

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**“PROCESO DE SECADO DE LA PAPA AMARILLA  
(*Solanum tuberosum*) PARA LA OBTENCIÓN DE  
PARÁMETROS ÓPTIMOS EN UN SECADOR  
ROTATORIO DISCONTINUO”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**CARHUANCHO AYUQUE EVA MILAGROS  
PALOMINO CHAUCA JOURCH VALERIANO**

**ASESORA**

**ING° TOLEDO PALOMINO MARÍA ESTELA**

**CALLAO – 2021**

**PERÚ**

## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por la señorita Bachiller **CARHUANCHO AYUQUE EVA MILAGROS** y el señor bachiller **PALOMINO CHAUCA JOURCH VALERIANO** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° CARLOS ALEJANDRO ANCIETA DEXTRE	PRESIDENTE
ING° JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ	SECRETARIO
ING° RICARDO RODRIGUEZ VILCHEZ	VOCAL
ING° MARÍA ESTELA TOLEDO PALOMINO	ASESORA

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 1 de Tesis con Ciclo de Tesis Folio N° 56 y Acta N° 55 de fecha **UNO DE SETIEMBRE DE 2019**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con la Resolución N° 245-2018-CU de fecha 30 de octubre de 2018

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de investigación lo dedicamos a Dios por encaminarnos en la realización de la tesis.

Y especialmente a nuestros padres Valeriano Palomino, Juana Chauca y Paty Ayuque por ser los pilares de nuestra formación profesional y motivación para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional del Callao por habilitarnos sus instalaciones del laboratorio de investigación de la facultad de Ingeniería Química para la realización de la tesis.

A todas las personas que de una u otra forma nos ayudaron y brindaron su cooperación, en especial a nuestra asesora Ing° María Estela Toledo Palomino, quien nos transmitió sus conocimientos permitiéndonos la determinación del objetivo y hacer de esta investigación una realidad.

Al Dr. Luis Carrasco Venegas y al Ing° Adalides Arenas por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Ing° Calixto Ipanaque Masa y al Sr. Juan Castañeda Escribano por su apoyo en las coordinaciones del V GRUPO DE TESIS CON CICLO DE TESIS y a los profesores de los tres módulos Mg. Policarpo Suero Iquiapaza, Dr. Salvador Trujillo Perez y Mg. Carlos Pereyra Leonardo, por sus enseñanzas.

# ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>10</b>
1.1. Descripción de la realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	11
1.2.1. Problema general	11
1.2.2. Problemas específicos	11
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Limitantes de la investigación	12
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1. Antecedentes	13
2.1.1. Internacional	13
2.1.2. Nacional	15
2.2. Bases teóricas	16
2.2.1. Secado	16
2.2.2. La papa	34
2.2.3. El agua	43
2.3. Conceptual	47
2.4. Definición de términos básicos	48
<b>III. HIPÓTESIS Y VARIABLES</b>	<b>50</b>
3.1. Hipótesis general e hipótesis específicas	50
3.1.1. Hipótesis general	50
3.1.2. Hipótesis específicas	50

3.2. Definición conceptual de variables	50
3.2.1. Operacionalización de variables	50
<b>IV. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>53</b>
4.1. Tipo y diseño de investigación	53
4.2. Método de investigación	53
4.3. Población y muestra	59
4.3.1. Población	59
4.3.2. Muestra	59
4.4. Lugar de estudio y periodo de desarrollo	59
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información	59
4.5.1. Materiales, reactivos y equipos	60
4.6. Análisis y procesamientos de datos	62
<b>V. RESULTADOS</b>	<b>64</b>
5.1. Resultados descriptivos	64
5.2. Resultados inferenciales	68
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos	76
<b>VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>79</b>
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	79
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	79
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>81</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>82</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>85</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Secador de aire caliente	188
Figura 2	Algunos secadores rotatorios	222
Figura 3	Clasificación de los secadores según su tipo de producción	23
Figura 4	Esquema de los mecanismos de transferencia de calor	31
Figura 5	Mecanismo de conducción	31
Figura 6	Mecanismo de convección	32
Figura 7	Planta de la papa	38
Figura 8	Tubérculo de la papa amarilla	38
Figura 9	Nutrientes de la papa	42
Figura 10	Composición química del tubérculo de la papa	42
Figura 11	Isoterma de adsorción y desorción	48
Figura 12	Relación de las variables de la investigación	51
Figura 13	Recepción de papa amarilla	54
Figura 14	Limpieza y desinfección de la papa	54
Figura 15	Cortes de la papa amarilla 3,0; 3,5 y 4,0 mm de espesor	55
Figura 16	Tubo de vidrio	55
Figura 17	Tuberías para la entrada y salida de aire caliente	56
Figura 18	Motor y controlador de velocidad	56
Figura 19	Pistola de calor	57
Figura 20	Peso en intervalos de 15 min.	58
Figura 21	Diagrama de bloques del procedimiento experimental	58
Figura 22	Papa amarilla fresca	60
Figura 23	Secador rotatorio discontinuo	61
Figura 25	Monitor y PC	61
Figura 24	Balanza analítica	61
Figura 26	Utensilios de acero inoxidable	61
Figura 27	Calibrador de vernier	62
Figura 28	Tabla plástica para cortar	62
Figura 29	Diseño experimental	64

Figura 30	Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla ... vs el tiempo a una temperatura de 50°C y un flujo de aire de 400l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm	..... 66
Figura 31	Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla .... vs el tiempo a una temperatura de 50°C y un flujo de aire de 600l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm	..... 66
Figura 32	Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla .... vs el tiempo a una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 400l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm	..... 67
Figura 33	Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla ... vs el tiempo a una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 600 l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm	..... 67
Figura 34	Gráfico de efectos principales para el tiempo de secado	71
Figura 35	Gráfico de interacción para el tiempo de secado	72
Figura 36	Gráficos de superficie para espesores de 3,0; 3,5 y 4,0 mm	73
Figura 37	Gráfico de la ventana de optimizador de respuesta	74
Figura 38	Gráficos de la determinación de parámetros óptimos de secado de la papa amarilla	..... 75
Figura 39	Producto seco a las condiciones óptimas	76
Figura 40	Gráfico de la velocidad de secado de la papa amarilla a las condiciones óptimas	..... 77
Figura 41	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T = 50°C, F = 400 L/min).	..... 95
Figura 42	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm T = 50°C, F = 600 L/min).	..... 96
Figura 43	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T = 60°C, F = 400 L/min)	..... 97
Figura 44	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T = 60°C, F = 600 L/min)	..... 98
Figura 45	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T = 50°C, F = 400 L/min)	..... 99

Figura 46	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T = 50°C, F = 600 L/min).	..... 100
Figura 47	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T = 60°C, F = 600 L/min)	..... 101
Figura 48	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T = 60°C, F = 400 L/min)	..... 102
Figura 49	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 50°C, F = 400 L/min)	..... 103
Figura 50	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 50°C, F = 600 L/min)	..... 104
Figura 51	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 60°C, F = 400 L/min)	..... 105
Figura 52	Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 60°C, F = 600 L/min)	..... 106
Figura 53	Análisis de varianza (ANOVA) para la elección del modelo matemático en el software Minitab 18	..... 114
Figura 54	Comparaciones en parejas de Tukey	115
Figura 55	Gráfico de intervalos de los modelos matemáticos 95% IC para la media	..... 116
Figura 56	Gráfico de caja de los modelos matemáticos	116
Figura 57	Gráfico de valores individuales de los modelos matemáticos	117
Figura 58	Gráficos de residuos de los modelos matemáticos	117
Figura 59	ICs Simultáneos de 95% de Tukey diferencia de las medias para los modelos matemáticos	..... 118
Figura 60	Diseño factorial de múltiples niveles.	118
Figura 61	Gráfico de superficie de espesor 3,0 mm	119
Figura 62	Gráfico de superficie para espesor de 3,5 mm	119
Figura 63	Gráfico de superficie para espesor de 4,0 mm	120
Figura 64	Optimizador de respuesta	120

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Identificación de variedades de papa	39
Tabla 2	Variedades modernas de uso en el Perú	39
Tabla 3	Composición química proximal de la papa	43
Tabla 4	Composición química proximal de la papa seca	43
Tabla 5	Contenido de agua en algunos alimentos (%)	44
Tabla 6	Actividad de agua de algunos alimentos	47
Tabla 7	Operacionalización de variables	52
Tabla 8	Corridas experimentales	57
Tabla 9	Composición química proximal de la papa amarilla	65
Tabla 10	Modelo matemáticos	68
Tabla 11	Modelo matemático de Midilli	69
Tabla 12	Comparación de R <sup>2</sup> en los diferentes modelos matemáticos	70
Tabla 13	Composición química proximal de la papa amarilla secado a las condiciones óptimas	75
Tabla 14	Velocidad de secado	77
Tabla 15	Matriz de consistencia	86
Tabla 16	Detalles de experimentos	90
Tabla 17	Datos de la figura 30	91
Tabla 18	Datos de la figura 31	92
Tabla 19	Datos de la figura 32	93
Tabla 20	Datos de la figura 33	94
Tabla 21	Modelo de newton	107
Tabla 22	Modelo de Henderson Pabis	108
Tabla 23	Modelo de Midilli	109
Tabla 24	Modelo de dos términos	110
Tabla 25	Modelo exponencial de dos términos	111
Tabla 26	Modelo de Wang Singh	112
Tabla 27	Modelo logarítmico	113

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se ha realizado un estudio para la obtención de los parámetros óptimos del proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) en un secador rotatorio discontinuo a escala de laboratorio teniendo en cuenta, en primer lugar, las características fundamentales de la papa amarilla. Las muestras de papa amarilla con cortes de 3,0 mm, 3,5 mm y 4,0 mm de espesor fueron colocadas en el secador en contacto directo empleando como medio de secado un flujo de aire caliente de 400 L/min y 600 L/min, a temperaturas de secado de 50°C y 60°C, y velocidad de rotación de 13,20 rpm. Se registró las masas de la muestra en intervalos de 15 minutos hasta conseguir un peso constante.

