca.....	25
Tabla 2: Análisis fraccionario del contenido nutricional de la Pituca cada 100g.....	26
Tabla 3: Composición química de la Pituca.....	29
Tabla 4: Criterios fisicoquímicos de implicancia sanitaria.....	30
Tabla 5: Modelos matemáticos.....	49
Tabla 6: Operacionalización de variables.....	52
Tabla 7: Resultado de los flujos de aire a distintas temperaturas.....	69
Tabla 8: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 60°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	70
Tabla 9: Tiempo VS Humedad promedio a 2mm, 60°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	72
Tabla 10: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 60°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	73
Tabla 11: Tiempo VS Humedad promedio a 4mm, 60°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	74
Tabla 12: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 60°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	75
Tabla 13: Tiempo VS Humedad promedio a 6mm, 60°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	76
Tabla 14: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 70°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	77
Tabla 15: Tiempo VS Humedad promedio a 2mm, 70°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	78
Tabla 16: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 70°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	79
Tabla 17: Tiempo VS Humedad promedio a 4mm, 70°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	80

Tabla 18: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 70°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	81
Tabla 19: Tiempo VS Humedad promedio a 6mm, 70°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h .....	82
Tabla 20: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 80°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	83
Tabla 21: Tiempo VS Humedad promedio a 2mm, 80°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h .....	84
Tabla 22: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 80°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	85
Tabla 23: Tiempo VS Humedad promedio a 4mm, 80°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h .....	86
Tabla 24: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 80°C con una velocidad de 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	87
Tabla 25: Tiempo VS Humedad promedio a 6mm, 80°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h .....	88
Tabla 26: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 60°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	89
Tabla 27: Tiempo VS Humedad promedio a 2mm, 60°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	90
Tabla 28: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 60°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	91
Tabla 29: Tiempo VS Humedad promedio a 4mm, 60°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	92
Tabla 30: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 60°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	93
Tabla 31: Tiempo VS Humedad promedio a 6mm, 60°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	94
Tabla 32: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 70°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	95
Tabla 33: Tiempo VS Humedad promedio a 2mm, 70°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	96

Tabla 34: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 70°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	97
Tabla 35: Tiempo VS Humedad promedio a 4mm, 70°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	98
Tabla 36: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 70°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	99
Tabla 37: Tiempo VS Humedad promedio a 6mm, 70°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	100
Tabla 38: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 80°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	101
Tabla 39: Tiempo VS Humedad promedio a 2mm, 80°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	102
Tabla 40: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 80°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	103
Tabla 41: Tiempo VS Humedad promedio a 4mm, 80°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h .....	104
Tabla 42: Relación del tiempo con la masa de la Pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 80°C con una velocidad de 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	105
Tabla 43: Tiempo VS Humedad promedio a 6mm, 80°C y 48.8 m <sup>3</sup> /h .....	106
Tabla 44: Relación grosor, flujo de aire, temperatura, tiempo con la humedad final.....	107
Tabla 45: Punto óptimo.....	108
Tabla 46: Tabla final de recopilación de las corridas experimentales.....	109
Tabla 47: Modelo matemático.....	110
Tabla 48: Resultado de los modelos matemáticos en el proceso de secado de Pituca.....	111
Tabla 49: Constantes del modelo de Midilli para el proceso de secado de pituca.....	112

## TABLA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de tiempo VS contenido de humedad.....	45
Gráfico 2 Curva de secado modelo.....	64
Gráfico 3: Curva de secador a 2mm, 60°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	72
Gráfico 4: Curva de secador a 4mm, 60°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	74
Gráfico 5: Curva de secador a 6mm, 60°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	76
Gráfico 6: Curva de secador a 2mm, 70°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	78
Gráfico 7: Curva de secador a 4mm, 70°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	80
Gráfico 8: Curva de secador a 6mm, 70°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	82
Gráfico 9: Curva de secador a 2mm, 80°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	84
Gráfico 10: Curva de secador a 4mm, 80°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	86
Gráfico 11: Curva de secador a 6mm, 80°C y 28.8 m <sup>3</sup> /h.....	88
Gráfico 12: Curva de secador a 2mm, 60°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	90
Gráfico 13: Curva de secador a 4mm, 60°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	92
Gráfico 14: Curva de secador a 6mm, 60°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	94
Gráfico 15: Curva de secador a 2mm, 70°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	96
Gráfico 16: Curva de secador a 4mm, 70°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	98
Gráfico 17: Curva de secador a 6mm, 70°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	100
Gráfico 18: Curva de secador a 2mm, 80°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	102
Gráfico 19: Curva de secador a 4mm, 80°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	104
Gráfico 20: Curva de secador a 6mm, 80°C y 45.5 m <sup>3</sup> /h.....	106
Gráfico 21: Diagrama del punto óptimo.....	108
Gráfico 22: Curva del modelo de Midilli aplicada al Proceso de secado de Pituca.....	112

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Tubérculo: Pituca.....	22
Figura 2: Planta de Pituca.....	22
Figura 3: Clasificación de los secadores.....	35
Figura 4: Secador rotatorio.....	37
Figura 5: Diseño de la investigación.....	53
Figura 6: Cortadora de embutidos.....	55
Figura 7: Balanza.....	56
Figura 8: Secador rotatorio discontinuo.....	57
Figura 9: Calibrador de Vernier.....	58
Figura 10: Bolsa de organza.....	58
Figura 11: Pituca.....	58
Figura 12: Obtención de la materia prima.....	59
Figura 13: Corte y selección.....	60
Figura 14: Secador rotatorio discontinuo del laboratorio de Ingeniería Química.....	61
Figura 15: Diseño factorial.....	63
Figura 16: Diagrama de bloques para el proceso de secado de pituca.....	65

## RESUMEN

El proceso de secado de Pituca (*Colocasia esculenta*) fue realizado en un secador rotario discontinuo a escala de Laboratorio, donde se trabajó con tres variables de análisis: el grosor de corte de la rodaja de Pituca 2mm, 4mm y 6mm, la otra variable fue la temperatura en el secador las cuales fueron: 60°C, 70°C y 80°C; y la última variable fue el flujo de aire la cual ingresa al secador de 28.8 m<sup>3</sup>/h y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Estas variables sirven para poder optimizar el proceso de secado.

Con los datos obtenidos se obtuvo que el modelo matemático que mejor se ajusta al proceso de secado de Pituca fue el de Midilli, con una regresión lineal de 0.9987. Adicionalmente con el programa Minitab se obtuvo el punto óptimo del proceso: espesor de rodaja de 6mm, para una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 28.8 m<sup>3</sup>/h. Para una humedad del 15% que recomienda el MINSA para los tubérculos, dando un tiempo de 10.02 minutos.

Palabras claves: secador rotatorio discontinuo, Pituca, método factorial completo, punto óptimo, humedad de Pituca.

## ABSTRACT

The drying process of Pituca (*Colocasia esculenta*) was carried out in a discontinuous rotary dryer at Laboratory scale, where three analysis variables were used: the cut thickness of the Pituca slice 2mm, 4mm and 6mm, the other variable was the temperature in the dryer which were: 60 ° C, 70 ° C and 80 ° C; and the last variable was the air flow which enters the dryer of 28.8 m<sup>3</sup> / h and 45.5 m<sup>3</sup> / h. These variables serve to optimize the drying process.

With the obtained data it was obtained that the mathematical model that best fits the Pituca drying process was that of Midilli, with a linear regression of 0.9987. Additionally, with the Minitab program, the optimum point of the process was obtained: slice thickness of 6mm, for a temperature of 60 ° C and an air flow of 28.8 ° C. For a humidity of 15% recommended by the MINSA for the tubers, giving a time of 10.02 minutes.

Key words: Discontinuous rotary dryer, Pituca, complete factorial method, optimal point, Pituca humidity.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación, se llevó a cabo a través de un plan de trabajo y un diagnóstico, el cual nos proporcionó la información para su desarrollo.

En la actualidad el Perú presenta un alto índice de desnutrición por parte de su población joven, en especial en las regiones de la Sierra y Selva; es por esta razón, que nos dedicamos a investigar un producto agrícola que sea nutritivo y pueda ayudar en la buena alimentación de los pobladores en las zonas de mayor desnutrición, por lo que la Pituca fue una de las mejores opciones; sin embargo no hay un conocimiento previo de cómo se debe de conservar la Pituca, por tal motivo se decidió investigar un proceso de secado de Pituca en un secador rotatorio discontinuo.

El secador rotatorio constituye una de las formas más ampliamente utilizadas para el secado, de una amplia gama de materiales, a nivel industrial, en forma rápida y con bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades, esto nos ayudara a encontrar la humedad optima final de la pituca para empezar un proceso de producción de harina.

El estudio de secado de otros tubérculos ya investigados ayudara mucho para saber que dimensiones debe tener la pituca, cuál sería la temperatura óptima y con qué flujo de aire caliente del secador sería el más óptimo para el proceso de secado.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

En el Perú no se tiene un proceso adecuado para la conservación de la Pituca sin afectar sus propiedades alimenticias, por lo cual se ha considerado realizar un proyecto de investigación que permita optimizar el secado de Pituca, este proyecto nos ayudará a visualizar nuevas oportunidades en el desarrollo de la industria en el país.

El secado de la Pituca nos ayudara a eliminar la proliferación de microorganismos y desacelerar la putrefacción de este tubérculo ya que contiene el 70% de la humedad, además de asegurar la preservación de la Pituca.

Se ha decidido usar el tubérculo de la Pituca, dado que es una planta fácil de cultivar, y crece en grandes cantidades en el Perú, y además de poseer una gran cantidad de almidón que puede ser usado como reemplazo de la harina de trigo.

Por lo tanto, existe la necesidad de determinar las condiciones más adecuadas para el secado de Pituca.

### **1.2. Formulación del problema**

#### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es la humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cuál es el grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca para obtener un mejor rendimiento en el secado?
- b. ¿Cuáles deben ser los parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar es la humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- a. Determinar el grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca para obtener un mejor rendimiento en el secado.
- b. Determinar los parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte.

## **1.4. Limitantes de la investigación**

### **a. Teórico**

La presente investigación se centrará en los siguientes puntos: caracterización y valor nutricional de la Pituca y así mismo conocer cuáles son los parámetros que rigen a un secador rotatorio discontinuo.

### **b. Temporal**

El tiempo aproximado para la realización de las corridas experimentales será de dos semanas, teniendo en cuenta que se debe realizar corridas de pruebas para conocer el equipo del secador rotatorio discontinuo.

### **c. Espacial**

Contar con un laboratorio de investigación en la Facultad de Ingeniería Química, cuyas instalaciones cuente con un equipo de secador rotatorio discontinuo.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de estudio

#### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

**Oyenuga (1967)**, cree que la *Colocasia* es nativa de las áreas de Ghana y otros lugares de África Occidental.

**Villar (2001)**, estudió las variables que influyen en la operación de secado utilizando un secador rotatorio. Realizó balances de materia y energía para determinar el flujo y la temperatura del gas a la salida del secador, también estudió el efecto de las variables sobre el tiempo de residencia y el retenido del sólido, además calculó el calor total transferido desde la fase gaseosa a la fase sólida. Para ello, realizó pruebas del flujo de aire en el secador rotatorio y encontró que a medida que se redujo el tamaño de partícula, el flujo de aire se incrementó, aumentando así el calor total transferido.

**Vega y Lemus (2006)**, modelaron la cinética de secado de la Papaya Chilena diferentes temperaturas (40, 50, 70 y 80°C) y variaciones de la velocidad del aire ( $2.0 \pm 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Mediante los modelos matemáticos Newton, Henderson-Pabis y Page. Además, se evaluó la calidad de ajuste de estos modelos por medio del coeficiente de regresión lineal, suma de errores cuadrados, raíz media de los errores cuadrados y Chi-cuadrado.

**González (2008)**, estudió el secado de granos de maíz crudo utilizando un lecho fluidizado al vacío. Para ello, inicialmente determinó las características de las partículas de maíz fresco, obteniendo de esta forma valores de densidad, volumen y diámetro de partículas, entre otros. Esto permitió que se realizaran prueba fluidinámicas para conocer los valores de velocidad, caída de presión, porosidad del lecho etc. Posterior a ello, realizó pruebas de secado a diferentes

temperaturas y velocidades del aire en la columna y comprobó que a mayor temperatura y velocidad de aire la remoción de humedad es mayor para todos los casos. Además, con estos datos construyó las curvas de velocidad de secado del maíz para las diferentes condiciones.

**Brito y Marín (2010)**, estudiaron la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado del frijol (*Vigna Unguiculata*) utilizando un secador discontinuo de bandeja. Establecieron un valor de humedad inicial y un rango de temperatura para hacer las corridas de secado y obtuvieron curvas de secado a diferentes condiciones de temperatura, esto les permitió calcular el tiempo de secado y observar que, al aumentar la temperatura, se redujo considerablemente el tiempo de secado del frijol.

**Villalba (2015)**, aplicó modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa, han desarrollado una gran cantidad de modelos, tanto teóricos como experimentales, que buscan predecir la cinética de secado de diferentes tipos de biomasa y además proponer elementos fundamentales que deberán poseer un modelo de secado unificado.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

**Fernández Lancho (1970)**, refiere que la Pituca (*Colocasia esculenta*) está entre los primeros cultivos domesticados por el hombre y es posible trazar su historia hasta las culturas neolíticas más primitivas del sureste de Asia entre India y Indonesia. Es nativa de las áreas boscosas del centro-sur de Asia, probablemente de la India y de allí fue llevada a África. Hoy es el principal cultivo en África Occidental.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. La Pituca**

#### **a. Tubérculo: Pituca en el Perú.**

Las familias peruanas en la actualidad optan por consumir productos importados el cual ha sido incorporado en los sistemas de producción del Perú. En el pasado factores históricos, en el presente por falta de conocimiento y costumbre, se lleva a l desaprovechamiento de nuestros recursos y potencial alimenticio.

En el Perú se le conoce a este tubérculo con el nombre de “Pituca”, el cual varía en algunos departamentos, como en Huánuco con el nombre de “Arairima”, en Moyobamba como “Taro”, Selva alta “Michutsi” y Selva baja “Witina” (Nuñez 1989, citado por Sandoval, 1993).

La Pituca es una planta perenne con rizomas provistos de tubérculos y con grandes hojas ovales, acorazonadas, enteras, de hasta un metro de longitud, el limbo al principio es entero y después se dispone verticalmente y se ondula, de color verde difuminado en azul; flores insignificantes reunidas en inflorescencias. Son plantas herbáceas suculentas que alcanzan altura de 1 a 3 metros, sin tallo aéreo, el tallo central es elipsoidal, subterráneo conocido como corno rico en carbohidratos (18-30% en Base Fresca y 65 a 80 % en Bese Seca). Las Raíces son múltiples distribuidas uniformemente alrededor del tallo subterráneo, suaves, suculentas con unos 0.80 a 1.20 metros de largo y un grosor de 3 a 5mm de diámetro, el tallo es céntrico elipsoidal subterráneo conocido como corno el cual es el producto de interés comercial, las hojas son por lo general de forma peltada aparecen arrolladas por la base formando un pesado tallo corto.

El tubérculo de la raíz suele plantarse cerca de la superficie. Una vez plantado, los primeros indicios de crecimiento aparecen entre la primera y la tercera semana. Cuando es adulta, necesita

como mínimo un 1 m para poder desarrollarse adecuadamente haciéndolo mejor en suelos ricos en compost y a la sombra, aunque crecerán perfectamente en suelos que retengan la humedad.

Las Hojas son por general de forma peltada. Se producen en el meristemo apical del cormo y aparecen arrolladas por la base formando un pseudo tallo corto. Las hojas nuevas salen enrolladas de entre los peciolos de las ya formadas y las laterales más viejas se marchitan y secan. En los primeros seis meses el área foliar se incrementa rápidamente, para luego mantenerse estable mientras aumenta el peso de los órganos subterráneos. Son buena fuente de tiamina, riboflavina, hierro, fósforo, y zinc, un buen recurso de vitamina B6, vitamina C, niacina, potasio, cobre y manganeso. Los cormos de la Pituca tienen un alto contenido en almidón y son fuente de fibra dietética. El ciclo del cultivo dura 8 a 10 meses.

#### **b. Origen**

Schery (1956) menciona que el taro o pituca, es una raíz de origen asiático, desde donde progresivamente fue introducida al trópico de todo el mundo.

Según Nieto (1977), pituca es el nombre vulgar con el cual se le conoce en el Perú a la especie *Colocasia esculenta*. Además, señala que en otros lugares del mundo toma diferentes nombres, así tenemos: taro, eddoe, dasheen, tannia, malanga, etc.; en la literatura se le encuentra generalmente con el nombre de taro o dasheen.

Plowman (1969), manifiesta que el taro constituyó un importante alimento en el África Occidental, y cuando los esclavos africanos fueron traídos a América durante la época de la colonia trajeron consigo la planta.

### c. Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Alismatales

Familia: Araceae

Subfamilia: Aroideae

Género: Colocasia

Especie: Colocasia esculenta

Nombre binomial: Colocasia esculenta (L.) Schott

A continuación, en la figura 1 y figura 2 podemos observar el aspecto de la Pituca.



**Figura 1.** Tubérculo: Pituca.  
Fuente: [www.google.com/imagen](http://www.google.com/imagen).



**Figura 2.** Planta de Pituca.  
Fuente: [www.google.com/imagen](http://www.google.com/imagen)

#### **d. Requerimiento del cultivo**

La Pituca es una planta netamente tropical. Para su desarrollo óptimo requiere las siguientes condiciones climáticas y de suelo.

##### **i. Fotoperiodo:**

El mejor desarrollo se alcanza con periodos de 11-12 horas luz. La luz influye sobre algunos aspectos morfológicos como el número de hojas y cormos, así como la altura de la planta (Mendoza, 1989). Para esta exigencia nuestra zona no tiene ningún problema.

##### **ii. Tipo de suelo:**

En cuanto al tipo de suelo, las plantas se adaptan más a aquéllos profundas, fértiles, con suficiente materia orgánica y bien drenada. Deben evitarse los suelos con alto contenido de arcilla o arena. El pH óptimo debe ser entre 5.5-6.5, aunque puede adaptarse a espectros de 4.5-7.5 (Jiménez, 1988).

Aunque se adapta a una gran diversidad de suelos, los óptimos son los francos, franco limosos o arenosos con profundidades de 50 a 60 cm. Ricos en materia orgánica (2-3%) y PH de 4.5 a 7.5, En suelos Quebrados se debe practicar la siembra en curvas a nivel para la protección del terreno, el uso de abonos orgánicos como estiércol ha mostrado considerable mejoría en los rendimientos en la producción de cormos.

El cultivo muestra problemas en suelos arenosos o pesados y mal drenados, así como en suelos rocosos y pedregosos ya que deforma el cormo y se dificulta la cosecha. Los suelos muy pesados dificultan la emergencia de las plantas y el desarrollo de los cormos (Montalvo, 1991).

Existen variedades que crecen bajo el agua (cultivos bajo inundación), en tanto que otras prefieren los suelos bien drenados (cultivos secos).

### **iii. Temperatura:**

La Pituca es una planta que produce con buenos rendimientos en temperaturas desde 12 hasta 30° Centígrados. Lo cual nos indica que es un cultivo que se adapta a climas calientes.

Debe haber temperaturas promedio no inferiores a 20°C, siendo la óptima entre 25-30 °C. Las temperaturas menores de 18°C detienen el crecimiento y se interrumpe la fotosíntesis (Mendoza, 1989 y Montalvo, 1991).

### **iv. Altitud:**

La Pituca se cultiva en alturas desde 200 a 2,300 msnm, siendo las mejores de 200 a 1,000 msnm. Se adapta desde el nivel del mar hasta 1500 msnm (Jiménez, 1988). Precipitación. Requiere de regímenes de lluvia altas (1800-2500 mm) y bien distribuidas; cuando existe insuficiente humedad en el suelo, las hojas se tornan amarillentas y se marchitan.

### **v. Precipitación:**

Para que no se manifiesten retrasos en el crecimiento, la planta de malanga necesita suficiente agua. Sin embargo, crece bien en zonas con precipitación de 1,000 a 1,600 mm anuales bien distribuidas, es una Planta bastante exigente en cuanto a humedad disponible en el suelo.

### **e. Valor nutricional**

Cuando un cultivo es orientado a la alimentación, el valor nutritivo y la aceptación del consumidor son importantes. El valor nutritivo de un alimento depende de sus estándares nutritivos, de su digestibilidad y de la presencia o ausencia de anti nutrientes y factores de toxicidad.

Los cormos y cormelos son la parte económica importante del taro. De vez en cuando las hojas y pecíolos son también usados como alimento.

El principal alimento almacenado en el cormo son los hidratos de carbono cuya fracción está compuesta como sigue en la tabla 1.

Tabla 1  
*Análisis Fraccionario del Contenido de Hidratos de Carbono en Cormo de la Pituca*

<b>Componentes</b>	<b>Porcentaje</b>
Almidón	77.9 %
Pentosa	2.6%
Proteína Cruda	1.4 %
Dextrina	0.5%
Azúcares reductores	0.5%
Sacarosa	0.1%

**Fuente: MORÍN (1983)**

Por los nutrientes que proporcionan, los cormos pueden ser considerados como una fuente buena de hidratos de carbono y potasio.

Los granos de almidón son muy pequeños y van en diámetro de 1 a 4 milimicras.

Como resultado, el almidón de la Pituca es muy rápidamente digerible cuando es usado para alimento, además de su alto contenido de almidón, la Pituca o papa china tiene un volumen alto de proteína y aminoácidos que otras raíces y tubérculos tropicales, lo cual se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2

*Análisis Fraccionario del Contenido Nutricional de la Pituca por cada 100 gramos.*

<b>Valor Nutricional</b>	
Energía	1 o 2 Kcal
Proteína	1.6 g
Grasa	0.5 g
Carbohidrato	23.2 g
Fibra	0.8 g
Calcio	50 mg
Fósforo	41 mg
Hierro	1.2 mg
Calcio	96.0 mg
Potasio	88.0 mg
Vitamina A	5.0Mcg
Tiamina	0.08 mg
Riboflavina	0.04 mg
Niacina	0.07 mg
Ácido Ascórbico	7.0 mg
Cáscara o porción no comestible:	16.0 %

**Fuente: MORÍN (1983)**

## **f. Usos de la Pituca**

Núñez (1989), indica que las hojas de algunas variedades con bajo contenido de oxalato de calcio, se consumen hervidas como hortalizas. También menciona que los cormos cocidos sustituyen a la papa y se utilizan encorridos considerándolas como artículos muy nutritivos.