Del diseño experimental se determinaron 12 corridas experimentales de las cuales se realizó la gráfica de curva de secado para cada experimento y fueron ajustados mediante regresión no lineal a los modelos matemáticos de Newton, Henderson Pabis, Midilli, Dos términos, Exponencial de dos términos, Wang y Singh, y Logarítmico. Del ANOVA realizado se determinó que el modelo matemático que mejor describió a las curvas de secado fue el modelo de Midilli presentando el mayor valor de  $R^2 = 0,99976$ , y el menor valor de  $MSE = 0,00023$  y  $S = 0,0139$ . Se realizó la optimización con el software Minitab 18 mediante la herramienta DOE (optimizador de respuesta), y se determinó que la condición óptima se da a un espesor de 3mm, temperatura de 60°C y un flujo de aire de 400 L/min y con el modelo matemático obtenido se determinó que a estas condiciones el tiempo óptimo de secado es de 1,9 horas. Finalmente se comprobó mediante el análisis proximal realizado por CERPER S.A. que las propiedades físico químicas del producto final se concentran.

**Palabras clave** : secado, secador rotatorio, papa amarilla, parámetros óptimos

## ABSTRACT

In the present research work a study has been carried out to obtain the optimum parameters of the drying process of the yellow potato (*solanum tuberosum*) in a rotary dryer on a laboratory scale taking into account, firstly, the fundamental characteristics of the yellow potato. Samples of yellow potatoes with cuts of 3,0 mm, 3,5 mm and 4,0 mm thick were placed in the dryer in direct contact using as a drying medium a flow of hot air of 400 L/min and 600 L/min, at drying temperatures of 50°C and 60°C, and a rotation speed of 13,20 rpm. The sample masses were recorded in 15 minute intervals until a constant weight was achieved.

From the experimental design, 12 experimental runs were determined, of which the drying curve graph was made for each experiment and adjusted by nonlinear regression to the mathematical models of Newton, Henderson Pabis, Midilli, Two terms, Exponential of two terms, Wang and Singh, and Logarithmic. From the ANOVA, it was determined that the mathematical model that best described the drying curves was the Midilli model, presenting the highest value of  $R^2 = 0,99976$ , and the lowest value of  $MSE = 0,00023$  and  $S = 0,0139$ . Optimization was performed with the Minitab 18 software using the DOE tool (response optimizer), and it was determined that the optimum condition is given at a thickness of 3 mm, temperature of 60°C and an air flow of 400 L/min and with the model Mathematical obtained was determined that under these conditions the optimal drying time is 1,9 hours. Finally, it was verified through the proximal analysis carried out by CERPER S.A. that the physical chemical properties of the final product are concentrated.

**Keywords** : drying, rotary dryer, yellow potato, optimal parameters.

## INTRODUCCIÓN

La papa es el tercer cultivo alimenticio más importante del mundo, debido a su gran valor nutricional, cultivada por primera vez aproximadamente hace 8 000 años a.c. en los andes del sur y el altiplano del Perú y el nor oeste de Bolivia.

En nuestro país se cultivan y producen más de 3 000 de las 5 000 variedades de papa que existen en el mundo y una de la más producida es la papa amarilla.

El Perú es el líder en la producción de la papa a nivel de América Latina, logrando exportar alrededor de 500 toneladas de papa nativa al año.

Según la asociación de exportadores (ADEX) la exportación de papa y sus derivados, entre los que resaltan los snacks tradicionales y orgánicos, creció en el primer bimestre del 2019, 19,4% más que en el mismo periodo del año pasado.

Una alternativa para el acondicionamiento de la papa amarilla para su posterior exportación es realizar el proceso de secado y en este trabajo se pretende determinar los parámetros óptimos de secado de la papa amarilla, a nivel laboratorio en un secador rotatorio discontinuo.

Los resultados en el presente trabajo pueden servir como iniciativa para un estudio a escala planta piloto para evaluar la posibilidad como alternativa de acondicionamiento de la papa amarilla para su exportación en presentación de rodajas.

# **I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

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

El secado es muy importante tanto en las industrias químicas como en las industrias alimentarias. Consiste en la separación de un líquido y un sólido por evaporación o sublimación. Cuando el líquido volátil es agua suele llamarse deshidratación. Llevar a cabo esta operación es muy compleja porque implica tener en cuenta tanto el transporte de calor como el de masa que ocurre simultáneamente. Existen en la referencia bibliográfica estudios de muchos autores, pero hasta estos momentos los modelos y teorías propuestos no explican a cabalidad los diferentes fenómenos que ocurren durante las etapas del proceso.

Esto ocurre fundamentalmente en el caso de deshidratación de alimentos donde se debe tener en cuenta los contenidos de los sólidos como su comportamiento puesto que muchos de ellos se deterioran por acción del calor o simplemente por modificación de la actividad del agua. Así por ejemplo la vitamina C y algunos de los complejos B son inestables a la acción del calor y rápidamente pierden su actividad dando lugar a la falta de calidad de producto seco. De la misma manera enzimas que catalizan reacciones favorables para la calidad son inactivadas cuando los alimentos se someten a temperaturas altas.

Doymaz y Pala (2003 citado en Vega, A., et al., 2005) afirma que la conservación de los alimentos es muy importante para evitar el deterioro de estos, entre las técnicas de conservación de los alimentos el proceso de secado representa una alternativa tecnológica, al reducir el contenido de humedad se previene el crecimiento de microorganismos y se minimizan las demás reacciones de deterioro.

Por otro lado nuestro país es considerado el principal productor de papa en América Latina, produciendo más de 4,5 millones de toneladas.

A nivel mundial la producción de este insumo andino ha permitido ubicar al Perú en el puesto 11, mientras que a nivel nacional es el principal tubérculo y el sustento de todos los peruanos.

Actualmente el 16% de la producción anual de papa es nativa, se exporta alrededor de 500 toneladas en presentaciones precocidas congeladas y chips, siendo Estados Unidos, España y Alemania los principales compradores. Asimismo, se está buscando ingresar al mercado asiático, especialmente China. (Marca Perú, 2019)

Dentro de las casi 3 000 variedades de papas que tiene el Perú, tenemos a la papa amarilla una de la más usada en la gastronomía peruana y de las que más se produce.

Jarayaman y Das Gupta, (1995 citado en Vega, A., et al., 2005) El secado de los alimentos reduce su volumen y peso lo que ayuda en una reducción importante de los costos de empaque, almacenamiento y transporte. Los productos secos además permiten ser almacenados a temperatura ambiente por largos períodos de tiempo.

Por ello nos vemos en la necesidad de controlar el alto contenido de humedad, eliminando parcial o totalmente la humedad de la papa amarilla (*solanum tuberosum*), en un secador rotatorio discontinuo facilitando un secado uniforme del producto, en consecuencia en esta investigación proponemos realizar el proceso de secado de la papa amarilla para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo.

## **1.2. Formulación del problema**

Por todo lo expuesto los problemas que debe afrontar el presente estudio son :

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo debe ser el proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- 1) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla (*solanum tuberosum*)?
- 2) ¿Cuáles son los parámetros óptimos para el proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) en un secador rotatorio discontinuo?

### **1.3. Objetivos**

Los objetivos que se pretenden alcanzar al realizar el presente estudio son

#### **1.3.1. Objetivo general**

Definir el proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- 1) Identificar las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla (*solanum tuberosum*)
- 2) Definir los parámetros óptimos para el proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*)

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

- a) **Teórico.**- En el presente trabajo de investigación se tiene como limitante la recolección de información respecto a las condiciones y técnicas o metodologías de secado de papa amarilla oriunda del Perú.
- b) **Temporal.**- En el presente trabajo de investigación se tiene como limitante el lidiar con la autorización para poder llevar a cabo las corridas experimentales ya que se tuvo que realizar varias corridas.
- c) **Espacial.**- El presente trabajo de investigación se encuentra limitado por el uso de las instalaciones del laboratorio de investigación de la Universidad Nacional del Callao.

## II MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Internacional

López, A. et al. (1993) en su trabajo de investigación “**Modelización de la cinética de secado de patata cortada en láminas**” su objetivo fue determinar los valores constantes de difusividad y la energía de activación de la difusión para obtener el modelo de la cinética de secado de la patata. Para la realización de los experimentos de secado en capa fina utilizaron patata de la variedad bintje producida en el norte de España cortadas en láminas de 2,5 mm de espesor, temperaturas de aire de 60°C, 70°C, 80°C y 85°C y velocidades de aire de 0.5, 1 y 1,5 m/s, utilizaron una carga del lecho de secado de 25 Kg/m<sup>2</sup>, que equivale a unos 5 – 8 cm de espesor de lecho. El contenido de humedad del producto seco lo determinaron en una estufa a vacío en muestras de 20 g a temperatura de 70°C y una presión inferior a 1 000 mmHg De los resultados apreciaron dos periodos uno de velocidad de secado constante y otro de velocidad de secado decreciente, obtuvieron una relación entre el caudal másico de aire de secado y el coeficiente de trasmisión de calor por convección para el primer periodo y para el segundo periodo utilizaron la segunda ley de Fick para obtener los valores de la difusividad obteniéndose un valor de difusividad de 8,25 KJ/Kmol y la energía de activación de la difusión 1,21 x 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s Concluyeron que la influencia de la temperatura es más importante y significativo que la influencia de la velocidad del aire de secado.

Montes, E. et al. (2008) en su trabajo de investigación “**Modelado de la cinética de secado de ñame (discorea rotundata) en capa delgada**”, su objetivo fue evaluar el efecto de la temperatura, variedad y geometría en el tiempo de secado, desarrollaron un arreglo factorial con tres factores: temperatura 45°C, 55°C y 70°C, geometría en forma de rodajas y láminas y 2 variedades, realizaron tres repeticiones por tratamiento utilizado. Obtuvieron como resultado que para una temperatura de 70°C el tiempo de secado disminuyó en 28,15% Con los resultados obtenidos fueron construidas las curvas de secado y fueron ajustadas a diferentes modelos matemáticos.

Concluyeron que el modelo logarítmico es el que mejor describe el proceso de secado por presentar un coeficiente de determinación  $R^2 \geq 99,17$  y un error medio estimado  $SE \leq 0,0299$

Roquel, M. (2008) en su trabajo de tesis titulada “**Diseño de una línea de producción para la elaboración de harina de camote**” su objetivo fue evaluar el desarrollo de una producción de harina de camote para panificación a nivel de laboratorio. En ella nos indica que para la obtención de la harina se obtuvo por tres figuras distintas de corte que son cuadritos, rodajas y julianas, de estas figuras realizó curvas de secado tomando tiempos de 15 min en cada peso hasta llegar a un peso contante de las muestras, refiriéndose a la forma que es conveniente siendo esta la de rebanadas, Para la evaluación de los valores nutricionales realiza una serie de análisis referente al químico proximal, llegando a concluir que es factible la obtención de harina de camote.

Bonilla, S. (2013) en su trabajo de tesis “**Harina de papa soloma (solanum tuberosum) para utilizarla en panificación**”, tuvo como objetivo elaborar una harina de papa de la variedad soloma (solanum tuberosum l), la cual pasó por un proceso de lavado y pelado manual que posteriormente hizo una inmersión en bisulfito de sodio a 1%, durante 10 min; con el objetivo de evitar el pardeamiento enzimático que puede provocar el secado y deshidratado de la papa. Posteriormente la papa fue cortada en rodajas y secada en un deshidratador. Concluyendo que la elaboración de harina de papa es un producto no existente, pero que aportaría a la industria alimentaria un gran beneficio como sustituto parcial de la harina de trigo que es utilizada en panadería.

Chamorro, D. (2012) en su trabajo de tesis titulado “**Construcción de una máquina secadora de pellets de balanceado**”, tuvo como objetivo realizar el diseño mecánico del secador para posteriormente implementar los elementos de control: tanto sensores y actuadores. Para la construcción de la máquina se consideró como variable la humedad en base seca, capacidad promedio, humedad de entrada de pellet, humedad de salida del pellet, temperatura máxima del aire de secado, densidad del aire, capacidad calórica del aire, temperatura de bulbo húmedo. Teniendo como resultado que al tener

un control automático de la máquina secadora, se logra reducir la humedad al 12% que es el valor aceptable para el almacenamiento adecuado mejorando la calidad del producto.

Salcedo, J. et al. (2016) en su trabajo de investigación **“Modelado de la cinética de secado del afrecho de yuca (Manihot esculenta Crantz)”** cuyo objetivo fue determinar el modelo que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado del afrecho de yuca, para lo cual evaluaron el efecto de la temperatura y la velocidad del aire sobre la velocidad del secado del afrecho de yuca, ajustándose a modelos matemáticos que describan la cinética de secado. Además, se determinó el coeficiente de difusividad efectiva para las condiciones del proceso. Los resultados mostraron un efecto significativo de la temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado, el menor tiempo de secado fue de 11 h para las condiciones de 50°C y 3,4 m/s, lográndose una reducción del 88% de la humedad inicial en el afrecho de yuca hasta un valor final de 10% Concluyeron que el modelo que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado del afrecho de yuca fue el modelo de Wang y Singh con un R<sup>2</sup> entre 0,9996 – 0,9955 y valor de los residuos MAE < 0,0213 y RMSE < 0,0006 El coeficiente de difusividad efectiva presento valores entre  $2,5438 \times 10^{-11}$  y  $1,5027 \times 10^{-10}$  que se encuentra dentro del intervalo general para productos agrícolas.

### **2.1.2. Nacional**

Carranza, A. (2010) en un proyecto de investigación titulada “Implementación de una planta para la elaboración de puré de papa amarilla tumbay deshidratada con agregados” en la cual tuvo como objetivo principal la creación de una empresa de viabilidad técnica y financiera sostenible, hace referencia de la utilización de la harina de papa sin señalar los métodos de secado o la forma de obtención de la harina, finalmente concluye que dicha planta resultaría ser técnica y económicamente viable.

Alonso, J. et al., (2014) en una investigación titulada “Producción de harina de papa para puré instantáneo”, cuyo objetivo fue determinar un proceso adecuado para producir harina de papa y realizar pruebas de humedad a la harina obtenida. Para determinar la cantidad de humedad utilizaron el método

de secado en termo balanza (Kirk et al., 1996) en un termo balanza sartorius, MA 150, las papas se cortaron en cuatro cuadrantes extrayendo tejido vegetal de cada uno de ellas. Los cortes no excedieron de 0,15 mm a 0,25 mm de grosor y de 1 a 15 mm. Concluyeron que las papas nacionales que se estudiaron superan el contenido de humedad que estipula la FAO para la elaboración de harina, con un 8% a 11% más de agua en comparación a la referencia.

Osorio, C., Segura, C. (2018) en su trabajo de tesis “Proceso de secado de arracacha (arracacia xanthorrhiza) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo” su objetivo fue desarrollar el proceso de secado de arracacha para la obtención de parámetros en un secador rotatorio discontinuo. Tomaron muestras con espesores de 1,5, 2 y 5 mm evaluaron el efecto de la T (55°C, 65°C y 75°C) y flujo del aire (480 y 750 L/min). Sus resultados indicaron que, a un espesor de 1,5 mm, T de 65°C y flujo de aire de 480 L/min, el tiempo de secado fue de 45,5 min. Concluyendo que se desarrolló el proceso de secado de la arracacha (arracacia xanthorrhiza) en un secador rotatorio discontinuo, permitiéndose realizar pruebas de secado a diferentes temperaturas llevando un control automático en la temperatura de secado.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Secado**

Consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptable mediante el aporte de calor. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones. Es necesario conocer el proceso de secado para así determinar las condiciones óptimas del secado. (Chamorro, 2012)

En la mayoría de las aplicaciones industriales del secado no es necesario ni resulta económicamente factible, eliminar todo vestigio de humedad; el sólido seco generalmente contiene una cierta cantidad de humedad, cuyo contenido está condicionado a la calidad del producto y a factores económicos. Así por ejemplo, la sal común contiene 0,5%, el carbón

contiene 4,0%, el almidón de maíz contiene 9,0%, el arseniato de plomo contiene 4,0% y en general los alimentos contienen 5,0% (Ángeles, 2006)

Ángeles (2006) en su trabajo de investigación afirma que el secado es muy importante, las razones pueden ser :

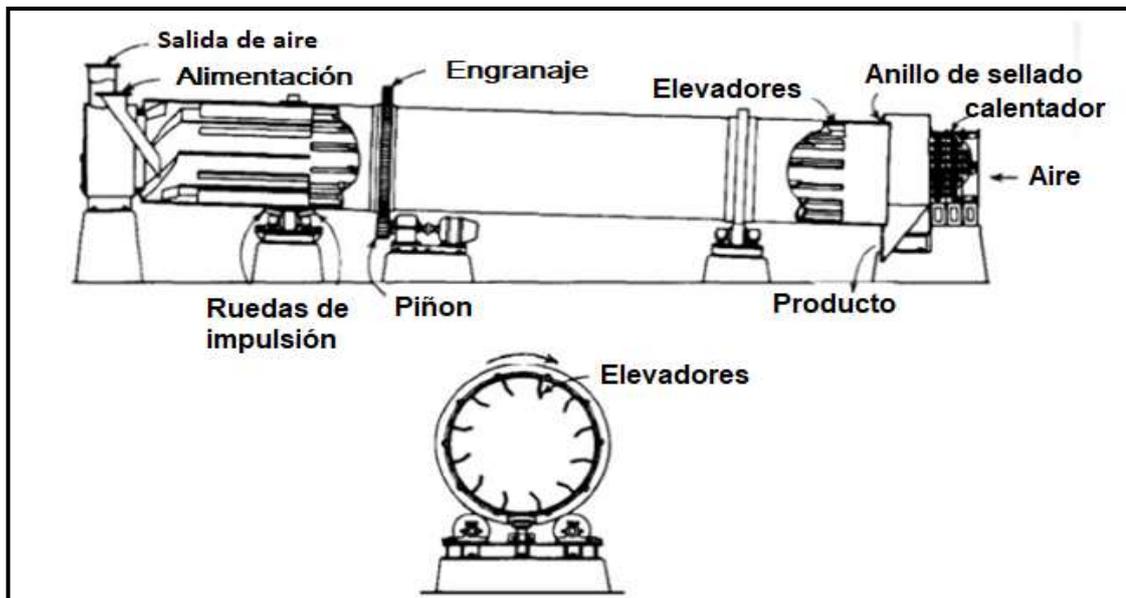
- a) En muchos casos, el objetivo es extraer un líquido de un sólido, sea para facilitar el manejo de éste en otra operación o por ser inconveniente la humedad en alguna operación subsiguiente de elaboración.
- b) Otra de las razones puede ser que el producto final debe estar seco para que pueda ser utilizado, como sucede con los pigmentos, el rayón, el azúcar etc.
- c) Otras veces es necesario el secado para eliminar costos de transporte, para asegurar la conservación de un producto durante su almacenamiento o transporte, o para aumentar la capacidad de otros equipos en un proceso de fabricación.
- d) **Clasificación de los equipos de secado.**- Se puede ver que existen diferentes métodos de secado, es importante observar que hay variaciones en cada método, que se encuentra al estudiar uno en particular. A continuación, se clasifica a los secadores según su tipo de producción (**Ver Figura 3 pág. N° 24**)

En nuestro caso nos encargaremos de estudiar más afondo los secadores rotatorios, siendo este tipo planteado a estudiar.

- 1) **Secadores rotatorios.**- Para Treybal (1997) los secadores rotatorios forman un grupo muy importante de secadores; son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperlos. En la **Figura 1 (Ver pag. N° 19)** se muestra uno de estos secadores, un secador de aire caliente directo a contracorriente. 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.