La Pituca en la alimentación humana, reporta usado en panificación en 30% de harina fina de Pituca, comparadas con harina gruesa mezclados al 50% con harina de trigo de la Pituca se podría obtener productos y sub- productos similares a los de la papa, pan diversos usos.

## **g. Composición química**

La Pituca es un alimento escaso en proteína y grasa.

Su mayor valor alimenticio está en su contenido de carbohidratos y nutritivamente frente a la yuca, papa y cereales, la Pituca resulta de mayor valor alimenticio.

Además, los gránulos de almidón con un tamaño de 4–11 micras son fáciles de digerir en alimentos para cuando es consumido en cantidad, es una buena fuente de calcio altamente asimilable.

La tabla 3, muestra la composición química de la Pituca, siendo muy notable su contenido de carbohidratos, los mismos que según Onwueme (1978) está conformado casi en totalidad por almidón como se indica en C-2.

Tabla 3  
*Composición química de los cornos de Pituca*

<b>Componentes</b>	<b>% base húmeda</b>	<b>% base seca</b>
<b>Humedad</b>	74.3	
<b>Proteína</b>	1.5	5.8
<b>Grasa</b>	0.6	2.3
<b>Fibra</b>	0.9	3.5
<b>Ceniza</b>	1.2	4.7
<b>Carbohidratos</b>	21.5	83.7

Fuente: Amos (1968)

#### **h. Criterios fisicoquímicos**

Los criterios fisicoquímicos se sustentan en lo dispuesto por el CODEX ALIMENTARIUS quedando a sujetos a las enmiendas y actualizaciones correspondientes.

Los criterios químicos relacionados a la calidad nutricional se sujetan a lo dispuesto por el Centro Nacional de alimentación del Instituto Nacional de Salud. A continuación, en la tabla 4 se muestra la cantidad máxima de humedad que puede contener los alimentos.

Tabla 4  
*Criterios Fisicoquímicos de Implicancia Sanitaria de:*

	<b>Máximo de % de humedad</b>	<b>Máximo de % de Acidez (*)</b>
<b>Extruidos y/o expandidos proteinizados o no, hojuelas, que no requieren cocción</b>	5	0.15
<b>Hojuelas a base de granos (gramíneas) que requieren cocción</b>	12 – 12.5	0.2 (cebada) 6.0 (avena)(**)
<b>Hojuelas a base de granos (quenopodiáceas) que requieren cocción</b>	13.5	0.2
<b>Harinas a base de granos, tubérculo, raíces, frutas que requieren cocción</b>	15	0.15

**Fuente: EL Peruano (2006) (\*) Expresada en ácido sulfúrico (\*\*) Expresada en ácidos grasos libres**

### **2.2.2. Proceso de secado**

El secado de sólidos consiste en separar, mediante el contacto con un gas caliente, pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.

El contenido de líquido de una sustancia seca varía de un producto a otro. Ocasionalmente el producto que no contiene líquido recibe el nombre de totalmente seco, pero lo más frecuente es que el producto contenga algo de líquido.

El secado significa que hay una reducción del contenido de líquido dentro de un sólido. (McCabe y Colaboradores, 1991).

#### **a. Contenido de humedad**

El contenido de humedad de un material se puede expresar en base seca ó base húmeda. Si un material se expone al aire a una temperatura y humedad dada, dicho material perderá o ganará agua hasta que se establezcan unas condiciones de equilibrio. La humedad correspondiente a dicho equilibrio varía ampliamente con la humedad y la temperatura del aire. (Coulson y Richarson, 1978).

#### **i. Contenido de humedad en base húmeda (W)**

Es la relación entre la cantidad de líquido ó agua y la cantidad de sólido húmedo, y es expresado en la Ec. 2.1

$$W = \frac{mh}{mSh} \quad \dots (Ec. 2.1)$$

Donde:

mh: masa de agua (kg)

mSh: masa de sólido húmedo (kg)

## ii. Contenido de humedad en base seca (X)

Es la relación entre la cantidad de líquido ó agua y la cantidad de sólido completamente seco, se expresa en la Ec. 2.2

$$X = \frac{mh}{mSs} \quad \dots (Ec. 2.2)$$

Donde:

mh: masa de agua (kg)

mSs: masa de sólido seco (kg)

Por definición:

$$mSh = mh + mSs \quad \dots (Ec. 2.3)$$

Donde:

$$mh = mSh - mSs \quad \dots (Ec. 2.4)$$

Sustituyendo la ecuación 2.4 en la ecuación 2.1 y 2.2, se tiene:

$$W = \frac{mSh - mSs}{mSh} \quad \dots (Ec. 2.5)$$

$$X = \frac{mSh - mSs}{mSs} \quad \dots (Ec. 2.6)$$

Donde:

$$mSs = (1 - W). mSh \quad \dots (Ec. 2.7)$$

Relacionando la humedad en base humedad y en base seca se tiene que:

$$W = \frac{X}{1 + X} \quad \dots (Ec. 2.8)$$

$$X = \frac{W}{(1 - W)} \quad \dots (Ec. 2.9)$$

Resulta útil expresar el contenido de humedad en base seca, debido a que el denominador de su ecuación es un valor constante en todo el sistema. (Treybal, 2000).

## **b. Factores involucrados en el Secado.**

### ✓ **Por su Atmosfera de secado**

- Presión y atmosfera.
- Velocidad relativa de la atmosfera de secado, incluyendo cambios en la presión parcial del líquido a través del secado.
- Composición de la atmosfera de secado, incluyendo los cambios de la presión en el líquido durante el secado.
- Presión de vapor efectivo del líquido.

### ✓ **La transferencia de calor.**

- Transferencia de calor en la película líquida del sólido.
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido.
- Transferencia de calor del sólido al líquido a través de la película superficial y dentro de los intersticios y poros de la masa sólida.
- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la zona del sólido seco.
- Conductividad térmica del líquido.
- Conductividad térmica del sólido húmedo.
- Conductividad térmica de la zona cercana al sólido seco.
- Calor latente del líquido.
- Calor de hidratación, cuando se elimina agua combinada al finalizar el proceso de secado.
- Efecto de electrolisis presentes en líquido sobre las características de secado del material.

✓ **Propiedades del sólido**

- Tamaño de particular.
- Área efectiva del sólido.
- Porosidad, es decir, tamaño de y longitud de poros y la extensión en que están ramificadas.
- Dureza superficial por la velocidad del secado.

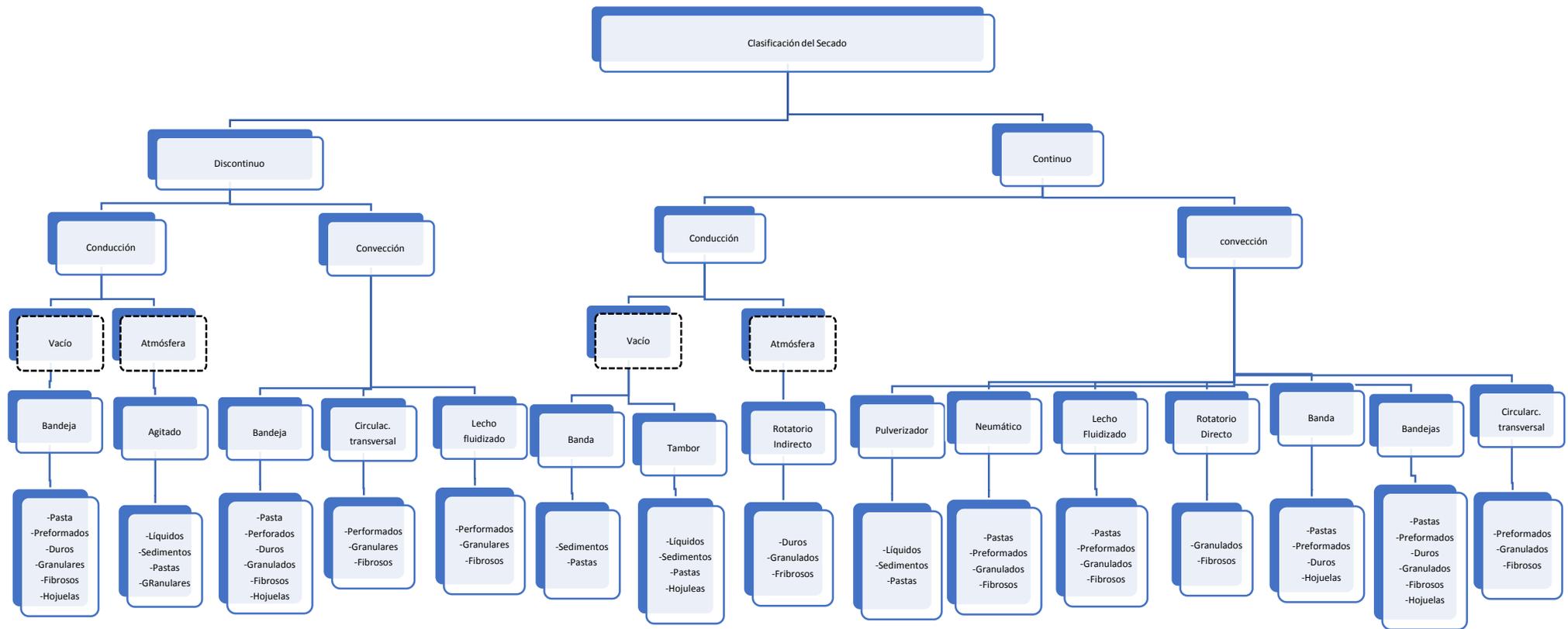
**c. Clasificación de los secadores**

Se usan muchos tipos de secadores en la deshidratación de alimentos, la selección de un tipo en particular es guiada por la naturaleza del producto que va a ser secado, la forma deseada del producto terminado, la economía y las condiciones de operación. Los secadores pueden clasificarse de acuerdo con el modo de operar o con el servicio requerido.

El gráfico 2.3 clasifica a los secadores según su método de operación. Se hace una primera subdivisión según la forma de transferencia de calor.

- Calentamiento por conducción
- Calentamiento por convección
- Calentamiento infrarrojo o sea todas las formas de calentamiento por radiación.
- Calentamiento dieléctrico.

La siguiente subdivisión principal es por tipo de recipiente de secado: bandeja, tambor rotatorio, lecho fluidizado, neumático o pulverización. La figura 3, también muestra cuáles son los recipientes que realmente se adaptan mejor a la operación, al vacío o con atmosfera inertes.



**Figura 3.** Clasificación de los secadores., Nonhebel G (1979)

#### **d. Secador rotatorio discontinuo**

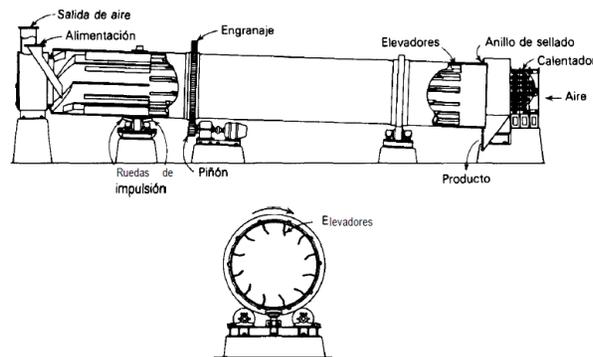
El secador discontinuo con agitación es esencialmente un recipiente calentado, unas veces dispuesto en forma horizontal (cilindro) y otras vertical (cuba) donde el material a secar se agita en contacto con la pared metálica caliente.

El secador rotatorio constituye una de las formas más ampliamente utilizadas para el secado, de una amplia gama de materiales, a nivel industrial, en forma rápida y con bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades; forman un grupo muy importante de secadores, son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperse.

El sólido por secar se introduce continuamente en uno de los extremos de un cilindro giratorio, como se muestra, mientras que el aire caliente fluye por el otro extremo. El cilindro está instalado en un pequeño ángulo con respecto a la horizontal; en consecuencia, el sólido se mueve lentamente a través del aparato.

Dentro del secador, unos elevadores que se extienden desde las paredes del cilindro en la longitud total del secador levantan el sólido y lo riegan en una cortina móvil a través del aire; así lo exponen completamente a la acción secadora del gas. Esta acción elevadora también contribuye al movimiento hacia adelante del sólido.

A continuación, la figura 4 muestra como es la apariencia de un secador rotatorio.



**Figura 4.** Secador rotatorio. Fuente: Alibaba, <https://spanish.alibaba.com/productDetail/indirect-heating-steam-tube-rotary-dryer-calculator-1725589915.html>

En el extremo de alimentación del sólido, unos cuantos elevadores espirales pequeños ayudan a impartir el movimiento inicial del sólido hacia adelante, antes de que este llegue a los elevadores principales. Es obvio que el sólido no debe ser pegajoso ni chicloso, puesto que podría pegarse a las paredes del secador. En estos casos, la recirculación de una parte del producto seco puede permitir el uso de un secador rotatorio.

### **i. Tipos de secadores rotatorios**

Los secadores rotatorios pueden ser clasificados en tres tipos:

- Secador rotatorio de cascada con calentamiento directo.
- Secador directo con persianas periféricas para el aire caliente.
- Secador por calentamiento indirecto.

#### **✓ Secador rotatorio de cascada con calentamiento directo.**

La carcasa rotatoria puede alcanzar los 3 m de diámetro; según la producción requerida, la longitud está habitualmente comprendida entre cuatro y quince diámetros. Para provocar el desplazamiento longitudinal del sólido que se está secando, la carcasa está montada con una pendiente

comprendida entre el 2.5 y el 5% (aunque algunas ocasiones los secadores en paralelo pueden estar prácticamente horizontales).

Unidas a la pared interna del cilindro del secador hay una serie continua de elevadores, como puede verse en la figura 2. a medida que gira el secador, estos elevadores toman material y lo arrojan en cascada dentro de la corriente gaseosa. El secador gira a una velocidad de 4 a 5 *rpm*. La velocidad del aire varía de 1.5 s 2.5 *m/s*, dependiendo del tamaño de las partículas a secar y de la cantidad de polvo fino formado dentro del secador.

#### ✓ **Secador rotatorio de persianas**

Una válvula asegura que el aire fluye sólo por aquella persiana que en ese momento se encuentra bajo el lecho de material a secar, mientras que la superposición de las tablillas que forman las persianas asegura que no entre material sólido en los conductos del aire. Las persianas forman un tambor interno levemente cónico, con lo cual se logra el movimiento axial del sólido, aunque el eje del secador este horizontal. En el extremo de salida hay un anillo de retención formado por un sistema de hojas articuladas superpuestas.

En una operación normal se usa un lecho relativamente espeso, que ocupa alrededor del 40% del volumen del secador, pero es posible modificar el espesor del lecho cambiando el ángulo de las hojas que forman el anillo de retención; además esto permite vaciar rápidamente el secador.

El suave rodar del lecho impide la formación de costras y minimiza la rotura de los materiales que producen polvos.

El espesor relativamente grande del lecho de material, permite lograr un tiempo de retención satisfactorio en un equipo pequeño, comparado con el secador de cascada, y su consumo de potencia es menor, puesto que es baja su velocidad de rotación. Además, como se puede alcanzar un alto coeficiente de transferencia de calor, resulta ser un equipo compacto al usarlo con materiales que sequeen principalmente en el período de secado a velocidad decreciente.

Este secador no es apropiado para materiales pegajosos, los cuales tienden a taponear las rendijas de las persianas y a formar grandes apelotonamientos debido al movimiento rotatorio. Puesto que este equipo se comporta como un intercambiador de calor de corrientes cruzadas, la temperatura de los sólidos a la salida se aproxima a la del aire de la entrada, lo cual puede limitar el valor máximo de esta última. Además, la caída de la temperatura del aire en la región de secado a velocidad decreciente es pequeña, por lo cual el rendimiento térmico tiende a ser pequeño; éste será alto en la zona de secado a velocidad constante donde es máxima la diferencia de temperatura entre el aire de entrada y de salida.

Puesto que el aire entra a la misma temperatura en toda la extensión del lecho, una porción de la alimentación tendrá el mismo proceso de secado recorriendo este equipo, que, si es secado en condiciones similares, en un secador discontinuo.

Por lo tanto, es posible llevar a cabo pruebas de laboratorio en un pequeño secador discontinuo para determinar un caudal de aire y el correspondiente tiempo de secado. El secador de tamaño industrial es entonces dimensionado para obtener las mismas condiciones.

### ✓ **Secador indirecto**

Un tipo de secador indirecto posee una carcasa rotatoria inclinada, como los secadores directos, pero en lugar de elevadores está provisto de tubos que contienen vapor o agua caliente. Los equipos pequeños poseen una sola fila de tubos, pero los equipos de mayor tamaño emplean dos filas de tubos, de las cuales la interna está formada por tubos de menor diámetro que los tubos de la fila externa.

La alimentación se calienta por contacto directo con los tubos sobre los cuales fluye formando una delgada capa. Se inyecta aire a través del secador en cantidad suficiente para eliminar el vapor de agua. El aire abandona el secador prácticamente saturado, por lo cual la cantidad requerida, suele ser mucho menor que en un secador rotatorio directo. El problema de la eliminación de polvo en el aire de salida está simplificado y en muchos casos es adecuada la circulación natural del aire sin ayuda de ventiladores. La velocidad del aire se encuentra por lo común alrededor de los 0,3 m/s.

El vapor de calefacción es introducido dentro de los tubos, y el condensado eliminado mediante un distribuidor dispuesto en el extremo de descarga de los sólidos. Los sólidos secos se descargan a través de aberturas practicadas en la carcasa, las cuales poseen una pestaña que permite mantener un espesor de lecho suficiente.

Este secador es especialmente adecuado para materiales que presentan un período de secado a velocidad decreciente prolongado y por ello deben mantenerse durante un largo tiempo a una temperatura prácticamente constante. Por otra parte, la rotación evita la formación de terrones de material y facilita la salida del vapor de agua.

Puesto que hay poca pérdida de calor en la corriente gaseosa que sale, su rendimiento térmico es elevado. Este equipo es adecuado para el secado de materiales termo sensibles, pues la temperatura máxima.

### **e. Diseño de secadores rotatorios**

A continuación, se presentan las ecuaciones de diseño para los secaderos rotatorios.

#### **✓ Tiempo de retención.**

Una estimación del tiempo de residencia es dificultosa de obtener debido a la compleja interacción de los siguientes factores:

- Porcentaje de carga.
- Número de elevadores.
- Diseño de elevadores.
- Inclinación del secador desde la base horizontal.
- Velocidad de rotación de la carcasa del secador.
- Longitud (efectiva) del secador.
- Diámetro del secador.
- Propiedades físicas del material a secar.
- Velocidad del aire dentro del secador.

#### **✓ Velocidad de secado**

Velocidad del Secado, el concepto de velocidad de secado es algo diferente al de tiempo de residencia, pero está relacionado.

Se entiende por velocidad de secado a los puntos de humedad que se extraen en una unidad de tiempo, generalmente una hora. Así se habla de una extracción de humedad, por ejemplo, de cuatro puntos/hora.

Era común expresar que no convenía extraer más de 5 puntos/hora en el caso del maíz, y valores menores para el trigo y otros granos. Si la extracción no alcanzaba con 5 puntos/hora (por ejemplo, de 22 a 14%) se recomendaba hacer dos pasadas por la secadora, ya que velocidades mayores podían afectar la calidad del grano y originar falta de uniformidad en el secado, mayor proporción de revenido y otros problemas

### ✓ **Capacidad de secado**

Es el flujo másico del producto en la secadora, se expresa en unidades comunes como toneladas o quintales por hora, ya sea de producto seco o húmedo. Tiene una importancia fundamental, porque es un parámetro, quizás el más utilizado en el desempeño de las secadoras. Interviene en casi todos los cálculos, en los proyectos y en los costos de secado de granos.

Expresar la capacidad de una secadora solamente en ton/h o q/h puede llevar a cierta confusión, pues en realidad, una secadora no tiene una sola capacidad horaria, sino varias, que dependen de varios factores, como la humedad inicial del grano, la temperatura de secado y otros.

### ✓ **Granulometría**

Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica. Si las partículas tienen la misma dimensión, el tamaño lo especifica cualquier lado de la misma. En el

caso de que sean partículas irregulares, es decir, tengan una dimensión mayor de que otra, su tamaño se determina tomando en cuenta la “segunda dimensión” principal mayor.

#### **f. Tiempo de secado**

Si se desea determinar el tiempo de secado de un sólido bajo las mismas condiciones para las que se determinó experimentalmente una curva de secado solo se necesita leer en la curva la diferencia en los tiempos que corresponden a los contenidos inicial y final de humedad.

Dentro de ciertos límites, es posible a veces estimar el aspecto de una curva de velocidad de secado para condiciones diferentes de aquellas fijadas o existentes en los experimentos.

En estos casos, para determinar el tiempo de secado se puede partir de la expresión que define la velocidad de secado:

$$N = \frac{-L_s}{A} x \frac{dx}{d\theta} \dots (Ec. 2.10)$$

Donde:

N: velocidad de secado

$L_s$ : Peso del sólido seco

A: Superficie del sólido seco

$\frac{dx}{d\theta}$ : Variación del contenido de humedad con respecto al tiempo

#### **g. Generalidades de las curvas de secado**

Las curvas de secado suelen ser descritos por diagramas el cual sigue coordenadas, como son las siguientes:

- Temperatura del material contra el contenido de humedad del material (Curva de temperatura).
- Contenido de humedad del material contra el tiempo de secado (Curva de secado).
- Velocidad de secado contra contenido de humedad (Curva de velocidad de secado).

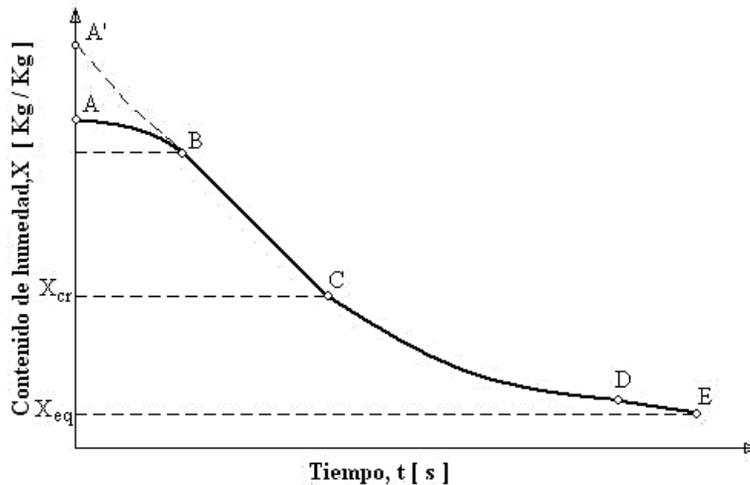
Las curvas de secado se obtienen por medio de pruebas de laboratorio, teniendo en cuenta la estabilidad del proceso. Se usa el aire caliente para el secado y la letra Y es el contenido de humedad absoluta de masa en el aire (Peso de masa de vapor de agua por el peso de masa de aire seco).

#### ✓ **Curva de tiempo y contenido de humedad**

La curva nos muestra la gráfica 1, es el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado. En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrado en la curva A-B. Al término de esta etapa, la curva de secado toma una forma lineal, en este periodo la velocidad de secado se vuelve constante (B-C).

El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llega a su punto crítico (Punto C) donde la línea recta tiene a curvarse y a formar asíntota con el contenido de Humedad  $X_{eq}$  donde le valor mínimo de humedad en el proceso de secado, esto quiere decir que el punto E jamás es tocado.

La recta B-C es llamado el periodo de velocidad constante, y al siguiente periodo de secado se conoce como el periodo de caída de velocidad de secado.



**Gráfico 1.** Curva de tiempo vs Contenido de Humedad. Fuente:<http://catarina.udlap.mx> capitulo4.pdf

#### **h. Efecto de las variables del proceso sobre la velocidad del secado**

##### **✓ Temperatura en el proceso de secado.**

La temperatura de secado está estrechamente relacionada con la humedad relativa del aire, ya que influye en la calidad organoléptica del producto final, por ejemplo, si la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa es baja, existe peligro de que la humedad que será eliminada de la superficie de los alimentos se elimine más rápido de lo que el agua puede difundirse del interior húmedo del alimento al exterior y se forme un endurecimiento o costra en la superficie del material. (Ress y Col., 1991)

##### **✓ Contenido de humedad.**

Se refiere a toda el agua en forma global presente en el alimento. Puede expresarse en base seca o húmeda. El contenido de humedad en base húmeda es el contenido de agua en relación con la masa total húmeda del sólido.

El contenido de humedad en base seca, es el contenido de agua con relación a la masa totalmente seca del sólido (Badui, 1993).

✓ **Contenido de humedad del aire seco.**

El contenido de humedad en el aire seco o humedad relativa es un variable importante en el secado de materiales con determinada humedad.

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de post-cosecha de productos agrícola, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos (Click y Baker 1980).

✓ **Aire como agente secante.**

Los productos alimenticios pueden ser secados con aire, vapor sobrecalentado, en vacío, con gas inerte y con la aplicación directa de calor. Generalmente se utiliza aire como medio deshidratador debido a su abundancia, su conveniencia y a que puede ser regulado sobre el calentamiento del alimento (Fellows y col, 1994)

El aire caliente causa la transferencia de calor que hace posible la deshidratación del alimento, además, conduce el aire húmedo a la salida del secador y la velocidad de secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento. (Foust, 1990).

✓ **El agua en los alimentos.**

El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua en los alimentos ricos en ella, o ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y, por tanto, su aceptabilidad.

Por lo tanto, retirando agua de los alimentos o haciéndola menor disponible se puede extender la vida útil de los mismos (Brennan y col., 1998)

✓ **Actividad acuosa en los alimentos.**

Del agua contenida en un alimento dependen las propiedades reológicas y de textura de este, pero también es responsable en gran medida de las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, las cuales son las tres principales causas del deterioro de un producto.

Para medir el agua que es capaz de propiciar las reacciones anteriores se acudió el término de actividad acuosa, el cual representa el grado de interacción del agua con los demás constituyentes (Scott, 1953; Scott, 1957)

**i. Modelos matemáticos de la cinética del secado**

Junmeng desarrolló un modelo para determinar la cinética de secado bajo condiciones no isotérmicas. Para ello realizaron un análisis gravimétrico controlado por el computador. También usaron los resultados experimentales para verificar la precisión de modelos matemáticos comunes.

Chavan et al. Ejecutaron un diseño experimental orientado al secado de la macarela y posteriormente procedieron a estudiar un total de once modelos matemáticos con el fin de evaluar cual se adecuaba mejor a los datos obtenidos experimentalmente. En la tabla 5 se listan los modelos matemáticos usados por ambos autores.

Tabla 5  
Modelos Matemáticos

N°	Modelo	Ecuación
1	Newton	$MR = e^{-kt}$
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$
3	Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
4	Logaritmica	$MR = ae^{-kt} + c$
5	Dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
6	Dos términos exponenciales	$MR = ae^{-k_0t} + (1 - a)e^{-kat}$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at - bt^2$
8	Aproximación por difusión	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$
9	Verma et al	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-gt}$
10	Henderson y Pabis modificado	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
11	Modelo de Midilli	$MR = ae^{-kt^n} + bt$
12	White et al.	$MR = e^{(-kt)^n}$
13	Wang et al.	$MR = a + bt + ct^2$

Fuente: Villalba, (2015)

### 2.3. Definiciones de términos básicos

- **Base de peso húmedo:** Es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido mojado.
- **Base de peso seco:** Es la expresión del contenido de humedad de sólidos mojados en kilogramos de agua por kilogramos de sólidos completamente secos.
- **Pituca:** Es un tubérculo rico en minerales y carbohidratos beneficiosos para la salud.
- **Secado:** Es un método de conservación de alimentos, consistente en extraer el agua de estos, lo que inhibe la proliferación de microorganismos y dificulta la putrefacción.
- **Secador:** Aparato o máquina eléctrica para secar.
- **Espesor:** Dimensión más pequeña de un cuerpo de tres dimensiones.
- **Gradiente de temperatura:** El gradiente de temperatura, es la variación de temperatura en una corta distancia, medida en dirección radial de la superficie. El cambio de temperatura por unidad de longitud, se denomina gradiente de temperatura.
- **Humedad:** Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire
- **Tiempo:** Período determinado durante el que se realiza una acción o se desarrolla un acontecimiento.
- **Flujo de aire:** Es la cantidad de aire comprimido, medido como volumen, suministrado por el compresor por unidad de tiempo.

### **III. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis general e hipótesis específicas**

##### **3.1.1. Hipótesis General**

La humedad final óptima será la más cerca al 15% para la deshidratación de la Pituca en un secador rotatorio discontinuo.

##### **3.1.2. Hipótesis Específicas**

- El grosor más adecuado será de 4 mm para llegar a la humedad óptima cercana al 15%.
- Los parámetros de operación óptimos será cuando la temperatura sea de 70°C y un flujo de 45.5 m<sup>3</sup>/h.

#### **3.2. Definición conceptual de variables**

Las variables de la investigación son:

Y= variable dependiente

X<sub>1</sub>= variable independiente

X<sub>2</sub>= variable independiente

Es decir:  $Y=f(X_1, X_2)$ .

Y= Humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo.

X<sub>1</sub>= Grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca.

X<sub>2</sub>= Parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte.

### 3.3. Operacionalización de variables

Tabla 6  
*Operacionalización de Variables*

VARIABLES DEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
Y= Humedad final optima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo.	Porcentaje de Humedad final	%	-Método de AOAC (método de la estufa de aire) -Método estadístico
VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
X <sub>1</sub> =Grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca.	-Grosor	-2mm,4mm y 6mm	-Ensayos experimentales
X <sub>2</sub> =Parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte.	-Temperatura -Flujo de aire	-60,70 y 80°C -28.8 y 45.5 m <sup>3</sup> /h	-Ensayos Experimentales

Fuente: Elaboración propia

## **IV. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1. Tipo y diseño de la investigación**

#### **4.1.1. Tipos de investigación**

Los tipos de investigación que se realizaran en el presente trabajo de tesis son:

**Por su finalidad** es de tipo aplicada, dado que los resultados obtenidos en la investigación tienen por finalidad orientarlos hacia los procesos productivos.

**Por su diseño interpretativo** es experimental, porque permitirá manipular las variables independientes para obtener la variable de respuesta requerida.

**Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados** es del tipo cuantitativo, porque las variables de la investigación son cuantitativas tipo experimental.

#### 4.1.2. Diseño de Investigación

El diseño de la presente investigación cuenta con tres etapas, los cuales se da en el Figura 5:



**Figura 5.** Diseño de Investigación. Fuente: Elaboración Propia.

## **4.2. Método de la investigación**

En la investigación se ha tenido en cuenta tres etapas:

- **Primera etapa**

Preceder a buscar reseñas históricas, revistas científicas, tesis y tecnología relacionada a la investigación, con el fin de tener una base para proceder al análisis respectivo.

- **Segunda etapa**

Realizar los ensayos en el laboratorio, usando el secador rotatorio discontinuo para el proceso de secado de la Pituca a diferentes geometrías de corte, teniendo en cuenta los parámetros de operación (temperatura y velocidad).

- **Tercera etapa**

Con los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio, se procederá hacer un análisis de los datos ajustándolos a los modelos matemáticos y estadísticos poder identificar nuestra variable Y.

## **4.3. Población y Muestra**

El criterio de población muestra será aplicado para la primera etapa de investigación.

Para esta etapa la población estará conformada por la pituca que se cultiva en la provincia de Junin.

Se trabajará con una muestra experimental de 60 g para cada ensayo, en total fueron 18 corridas por lo cual la muestra total de la experiencia fue 1080 g de Pituca.

## **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollo**

La investigación se desarrolló en la Universidad Nacional del Callao, ubicado en el departamento del Callao.

Las pruebas experimentales se realizaron durante el mes de julio del 2017 en el laboratorio de la facultad de la universidad, dado que primero se realizó un reconocimiento del equipo y uso, para poder utilizarlo para los ensayos.

#### 4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos, tendremos que aplicar lo siguiente:

##### 4.5.1. Equipos, materiales e Insumos a utilizar

###### A. Equipos

- ✓ **Para cortar la Pituca en rodajas con espesores establecidos:** cortadora de embutidos electrónica con filo ondulado (150 W), modelo DCS-8312-220, con un diámetro de cuchillo de 220 mm, peso de 15,48kg.



**Figura 6.** Cortadora de embutidos. Fuente: Elaboración Propia.

- ✓ **Para el pesado de la Pituca:** Balanza pesa gramera digital 6001 Pocket Scale de 0 a 500 gramos, MH-Series Gris



**Figura 7.** Balanza. Fuente: Elaboración Propia.

- ✓ **Para el secado de la Pituca:** Secador Rotatorio discontinuo.

Las especificaciones son las siguientes:

- Longitud = 45.5 cm
- Diámetro = 33.5 cm
- Peso = 1 Kg
- Potencia motor o drum = 0.75 HP
- Potencia motor del ventilador 1 (inyector de aire) = 1800W
- Revoluciones del secador= 13.2 rpm



**Figura 8.** Secador Rotatorio discontinuo. Fuente: Elaboración Propia.

- ✓ **Para monitorear la temperatura en el secador:** Computadora con el software Data Q
- ✓ **Para medir el tiempo transcurrido del secado de Pituca:** Cronometro digital.
- ✓

#### **B. Materiales**

- ✓ **Para medir la temperatura de ambiente:** Termómetro.
- ✓ **Para corte de cascara:** 2 cuchillos grandes.
- ✓ **Para medir el grosor de las rodajas de Pituca:** Calibrador Vernier (Capacidad 150 mm-6”).
- ✓ **Para el pesado de las muestras:** Luna de reloj (79 mm de diámetro).

- ✓ **Para poner las muestras en el secador:** Bolsitas de Organza 10x15 doble cinta (Color blanco).
- ✓ **Para el sacado de muestras del secador:** Pinza de metal de 50 cm con gancho en un lado.
- ✓ **Para poder hallar la longitud de nuestra capsula (parte del secador):** Huincha.
- ✓ **Para medir la perdida depresión:** tubo de Venturi.
- ✓ **Para la forma circular y de diámetro exacto:** Molde Circular.



**Figura 9.** Calibrador de Vernier. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 10.** Bolsa Organza. Fuente: Elaboración Propia.

### C. Insumos

- ✓ Pituca (Colocacia esculenta).



**Figura 11.** Pituca. Fuente: Elaboración Propia.

## 4.5.2. Métodos

### A. Obtención de la materia Prima

Se utilizará los cornos de la Pituca (Colocacia Esculenta), provenientes de la Selva Central (Distrito de la Merced, Departamento de Junín) que serán adquiridas en el mercado “Minka” del Callao.



**Figura 12.** Obtención de la materia prima. Fuente: Elaboración Propia.

### B. Análisis Físicoquímico

La humedad inicial de la Pituca se obtendrá usando el método de AOAC (método de la estufa de aire - referencia del Instituto Nacional, NCh 841 of 78), para lo cual se usará 500 gramos de muestra.

### C. Pre-tratamiento

La pituca será limpiada con un paño seco para sacar cualquier material extraño que pueda interferir en el proceso de secado.

#### D. Cortes y Selección

Retirar la cascara a la Pituca, utilizando un cuchillo limpio.

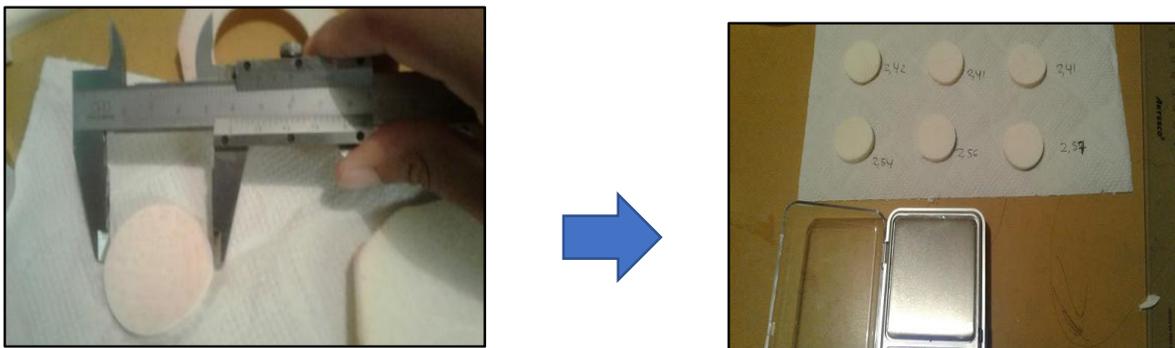
Cortar en rodajas con ayuda de la cortadora de embutidos a diferentes espesores de 2, 4 y 6mm aproximadamente.

Utilizando con el calibrador de Venier se procederá a seleccionar las rodajas de Pituca que cumplan con los espesores establecidos.

Finalmente usar un molde circular para obtener rodajas de Pituca de un mismo diámetro.

Se tendrán 54 muestras, 18 muestras con grosor de 2 mm, 18 muestras con grosor de 4mm y 18 muestras con grosor de 6 mm.

Las muestras se mantendrán en una bolsa hermética, para su utilización en cada experimentación.



**Figura 13.** Corte y Selección. Fuente: Elaboración Propia.

### E. Montaje del equipo

El secador Rotatorio Discontinuo, es un tubo de vidrio el cual gira sobre su eje a una velocidad de 13,2 rpm, el cual seca la muestra por medio de un flujo de aire caliente que entra por uno de los extremos, así mismo por medio de la termocupla se puede ver la variación de la temperatura dentro del secador, esto se logra obtener gracias al software DataQ que se encuentra instalado en una computadora.



**Figura 14.** Secador Rotatorio Discontinuo del laboratorio de la facultad de Ingeniería Química. Fuente: Elaboración Propia.

Se realizará este procedimiento con la finalidad obtener la humedad final, el cual dependerá de la forma de rodajas de Pituca con 3 grosores diferentes, variando la temperatura y el flujo de aire.

- ✓ Se procederá a prender el equipo y se calentará hasta una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 28.8 m<sup>3</sup>/h
- ✓ Luego se introducirán las muestras dentro del secador (las cuales se encuentran en las bolsitas de organza), estas serán de 3 muestras del mismo grosor, de 2 mm, 4mm y 6 mm, teniendo en total 9 muestras.
- ✓ Durante el proceso de secado cada 10 minutos se procederá a pesar las muestras.
- ✓ Después que la muestra haya sido secada totalmente, se debe pesar el producto final a fin de determinar que el peso se mantiene constante. Este procedimiento se volverá hacer para temperaturas de 70°C y 80°C con el mismo flujo de aire. Así mismo se realizará otras corridas con flujo de aire de 45.5 m<sup>3</sup>/h y temperaturas de 60°C, 70°C y

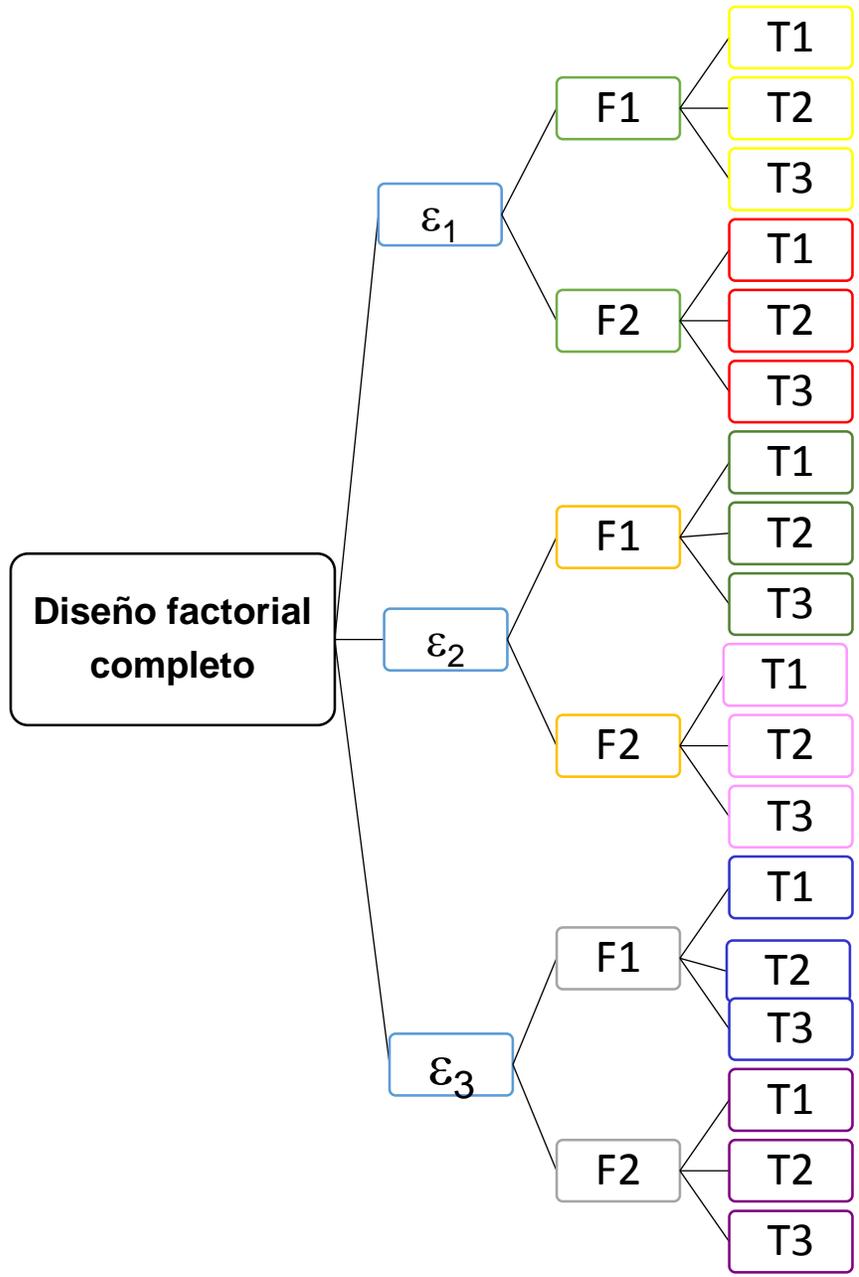


Figura 15. Diseño Experimental. Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

$\varepsilon_1$  :grosor de rodaja de Pituca de 2mm

$\varepsilon_2$  :grosor de rodaja de Pituca de 4mm

$\varepsilon_3$  :grosor de rodaja de Pituca de 6mm

F1: Fujo de aire de 28.8 m<sup>3</sup>/h

F2: Fujo de aire de 45.5 m<sup>3</sup>/h

T1: Temperatura de 60 °C

T2: Temperatura de 70 °C

T3: Temperatura de 80 °C

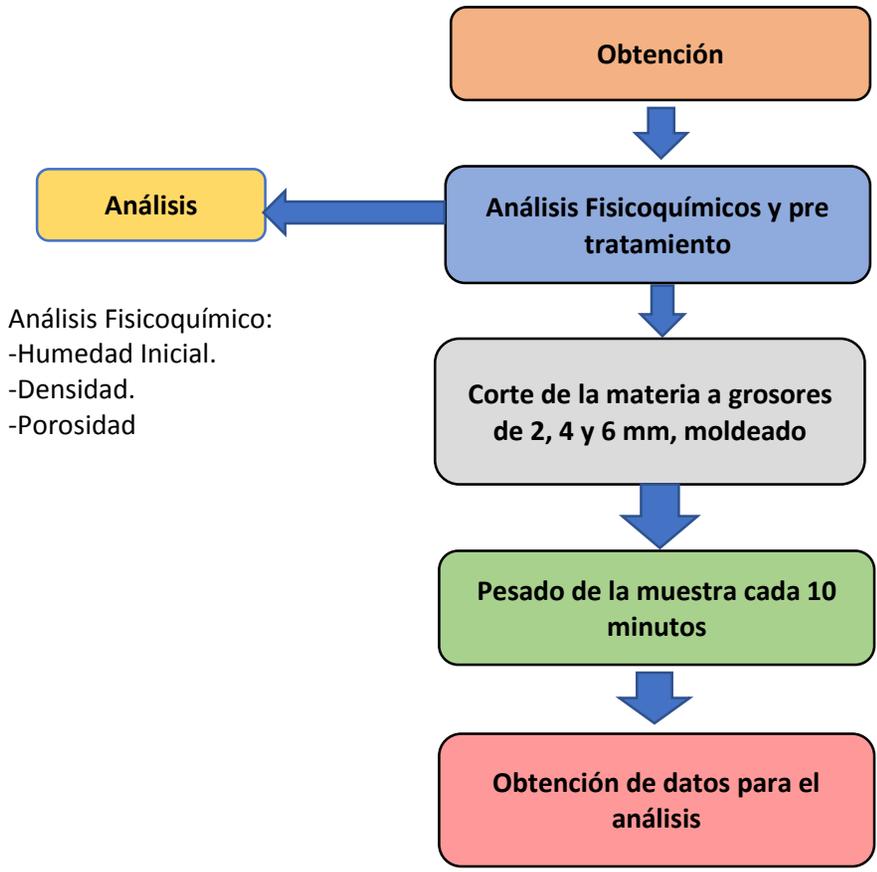
Dando un total de 18 corridas experimentales y siendo por triplicado seria 54 corridas experimentales.