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 o tendería a apelsonarse. En estos casos, la recirculación de una parte del producto seco puede permitir el uso de un secador rotatorio. (Treybal, 1997)



*Figura 1* Secador de aire caliente de Ruggles – Coles XW, fabricado por Hardinge Co. Inc., Treybal 1997

Según Treybal (1997) el secador puede alimentarse con gas de combustible caliente y no con aire; además, si el gas sale del secador a una temperatura lo suficientemente alta, al ser descargado a través de un montón de aire puede proporcionar una corriente de aire natural adecuada que proporcione el gas suficiente para el secado. Sin embargo, de ordinario, se utiliza un ventilador de extracción para jalar

el gas a través del secador, porque así se obtiene un control más completo del flujo de gas. Se puede interponer un recolector de polvo, del tipo de ciclón, filtro o de lavado entre el ventilador y el gas saliente. También puede ponerse un ventilador de empuje en la entrada del gas; de esta forma se mantiene una presión cercana a la atmosférica en el secador; éste previene la fuga de aire frío en los extremos de almacenamiento del secador; si la presión está bien balanceada, la fuga hacia el exterior también puede reducirse al mínimo.

Los secadores rotatorios se fabrican para diversas operaciones. La clasificación siguiente incluye los tipos principales.

- **Secador directo, flujo a contracorriente.**- Para Treybal (1997) los materiales que pueden calentarse a temperaturas elevadas, como minerales, arena, piedra caliza, arcillas, etc., se puede utilizar un gas de combustible como gas de secado. Para sustancias que no pueden calentarse excesivamente, como ciertos productos químicos cristalinos como sulfato de amonio y azúcar de caña, se puede utilizar aire caliente. El arreglo general es el que se muestra en la **Figura 2 (Ver pag. Nº 24)**; si se utiliza gas de combustible, las espirales de calentamiento se reemplazan por una caldera que está quemando gas, aceite o carbón.
- **Secador directo, flujo a corriente paralela.**- Los sólidos que pueden secarse con un gas de combustible sin miedo de contaminarlos, pero que no deben calentarse a temperaturas muy elevadas por temor a dañarlos (como yeso, piritas de fierro, y materiales orgánicos como la turba y la alfalfa), deben secarse en un secador con flujo a corriente paralela. La construcción general es muy similar a la **Figura 2 (Ver pag. Nº 23)**, excepto en que el gas y el sólido entran por el mismo extremo del secador. (Treybal, 1997)
- **Secador indirecto, flujo a contracorriente.**- Para sólidos como pigmentos blancos y similares, que pueden calentarse a temperaturas elevadas pero que nunca deben entrar en contacto

con el gas, puede utilizarse el secador indirecto que se muestra en forma esquemática en la **Figura 2a (Ver pag. Nº 23)** Como una construcción alternativa, el secado puede encerrarse en una estructura de ladrillo y rodearse completamente con los gases calientes de combustible. El flujo de aire en un secador de este tipo debe ser mínimo, puesto que el calor se proporciona por conducción a través de la estructura o tubería central; además, de esta manera pueden manejarse los sólidos muy finamente divididos que tienden a formar polvo. Para los sólidos que no se deben calentar a temperaturas elevadas y para los cuales es deseable el calor indirecto, como el alimento para ganado, granos para cerveza, plumas y similares, se puede utilizar el secador de tubería con vapor que se muestra en la **Figura 2b (Ver pag. Nº 23)** El secador puede tener o no elevadores y puede construirse con una, dos o más hileras concéntricas de tubos calentados con vapor. Como los tubos giran con el secador, es necesaria una junta giratoria especial en donde se introduce el vapor y se separa el condensado. Con frecuencia se utiliza este tipo de secador cuando se necesita la recuperación del líquido evaporado. (Treybal, 1997)

- **Directo – indirecto.**- Según Treybal (1997) estos secadores son más económicos de manejar que los secadores directos, pueden utilizarse para sólidos que pueden secarse a altas temperaturas mediante un gas de combustible, en especial cuando los costos de combustible son altos y cuando se deben eliminar elevados porcentajes de humedad del sólido. En la **Figura 2c (Ver pag. Nº 23)** se muestra un arreglo típico. En un secador de este tipo, el gas caliente puede entrar al tubo central a 650°C a 980°C (1 200°F a 1 800°F), ser enfriado hasta 200°C a 480°C (400°F a 900°F), cuando pase por vez primera por el secador y ser regresado a través del espacio de secado anular para que se enfríe más aún hasta 60°C a 70°C (140°F a 170°F) durante la descarga. La lignita, carbón y coque pueden secarse en atmósfera inerte en este secador a

temperaturas relativamente altas sin peligro de que se quemen o de provocar una explosión de polvos.

- e) Método de fijación y naturaleza de la humedad.**- Para Kneule (1982) La humedad contenida en los cuerpos sólidos o líquidos se presenta en forma de líquido puro (en la mayoría de los casos agua) o en forma de una solución en la que el agua constituye por lo general el disolvente. Se trata entonces de una solución capaz de cristalizar o de una solución coloidal. Según la naturaleza de la unión entre la humedad y la materia seca, se distingue el líquido adherente, el líquido capilar y el líquido de hinchado. A menudo también la humedad puede presentarse como agua químicamente combinada, cuya separación no puede siempre considerarse como un problema de secado.

El líquido adherente se presenta en forma de una película unida a los fragmentos gruesos de la superficie exterior de la materia, existiendo por todas partes un contacto libre entre la superficie húmeda y el agente secador. En el fenómeno de secado, el detalle característico será que la tensión de vapor del líquido adherente corresponderá para cada temperatura a su valor de saturación.

Se designa como líquido capilar el que queda retenido en los intersticios de una materia porosa y que, en el momento del secado, se desplaza hacia la superficie bajo la acción de fuerzas capilares. En las materias de poros gruesos, el líquido capilar, como el líquido adherente, conserva una tensión de vapor en relación a la temperatura del producto. En las materias de poros finos, el diámetro capilar es muy reducido (inferior a  $10^{-7}$ m), la tensión de vapor es sensiblemente menor y desciende aún más en el transcurso del secado, porque el líquido queda retenido en los capilares más finos. Con la denominación de líquido de hinchado entendemos toda clase de humedad que provoca en su cuerpo un hinchamiento o aumento de volumen.

f) **Equilibrio en el secado.**- El grado de presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido húmedo o en una solución líquida depende de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura. Por tanto, si un sólido húmedo se expone a una corriente continua de gas fresco que contiene una presión parcial dada del vapor “p”, el sólido o bien perderá humedad por evaporación o ganará humedad del gas, hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a “p”. (Treybal, 1997)

Por lo tanto, el sólido y el gas están en equilibrio, y el contenido de humedad del sólido se conoce como su contenido de humedad en el equilibrio en condiciones predominantes.

Los sólidos que son solubles en el líquido de que se trate, generalmente muestran contenidos insignificantes de humedad en el equilibrio, cuando se exponen a gases cuya presión parcial de vapor es menor que la de la solución saturada del sólido.