#### F. Registro de datos

Por medio de los tiempos y el pesado de las muestras podremos hacer nuestra grafica de tiempo vs Humedad.



Gráfico 2. Curva de secado modelo. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 16.** Diagrama de bloques para el proceso de secado de la Pituca. Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para el análisis de los datos se usará un modelo factorial completo que de grado  $3 \times 2 \times 3$  usando el programa Minitab con factores de grosor, flujo de aire y temperatura, y con variable respuesta la Humedad Relativa, además el programa nos dará como resultado el punto óptimo del proceso. El modelo de la curva de secado se hallará mediante el programa Polymath.

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

Para poder hallar la humedad inicial de la Pituca, se utilizó el método AOAC International official methods of Analysis 19 th Edition 2012.920.87 (método de la estufa de aire), basada en la norma austriaca S2023, el cual se realizó con una muestra fresca.

El análisis fue hecho en el laboratorio de servicios de análisis químico (LASAQ), de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Los resultados nos dieron una humedad inicial de 70.4g/100g de muestra original y una densidad de 1.008 g/ml.

#### 5.1.1. Cálculo del Flujo del aire

El caudal volumétrico relaciona al caudal masico con la densidad del aire para el caso del secador rotatorio, para la cual se usará la siguiente ecuación 5.1

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \dots(\text{Ec.5.1})$$

Donde:

$q_v$ : Flujo volumétrico

$q_m$ : Caudal masico

$\rho$ : densidad del aire

Cálculo del caudal masico mediante la Ec.5.2

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} * \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 * \Delta P * \rho} \dots (\text{Ec.5.2})$$

Donde:

$q_m$ : Caudal masico

$c$ : Coeficiente de descarga

$\beta$ : Relación de diámetros

$\Delta P$ : Diferencia de presiones en ambos lados de la tubería

$\rho$ : Densidad del aire

Tener en cuenta que la relación de diámetros se halla con la ecuación Ec.5.3

$$\beta = \frac{d}{D} \dots (Ec. 5.3)$$

Donde:

$d$ : diámetro del orificio

$D$ : diámetro de la tubería

Para hallar la diferencia de presiones en ambos lados de la tubería, se aplicará la siguiente la ecuación 5.4

$$\Delta P = \rho * g * \Delta h \dots (Ec. 5.4)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del líquido (agua)

$g$ : Gravedad

$\Delta h$ : Variación de alturas

Reemplazar los datos obtenidos experimentalmente en las ecuaciones:

$$\beta = \frac{0.014595m}{0.0265m} = 0.5664$$

- Diferencia de presiones para el primer caudal volumétrico

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta h_1 = 0.008 \text{ m}$$

$$\Delta P = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.008 \text{ m} = 78.4 \text{ Psi}$$

- Diferencia de presiones para el segundo caudal volumétrico

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta h_2 = 0.02 \text{ m}$$

$$\Delta P = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.02 \text{ m} = 196 \text{ Psi}$$

Para hallar el caudal masico reemplazamos los datos en la ecuación a las diferentes temperaturas:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} * \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 * \Delta P * \rho}$$

$$C = 0.7$$

$$\rho_{\text{aire}}(60^\circ\text{C}) = 1.059 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{aire}}(70^\circ\text{C}) = 1.028 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{aire}}(80^\circ\text{C}) = 0.994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Reemplazando en las ecuaciones 5.1 y 5.2 a diferentes temperaturas se tendrán los siguientes

datos:

Tabla 7

*Resultado de los Flujos de Aire con respecto a Distintas Temperaturas.*

T°C	qm	qv	qv (L/min)	qv promedio	qv m <sup>3</sup> /h
60	0.0083	0.0079	472		
70	0.0082	0.0080	479	480	28.8
80	0.0081	0.0081	488		
60	0.0132	0.0124	747		
70	0.0130	0.0126	758	759	45.5
80	0.0128	0.0128	771		

Fuente: Elaboración propia

Donde los flujos para la experimentación serán los siguientes:

F1: 28.8 m<sup>3</sup>/h

F2: 45.5 m<sup>3</sup>/h

### 5.1.2. Resultado de las corridas experimentales

#### PRUEBA 1:

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_1$ : Temperatura, 60°C

Grosor: 2mm

Tabla 8

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 60°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	1.42	1.45	1.45	1.44
<b>10</b>	1.18	1.18	1.21	1.19
<b>20</b>	0.93	1.02	1.02	0.99
<b>30</b>	0.78	0.9	0.87	0.89
<b>40</b>	0.7	0.82	0.72	0.75
<b>50</b>	0.63	0.75	0.67	0.65
<b>60</b>	0.6	0.72	0.66	0.63
<b>70</b>	0.54	0.67	0.63	0.61
<b>80</b>	0.54	0.66	0.63	0.61
<b>90</b>	0.54	0.65	0.62	0.6
<b>100</b>	0.54	0.65	0.61	0.6
<b>110</b>	0.53	0.65	0.61	0.6
<b>120</b>	0.53	0.64	0.6	0.59
<b>130</b>	0.53	0.64	0.6	0.59

Fuente: Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Hallando la humedad en base seca para cada corrida “X”

$$X_{prom} = \frac{W_{sh} - W_{ss}}{W_{ss}} \quad \dots (Ec. 5.5)$$

X: humedad en base seca.

$W_{sh}$ : Peso solido húmedo

$W_{ss}$ : Peso sólido seco

%humedad inicial de la pituca: 70.4

$$W_{ss} = 1.44x \frac{29.6}{100} g$$

$$W_{ss} = 0.42624 g$$

Reemplazando en la ecuación 5.

$$X_{prom} = \frac{1.44 - 0.42624}{0.42624}$$

$$X_{prom} = 2.38$$

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 9.

Tabla 9  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 2mm, 60°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X<sub>prom</sub></b>
0	2.38
10	1.79
20	1.32
30	1.08
40	0.75
50	0.52
60	0.48
70	0.44
80	0.43
90	0.42
100	0.41
110	0.4
120	0.38
130	0.38



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. Curva de secado a 2mm, 60C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 2:**

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_1$ : Temperatura, 60°C

Grosor: 4mm

Tabla 10

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 60°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	2.22	2.24	2.24	2.23
<b>10</b>	1.86	1.93	1.74	1.9
<b>20</b>	1.61	1.65	1.43	1.63
<b>30</b>	1.4	1.41	1.19	1.41
<b>40</b>	1.2	1.29	1.12	1.2
<b>50</b>	1.05	1.18	0.98	1.02
<b>60</b>	0.95	1.07	0.87	0.91
<b>70</b>	0.85	0.99	0.78	0.82
<b>80</b>	0.79	0.92	0.75	0.77
<b>90</b>	0.75	0.88	0.72	0.74
<b>100</b>	0.73	0.84	0.7	0.72
<b>110</b>	0.71	0.82	0.69	0.7
<b>120</b>	0.7	0.81	0.67	0.69
<b>130</b>	0.69	0.79	0.67	0.68
<b>140</b>	0.69	0.79	0.67	0.68
<b>150</b>	0.67	0.77	0.66	0.67
<b>160</b>	0.67	0.77	0.66	0.67

Fuente: Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 11

Tabla 11  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 4mm, 60°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
0	2.38
10	1.87
20	1.47
30	1.13
40	0.82
50	0.54
60	0.38
70	0.23
80	0.16
90	0.11
100	0.08
110	0.06
120	0.04
130	0.03
140	0.03
150	0.01
160	0.01

Fuente: Elaboración propia

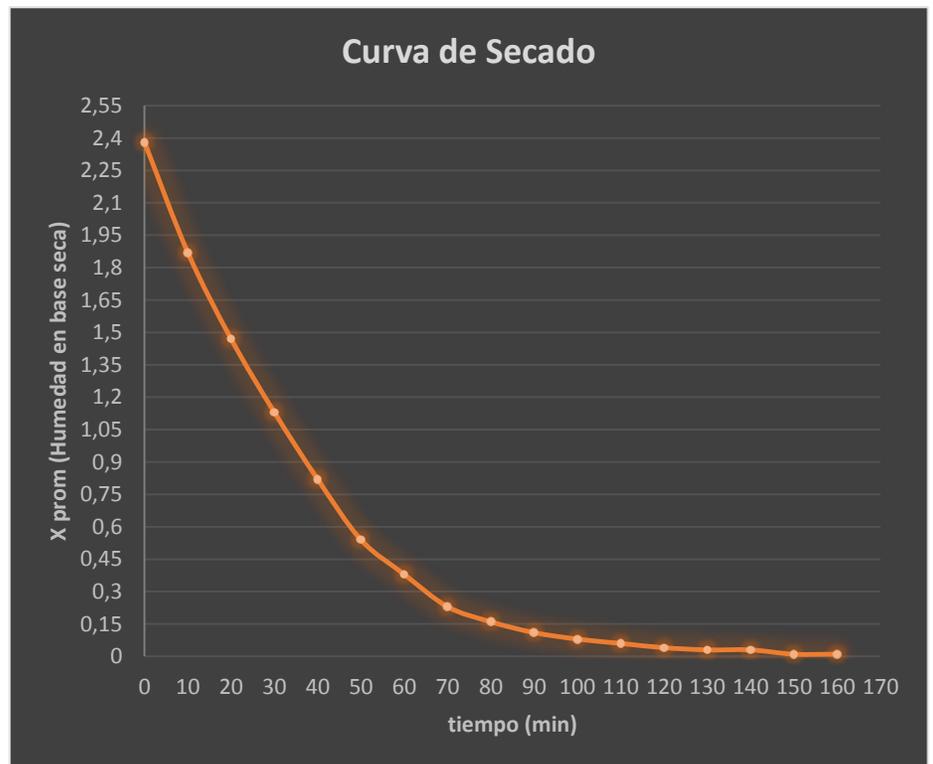


Gráfico 4. Curva de secado a 4mm, 60C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 3:** $v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h $T_1$ : Temperatura, 60°C

Grosor: 6mm

Tabla 12

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 60°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	3.27	3.27	3.27	3.27
<b>10</b>	3.07	3.11	3.02	3.09
<b>20</b>	2.78	2.83	2.63	2.81
<b>30</b>	2.5	2.61	2.44	2.53
<b>40</b>	2.3	2.4	2.23	2.27
<b>50</b>	2.13	2.21	2.01	2.17
<b>60</b>	1.97	2.02	1.86	2
<b>70</b>	1.82	1.89	1.74	1.82
<b>80</b>	1.75	1.73	1.62	1.74
<b>90</b>	1.67	1.64	1.53	1.66
<b>100</b>	1.6	1.55	1.45	1.58
<b>110</b>	1.54	1.45	1.38	1.46
<b>120</b>	1.47	1.38	1.3	1.38
<b>130</b>	1.42	1.31	1.25	1.28
<b>140</b>	1.39	1.25	1.19	1.22
<b>150</b>	1.37	1.21	1.16	1.19
<b>160</b>	1.35	1.18	1.14	1.16
<b>170</b>	1.33	1.16	1.12	1.14
<b>180</b>	1.31	1.14	1.11	1.13
<b>190</b>	1.3	1.12	1.1	1.11
<b>200</b>	1.29	1.11	1.09	1.1
<b>210</b>	1.27	1.1	1.07	1.09
<b>220</b>	1.26	1.09	1.06	1.08
<b>230</b>	1.26	1.09	1.06	1.08
<b>240</b>	1.26	1.08	1.06	1.07

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

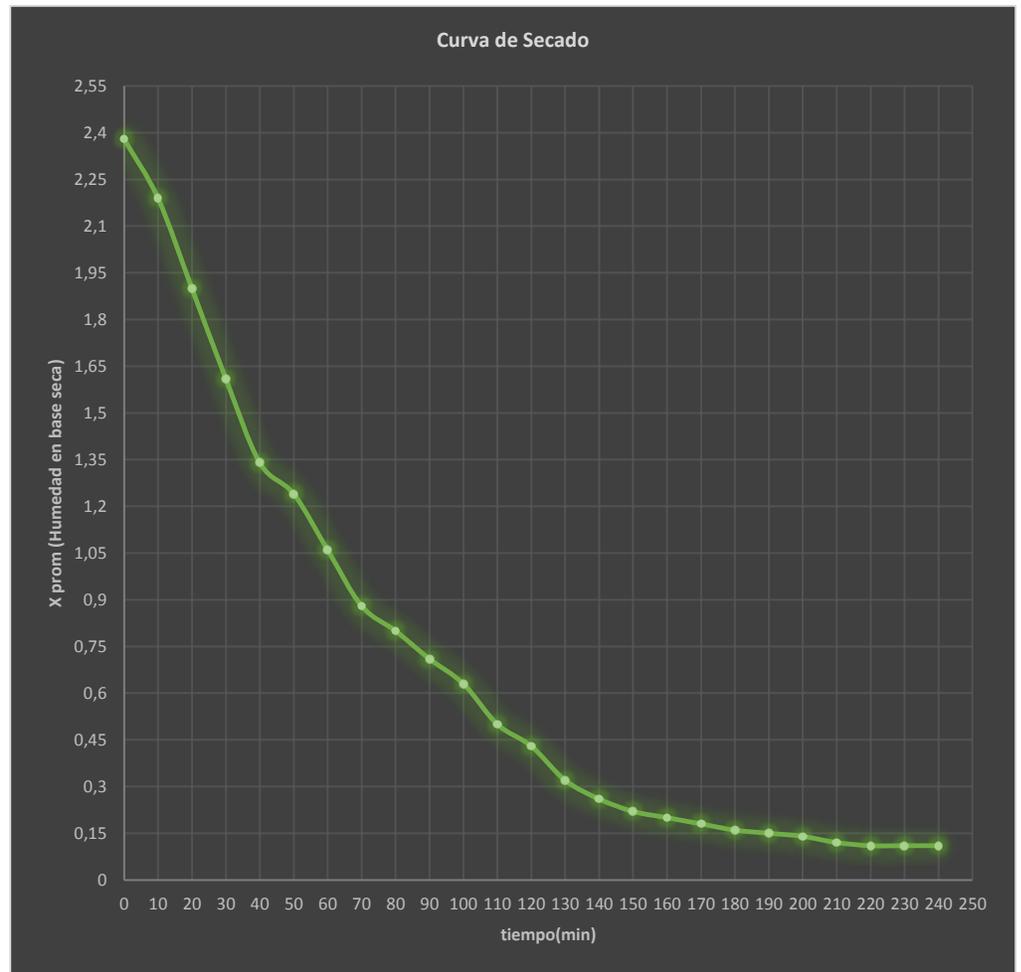
M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 13

Tabla 13  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 6mm, 60°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
0	2.38
10	2.19
20	1.9
30	1.61
40	1.34
50	1.24
60	1.06
70	0.88
80	0.8
90	0.71
100	0.63
110	0.5
120	0.43
130	0.32
140	0.26
150	0.22
160	0.2
170	0.18
180	0.16
190	0.15
200	0.14
210	0.12
220	0.11
230	0.11
240	0.11

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 4:**

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_2$ : Temperatura, 70°C

Grosor: 2mm

Tabla 14

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 70°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	1.24	1.23	1.26	1.24
<b>10</b>	1.09	1.01	1.08	1.06
<b>20</b>	0.9	0.78	0.77	0.78
<b>30</b>	0.69	0.59	0.6	0.6
<b>40</b>	0.6	0.49	0.46	0.48
<b>50</b>	0.53	0.48	0.41	0.47
<b>60</b>	0.52	0.46	0.39	0.46
<b>70</b>	0.51	0.46	0.38	0.45
<b>80</b>	0.49	0.45	0.37	0.44
<b>90</b>	0.5	0.45	0.36	0.44
<b>100</b>	0.49	0.44	0.37	0.43
<b>110</b>	0.49	0.44	0.37	0.43

Fuente: Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 15

Tabla 15

*Tiempo vs Humedad Promedio a 2mm, 70°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
<b>0</b>	2.38
<b>10</b>	1.88
<b>20</b>	1.11
<b>30</b>	0.62
<b>40</b>	0.29
<b>50</b>	0.29
<b>60</b>	0.24
<b>70</b>	0.22
<b>80</b>	0.19
<b>90</b>	0.19
<b>100</b>	0.18
<b>110</b>	0.18

Fuente: Elaboración propia

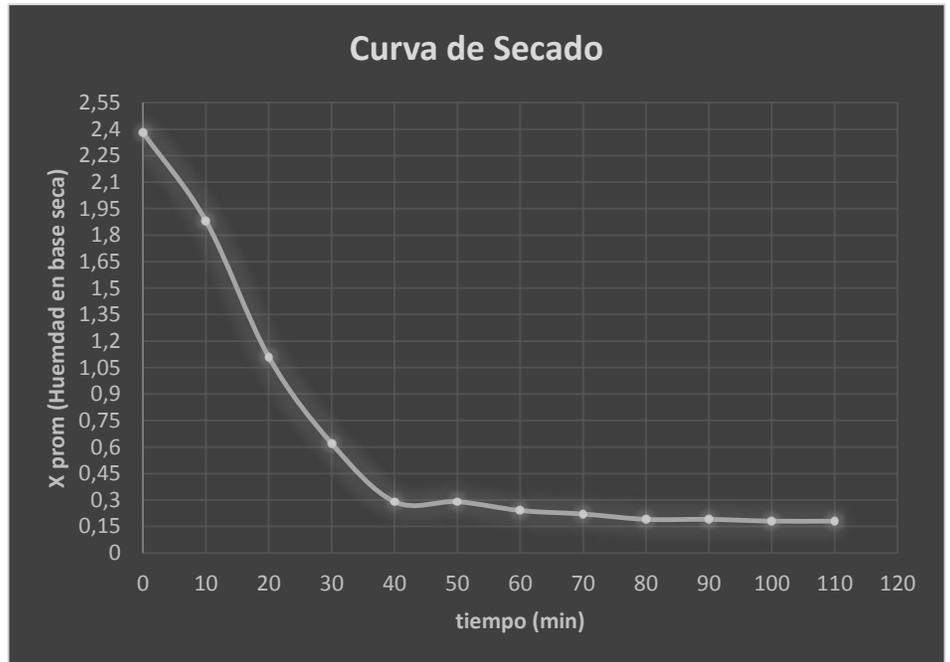


Gráfico 6. Curva de secado a 2mm, 70C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 5:**

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_2$ : Temperatura, 70°C

Grosor: 4mm

Tabla 16

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 70°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	2.33	2.32	2.34	2.33
<b>10</b>	2.03	2.03	1.96	2.01
<b>20</b>	1.58	1.73	1.71	1.72
<b>30</b>	1.31	1.51	1.48	1.5
<b>40</b>	1.15	1.29	1.29	1.29
<b>50</b>	1.03	1.07	1.16	1.09
<b>60</b>	0.93	0.92	0.97	0.94
<b>70</b>	0.86	0.84	0.88	0.86
<b>80</b>	0.81	0.78	0.82	0.8
<b>90</b>	0.76	0.75	0.76	0.76
<b>100</b>	0.74	0.73	0.76	0.74
<b>110</b>	0.74	0.71	0.73	0.73
<b>120</b>	0.72	0.7	0.72	0.71
<b>130</b>	0.72	0.69	0.72	0.71
<b>140</b>	0.71	0.68	0.71	0.7
<b>150</b>	0.69	0.67	0.71	0.69
<b>160</b>	0.69	0.67	0.71	0.69

**Fuente:** Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 17.

Tabla 17  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 4mm, 70°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
0	2.38
10	1.91
20	1.49
30	1.17
40	0.87
50	0.58
60	0.36
70	0.25
80	0.16
90	0.1
100	0.08
110	0.05
120	0.03
130	0.03
140	0.01
150	0.00
160	0.00



**Gráfico 7.** Curva de secado a 4mm, 70C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**Fuente:** Elaboración propia

**PRUEBA 6:**

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_2$ : Temperatura, 70°C

Grosor: 6mm

Tabla 18

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 70°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	3.46	3.42	3.46	3.45
<b>10</b>	3.08	3.2	3.1	3.09
<b>20</b>	2.78	2.85	2.67	2.82
<b>30</b>	2.45	2.53	2.39	2.46
<b>40</b>	2.22	2.3	2.18	2.23
<b>50</b>	2.03	2.09	1.99	2.04
<b>60</b>	1.84	1.91	1.83	1.86
<b>70</b>	1.71	1.71	1.69	1.7
<b>80</b>	1.58	1.59	1.56	1.58
<b>90</b>	1.46	1.4	1.39	1.42
<b>100</b>	1.37	1.34	1.29	1.33
<b>110</b>	1.33	1.25	1.25	1.28
<b>120</b>	1.3	1.14	1.2	1.21
<b>130</b>	1.28	1.08	1.16	1.12
<b>140</b>	1.26	1.05	1.13	1.09
<b>150</b>	1.24	1.02	1.11	1.07
<b>160</b>	1.23	0.98	1.09	1.04
<b>170</b>	1.23	0.98	1.07	1.03

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 19.