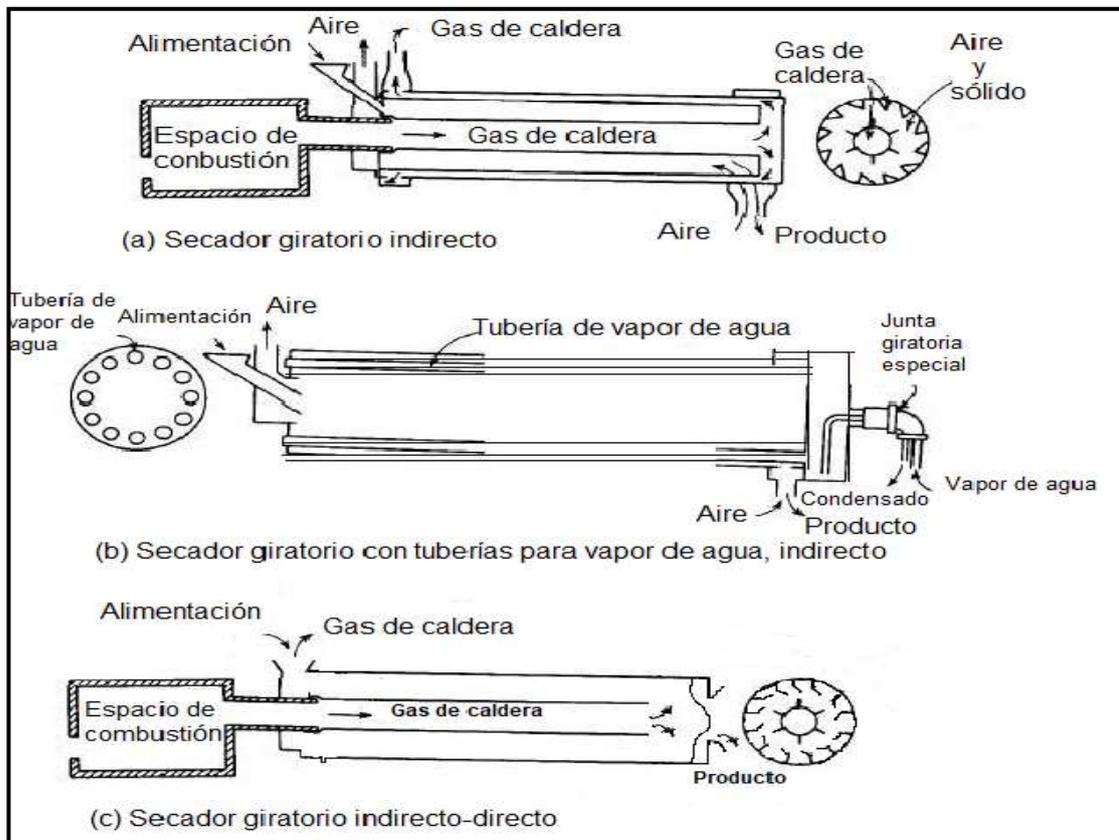


Figura 2 Algunos secadores rotatorios (esquemático)  
Treybal, 1997

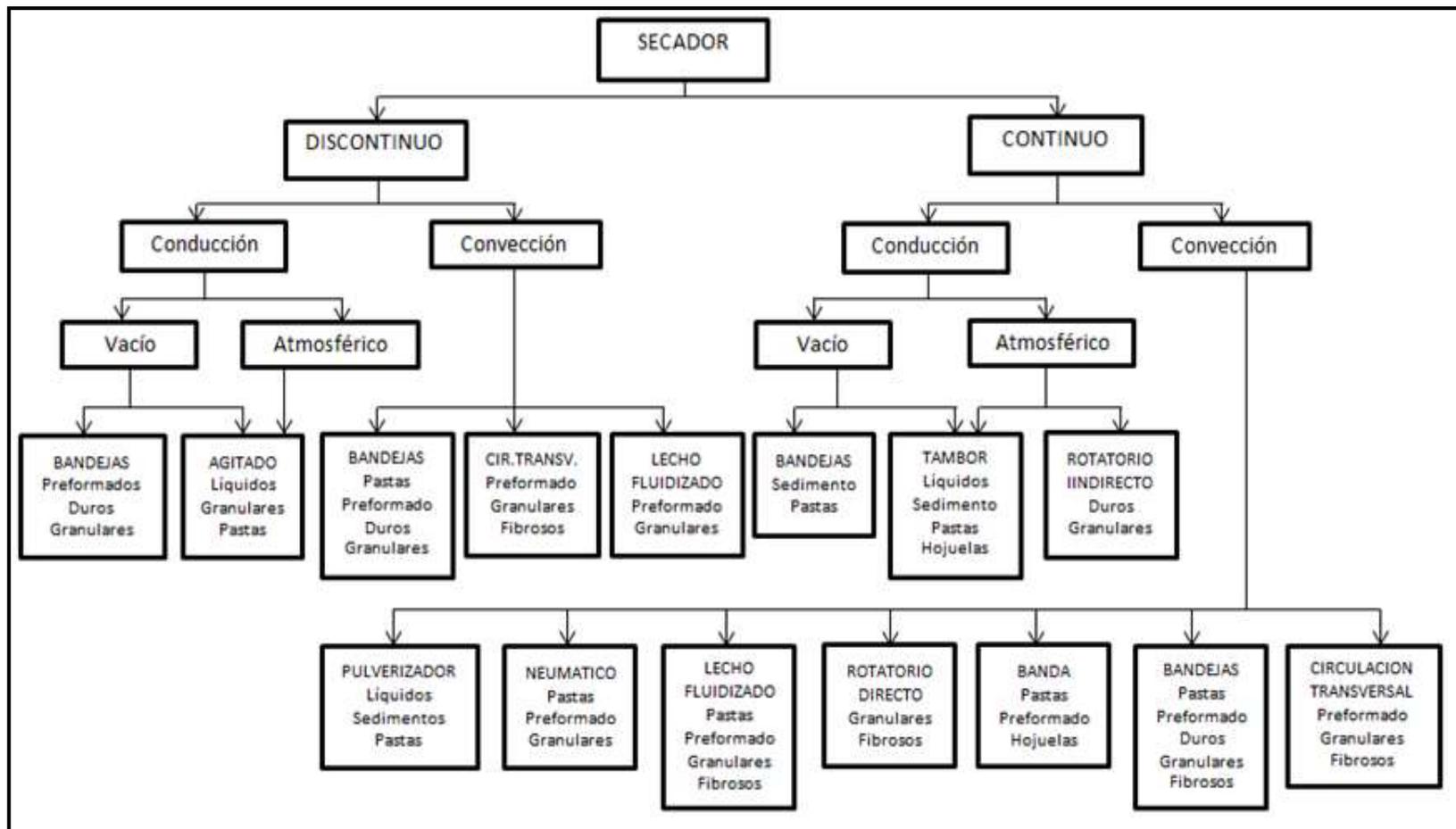


Figura 3 Clasificación de los secadores según su tipo de producción  
Nonhebel G el secado de sólidos en la industria química.

**g) Mecanismos del proceso de secado.**- La migración de humedad toma parte en fase líquida y gaseosa y se distinguen los siguientes mecanismos de transporte :

- 1) Transporte por difusión líquida.**- En este tipo de transporte de humedad se asume que la velocidad de transferencia de la humedad líquida es proporcional al gradiente de la concentración de humedad dentro del material.
- 2) Transporte por difusión de vapor.**- Este es el principal mecanismo de transferencia de humedad por vapor del material. Toma lugar cuando la dimensión característica de los espacios del aire libre son mayores a  $10^{-7}$ m
- 3) Transporte por efusión (o difusión tipo Knudsen).**- Toma lugar cuando la dimensión característica del espacio del aire en un material capilar o poroso es menor a  $10^{-7}$ m
- 4) Transporte por termodifusión.**- La cual es la transferencia de humedad debida al cambio de temperatura en una dirección tomando en cuenta el coeficiente de termodifusión.
- 5) Transporte por fuerzas capilares.**- Si el número de capilaridades con varios radios forman canales inter conectados entonces se crea una diferencia en presión capilar la cual da como resultado una redistribución de la humedad de los capilares grandes a los pequeños por succión capilar.
- 6) Transporte por presión ósmica.**- La presión ósmica es una función del contenido de humedad en el material.
- 7) Transporte debido al gradiente de presión.**- Este tipo de transporte se debe a que ciertas presiones internas varían debido a que la humedad se evapora, cambia de lugar o ha sido transportada. La humedad debe de compensar el cambio de presión y se genera el transporte.

Existen otros tipos de transporte que a su vez se entrelazan un ejemplo es el transporte debido a la gravedad, presión interna, encogimiento o presión externa. (Dávila, 2004)

Para Anikumar y Mujumdar (1987) existen dos métodos para remover la humedad :

- **Evaporación.**- Esta ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del solido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición.
- Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre puede ser disminuida bajando la presión (evaporación al vacío). Si la presión disminuye y baja más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el producto es congelado.
- **Vaporización.**- El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión de vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

**h) Transferencia de masa del proceso de secado :**

- 1) Definición de difusividad y su variación a lo largo del secado.**- La difusión molecular es la transferencia de masa provocada por el movimiento libre de las moléculas. En gases y líquidos la transferencia de masas también resulta del movimiento del volumen de los fluidos.

En sistemas binarios (A, B), la proporción de masa transferida de un componente A por unidad de área superficial y tiempo (flux,  $J_A$ ) se define por la primera ley de Fick :

$$J_A = -\frac{D_{AB}dC_A}{dz}$$

Donde  $C_A$  es la concentración del componente A,  $z$  es la difusión y  $D_{AB}$  es la difusividad o coeficiente de difusión relativo al componente B. La concentración se expresa en  $\text{Kmol/m}^3$  o  $\text{Kg/m}^3$  y los

correspondientes fluxes en  $\text{Kmol}/(\text{m}^2\text{s})$  o  $\text{Kg}/(\text{m}^2\text{s})$  La difusividad tiene unidades de  $\text{m}^2/\text{s}$

La difusividad es una propiedad física del sistema (sustancias y materiales difusantes) La difusión en gases se puede abordar en términos de la teoría cinética, en cambio la difusión de sólidos requiere un tratamiento empírico.

A partir de modelos matemáticos de secado de frutas surgen naturalmente parámetros que influyen en el proceso, tales como el coeficiente externo de transferencia de materia  $K_m$  ( $\text{m}/\text{s}$ ), la difusividad efectiva del agua en una fruta  $D_{ef}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) y el número de Biot  $Bi$  (adimensional) Uno de los más conocidos modelos de secado es el de Luikov, que está basado en la termodinámica de los procesos irreversibles. (Luikov, 1966)

En su trabajo original, Lima (1999) desarrolló modelos bidimensionales, analíticos y numéricos, para simular la difusión de agua en sólidos, los cuales fueron empleados para describir el secado del plátano. En su investigación se destaca el denominado modelo III, en el cual usa condición de contorno convectiva, fenómenos simultáneos de transferencia de humedad y disminución de volumen del fruto. En su modelo III el citado autor admitió, entre otras consideraciones, que :

El secado ocurre bajo condición de contorno convectiva, con humedad dependiente de la posición y del tiempo, en un sólido esferoidal.

El número de Biot es admitido como variable en el secado.

La disminución de volumen es linealmente proporcional a la pérdida promedio de humedad del sólido.

Según Lima (1999) el modelo III es el más realista de los analizados por él, dando resultados confiables para los parámetros de transferencia de materia porque están incluidos más efectos físicos que inciden en la cinética de secado, comparado con otros modelos del citado autor.

Por otro lado, Karim y Hawlader (2005) desarrollaron un modelo de secado de frutas, prediciendo su temperatura y humedad. Como ellos admitieron disminución de volumen, la difusividad  $D_{ef}$  resulto dependiente del contenido acuoso y de la temperatura.

La consideración común en todos ellos, es que el coeficiente de difusividad de la humedad dentro del solido es constante, a pesar de que este puede variar de manera importante en función de la temperatura de la partícula y de la cantidad de humedad.

Se puede concluir que la difusividad varia conforme cambia las condiciones de secado (temperatura y velocidad del aire), es decir no es intrínseca al material.

- 2) Difusión de agua en estado líquido y en estado de vapor.-** La difusión se da en sólidos de estructura fina y en los capilares, poros y pequeños huecos llenos con vapor. El vapor difunde hacia afuera hasta que alcanza la superficie donde alcanza la corriente global del aire. Desgraciadamente, la teoría de la difusión no tiene en cuenta el encogimiento, casos de endurecimiento o isothermas de adsorción. Siendo el coeficiente de difusión dependiente de la concentración y de la temperatura. La ley de Fick aplicada a un sistema unidimensional puede expresarse como :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

Donde  $X$  es el contenido de humedad libre,  $t$  es el tiempo,  $x$  es la dimensión espacial y  $D_{ef}$  es el coeficiente de difusión.

La solución de la ley de Fick modificada para una lámina es :

$$\Gamma = \frac{X - X_S}{X_0 - X_S} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} e^{\left(\frac{-\pi^2 h_n^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)}$$

Donde  $h_n = 2n - 1$ ,  $L$  es el espesor de la lámina,  $X$  es el contenido de humedad al tiempo  $t$ ,  $X_0$  es el contenido de humedad inicial y  $X_S$  es el contenido de humedad en la superficie.