Tabla 19  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 6mm, 70°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
<b>0</b>	2.38
<b>10</b>	2.03
<b>20</b>	1.76
<b>30</b>	1.41
<b>40</b>	1.19
<b>50</b>	1
<b>60</b>	0.82
<b>70</b>	0.67
<b>80</b>	0.55
<b>90</b>	0.39
<b>100</b>	0.31
<b>110</b>	0.25
<b>120</b>	0.19
<b>130</b>	0.1
<b>140</b>	0.07
<b>150</b>	0.04
<b>160</b>	0.01
<b>170</b>	0.00

Fuente: Elaboración propia

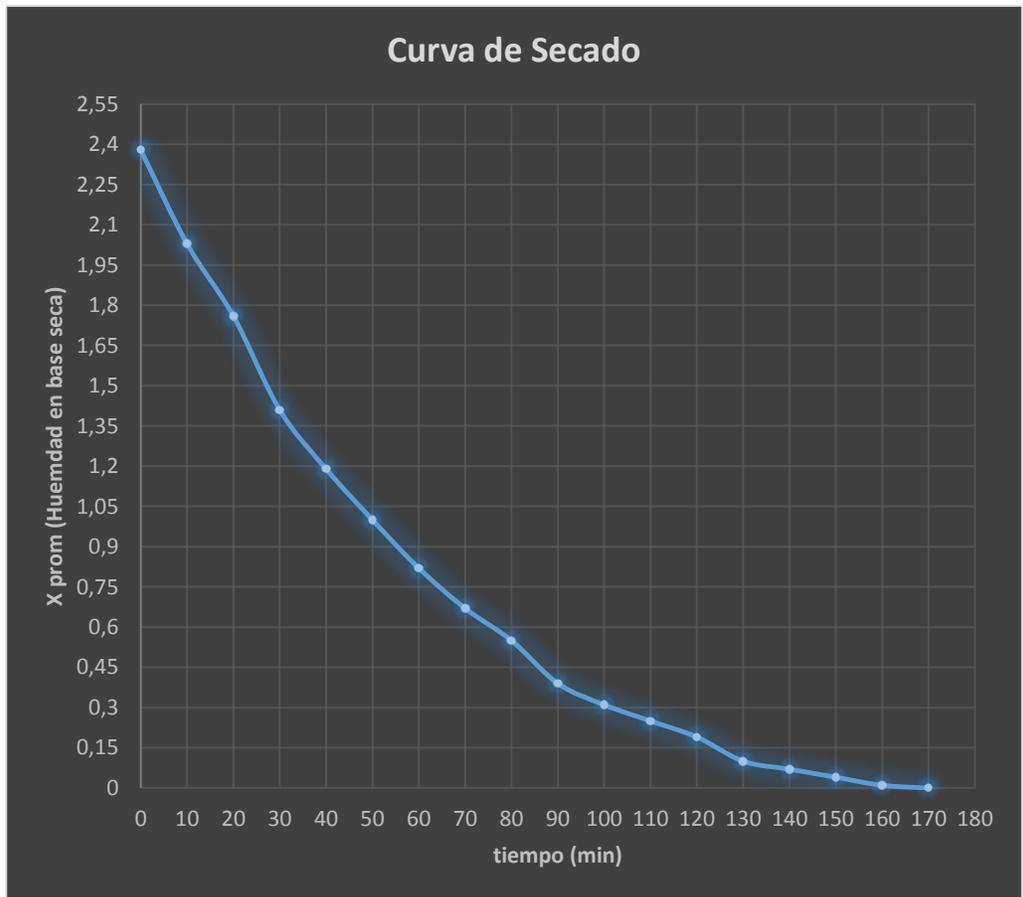


Gráfico 8. Curva de secado a 6mm, 70C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 7:**

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_3$ : Temperatura, 80°C

Grosor: 2mm

Tabla 20

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 80°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	1.26	1.24	1.23	1.24
<b>10</b>	0.91	0.7	0.79	0.75
<b>20</b>	0.65	0.53	0.57	0.55
<b>30</b>	0.51	0.44	0.47	0.47
<b>40</b>	0.47	0.43	0.44	0.45
<b>50</b>	0.46	0.42	0.44	0.44
<b>60</b>	0.46	0.42	0.44	0.44

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

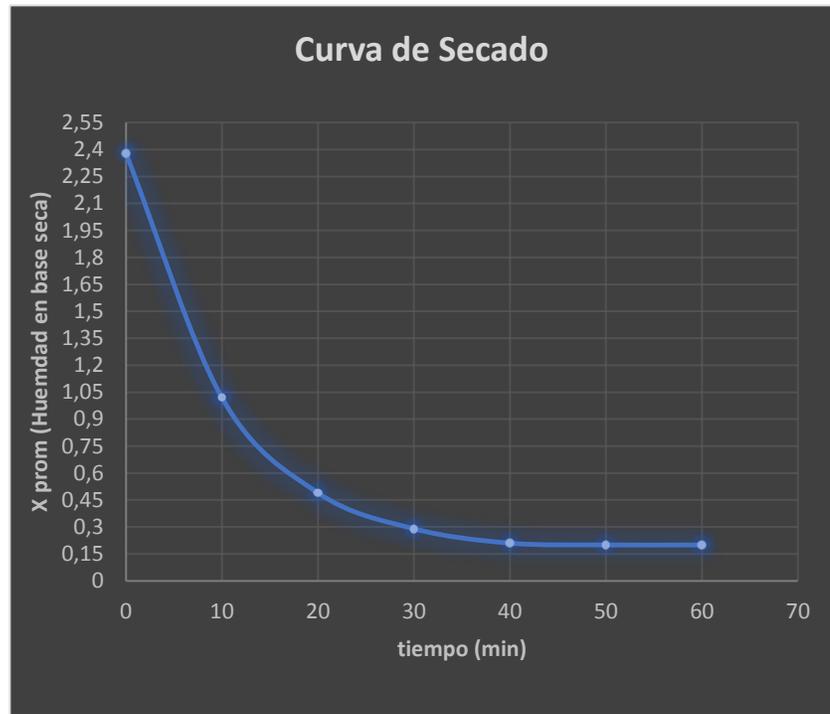
M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 21.

Tabla 21  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 2mm, 80°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
<b>0</b>	2.38
<b>10</b>	1.02
<b>20</b>	0.49
<b>30</b>	0.29
<b>40</b>	0.21
<b>50</b>	0.2
<b>60</b>	0.2

**Fuente: Elaboración propia**



**Gráfico 9.** Curva de secado a 2mm, 80C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 8:** $v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h $T_3$ : Temperatura, 80°C

Grosor: 4mm

Tabla 22

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 80°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	2.56	2.53	2.49	2.53
<b>10</b>	2.17	2.13	2.15	2.15
<b>20</b>	1.89	1.81	1.84	1.85
<b>30</b>	1.65	1.57	1.56	1.59
<b>40</b>	1.46	1.36	1.38	1.37
<b>50</b>	1.35	1.23	1.26	1.28
<b>60</b>	1.27	1.15	1.19	1.2
<b>70</b>	1.19	1.1	1.13	1.14
<b>80</b>	1.16	1.05	1.09	1.1
<b>90</b>	1.13	1.02	1.06	1.07
<b>100</b>	1.11	1	1.04	1.05
<b>110</b>	1.1	0.99	1.02	1.04
<b>120</b>	1.08	0.97	1.01	1.02
<b>130</b>	1.07	0.97	0.99	1.01
<b>140</b>	1.06	0.96	0.97	1
<b>150</b>	1.06	0.96	0.97	1

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 23.

Tabla 23  
*Tiempo vs Humedad promedio a 4mm, 80°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
0	2.38
10	1.87
20	1.47
30	1.13
40	0.83
50	0.71
60	0.61
70	0.52
80	0.47
90	0.43
100	0.4
110	0.39
120	0.36
130	0.35
140	0.33
150	0.33

Fuente: Elaboración propia

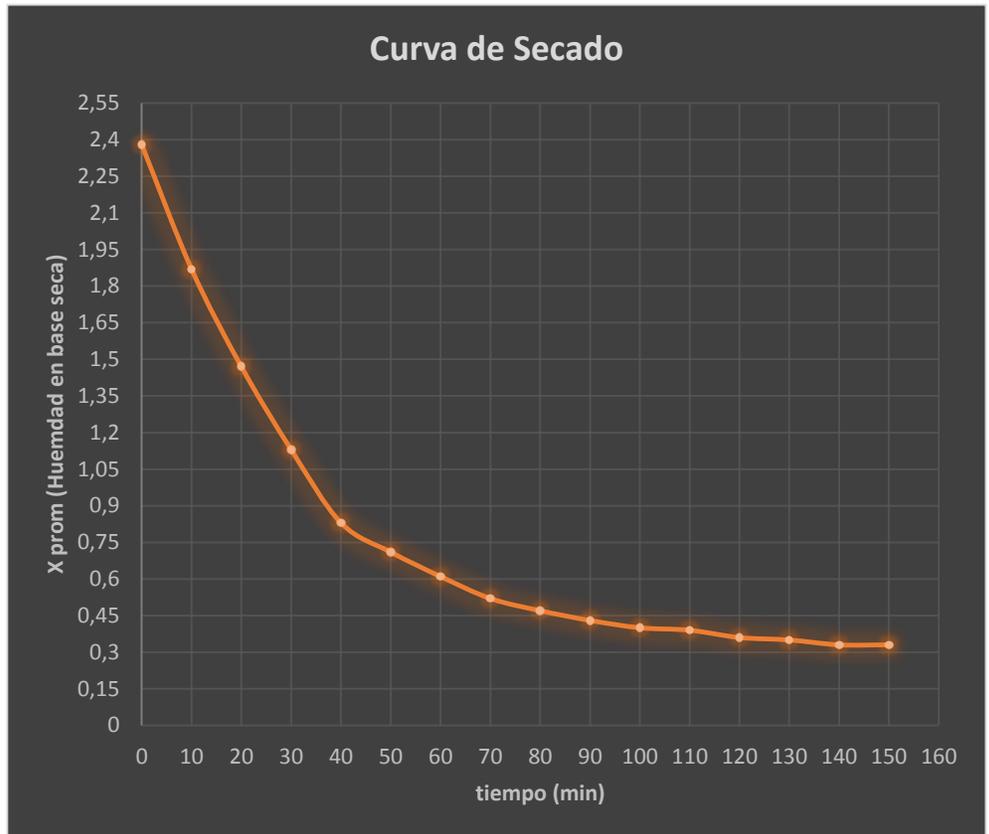


Gráfico 10. Curva de secado a 4mm, 80C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 9:**

$v_1$ : Velocidad, 28.8 m<sup>3</sup>/h

$T_3$ : Temperatura, 80°C

Grosor: 6mm

Tabla 24

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 80°C, con una velocidad de 28.8 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	3.79	3.79	3.8	3.79
<b>10</b>	3.33	3.33	3.39	3.35
<b>20</b>	2.94	2.99	2.97	2.97
<b>30</b>	2.66	2.67	2.69	2.67
<b>40</b>	2.42	2.42	2.48	2.44
<b>50</b>	2.27	2.2	2.32	2.26
<b>60</b>	2.13	2.07	2.18	2.13
<b>70</b>	2.04	1.96	2.05	2.02
<b>80</b>	1.96	1.89	1.94	1.93
<b>90</b>	1.89	1.83	1.85	1.86
<b>100</b>	1.84	1.78	1.79	1.8
<b>110</b>	1.8	1.73	1.75	1.76
<b>120</b>	1.78	1.7	1.7	1.73
<b>130</b>	1.74	1.66	1.68	1.69
<b>140</b>	1.71	1.62	1.65	1.66
<b>150</b>	1.68	1.6	1.61	1.63
<b>160</b>	1.67	1.57	1.59	1.61
<b>170</b>	1.65	1.56	1.57	1.59
<b>180</b>	1.63	1.54	1.56	1.58
<b>190</b>	1.62	1.52	1.55	1.56
<b>200</b>	1.6	1.52	1.55	1.56

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 25.

Tabla 25

*Tiempo vs Humedad promedio a 6mm, 80°C y 28.8m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>X prom</b>
0	2.38
10	1.98
20	1.64
30	1.38
40	1.17
50	1.02
60	0.89
70	0.8
80	0.72
90	0.65
100	0.61
110	0.57
120	0.54
130	0.51
140	0.48
150	0.45
160	0.43
170	0.42
180	0.4
190	0.39
200	0.39

Fuente: Elaboración propia

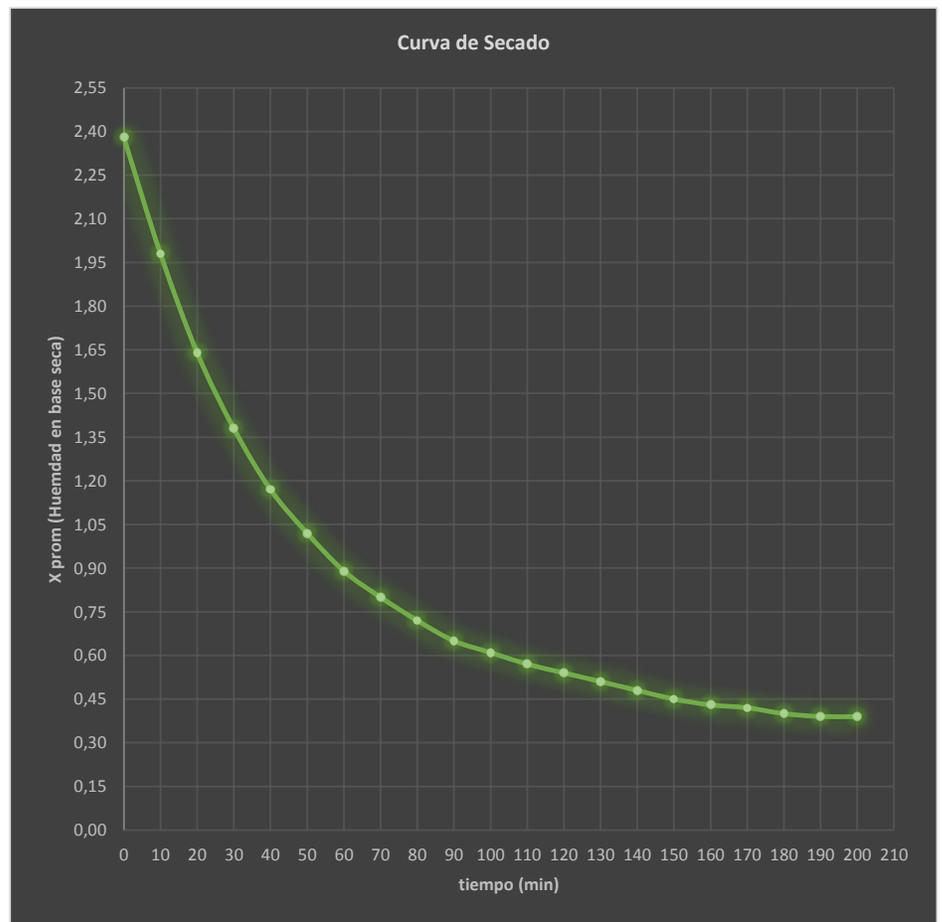


Gráfico 11. Curva de secado a 6mm, 80°C y 28.8 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 10:**

$v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h

$T_1$ : Temperatura, 60°C

Grosor: 2mm

Tabla 26

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 60°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	1.37	1.36	1.31	1.35
<b>10</b>	1.06	1.09	1.04	1.06
<b>20</b>	0.86	0.89	0.81	0.85
<b>30</b>	0.7	0.74	0.7	0.71
<b>40</b>	0.59	0.61	0.59	0.6
<b>50</b>	0.51	0.6	0.58	0.56
<b>60</b>	0.5	0.55	0.56	0.54
<b>70</b>	0.5	0.55	0.57	0.54

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 27.

Tabla 27  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 2mm, 60 °C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.67
20	1.14
30	0.79
40	0.5
50	0.41
60	0.35
70	0.35

**Fuente:** Elaboración propia



**Gráfico 12.** Curva de secado a 2mm, 60C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 11:** $v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h $T_1$ : Temperatura, 60°C

Grosor: 4mm

Tabla 28

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 60°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	2.41	2.37	2.42	2.4
<b>10</b>	2.06	1.97	2.02	2.02
<b>20</b>	1.87	1.74	1.86	1.82
<b>30</b>	1.66	1.59	1.68	1.64
<b>40</b>	1.54	1.44	1.53	1.54
<b>50</b>	1.46	1.32	1.45	1.41
<b>60</b>	1.34	1.26	1.3	1.3
<b>70</b>	1.28	1.2	1.25	1.24
<b>80</b>	1.24	1.14	1.17	1.18
<b>90</b>	1.2	1.11	1.14	1.15
<b>100</b>	1.13	1.12	1.12	1.12
<b>110</b>	1.11	1.09	1.08	1.09
<b>120</b>	1.11	1.07	1.08	1.09
<b>130</b>	1.09	1.06	1.05	1.07
<b>140</b>	1.07	1.05	1.03	1.05
<b>150</b>	1.06	1.05	1.03	1.05
<b>160</b>	1.05	1.05	1.03	1.04
<b>170</b>	1.05	1.02	1	1.02
<b>180</b>	1.04	1.02	1	1.02
<b>190</b>	1.04	1.01	0.99	1.01
<b>200</b>	1.03	1	0.99	1.01
<b>210</b>	1.03	1	0.99	1.01

Fuente: Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 29.

Tabla 29

*Tiempo vs Humedad promedio a 4mm, 60°C y 45.5m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.84
20	1.57
30	1.31
40	1.16
50	0.98
60	0.83
70	0.75
80	0.67
90	0.62
100	0.58
110	0.54
120	0.53
130	0.5
140	0.48
150	0.47
160	0.47
170	0.44
180	0.44
190	0.43
200	0.42
210	0.42

Fuente: Elaboración propia

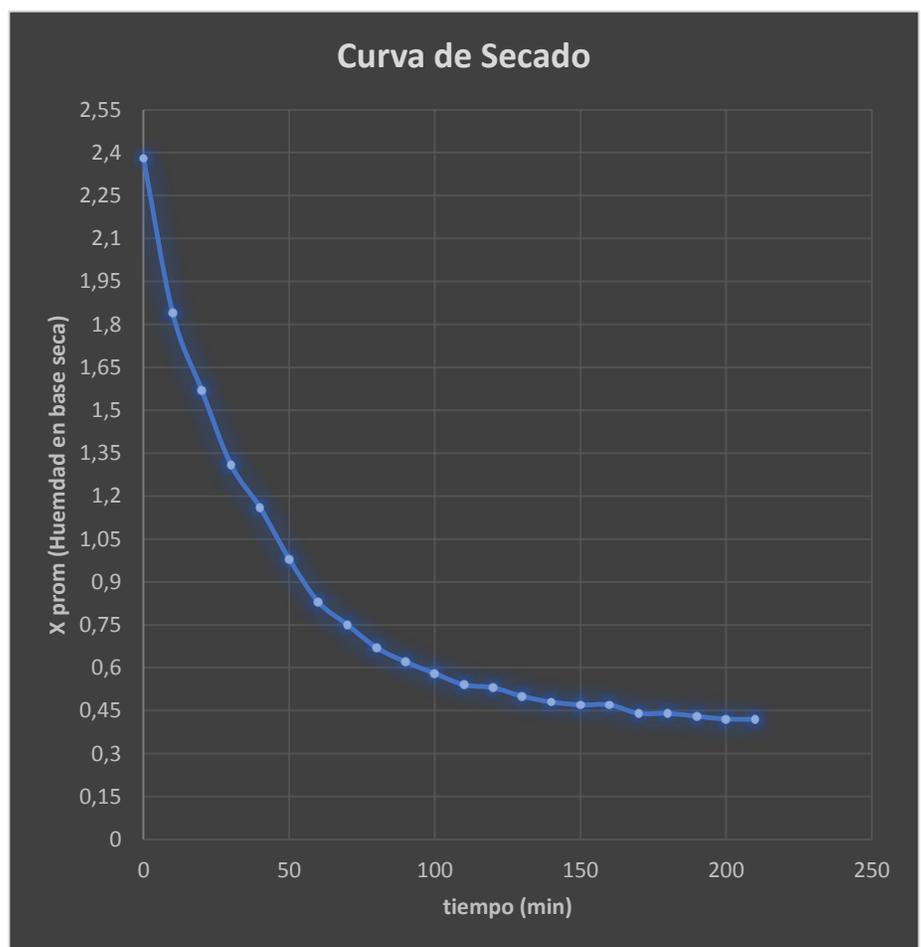


Gráfico 13. Curva de secado a 4mm, 60C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 12:** $v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h $T_1$ : Temperatura, 60°C

Grosor: 6mm

Tabla 30

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 60°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	3.67	3.66	3.65	3.66
<b>10</b>	3.34	3.3	3.35	3.33
<b>20</b>	3.1	3.04	3.09	3.08
<b>30</b>	2.86	2.83	2.87	2.85
<b>40</b>	2.67	2.62	2.66	2.65
<b>50</b>	2.56	2.46	2.55	2.52
<b>60</b>	2.44	2.33	2.43	2.4
<b>70</b>	2.33	2.22	2.3	2.32
<b>80</b>	2.21	2.11	2.2	2.17
<b>90</b>	2.14	2.01	2.11	2.09
<b>100</b>	2.09	1.96	2.04	2.03
<b>110</b>	2.02	1.89	1.97	1.96
<b>120</b>	1.94	1.83	1.9	1.89
<b>130</b>	1.92	1.79	1.86	1.86
<b>140</b>	1.89	1.72	1.8	1.8
<b>150</b>	1.87	1.7	1.79	1.79
<b>160</b>	1.83	1.67	1.74	1.75
<b>170</b>	1.8	1.65	1.74	1.73
<b>180</b>	1.79	1.63	1.71	1.71
<b>190</b>	1.77	1.62	1.69	1.69
<b>200</b>	1.75	1.57	1.67	1.66
<b>210</b>	1.73	1.57	1.64	1.65
<b>220</b>	1.71	1.56	1.64	1.64
<b>230</b>	1.68	1.56	1.64	1.63
<b>240</b>	1.67	1.56	1.64	1.62
<b>250</b>	1.66	1.56	1.63	1.62
<b>260</b>	1.66	1.56	1.63	1.62

Fuente: Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

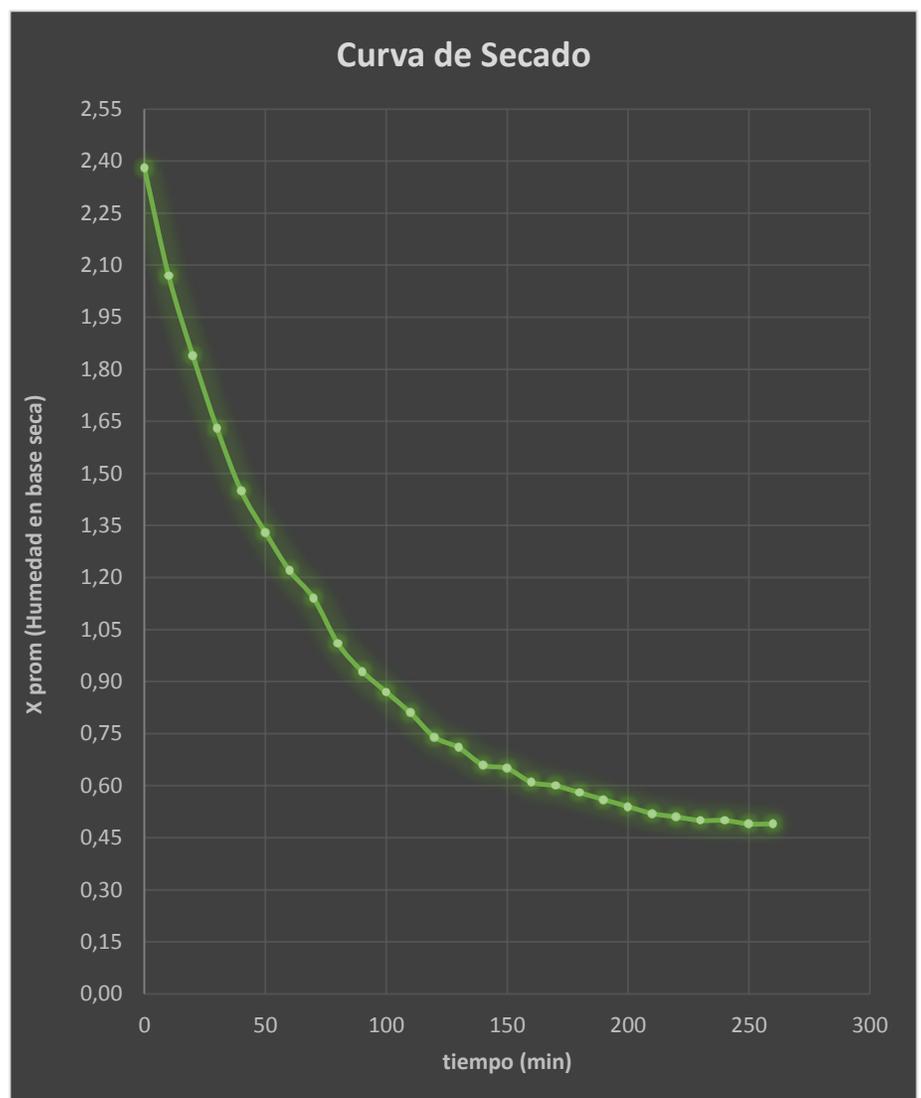
Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 31.