- 3) Capilaridad.**- Según Hernández (2005) afirma que la teoría capilar se refiere al flujo de un líquido a través de los intersticios y sobre la superficie de un sólido debido a la atracción molecular entre el líquido y el sólido. Este fenómeno fue analizado primero por Buckingham, quien introdujo el concepto de potencial capilar como fuerza conductora para flujo capilar no saturado. La ecuación que describe este fenómeno es :

$$J_i = -K_H \nabla \psi$$

En la ecuación anterior, el potencial del flujo capilar  $\psi$  se considera proporcional al gradiente de concentración de humedad.

Algunos investigadores han señalado que en el secado de sólidos granulares, el flujo de humedad es determinado totalmente por fuerzas capilares por lo que es independiente de la concentración de humedad. Como se ha demostrado a través de experimentos, el flujo de humedad puede ser en la dirección del incremento de concentración, lo cual puede explicarse estableciendo que la fuerza conductora en un gradiente de tensión. El argumento es que tanto las leyes de tensión superficial y del flujo viscoso están basadas en la presión, solamente para medio homogéneos y fuerzas del cuerpo despreciables, la tensión es proporcional al contenido de humedad.

La humedad alojada en los intersticios de sólidos, así como el líquido que cubre la superficie y el agua libre en las cavidades celulares, están sujetos a movimiento por la gravedad y capilaridad mientras existan caminos o pasajes para la continuidad del flujo. En el área de secado de alimentos, la teoría de flujo capilar ha sido aceptada como uno de los mecanismos fundamentales, principalmente para la etapa de secado con alto contenido de humedad.

**4) Gradiente de presiones.-** Para Ratti y Mujumdar, (1993) el secado es uno de los métodos más antiguos para deshidratar alimentos, el cual involucra de manera simultánea la transferencia de materia y energía. En la transferencia de materia se considera como la transición física del agua del estado líquido al de vapor, en donde la transferencia de masa tiene lugar cuando existe una gradiente de concentración o de presión. De esta manera los alimentos secos se pueden almacenar durante grandes periodos de tiempo sin que se alteren.

Así porque, la transferencia de masa es primordialmente debida al gradiente total de presión establecido a causa de la rápida generación de vapor dentro del material. La mayor parte del agua es vaporizada antes de abandonar la muestra. Si la muestra esta inicialmente muy húmeda y la presión dentro de la muestra aumenta muy rápidamente, el líquido puede ser eliminado bajo la influencia de un gradiente total de presión.

A mayor humedad inicial, mayor es la influencia del gradiente de presión sobre el total de masa eliminada. De este modo, existe una especie de bombeo de líquido, forzando el líquido hacia la superficie, frecuentemente como vapor. Esto contribuye a un secado muy rápido sin la necesidad de sobrecalentar la muestra. (Fito, 2006)

La eliminación de agua en forma de vapor de la superficie del material durante el secado, depende de condiciones externas tales como: temperatura, humedad, flujo de aire, área de la superficie expuesta y presión. Estas condiciones son importantes durante las etapas iniciales de secado cuando la humedad de la superficie está siendo removida. En algunos materiales puede haber encogimiento, excesiva evaporación en la superficie, después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos gradientes de humedad del interior a la superficie.

Este fenómeno es causado por el sobre secado, encogimiento y consecuentemente las altas tensiones dentro del material, dando como resultado agrietamiento y deformación.

En el secado existe transferencia de calor hacia un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro del sólido mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie.

La evaporación produce una migración de humedad desde adentro del sólido hacia la superficie, la cual ocurre a través de uno o más mecanismos, normalmente difusión, flujo capilar, presión interna causada por el encogimiento durante el secado.

- i) Transferencia de calor del proceso de secado.-** Transferencia de calor es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. La transferencia de calor siempre se produce del sistema de temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. La transferencia de calor se detiene cuando los dos sistemas alcanzan la misma temperatura. La energía no se transfiere de un sistema de temperatura baja a otro de temperatura más alta si no se realiza trabajo. (Incropera F, 1996)

El calor se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia.

La temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia.

- 1) Transferencia de calor por conducción.-** Es un mecanismo de transferencia de calor, que se presenta a nivel molecular y por contacto de éste, donde las moléculas con mayor energía (mayor temperatura) ceden calor a los de menor energía (menor temperatura), tal como muestra la **Figura 5 (Ver pag. N° 32)** (Kreith, Black, 1990)

$$q'' = -K \frac{dT}{dx}$$

Donde :

**K** : Coeficiente de transferencia de calor por conducción en  
[W/m k]

**dt/dx** : Gradiente de temperatura en la dirección

**q"** : Flujo de calor por unidad de área [W / m<sup>2</sup>]

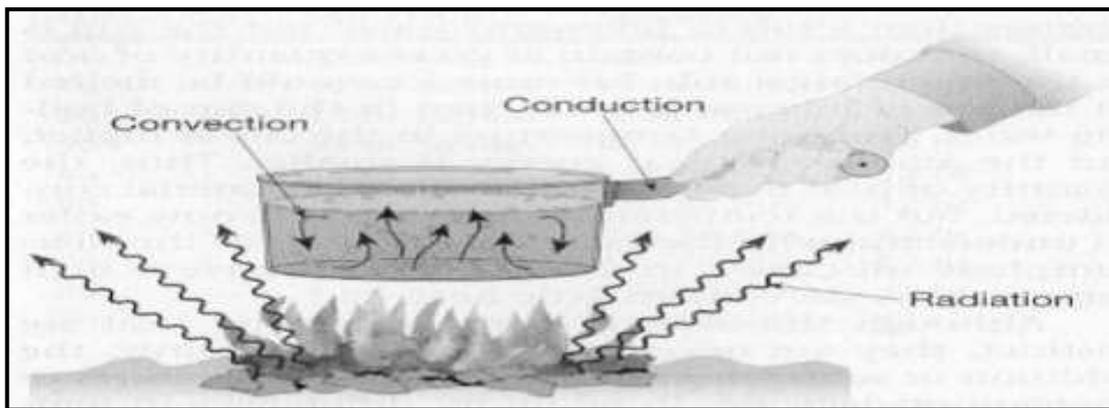


Figura 4 Esquema de los mecanismos de transferencia de calor  
Frank p. Incropera, fundamentos de transferencia de calor



Figura 5 Mecanismo de conducción, Calor y luz  
<http://www.noemi-g-noemi.blogspot.com/2010/06/5.html>.

**2) Transferencia de calor por convección.-** Es un mecanismo de transferencia de calor, que se presenta entre una superficie y un fluido en movimiento, los que se encuentran a diferentes temperaturas. (Kreith, Black, 1990)

Para Kreith, Black (1990) existen dos tipos de convección :

- **Convección natural.**- Cuando el movimiento es producido por el cambio de densidad que experimenta por las diferencias de temperaturas.
- **Convección forzada.**- Cuando el movimiento es provocado por un agente externo al sistema, lo cual provoca el movimiento del fluido. Este mecanismo se muestra en la **Figura 6**

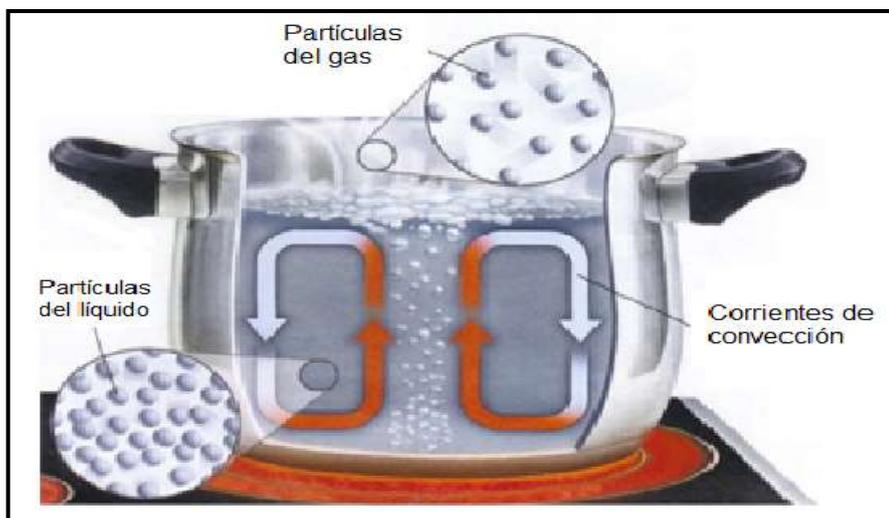
$$q'' = hc(T_s - T_\infty)$$

Donde :

**hc** : Coeficiente convectivo  $\frac{W}{m^2K}$

**T<sub>s</sub>** : Temperatura superficial [°C]

**T<sub>∞</sub>** : Temperatura media del fluido [°C]



*Figura 6.* Mecanismo de convección Calor y luz  
<http://www.noemi-g-noemi.blogspot.com/2010/06/5.html>.

- 3) Transferencia de calor por radiación.**- Cualquier cuerpo que tenga temperatura emite calor, es decir es la temperatura emitida por la materia que se encuentra a una temperatura infinita.

La ecuación que gobierna este mecanismo es :

$$q'' = \epsilon E_b(T_s^*) - \beta \sigma(T_s^{*4} - T_{\text{alr}}^{*4})$$

Donde :

$q''$  : Flujo de calor por unidad de área  $\frac{W}{m^2}$

$\epsilon$  : Emisividad [Adimensional]

$\beta$  : Absortividad [Adimensional]

$\sigma$  : Constante de Stefan Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}$

$E_b$  : Potencia emisiva superficial  $\frac{W}{m^2}$

$T_s^*$  : Irradiación  $\frac{W}{m^2}$

$T_s^{*4}$  : Temperatura de la superficie [K]

$T_{\text{alr}}^{*4}$  : Temperatura de los alrededores [K]

- j) Importancia del secado en general.**- La importancia del secado de los productos radica en que algunos productos que en la mayoría son agrícolas, preserven y mejoren sus propiedades, dándoles mayor valor si éstos son para la exportación, o también mejorando la prolongación del tiempo de almacenamiento que necesitan, y reduciendo las pérdidas durante el mismo. (Chamorro, 2012)

El proceso de secado se lleva a cabo desde hace miles de años. El propósito del secado, en el caso de los alimentos, es el de preservarlos de la manera más natural posible. El secado conlleva a la deshidratación en los alimentos, los cuales al no tener un contenido de humedad significativo inhibe el crecimiento bacteriano. Los alimentos deshidratados adecuadamente pueden durar meses sin que sea necesario su almacenamiento refrigerado.