Tabla 31

*Tiempo vs Humedad promedio a 6mm, 60°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	2.07
20	1.84
30	1.63
40	1.45
50	1.33
60	1.22
70	1.14
80	1.01
90	0.93
100	0.87
110	0.81
120	0.74
130	0.71
140	0.66
150	0.65
160	0.61
170	0.6
180	0.58
190	0.56
200	0.54
210	0.52
220	0.51
230	0.5
240	0.5
250	0.49
260	0.49

Fuente: Elaboración propia



**PRUEBA 13:**

$v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h

$T_2$ : Temperatura, 70°C

Grosor: 2mm

Tabla 32

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 70°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	1.32	1.32	1.33	1.32
<b>10</b>	0.94	0.95	0.99	0.96
<b>20</b>	0.56	0.64	0.59	0.6
<b>30</b>	0.4	0.45	0.4	0.42
<b>40</b>	0.31	0.34	0.31	0.32
<b>50</b>	0.29	0.29	0.3	0.29
<b>60</b>	0.29	0.28	0.29	0.29
<b>70</b>	0.28	0.28	0.28	0.28
<b>80</b>	0.28	0.27	0.29	0.28
<b>90</b>	0.27	0.27	0.28	0.27
<b>100</b>	0.27	0.27	0.28	0.27

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 33.

Tabla 33

*Tiempo vs Humedad promedio a 2mm, 70°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.45
20	0.52
30	0.06
40	0.06
50	0.06
60	0.06
70	0.06
80	0.06
90	0.06
100	0.06

Fuente: Elaboración propia



Gráfico 15. Curva de secado a 2mm, 70C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 14:**

$v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h

$T_2$ : Temperatura, 70°C

Grosor: 4mm

Tabla 34

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 70°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	2.23	2.24	2.25	2.24
<b>10</b>	1.85	1.9	1.83	1.86
<b>20</b>	1.39	1.51	1.4	1.43
<b>30</b>	1.14	1.23	1.15	1.17
<b>40</b>	0.92	1.04	0.99	0.98
<b>50</b>	0.76	0.85	0.83	0.81
<b>60</b>	0.65	0.71	0.7	0.69
<b>70</b>	0.58	0.58	0.63	0.6
<b>80</b>	0.55	0.55	0.58	0.56
<b>90</b>	0.53	0.53	0.55	0.54
<b>100</b>	0.53	0.51	0.54	0.53
<b>110</b>	0.52	0.5	0.53	0.52
<b>120</b>	0.52	0.5	0.53	0.52

**Fuente: Elaboración propia**

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 35.

Tabla 35

*Tiempo vs Humedad Promedio a 4mm, 70°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.81
20	1.16
30	0.77
40	0.48
50	0.23
60	0.04
70	0.04
80	0.04
90	0.04
100	0.04
110	0.04
120	0.04

Fuente: Elaboración propia

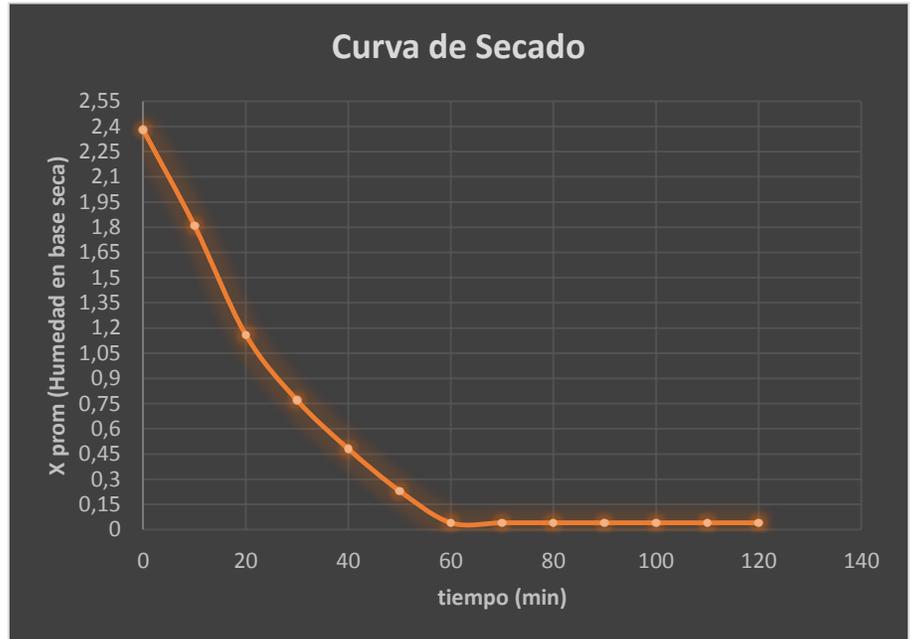


Gráfico 16. Curva de secado a 4mm, 70C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 15:** $v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h $T_2$ : Temperatura, 70°C

Grosor: 6m

Tabla 36

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 70°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	3.25	3.29	3.26	3.27
<b>10</b>	2.73	2.8	2.84	2.79
<b>20</b>	2.34	2.4	2.46	2.4
<b>30</b>	2.13	2.15	2.13	2.14
<b>40</b>	1.94	1.94	1.94	1.94
<b>50</b>	1.79	1.77	1.79	1.78
<b>60</b>	1.65	1.61	1.63	1.63
<b>70</b>	1.53	1.47	1.5	1.5
<b>80</b>	1.44	1.37	1.4	1.4
<b>90</b>	1.36	1.26	1.29	1.3
<b>100</b>	1.27	1.2	1.21	1.23
<b>110</b>	1.21	1.15	1.16	1.17
<b>120</b>	1.17	1.1	1.12	1.13
<b>130</b>	1.14	1.07	1.09	1.1
<b>140</b>	1.12	1.04	1.06	1.07
<b>150</b>	1.1	1.03	1.05	1.06
<b>160</b>	1.08	1.01	1.03	1.04
<b>170</b>	1.07	1	1.01	1.03
<b>180</b>	1.06	0.99	1	1.02
<b>190</b>	1.05	0.98	1	1.01
<b>200</b>	1.04	0.97	0.99	1
<b>210</b>	1.03	0.97	0.98	0.99
<b>220</b>	1.02	0.96	0.98	0.99
<b>230</b>	1.02	0.96	0.98	0.99

**Fuente:** Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

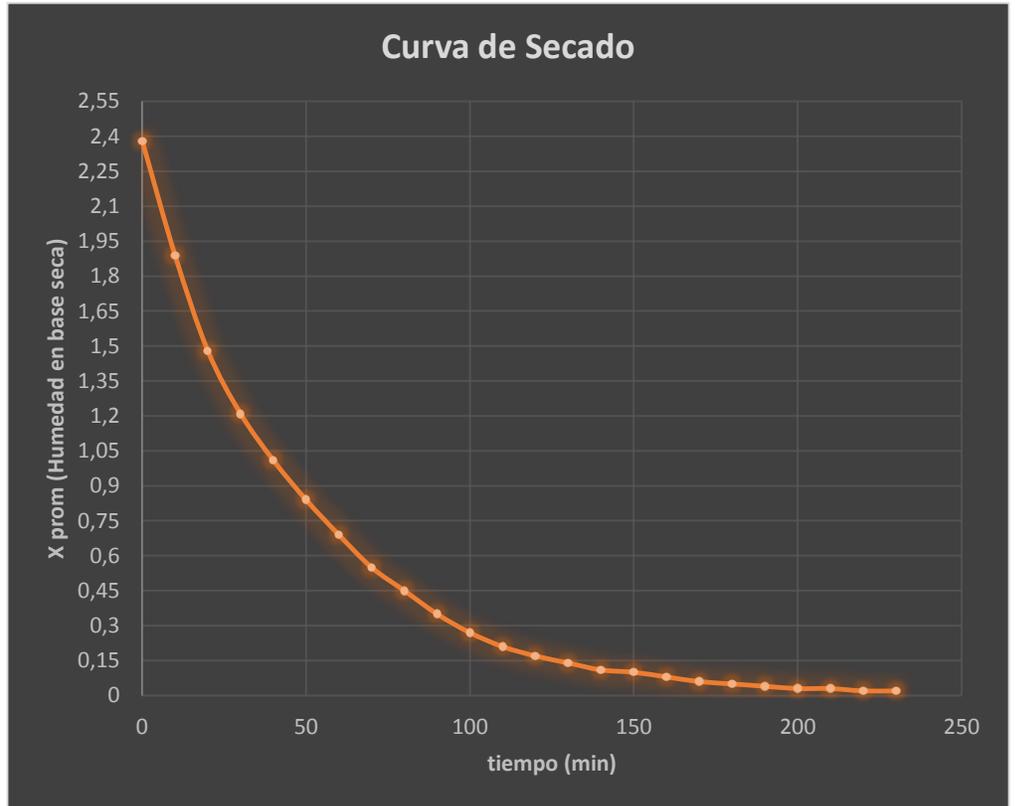
M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 37.

Tabla 37

*Tiempo vs Humedad Promedio a 6mm, 70°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.89
20	1.48
30	1.21
40	1.01
50	0.84
60	0.69
70	0.55
80	0.45
90	0.35
100	0.27
110	0.21
120	0.17
130	0.14
140	0.11
150	0.1
160	0.08
170	0.06
180	0.05
190	0.04
200	0.03
210	0.03
220	0.02
230	0.02



**Gráfico 17.** Curva de secado a 6mm, 70C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

Fuente: Elaboración propia

**PRUEBA 16:**

$v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h

$T_3$ : Temperatura, 80°C

Grosor: 2mm

Tabla 38

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 2mm y temperatura 80°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	1.27	1.28	1.3	1.28
<b>10</b>	0.71	0.66	0.78	0.72
<b>20</b>	0.45	0.4	0.5	0.45
<b>30</b>	0.34	0.3	0.37	0.34
<b>40</b>	0.29	0.27	0.3	0.29
<b>50</b>	0.28	0.26	0.28	0.27
<b>60</b>	0.27	0.26	0.28	0.27
<b>70</b>	0.27	0.26	0.27	0.27
<b>80</b>	0.27	0.26	0.27	0.27

Fuente: Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 39.

Tabla 39  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 2mm, 80°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	0.89
20	0.18
30	0.18
40	0.18
50	0.18
60	0.14
70	0.14
80	0.14



**Gráfico 18.** Curva de secado a 2mm, 80C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

Fuente: Elaboración propia

**PRUEBA 17:**

$v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h

$T_3$ : Temperatura, 80°C

Grosor: 4mm

Tabla 40

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 4mm y temperatura 80°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	2.24	2.21	2.23	2.23
<b>10</b>	1.81	1.62	1.77	1.79
<b>20</b>	1.39	1.26	1.4	1.4
<b>30</b>	1.19	1.08	1.22	1.21
<b>40</b>	1.02	0.83	1.03	1.03
<b>50</b>	0.8	0.63	0.86	0.83
<b>60</b>	0.7	0.53	0.74	0.72
<b>70</b>	0.63	0.52	0.69	0.66
<b>80</b>	0.61	0.51	0.67	0.6

**Fuente:** Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 41.

Tabla 41  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 4mm, 80°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.72
20	1.12
30	0.83
40	0.56
50	0.26
60	0.09
70	0.00
80	0.00

Fuente: Elaboración propia



Gráfico 19 Curva de secado a 4mm, 80C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

**PRUEBA 18:** $v_2$ : Velocidad, 45.5 m<sup>3</sup>/h $T_3$ : Temperatura, 80°C

Grosor: 6mm

Tabla 42

*Relación del tiempo con la masa de la pituca seca a un grosor de 6mm y temperatura 80°C, con una velocidad de 45.5 m<sup>3</sup>/h*

<b>t (min)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>PROMEDIO (g)</b>
<b>0</b>	3.33	3.37	3.37	3.36
<b>10</b>	2.87	2.8	2.8	2.82
<b>20</b>	2.3	2.38	2.35	2.34
<b>30</b>	2.1	2.13	2.11	2.11
<b>40</b>	1.83	1.89	1.88	1.87
<b>50</b>	1.56	1.58	1.67	1.6
<b>60</b>	1.37	1.42	1.5	1.43
<b>70</b>	1.2	1.27	1.35	1.27
<b>80</b>	1.11	1.15	1.23	1.16
<b>90</b>	1.03	1.07	1.15	1.08
<b>100</b>	0.97	1.01	1.11	1.03

**Fuente:** Elaboración propia

t: tiempo

M1: peso seco de pituca primera corrida.

M2: peso seco de pituca segunda corrida.

M3: peso seco de pituca tercera corrida.

Con los datos obtenidos de las humedades promedios se obtiene la siguiente tabla 43.

Tabla 43  
*Tiempo vs Humedad Promedio a 6mm, 80°C y 45.5 m<sup>3</sup>/h*

$\Theta$	X prom
0	2.38
10	1.84
20	1.36
30	1.13
40	0.88
50	0.61
60	0.44
70	0.28
80	0.17
90	0.09
100	0.04



Gráfico 20. Curva de secado a 6mm, 80C y 45.5 m<sup>3</sup>/h. Fuente: Elaboración Propia.

Fuente: Elaboración propia

Resumiendo, los espesores, flujo de aire y temperatura para un tiempo de proceso y humedad final, en la tabla 45.

Tabla 44

*Relación del grosor, flujo de aire, temperatura y tiempo con la humedad final*

<b>Grosor</b>	<b>Flujo de aire</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Humedad final</b>
<b>2</b>	28.8	60	130	0.38
<b>2</b>	28.8	70	110	0.18
<b>2</b>	28.8	80	60	0.2
<b>2</b>	45.5	60	70	0.35
<b>2</b>	45.5	70	100	0.06
<b>2</b>	45.5	80	80	0.14
<b>4</b>	28.8	60	160	0.01
<b>4</b>	28.8	70	160	0.00
<b>4</b>	28.8	80	150	0.33
<b>4</b>	45.5	60	210	0.42
<b>4</b>	45.5	70	120	0.04
<b>4</b>	45.5	80	80	0.00
<b>6</b>	28.8	60	240	0.11
<b>6</b>	28.8	70	170	0.00
<b>6</b>	28.8	80	200	0.39
<b>6</b>	45.5	60	260	0.49
<b>6</b>	45.5	70	230	0.02
<b>6</b>	45.5	80	100	0.04

**Fuente: Elaboración propia**

### 5.1.3. Punto óptimo

El punto óptimo se obtuvo del programa Minitab, luego de las corridas realizadas las variables óptimas para tener un buen secado, a una humedad del 15%, sin desnaturalizar al alimento sería:

Tabla 45  
*Punto optimo*

Solución	espesor	flujo	Temperatura	Humedad Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	2	45.5	80	0.14	0.911765

Fuente: Elaboración propia

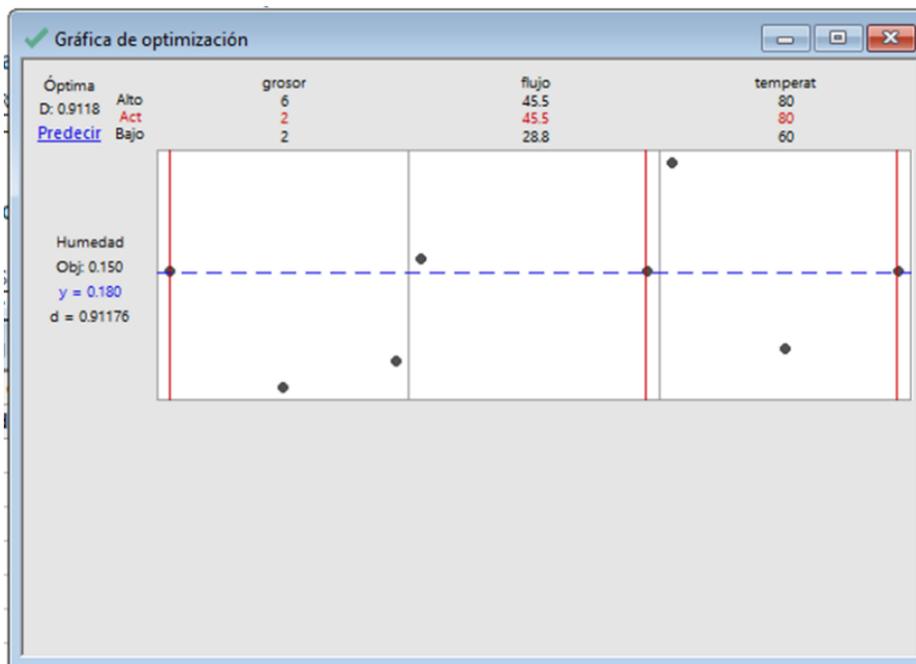


Gráfico 21. Diagrama del punto óptimo. Fuente: Elaboración Propia.

## 5.2. Resultados inferenciales

De la tabla 5.38 se puede observar que para el punto óptimo que es: espesor de 2mm, flujo de aire 45.5m<sup>3</sup>/h y una temperatura de 80°C, el tiempo de del proceso de secado sería de 80 minutos para poder secar la pituca.

Tabla 46

*Tabla final de la recopilación de las corridas experimentales*

<b>Grosor</b>	<b>Flujo de aire</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Humedad final</b>
2	28.8	60	130	0.38
2	28.8	70	110	0.18
2	28.8	80	60	0.2
2	45.5	60	70	0.35
2	45.5	70	100	0.06
2	45.5	80	80	0.14
4	28.8	60	160	0.01
4	28.8	70	160	0.00
4	28.8	80	150	0.33
4	45.5	60	210	0.42
4	45.5	70	120	0.04
4	45.5	80	80	0.00
6	28.8	60	240	0.11
6	28.8	70	170	0.00
6	28.8	80	200	0.39
6	45.5	60	260	0.49
6	45.5	70	230	0.02
6	45.5	80	100	0.04

Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Otro tipo de resultados estadísticos

Los datos obtenidos en cada corrida se ajustarán a un modelo matemático, para lo cual primero se deberá probar con cada modelo para poder verificar cual es el mejor ajuste que se adecua nuestra gráfica.

Tabla 47  
*Modelos matemáticos*

N°	Modelo	Ecuación
1	Newton	$MR = e^{-kt}$
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$
3	Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
4	Logaritmica	$MR = ae^{-kt} + c$
5	Dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
6	Dos términos exponencial	$MR = ae^{-k_0t} + (1 - a)e^{-kat}$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at - bt^2$
8	Aproximación por difusión	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$
10	Henderson y Pabis modificado	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
11	Modelo de Midilli	$MR = ae^{-kt^n} + bt$

Fuente: Villalba,( 2015).

Las corridas se realizaron con el programa Polymath con lo cual se obtuvieron los siguientes datos, para lo cual se tendrán en cuenta su R2, para escoger el modelo matemático para el proceso de secado de Pituca.

Tabla 48

*Resultados de los modelos matemáticos en el Proceso de Secado de Pituca.*

<b>N°</b>	<b>Modelo</b>	<b>R2</b>
<b>1</b>	Newton	0.4026
<b>2</b>	Page	0.4850
<b>3</b>	Henderson y Pabis	0.9734
<b>4</b>	Logaritmica	0.9964
<b>5</b>	Dos términos	0.9916
<b>6</b>	Dos términos exponenciales	0.9735
<b>7</b>	Wang and Singh	0.4621
<b>8</b>	Aproximación por difusión	0.9846
<b>10</b>	Henderson y Pabis modificado	0.9734
<b>11</b>	Modelo de Midilli	0.9987

**Fuente: Elaboración propia**

Como se observa en la tabla 48. El modelo con un R2 que se aproxima más a 1 es el modelo de MIDILLI.