Los diferentes tratamientos de los productos son importantes, así como es el secado que es un tema de gran importancia, éste se realiza en alimentos, plantas, granos, etc., para evitar la descomposición por enzimas o fermentos, disminuir el volumen, poder realizar el almacenamiento, facilitar el transporte, como parte de un proceso de producción, para lograr

homogeneidad de un producto, impide el desarrollo de microorganismos y reacciones de oxidación y de hidrólisis.

En la cadena de transformación y conservación de productos el secado ocupa un lugar importante porque se realiza sobre un gran número de productos. El objetivo de secar los productos es conseguir un producto en las condiciones óptimas de estabilidad, y mejorar sus propiedades nutricionales y organolépticas.

### **2.2.2. La papa**

En el mundo existen 5 000 variedades de papa, en Perú se encuentran alrededor de 3 000 La papa uno de los aportes del Perú al mundo, es hoy en día un producto que por su versatilidad se encuentra en las recetas de las más variadas cocinas a nivel mundial. Es el tercer cultivo alimenticio más importante del mundo en términos de consumo humano después del arroz y del trigo. Ha sido cultivada desde hace 8 000 años en América del Sur y era alimento importante de los Incas quienes desarrollaron técnicas avanzadas para almacenarlas. Además, tiene una amplia gama de aplicaciones tanto industriales como domésticas, se guisa, se sancocha, se asa, se saltea, se fríe. Interviene en purés, en cremas, suflés, croquetas y tortillas. (Deleite, 2013)

**a) Derivados.-** La papa se utiliza para una variedad de propósitos. Se producen almidones y harinas. El almidón de papa es extraído comercialmente en EUA y en Europa, siendo Holanda el productor más importante de ese continente. En los EUA, cada vez es más común que la producción de almidón sea aprovechada como subproducto del procesamiento de papas fritas y es usado especialmente para engomado de tejidos y papel fino por su alta viscosidad. (Deleite, 2013)

De hecho, es probable que menos del 50% de las papas sembradas se consumen frescas el resto se transforma en productos o ingredientes alimenticios de papa.

En Perú es muy tradicional cocerla, pelarla y secarla para su venta en los mercados internos. En la Sierra del Perú también se la convierte en chuño para lo cual se tiende en el campo para ser transformada por la helada por las noches dando como resultado una papa grisácea y de un

sabor totalmente alterado que sirve para acompañar los platos en el centro y sur.

En el Norte del país procesan otro tipo de chuño, escarbando un pozo de al menos un metro de profundidad en un terreno muy húmedo o pantanoso, introducen la papa y tapan el pozo con los trozos de terreno extraídos y luego al cabo de un mes aproximadamente extraen el chuño el cual emana un fuerte olor. (Deleite, 2013)

La papa en estos tiempos se acompaña en una infinidad de platos y se sirve en diversas formas, como pan, mazamorra, purés, papas, fritas, etc.

- b) Origen.-** Según Engel, F. (1970 citado por Moltaldo, A. 1984), la papa era conocida en América desde hace 10 500 años, su domesticación y cultivo han ocurrido en fecha posterior. Lo cierto es que en este continente surgieron dos pueblos cuya alimentación básica fue la papa.

Según Acosta, J. (1940 citado por Moltaldo, A. 1984) Los collas que habitaban los altiplanos junto al lago Titicaca cultura Tiahuanaco y los araucanos, que vivían al sur del río Bio, Chile (Medina, J.T., 1952). Este último pueblo no tuvo una evolución cultural comparable a los de los primeros. Junto al cultivo de la papa surgió en Perú la primera agroindustria americana: la fabricación de la papa seca o chuño, que es una manera de conservar el tubérculo, aun en uso en esas regiones.

- c) Historia.-** Comienza hace unos 8 000 años, cerca del lago Titicaca, que está a 3 800 metros sobre el nivel del mar, en la cordillera de los Andes, América del Sur, en la frontera de Bolivia y Perú. Ahí, según revela la investigación, las comunidades de cazadores y recolectores que habían poblado el sur del continente por lo menos unos 7.000 años antes, comenzaron a domesticar las plantas silvestres de la papa que se daban en abundancia en los alrededores del lago. (FAO, 2008)

En el continente americano hay unas 200 especies de papas silvestres, pero fue en los Andes centrales donde los agricultores lograron seleccionar y mejorar el primero de lo que habría de convertirse, en los milenios siguientes, una asombrosa variedad de cultivos del tubérculo. En realidad, lo que hoy se conoce como "papa" (*Solanum especie tuberosum*) contiene

apenas un fragmento de la diversidad genética de las siete especies reconocidas de papa y las 5 000 variedades que se siguen cultivando en los Andes.

Si bien los agricultores andinos cultivaron muchas hortalizas y cereales, como el tomate, los frijoles y el maíz, sus variedades de papa eran particularmente adecuadas a la zona del valle quechua, que se extiende a alturas de 3 100 a 3 500 metros sobre el nivel del mar, a lo largo de las vertientes de los Andes centrales (los pueblos andinos consideraban la región quechua la "zona civilizada"). Pero los agricultores también produjeron una especie de papa resistente a las heladas, que sobrevive en la tundra alpina de la región de la Puna, a 4 300 metros de altura.

La seguridad alimentaria que ofrecían el maíz y la papa, consolidada a través de la irrigación y la construcción de terrazas, permitió que surgiera, alrededor del año 500 dc, la civilización Huari en las tierras altas de la cuenca de Ayacucho. Por esa misma época, la ciudad Estado de Tiahuanaco se formó cerca del lago Titicaca, gracias en gran medida a su avanzada tecnología de "campos alzados", que son parcelas elevadas bordeadas de canales de riego, cuya productividad se ha estimado en unas 10 toneladas por hectárea. Se considera que en su apogeo, alrededor del año 800 dc, Tiahuanaco y los valles circundantes tenían una población de medio millón de habitantes o más.

**d) Clasificación botánica.-** La papa amarilla tiene la siguiente posición taxonómica, según el sistema de clasificación de Cronquist (1981) :

División : Magnoliophyta  
Clase : Magnoliopsida  
Sub clase : Asteridae  
Orden : Scrophulariales  
Familia : Solanaceae  
Género : Solanum  
Especie : Solanum tuberosum L

**e) Descripción de la planta.**- Según el CIP, la papa (*solanum tuberosum*) es un cultivo herbáceo anual que crece hasta 100 cm (40 pulgadas) de altura. A medida que crece la planta, sus hojas compuestas fabrican almidón que es transferido a las terminaciones de sus tallos subterráneos (o estolones).

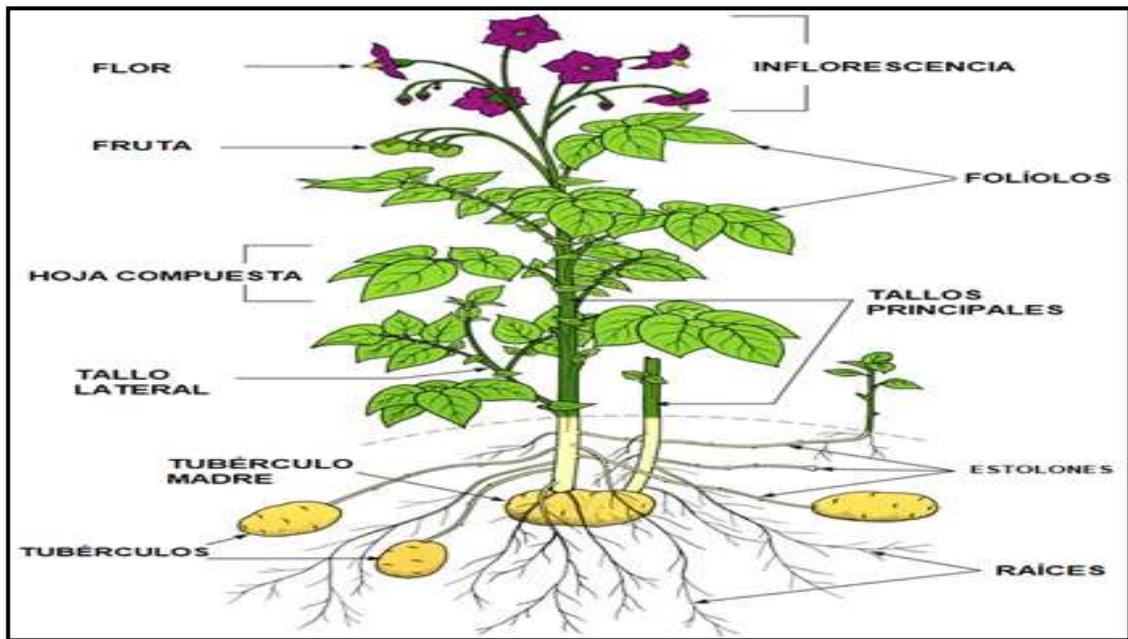
Los tallos se van engrosando para formar unos cuantos o hasta un máximo de 20 tubérculos cerca de la superficie del suelo. El número de tubérculos que llegan realmente a la madurez depende de la humedad y los nutrientes disponibles en el suelo los tubérculos pueden variar en forma y tamaño y normalmente pesan 300 g (10,5 onzas) cada uno.

Al término de la temporada de crecimiento, las hojas y tallos de la planta se marchitan al nivel del suelo y los nuevos tubérculos se desprenden de sus estolones.