Donde la ecuación de Midilli es:

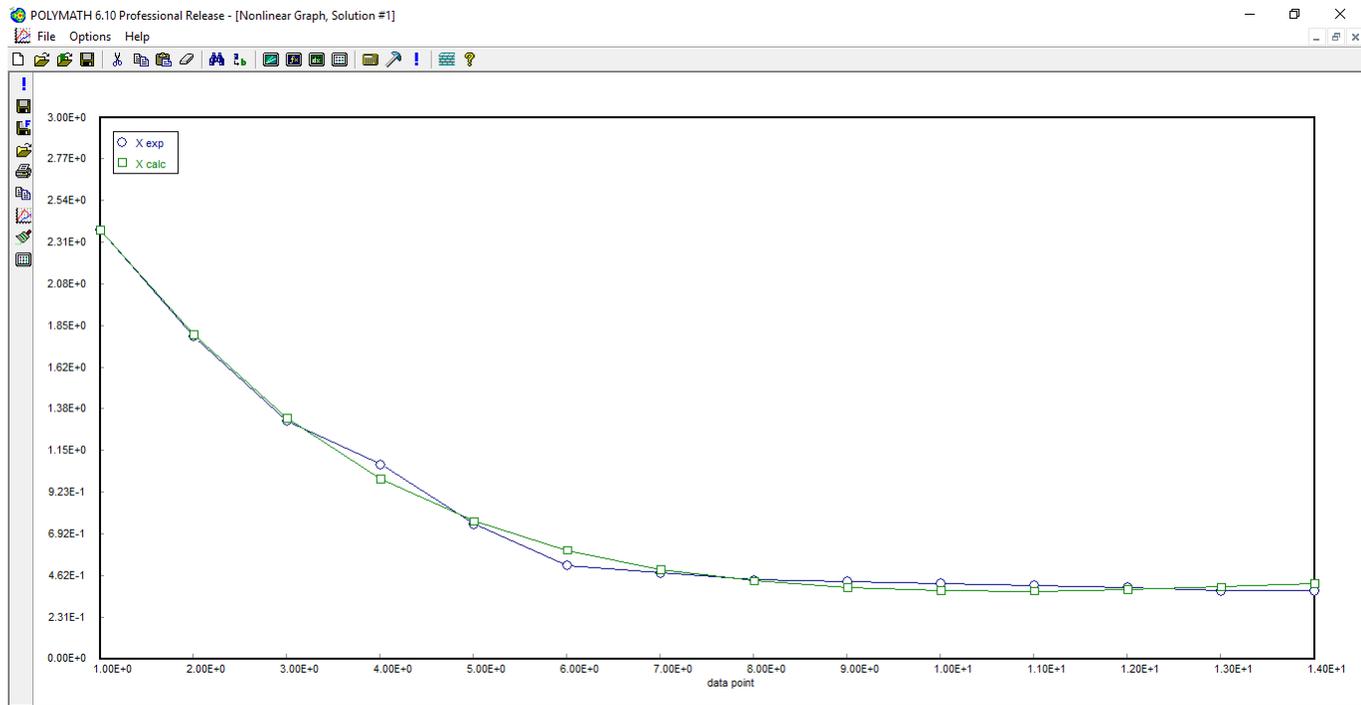
$$MR = ae^{-kt^n} + bt \dots (Ec 5.6)$$

Tabla 49

*Constantes del Modelo de Midilli para el secado de Pituca*

N° Experimentos	Parámetros			a	K	n	b	R^2	Varianza
	Espesor	Flujo	Temperatura						
1	2	28.8	60	2.379	0.025	1.070	0.003	0.996	0.002
2	2	28.8	70	2.398	0.009	1.498	0.002	0.996	0.003
3	2	28.8	80	2.380	0.098	0.955	0.003	1.000	0.000
4	2	45.5	60	2.376	0.025	1.157	0.004	0.999	0.001
5	2	45.5	70	2.380	0.013	1.558	-0.004	1.000	1.00E+09
6	2	45.5	80	2.380	0.065	1.148	-0.007	1.000	1.00E+09
7	4	28.8	60	2.355	0.012	1.228	0.000	0.999	0.001
8	4	28.8	70	2.354	0.010	1.263	0.000	0.999	0.001
9	4	28.8	80	2.392	0.027	1.000	0.002	0.998	0.001
10	4	45.5	60	2.378	0.037	0.838	0.002	0.999	0.000
11	4	45.5	70	2.388	0.019	1.178	-0.003	0.999	0.002
12	4	45.5	80	2.385	0.034	0.964	-0.005	0.998	0.003
13	6	28.8	60	2.397	0.009	1.118	0.000	0.998	0.001
14	6	28.8	70	2.377	0.012	1.082	-0.001	0.999	0.000
15	6	28.8	80	2.398	0.029	0.881	0.001	0.999	0.000
16	6	45.5	60	2.384	0.019	0.890	0.001	1.000	0.000
17	6	45.5	70	2.375	0.026	0.947	0.000	0.999	0.000
18	6	45.5	80	2.380	0.029	0.929	-0.003	0.999	0.001
R^2(PROM)								0.9987	

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 22.** Curva del modelo de Midilli aplicado al Proceso de secado de Pituca.

## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados**

#### **✓ Hipótesis general**

La humedad final óptima será de 14% según los datos obtenidos experimentalmente, por lo que se acepta la hipótesis planteada, dado que según los datos del MINSA la humedad debería ser del 15% como máximo para después ser usar como harina.

#### **✓ Hipótesis específicas**

- El grosor de rodaja de Pituca más adecuado será de 2mm dado al ser más delgada podrá secarse más rápido para tener una humedad optima de casi 15%, por lo cual la hipótesis planteada inicialmente no coincide, dado que se había mencionado que sería del 4mm
- Los parámetros óptimos del secador son un flujo de aire de 45.5 m<sup>3</sup>/h y 80°C, que logra realizar el proceso de secado en un menor tiempo y sin desnaturalizar el producto.

## **6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares**

En 2016 Bustos Gisela y Marapara Jhossi, realizaron una investigación acerca de los parámetros de secado de Pituca en un secador de bandeja para elaborar harina y su utilización en galletas, la misma que se obtuvo en el proceso de secado de Pituca con un alto rendimiento de su valor nutritivo.

Otro estudio realizado es el de Vega y Lemus (2006) donde realizan el proceso de secado a una papaya chilena, ellos trabajaron a temperaturas de 40,50,60,70 y 80°C , no tuvieron en cuenta el grosor de la papaya; como resultados obtuvieron que el proceso de secado de la papaya se acercó al modelo matemático de Page.

## CONCLUSIONES

- 1) El proceso de secado de pituca en un secador rotatorio discontinuo es el más adecuado con respecto a los demás tipos de secados, dado que permite el contacto del aire caliente en ambas caras de la superficie expuesta de la muestra, así mismo hay cambio en la posición del lecho que mejora el proceso de secado.
- 2) Respecto a los datos obtenidos del programa Minitab se observa que las interacciones tanto de la temperatura, flujo de aire y espesor de la rodaja de Pituca son importantes para el proceso de secado, dado que cada interacción entre si hacen la humedad pueda llegar a su valor optimo 14% de humedad.
- 3) El modelo de Midilli es el que más se adecua a los datos obtenidos del proceso de secado de la pituca, dado que el coeficiente de determinación es 0.9987 que es cercano a la unidad y la varianza tiende a cero.
- 4) En base a los resultados expuestos en la tabla 5.5 los valores óptimos del proceso de secado son grosor de rodaja de pituca 2mm, flujo de aire 45.5 m<sup>3</sup>/h y temperatura de 80°C durante 80 minutos, estos valores permiten obtener una humedad de 15%, cuyos valores son aptos para los tubérculos aprobados por MINSA (Ministerio de Salud).

## RECOMEDACIONES

- 1) Conocer el equipo de secado, como por ejemplo los rangos de temperatura con los que se quiere trabajar, el flujo de aire, y sobre el diámetro de la boquilla del secador para que en posibles experiencias la rodaja del producto pueda ingresar sin problemas.
- 2) Realizar primero una corrida de prueba para poder conocer el funcionamiento del secador, observar que variables se pueden modificar y cuales mantenerlas constante.
- 3) Mantener un orden al momento de hacer la experiencia dado que al hacer las corridas puede que haya algunos errores a la toma de los datos y pueda ocasionar lecturas erróneas.
- 4) Con los datos obtenidos se pueden realizar futuras investigaciones donde se pueda usar la muestra final de la Pituca ya sea para harina o galletas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amos, A.J. (1969). *Manual de industrias de los alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos*. Juárez, México: Editorial Pearson education de México.
- Brennan, J. G. (Ed.). (1998). *Las operaciones de las ingenierías de los alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Brown, G.G. (Ed.). (1965). *Operaciones básicas de la Ingeniería Química*. Madrid, España: Editorial Desván del libro.
- Brito, S., & Marin, C. (2010). *Evaluar la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado de frijol (Vigna Unguiculata), utilizando un secador discontinuo de bandejas* (tesis de pregrado). Universidad de Oriente, Venezuela.
- Bustos, G., & Marapasa, J. (2016). *Parámetros de secado en bandeja de Colocasia esculenta (PITUCA) para la elaboración de harina y su utilización en galletas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de la Amazonia, Perú.
- Coulson, J. M. (Ed.). (1978). *Chemical Engineering*. Oxford, Reino Unido: Editorial Butterworth-Heinemann.
- Click, L. & Baker, C. (1980). *Moisture determinations of agricultural products using a microwave oven*, (1), 80-90.
- FAO. (1991). *Principios de secado de granos psicometría higroscópica*. Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/X5057S/x5057S01.htm>
- Fernández, L.M. (1970). *Importancia de la pituca para la alimentación humana*. Lima, Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal, Dirección Universitaria de Proyección Social.

- Foust, A.S. (Ed.). (1990). *Principios de operaciones unitarias*. Tihuana, México: Compañía Editorial Continental.
- Gonzales, A. (2008). *Secado de granos de elote crudo utilizando un lecho fluidizado al vacío, empleando aire* (tesis de pregrado). Universidad de las Américas, México.
- Instituto Nacional de Recursos Fitogeneticos. (1999). *Descriptores para el taro (Colocasia Esculenta)*. Roma, Italia.
- Himmelblau, D. (1994). *Balances de Materia y Energía*. México: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Jimenes, P. J. (1988). *Patrones de asentamiento en la comarca de Molina de Aragón*. Guadalajara, México: Editorial Wad- Al-Hayara.
- Manases, F. (1970). *Importancia de la Pituca para la alimentación humana*. Universidad nacional Federico Villareal, Perú.
- Mendoza, F. R. D. (1989). *Producción de Malanga (Colocasia esculenta (L) Schott) por subirrigacion; una alternativa para el aprovechamiento de las zonas bajas inundables del trópico húmedo* (tesis de Licenciatura). Universidad Veracruzana, México.
- Mccabe, W. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: Editorial Mc Graw Hill Interamericana de México S.A.
- MINSA (2006). *Norma sanitaria para la fabricación de alimentos a base de granos y otros, destinados a programas sociales de alimentación*, Perú.
- Montalvo, A. (1991). *Cultivo de raíces y tubérculos tropicales*. San José, Costa Rica: Servicio editorial del Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura.
- Montero, R. (17 de mayo del 2006). *Normas Legales*. El peruano. p. 4.

- Morín, CH. (1983). *La Pituca: Información Básica sobre su Cultivo*. Lima, Perú, UNALM Dirección Universitaria de Proyección Social. 70 p.
- Nieto, H. M. (1977). *Estudio Técnico de la Deshidratación de Dos Variedades de Pituca (Colocasia esculenta) por Flujo de Aire Caliente y Caracterización de las Harinas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Nonhebel, G. (Ed.). (1979). *El secado de sólidos en la industria química*. Madrid, España: Editorial Reverte S.A.
- Núñez, R. (1989). *Sustitución parcial de la harina de trigo por la harina de pituca en la elaboración de panes enriquecidos con hidrolizado de pescado* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Federico Villareal, Perú.
- Onwueme, I. (1978). *Tropical tubers crops*. New York, United States: Editorial John Wiley & Sons Inc.
- Oyenuga, V.A. (1967). *Agriculture in Nigeria*. Recuperado de <https://www.amazon.com/Agriculture-Nigeria-V-Oyenuga/dp/B007EIMZ22>.
- Perry, R. (2001). *Manual del ingeniero químico*. Barcelona, España: Editorial España.
- Scott, W. J. (1953). *Water relations of Staphylococcus aureus at 30C°*. Aust. J. Biol. Sci. P. 549-564.
- Schery, R. W. (1956). *Plantas Útiles al Hombre*. Barcelona, España: Editorial Salvat editores S.A.
- Selvanet. (2006). *La Pituca o Taro: Colocasia Esculenta*. Recuperado de <https://selvanet20.blogspot.pe/2010/10/la-Pituca-o-tarocolocasia-esculenta.html>.
- Treybal, R. (2000). *Operaciones de transferencia de masa*. México: Editorial McGraw-Hill.

- Vega, A. & Lemus, R. (2006). *Modelado de la cinética de secado de papaya chilena (basconcella pubescens)*. Información tecnológica, 17(3), 23-32. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642006000300005](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000300005).
- Villalva, V. J. (2015). *Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa*. Científica de ingeniería y Desarrollo, 33(2). Recuperado de <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/5674/7812>.
- Villar, H. (2001). *Estudio de las variables que influyen en la operación del secado de sólidos utilizando un secador rotatorio* (tesis de pregrado). Universidad de Oriente, Venezuela.
- Yang, A. *Secador rotatorio*. Recuperado de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/indirect-heating-steam-tube-rotary-dryer-calcinator-1725589915.html>.

# ANEXOS

**ANEXO N°1**

**PROCESO DE SECADO DE PITUCA (*Colocasia esculenta*) EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO**

**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODOS</b>
¿Cuál es la humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo?	Determinar la humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo.	La humedad final óptima será la más cercana a 15% para la deshidratación de la Pituca en un secador rotatorio discontinuo.	Y= Humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo.	Porcentaje de Humedad final	15%	-Método de AOAC (método de la estufa de aire).  -Método estadístico
<b>PROBLEMA ESPECÍFICO</b>	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</b>	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODOS</b>
¿Cuál es el grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca para obtener un mejor rendimiento en el secado?	Determinar el grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca para obtener un mejor rendimiento en el secado.	El grosor más adecuado será de 4mm para llegar a una humedad óptima cercana al 15%	X <sub>1</sub> = Grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca.	-Grosor	-2mm,4mm y 6mm	-Ensayos experimentales
¿Cuáles deben ser los parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte?	Determinar los parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte.	Los parámetros de operación óptimo será cuando la temperatura sea de 70°C y un flujo de aire de 45.5 m <sup>3</sup> /h.	X <sub>2</sub> = Parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte.	-Temperatura -Flujo de aire	- 60,70 y 80 °C - 28.8 y 45.5 m <sup>3</sup> /h	-Ensayos experimentales.

**RELACION DE VARIABLES Y=(X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>)**

Y = Humedad final óptima a diferentes grosores de rodaja de Pituca y parámetros de operación en un secador rotatorio discontinuo.

X<sub>1</sub> = Grosor más adecuado que debe tener la rodaja de Pituca.

X<sub>2</sub> = Parámetros de la operación de secado de la Pituca a distintas geometrías de corte.

## ANEXO N°2



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA  
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



### INFORME DE ENSAYOS LASAQ N° 08-2017-DQ

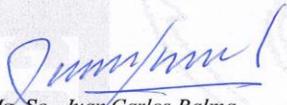
SOLICITANTE : Laura F. Obando Moreno.  
PRODUCTO DECLARADO : Pituca (tubérculo)  
NÚMERO DE MUESTRAS : 01  
CANTIDAD RECIBIDA : 600 g.  
MARCA : S/M  
FORMA DE PRESENTACIÓN : En bolsa  
MUESTREO POR : Muestra proporcionada por el solicitante  
FECHA DE RECEPCIÓN : 05 de mayo del 2017  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO: 12 de mayo del 2017  
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO / QUÍMICO

ENSAYO	RESULTADO
1.-Humedad, g/100g de muestra original	70.40
2.-Densidad aparente (g/mL)	1.008

#### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:

- 1) AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.920.87
- 2) Norma Austriaca S 2023.

Atentamente:

  
Mg. Sc. Juan Carlos Palma  
JEFE DEL LABORATORIO DE  
ANÁLISIS QUÍMICO

  
DIRECCIÓN   
Ph.D. Lisveth Flores del Pino  
DIRECTORA DEL DEPARTAMENTO  
ACADÉMICO DE QUÍMICA



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
 Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA  
**MUSEO DE HISTORIA NATURAL**



"Año del Buen Servicio al Ciudadano"

**CONSTANCIA N° 090- USM-2017**

EL JEFE DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (rizoma), recibida de **Laura Fabiola OBANDO MORENO y Elizabeth VEGA VEGA**, estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, ha sido estudiada y clasificada como: ***Colocasia esculenta*** (L.) Schott; y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1988):

**DIVISION: MAGNOLIOPHYTA**

**CLASE: LILIOPSIDA**

**ORDEN: ARALES**

**FAMILIA: ARACEAE**

**GENERO: *Colocasia***

**ESPECIE: *Colocasia esculenta* (L.) Schott**

Nombre vulgar: "pituca"

Determinada por: Mg. Asunción Cano Echevarría

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para fines de estudios.

Lima, 24 de mayo de 2017

  
**Mag. ASUNCIÓN A. CANO ECHEVARRÍA**  
 JEFE DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)



ACE/ddb

### ANEXO N°3

### MODELOS MATEMÁTICOS

<b>1. Logarítmica</b>	$MR = ae^{-kt} + c$
-----------------------	---------------------

Experimentos	Parámetros			a	k	c	R <sup>2</sup>	Varianza	
	Esesor	Flujo	Temperatura						
1	2	28.8	60	2.0798	0.0390	0.3405	0.9931	0.0032	
2	2	28.8	70	2.3960	0.0463	0.1105	0.9767	0.0161	
3	2	28.8	80	2.2032	0.0972	0.1787	0.9999	0.0001	
4	2	45.5	60	2.2220	0.0433	0.1836	0.9965	0.0027	
5	2	45.5	70	4.1620	0.0282	-1.7623	0.9955	0.0144	
6	2	45.5	80	2.7633	0.0783	-0.3816	0.9999	0.0004	
7	4	28.8	60	2.5126	0.0270	-0.0677	0.9954	0.0029	
8	4	28.8	70	2.5717	0.0251	-0.1229	0.9946	0.0037	
9	4	28.8	80	2.1046	0.0321	0.3095	0.9982	0.0008	
10	4	45.5	60	1.9133	0.0252	0.4221	0.9983	0.0005	
11	4	45.5	70	3.0483	0.0252	-0.6388	0.9978	0.0024	
12	4	45.5	80	2.8298	0.0271	-0.4521	0.9975	0.0026	
13	6	28.8	60	2.4835	0.0141	-0.0250	0.9968	0.0017	
14	6	28.8	70	2.6449	0.0153	-0.2412	0.9992	0.0005	
15	6	28.8	80	1.9870	0.0226	0.3843	0.9994	0.0002	
16	6	45.5	60	1.9000	0.0154	0.4527	0.9993	0.0002	
17	6	45.5	70	2.3479	0.0212	-0.0013	0.9991	0.0004	
18	6	45.5	80	2.6361	0.0218	-0.2736	0.9983	0.0013	
						R <sup>2</sup> (PROM)	0.9964		

## 2. Aproximación por la difusión

$$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$$

Experimentos	Parámetros			a	k	b	R^2	Varianza	
	Espesor	Flujo	Temperatura						
1	2	28.8	60	0.6829	0.0854	0.1990	0.9634	0.0169	
2	2	28.8	70	0.7372	0.0538	0.6661	0.9699	0.0207	
3	2	28.8	80	0.6897	0.0278	4.6181	0.9973	0.0026	
4	2	45.5	60	0.6973	0.0709	0.3975	0.9937	0.0049	
5	2	45.5	70	0.7268	0.0709	1.0000	0.9611	0.1238	
6	2	45.5	80	0.7005	0.1123	1.0000	0.9852	0.0549	
7	4	28.8	60	0.7356	0.0294	1.0000	0.9931	0.0043	
8	4	28.8	70	0.7452	0.0288	1.0000	0.9899	0.0069	
9	4	28.8	80	0.6901	0.0724	0.2066	0.9797	0.0090	
10	4	45.5	60	0.6502	0.0753	0.1209	0.9669	0.0103	
11	4	45.5	70	0.7407	0.0403	1.0000	0.9819	0.0200	
12	4	45.5	80	0.7174	0.0388	1.0000	0.9887	0.0114	
13	6	28.8	60	0.7350	0.0145	1.0000	0.9967	0.0018	
14	6	28.8	70	0.7382	0.0195	1.0000	0.9918	0.0052	
15	6	28.8	80	0.6826	0.0606	0.1546	0.9854	0.0051	
16	6	45.5	60	0.6809	0.0410	0.1456	0.9870	0.0039	
17	6	45.5	70	0.6768	0.0261	0.7558	0.9991	0.0004	
18	6	45.5	80	0.7123	0.0283	1.0000	0.9913	0.0064	
R^2(PROM)							0.9846		

### 3. Herdenson y Pabis

$$MR = ae^{-kt}$$

Parámetros			a	k	R <sup>2</sup>	Varianza	
Espesor	Flujo	Temperatura					
2	28.8	60	2.2276	0.0225	0.9354	0.0274	
2	28.8	70	2.4690	0.0402	0.9697	0.0188	
2	28.8	80	2.3424	0.0745	0.9815	0.0143	
2	45.5	60	2.3607	0.0351	0.9910	0.0058	
2	45.5	70	2.4535	0.0709	0.9611	0.0619	
2	45.5	80	2.4011	0.1123	0.9852	0.0275	
4	28.8	60	2.4713	0.0294	0.9931	0.0040	
4	28.8	70	2.4904	0.0288	0.9899	0.0064	
4	28.8	80	2.2317	0.0195	0.9553	0.0183	
4	45.5	60	2.0250	0.0115	0.9122	0.0260	
4	45.5	70	2.4815	0.0403	0.9819	0.0160	
4	45.5	80	2.4349	0.0388	0.9887	0.0091	
6	28.8	60	2.4700	0.0145	0.9967	0.0017	
6	28.8	70	2.4764	0.0195	0.9918	0.0049	
6	28.8	80	2.1340	0.0120	0.9485	0.0172	
6	45.5	60	2.1094	0.0077	0.9496	0.0146	
6	45.5	70	2.3474	0.0212	0.9991	0.0004	
6	45.5	80	2.4245	0.0283	0.9913	0.0057	
R <sup>2</sup> (PROM)					0.9734		

<b>4. Herrdenson y Pabis modificado</b>	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
---	---------------------------------------

Parámetros			a	k	b	c	R^2	Varianza
Espesor	Flujo	Temperatura						
2	28.8	60	0.7424082	0.0224585	0.742	0.7424372	0.9354394	0.032825
2	28.8	70	0.8229923	0.0401708	0.8229923	0.8229925	0.9696743	0.0234851
2	28.8	80	0.7808014	0.0745403	0.7808014	0.7808009	0.981487	0.0239149
2	45.5	60	0.7870239	0.0351115	0.7870239	0.786616	0.9909923	0.0086453
2	45.5	70	0.8178279	0.07088	0.8178279	0.8178279	0.9610648	1.00E+99
2	45.5	80	0.8003549	0.1123322	0.8003548	0.8003548	0.985207	1.00E+99
4	28.8	60	0.8237472	0.0293545	0.8237472	0.8237422	0.9931299	0.0045814
4	28.8	70	0.829104	0.028834	0.829104	0.8322026	0.9899028	0.0075771
4	28.8	80	0.7438055	0.0195347	0.7438055	0.7438169	0.9553135	0.0213429
4	45.5	60	0.6762072	0.0114708	0.6762072	0.6716873	0.9122061	0.02891
4	45.5	70	0.8271263	0.0403226	0.8271263	0.8271258	0.9819075	0.0266652
4	45.5	80	0.8116071	0.0387513	0.8116071	0.8116186	0.988706	0.015246
6	28.8	60	0.8232785	0.0144827	0.8232785	0.8232827	0.9966568	0.0018589
6	28.8	70	0.8254333	0.0194515	0.8254333	0.8254462	0.9917941	0.0055998
6	28.8	80	0.7111675	0.0120357	0.7111675	0.7111721	0.9485121	0.0192221
6	45.5	60	0.7030403	0.0077	0.7030403	0.7030122	0.9496002	0.0159117
6	45.5	70	0.782428	0.0212452	0.782428	0.7824277	0.9991044	0.0004363
6	45.5	80	0.8081579	0.0282751	0.8081579	0.8081574	0.9912907	0.0073476
							<b>R^2(PROM)</b>	<b>0.97344383</b>

<b>5. Dos términos</b>	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
------------------------	--------------------------------

Parámetros			a	k	b	g	R^2	Varianza	
Espesor	Flujo	Temperatura							
2	28.8	60	2.2791	0.0334	0.1239	-0.0086	0.9952	0.00246	
2	28.8	70	2.4932	0.0427	0.0058	-0.0316	0.9801	0.01540	
2	28.8	80	2.2695	0.0925	0.1103	-0.0092	1.0000	1.68E-05	
2	45.5	60	2.3937	0.0376	0.0008	-0.0778	0.9990	0.00092	
2	45.5	70	1.4116	0.0709	1.0419	0.0709	0.9611	1.00E+99	
2	45.5	80	1.0545	0.1123	1.3466	0.1123	0.9852	1.00E+99	
4	28.8	60	1.3438	0.0294	1.1275	0.0294	0.9931	0.00458	
4	28.8	70	1.3430	0.0288	1.1473	0.0288	0.9899	0.00758	
4	28.8	80	2.1858	0.0303	0.2214	-0.0024	0.9983	0.00079	
4	45.5	60	1.8344	0.0270	0.5108	0.0010	0.9985	0.00050	
4	45.5	70	1.4363	0.0403	1.0452	0.0403	0.9819	0.02667	
4	45.5	80	1.3975	0.0388	1.0374	0.0388	0.9887	0.03875	
6	28.8	60	1.3363	0.0145	1.1337	0.0145	0.9967	0.00186	
6	28.8	70	1.3680	0.0195	1.1084	0.0195	0.9918	0.00560	
6	28.8	80	1.7830	0.0261	0.6062	0.0024	0.9999	5.46E-05	
6	45.5	60	1.8278	0.0162	0.5309	0.0006	0.9994	0.00020	
6	45.5	70	2.2851	0.0207	0.0962	0.1651	0.9994	0.00030	
6	45.5	80	1.6146	0.0283	0.8100	0.0283	0.9913	0.00735	
<b>R^2(PROM)</b>							<b>0.9916</b>		

**6. Dos términos Exponencial**

$$MR = ae^{-k_0t} + (1 - a)e^{-kat}$$

Parametros			a	k	R^2	Varianza	
Espesor	Flujo	Temperatura					
2	28.8	60	1.630215	0.0201258	0.9414106	0.0248242	
2	28.8	70	1.738392	0.0345465	0.9697802	0.0187224	
2	28.8	80	1.676996	0.0652634	0.9843373	0.0121398	
2	45.5	60	1.687485	0.0306644	0.9924816	0.0048106	
2	45.5	70	1.722414	0.0607603	0.9560968	0.0697815	
2	45.5	80	1.698379	0.0982866	0.9828427	0.0318448	
4	28.8	60	1.738603	0.0253863	0.9902612	0.0056285	
4	28.8	70	1.747178	0.0248553	0.9863052	0.0086957	
4	28.8	80	1.632198	0.0174984	0.9605996	0.0161299	
4	45.5	60	1.527143	0.0105498	0.9174777	0.0244567	
4	45.5	70	1.739869	0.0345288	0.9776822	0.0197356	
4	45.5	80	1.718993	0.0334079	0.9860286	0.0113162	
6	28.8	60	1.744889	0.0125516	0.9954175	0.0023264	
6	28.8	70	1.743124	0.0167883	0.9885758	0.0067566	
6	28.8	80	1.581851	0.010903	0.9533916	0.0155688	
6	45.5	60	1.566671	0.0069682	0.9537432	0.0134354	
6	45.5	70	1.683745	0.0187202	0.9990304	0.0004294	
6	45.5	80	1.716064	0.0245134	0.9887362	0.007391	
					<b>R^2(PROM)</b>	<b>0.97356658</b>	

## 7. Wang and Singh

$$MR = 1 + at - bt^2$$

Parámetros			a	b	R <sup>2</sup>	Varianza	
Espesor	Flujo	Temperatura					
2	28.8	60	-0.0061	3.94E-06	0.4088	0.2505	
2	28.8	70	-0.0139	5.23E-05	0.4881	0.3171	
2	28.8	80	-0.0281	0.0002378	0.4858	0.3986	
2	45.5	60	0.0013	-0.0001895	0.3396	0.4226	
2	45.5	70	0.0410	-0.0025184	0.3443	1.0423	
2	45.5	80	-0.0213	-0.0005842	0.4722	0.9796	
4	28.8	60	-0.0093	1.42E-05	0.5841	0.2404	
4	28.8	70	-0.0067	-1.23E-05	0.5549	0.2827	
4	28.8	80	-0.0044	-6.17E-06	0.4365	0.2307	
4	45.5	60	-0.0026	-3.23E-06	0.4262	0.1700	
4	45.5	70	0.0166	-0.0005971	0.4252	0.5083	
4	45.5	80	0.0164	-0.0005752	0.4095	0.4783	
6	28.8	60	-0.0017	-1.26E-05	0.5295	0.2388	
6	28.8	70	0.0011	-5.61E-05	0.5370	0.2738	
6	28.8	80	-0.0006	-1.84E-05	0.3957	0.2056	
6	45.5	60	0.0009	-1.40E-05	0.3442	0.1905	
6	45.5	70	-0.0070	1.01E-05	0.6301	0.1638	
6	45.5	80	0.0038	-0.0001583	0.5056	0.3244	
R <sup>2</sup> (PROM)					0.4621		

8. Page				$MR = e^{-kt^n}$			
Experimentos	Parámetros			k	n	R <sup>2</sup>	Varianza
	Espesor	Flujo	Temperatura				
1	2	28.8	60	0.0005584	1.617	0.429	0.242
2	2	28.8	70	0.0002163	2.156	0.519	0.298
3	2	28.8	80	0.0072123	1.437	0.488	0.396
4	2	45.5	60	5.27E-05	2.428	0.355	0.412
5	2	45.5	70	4.64E-07	4.685	0.330	1.065
6	2	45.5	80	1.45E-05	3.901	0.484	0.958
7	4	28.8	60	1.43E-06	3.240	0.656	0.199
8	4	28.8	70	7.80E-07	3.379	0.626	0.237
9	4	28.8	80	0.0002364	1.764	0.460	0.221
10	4	45.5	60	0.0001799	1.650	0.447	0.164
11	4	45.5	70	1.36E-06	3.555	0.408	0.523
12	4	45.5	80	1.22E-06	3.538	0.389	0.495
13	6	28.8	60	2.69E-06	2.607	0.582	0.212
14	6	28.8	70	1.06E-06	2.996	0.567	0.256
15	6	28.8	80	4.37E-05	1.946	0.431	0.190
16	6	45.5	60	4.29E-06	2.224	0.350	0.189
17	6	45.5	70	3.40E-06	2.782	0.685	0.139
18	6	45.5	80	9.42E-07	3.310	0.525	0.312
						R <sup>2</sup> (PROM)	0.485

<b>9. Newton</b>	$MR = e^{-kt}$
------------------	----------------

Experimentos	Parámetros			k	R <sup>2</sup>	Varianza
	Espesor	Flujo	Temperatura			
1	2	28.8	60	0.008012	0.4027024	0.2336064
2	2	28.8	70	0.0166545	0.4786334	0.2936443
3	2	28.8	80	0.0314255	0.4818462	0.3346731
4	2	45.5	60	0.0117257	0.2942524	0.387061
5	2	45.5	70	0.0283356	0.2050407	0.8423588
6	2	45.5	80	0.0618269	0.4313498	0.7036288
7	4	28.8	60	0.013815	0.5490737	0.2443231
8	4	28.8	70	0.013185	0.5063407	0.2910676
9	4	28.8	80	0.0071513	0.4228694	0.2205168
10	4	45.5	60	0.0042031	0.4153655	0.1650143
11	4	45.5	70	0.0147494	0.277063	0.5327426
12	4	45.5	80	0.0135486	0.2641831	0.4966484
13	6	28.8	60	0.0056818	0.4340987	0.2802186
14	6	28.8	70	0.0078937	0.427402	0.317485
15	6	28.8	80	0.0041418	0.3808654	0.1964718
16	6	45.5	60	0.002237	0.2853555	0.1995876
17	6	45.5	70	0.0099688	0.598592	0.1700443
18	6	45.5	80	0.0112385	0.391045	0.3596223
				<b>R<sup>2</sup>(PROM)</b>	<b>0.40255994</b>	

## ANEXO N°4

### 1. Método Factorial Completo

Utilizaremos un modelo factorial completo donde se tiene 3 factores y todas las posibles combinaciones de tratamientos. Para lo cual se usara el Programa Minitab para poder iterar todas las combinaciones.

El modelo a utilizar será el siguiente:

$$Y_{ijkn} = \mu_{in} + \gamma_{in} + \beta_{jn} + \tau_{kn} + \gamma\beta_{ijn} + \gamma\tau_{ikn} + \beta\tau_{jkn} + \gamma\beta\tau_{ijkn} + \varepsilon_{ijkn}$$

Donde:

$$i = 1,2,3$$

$$j = 1,2$$

$$k = 1,2,3$$

$$n = 1..18$$

$\mu_{in}$ =Media global del análisis factorial

$\gamma_{in}$ =Factor asociado al espesor

$\beta_{jn}$ =Factor asociado al flujo

$\tau_{kn}$ =Factor asociado a la temperatura

$\gamma\beta_{ijn}$ =Interacción entre espesor y flujo

$\gamma\tau_{ikn}$ =Interacción entre flujo y temperatura

$\gamma\beta\tau_{ijkn}$ =Interacción entre flujo, temperatura y espesor

$\varepsilon_{ijkn}$ =Componente aleatorio

## 2. Resumen de modelo

El modelo general tiene un R cuadrado de 90%, lo cual significa que los factores de espesor, flujo y temperatura y las interacciones explican en un 90% a la variable respuesta de humedad. Más adelante veremos los coeficientes calculados para cada uno de los factores a forma de ecuación estadística, la cual nos ayudará a poder predecir una humedad relativa aproximada según la combinación de factores.

**Tabla 1**

### Obtención del R2

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
*	100.00%	*	*

**Fuente: Elaboración propia**

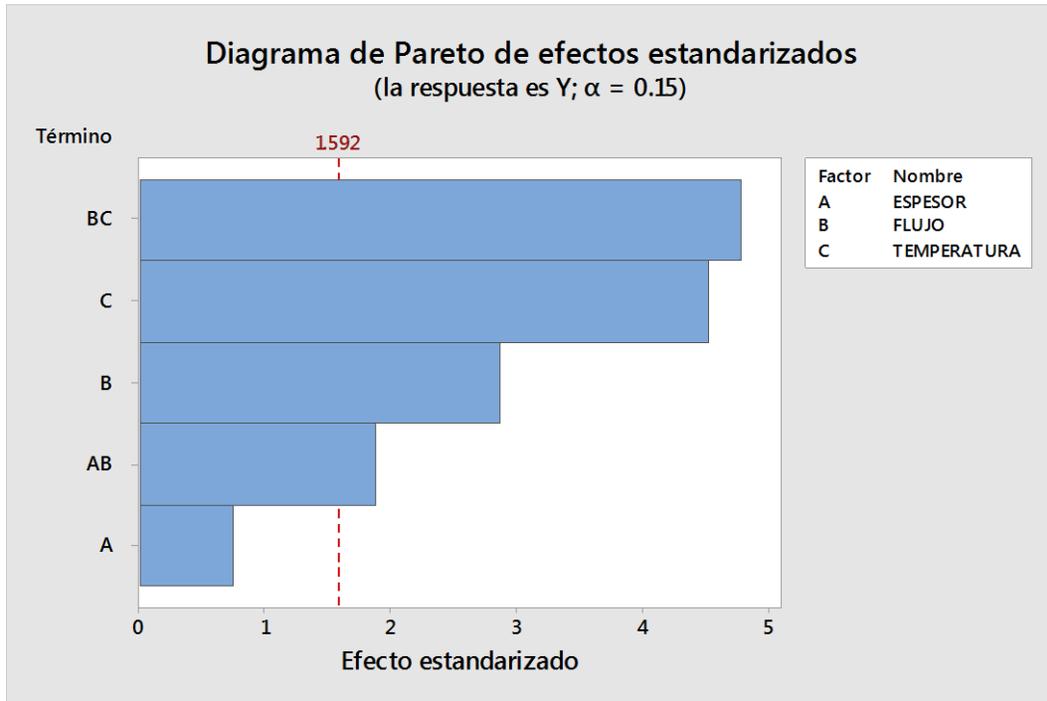
## 3. Ecuación de regresión

$$\begin{aligned}
 H(\%) = & 0.0983 - 0.0133 \text{ espesor}(2\text{mm}) - 0.0333 \text{ espesor}(4\text{mm}) + 0.0467 \text{ espesor}(6\text{mm}) + 0.0761 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) + 0.0761 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \\
 & + 0.1950 \text{ temperatura}(60^\circ\text{C}) - 0.01567 \text{ temperatura}(70^\circ\text{C}) - 0.0383 \text{ temperatura}(80^\circ\text{C}) \\
 & + 0.0992 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ espesor}(2\text{mm}) - 0.0992 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ espesor}(2\text{mm}) - 0.0278 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ espesor}(4\text{mm}) \\
 & - 0.0992 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ espesor}(4\text{mm}) - 0.0644 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ espesor}(6\text{mm}) + 0.0644 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ espesor}(6\text{mm}) \\
 & - 0.02028 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ temperatura}(60^\circ\text{C}) + 0.0322 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ temperatura}(70^\circ\text{C}) \\
 & + 0.1706 \text{ flujo} \left( 28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ temperatura}(80^\circ\text{C}) + 0.2028 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ temperatura}(60^\circ\text{C}) \\
 & - 0.0322 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ temperatura}(70^\circ\text{C}) - 0.01706 \text{ flujo} \left( 45.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ temperatura}(80^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

## 4. Análisis de gráficos estadísticos

## A. Diagrama de Pareto

**Gráfico 1**  
**Diagrama de Pareto**

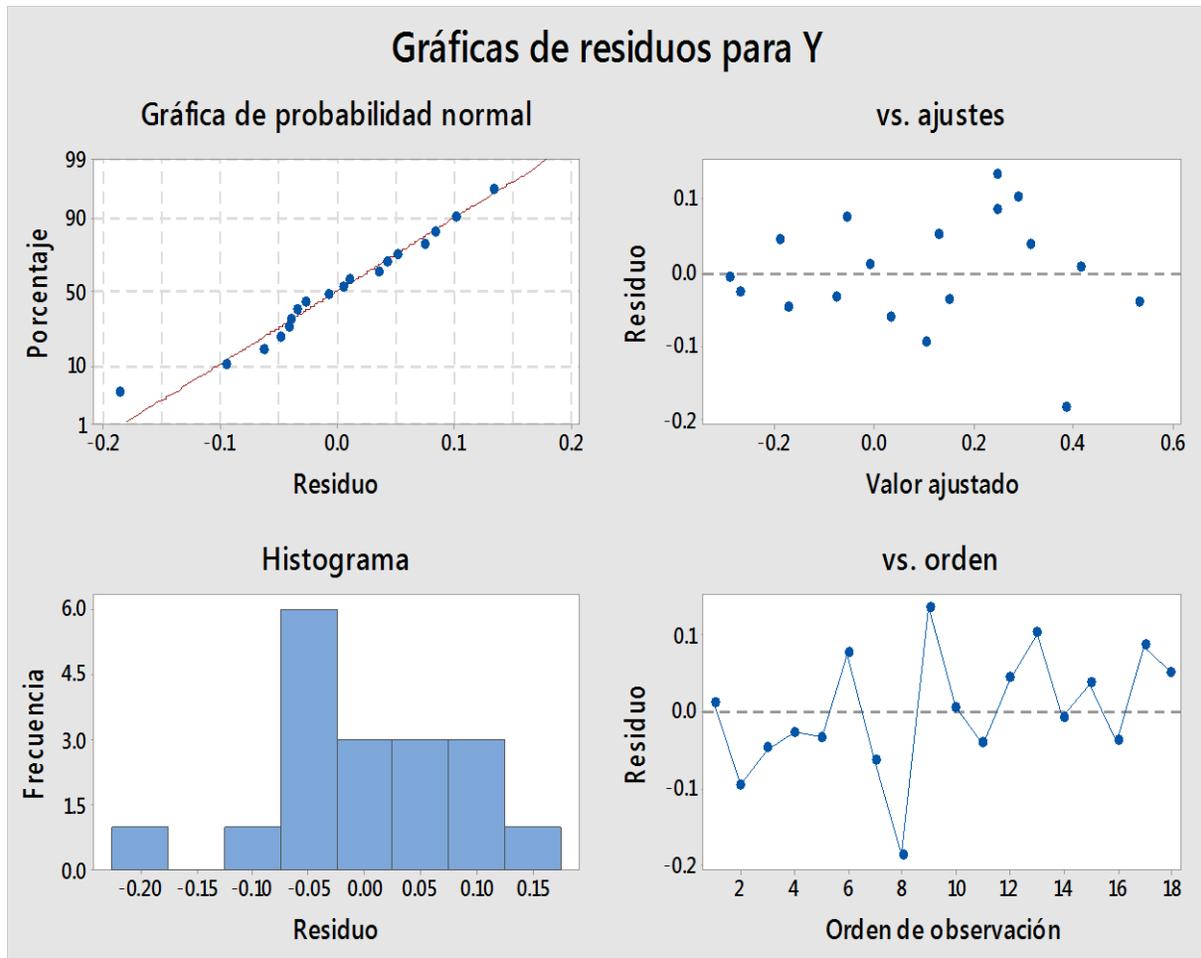


**Fuente: Elaboración propia**

El diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño. Los efectos estandarizados son estadísticos t que prueban la hipótesis nula de que el efecto es 0. El diagrama también muestra una línea de referencia para indicar cuáles efectos son estadísticamente significativos.

## B. Residuos versus Variable de respuesta Humedad.

**Gráfico 2**  
**Gráfica de Residuos**



**Fuente: Elaboración propia**

Una gráfica de residuos es una gráfica que se utiliza para examinar la bondad de ajuste en regresión y ANOVA. Examinar las gráficas de residuos le ayuda a determinar si se cumplen los supuestos de los mínimos cuadrados ordinarios.

Utilizamos el histograma de los residuos para determinar si los datos son asimétricos o si incluyen valores atípicos. Vemos que los datos tienen mayor proporción de datos hacia la derecha.

Utilizamos la gráfica de residuos vs. Ajustes para comprobar el supuesto de que los residuos tienen una varianza constante. En nuestro proceso vemos que los residuos están distribuidos aleatoriamente, no generan un patrón de incremento en varianza.

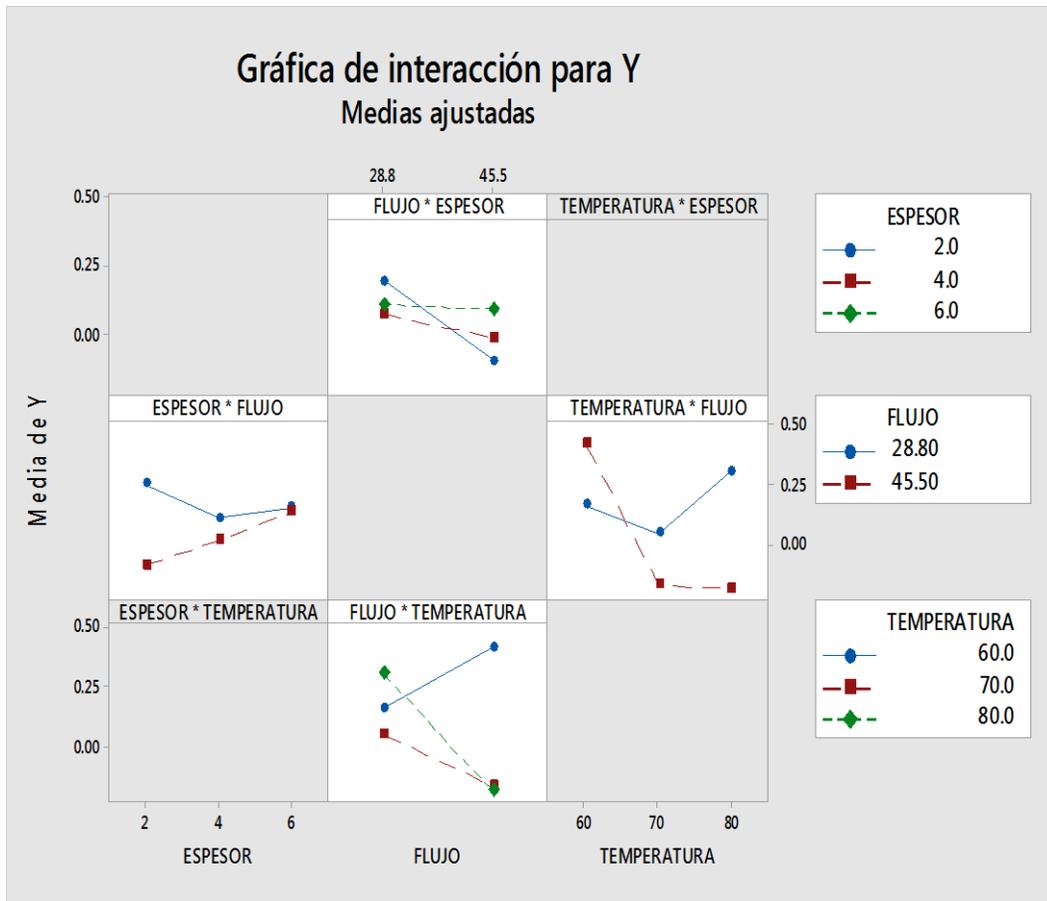
Utilizamos la gráfica de residuos vs. Orden para comprobar el supuesto de que los residuos no están correlacionados entre sí. En nuestro proceso los residuos no tienen ningún patrón de correlación, tienen una distribución aleatoria.

### **C. Interacción de los factores respecto a la humedad**

Utilizamos la Gráfica de interacción para mostrar cómo la relación entre un factor categórico y una respuesta continua depende del valor del segundo factor categórico. Esta gráfica muestra las medias de los niveles de un factor en el eje X y una línea separada para cada nivel del otro factor. Aunque podemos utilizar esta gráfica para mostrar los efectos, asegúrese de realizar la prueba de ANOVA adecuada y evaluar la significancia estadística de los efectos. Si los efectos de interacción son significativos, no puede interpretar los efectos principales sin considerar los efectos de interacción. Los gráficos NO muestran una interacción significativa entre ESPESOR x FLUJO, pero SI en FLUJO x TEMPERATURA, los mismo se muestra en el Análisis de Varianza.

### Gráfico 3

#### Gráfico de interacción de FACTORES versus la HUMEDAD



Fuente: Elaboración propia