Los tubérculos sirven después como almacén de nutrientes que le permiten a la planta sobrevivir al frío y más tarde rebrotar y reproducirse. Cada tubérculo tiene entre dos y hasta 10 brotes (u “ojos”), dispuestos en forma de espiral alrededor de su superficie. Los brotes generan rebrotes que crecen como nuevas plantas cuando las condiciones se vuelven favorables nuevamente.

A diferencia de otros cultivos importantes, las papas se reproducen vegetativamente de otras papas. Por lo tanto, una parte de la cosecha de cada año entre el 5 y 15 por ciento, dependiendo de la calidad de los tubérculos cultivados se reserva para su reutilización en la siguiente temporada de siembra. La mayoría de los agricultores en los países en desarrollo seleccionan y almacenan sus propios tubérculos-semilla. En los países desarrollados, los agricultores están más dispuestos a comprar “semilla certificada” libre de enfermedades, de los proveedores. (CIP)

**f) Variedades.**- La variedad de papa es su nombre que nos indica características agrícolas favorables (por ejemplo: capacidad de producción) al igual que características desfavorables (por ejemplo: susceptibles a un factor determinado). (Egúsquiza, 2000)



*Figura 7.* Planta de la papa  
<https://cipotato.org/es/potato/how-potato-grows/>



*Figura 8.* Tubérculo de la papa amarilla  
<https://www.belitu.com/product/papa-amarilla/>

En el campo, en el mercado o en la casa las variedades se identifican de una manera práctica de acuerdo a su origen, al color externo del tubérculo y a la manera principal de uso.

**1) Variedades nativas.-** Se siembran en la sierra, especialmente en las comunidades campesinas localizadas a partir de los 3 000 msnm

Se siembran mezcladas, la mezcla es una excelente manera de evitar o reducir la diseminación de plagas o enfermedades y una adecuada estrategia para asegurar la producción de alimentos en caso de ocurrir sequía, heladas, etc.

Algunas variedades nativas se siembran individualmente para comercialización por ser de muy buena calidad culinaria harinosas (papa amarilla) o para su uso en forma de chuño o moraya (papa amarga).

Tabla 1  
*Identificación de variedades de papa de manera práctica*

<b>Criterios</b>	<b>grupos</b>	<b>características</b>
<b>Por su origen</b>	Nativas	Harinosas, se consumen cocidas
	Modernas	Menos harinosas, se consumen cocidas o fritas.
<b>Por su color</b>	Blancas	Cáscara blanquecina, crema o cremosa.
	De color	Cáscara color rojo, rojizo, morado o bicolor.
<b>Por su uso</b>	Amarillas	Para sopas, papillas o puré.
	Industriales	Para hojuelas (chips), papa frita y otros.
	Amargas	Para elaborara chuño, moraya o tunta.

Egúsquiza, 2000

**2) Variedades modernas.-** Se conocen también como variedades mejoradas, se caracterizan por tener mayor capacidad productiva que la mayoría de variedades nativas.

**3) Variedades nativas amarillas :**

Egúsquiza, (2000) describe algunas variedades nativas amarillas como :

– **Tumbay.-** Se produce desde 3 000 msnm, en los departamentos de Huánuco, Pasco y Junín. Tubérculos redondos, piel amarillenta

con yemas moradas, ojos semiprofundos, pulpa amarillenta y brotes morados. Excelente calidad culinaria y comercial.

- **Peruanita.**- Se encuentra sembrada sobre los 3300 msnm, en los departamentos de Huánuco, Pasco, Junín, Huancavelica y Apurímac. Tubérculos redondos, ojos semiprofundos, piel bicolor, pulpa amarillenta, muy buena calidad culinaria.

Tabla 2  
*Variedades modernas de uso en el Perú*

<b>Variedades modernas de uso en el Perú.</b>			
<b>características</b>	<b>Variedades Modernas</b>		
Mayor área de siembre	- Tomasa Condemayta	- Yungay	
	- Perricholi	- Canchán INIA	
Mayor uso regional	Norte : Liberteña, Amapola, Molinera. Centro: Yungay, Perricholi, Tomasa Condemayta. Sur: CICA, Andina, Chaska.		
Tolerantes o resistentes a la ranca	- Perricholi		
	- Amarilis		
	- Canchán INIA		
Resistente al Nemátodo quiste	- María Huanca		
Resistentes a virus X e Y	- Muru, Costanera, Desértica.		
Tolerantes a Mosca	- Tomasa Condemayta		
Minadora	- María Tambeña		
Resistentes a suelos salinos	- Tacna		
	- costanera		
Aptitud para procesamiento (para industria)	- Capiro	- Desértica	- Única
	- Tacna	- María Reiche	- Primavera
	- María Bonita	- Costanera	
Variedades creadas en 1995 - 1999	- María Bonita INIA	- Chagllina	- Amarilis
	- San Juan INIA	- UNALM Guisi	- Unica
	- San Antonio Abad	- María Reiche	- Desértica
	- María Tambeña	- Primavera	

*Egúsqiza, 2000*

- **Runtush.**- Se siembra sobre 3 500 msnm, en la sierra desde la Libertad hasta Apurímac. Tubérculos redondeados, ojos numerosos profundos, piel amarilla clara, pulpa amarilla, brotes de color crema, excelente calidad culinaria y comercial.

- **Huagalina.**- Se siembra en la sierra de Cajamarca y La Libertad. Tubérculos ovalados, ojos superficiales, piel de pigmentos rojizos, brotes rojizos con nudos amarillentos, muy buena calidad culinaria y comercial.

**g) Valor nutritivo.**- Como señala la FAO (2008) la papa es un alimento versátil y tiene un gran contenido de carbohidratos, es popular en todo el mundo y se prepara y sirve en una gran variedad de formas. Recién cosechada, contiene un 80% de agua y un 20% de materia seca. Entre el 60% y el 80% de esta materia seca es almidón. Respecto a su peso en seco, el contenido de proteína de la papa es análogo al de los cereales, y es muy alto en comparación con otras raíces y tubérculos.

Además, la papa tiene poca grasa. Las papas tienen abundantes micronutrientes, sobre todo vitamina C: una papa media, de 150 gramos, consumida con su piel, aporta casi la mitad de las necesidades diarias del adulto (100 mg) La papa contiene una cantidad moderada de hierro, pero el gran contenido de vitamina C fomenta la absorción de este mineral. Además, este tubérculo tiene vitaminas B1, B3 y B6, y otros minerales como potasio, fósforo y magnesio, así como folato, ácido pantoténico y riboflavina. También contiene antioxidantes alimentarios, los cuales pueden contribuir a prevenir enfermedades relacionadas con el envejecimiento, y tiene fibra, cuyo consumo es bueno para la salud.

**h) Composición química del tubérculo de la papa.**- El tubérculo de por sí es esencialmente el tallo abruptamente engrosado debajo de la tierra. La parte externa de la cascara consiste de una capa parecida al corcho que constituye el peridermo el cual parece ser que tiene propósito de retardar la pérdida de humedad y ofrecer resistencia al ataque de microorganismos. Debajo de la corteza existe una pequeña capa que envuelve al parénquima el cual contiene un alto porcentaje de almidón.

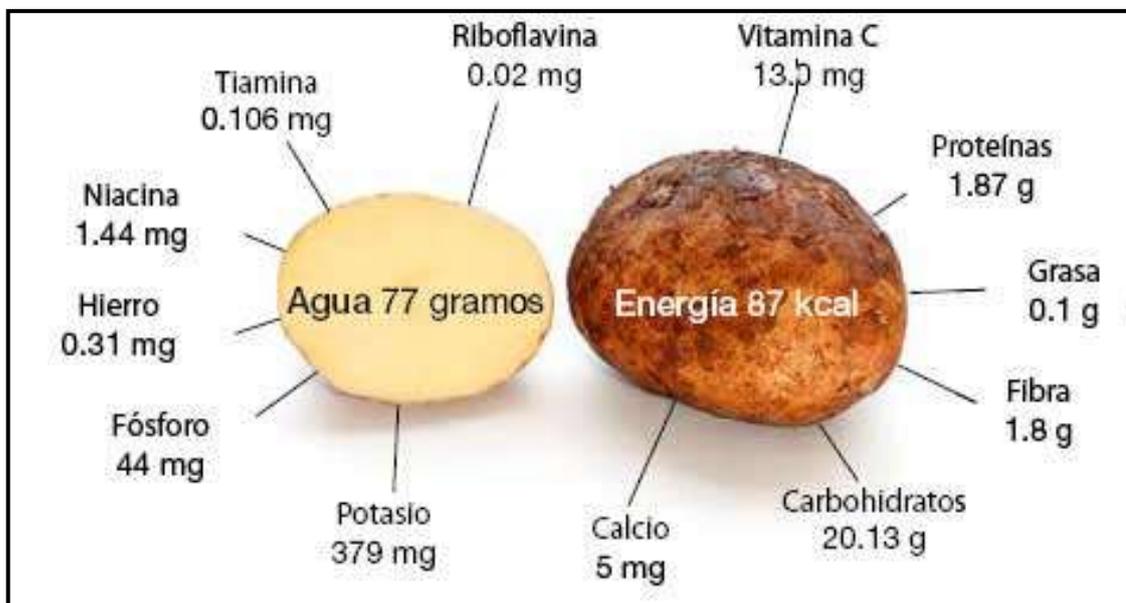


Figura 9 Nutrientes de la papa (Por 100 g de papa hervida y pelada antes del consumo) Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Base de datos nacional de nutrientes, <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/hojas.html>



Figura 10. Composición química del tubérculo de la papa. <http://www.fao.org/potato2008/es/lapapa/tuberculo.html>.

**1) Análisis proximal de la papa amarilla.**- La composición proximal de la papa amarilla se muestra en las siguientes tablas

*Tabla 3*

Composición química proximal de la papa

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje</b>
agua	79,9%
proteína	2,1%
grasa	0,1%
carbohidratos	
total	17,1%
fibra	0,5%
ceniza	0,9%

Chamorro Diana, 2012

*Tabla 4*

*Composición química proximal de la papa seca*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje</b>
agua	7,6%
proteína	8,0%
grasa	0,8%
carbohidratos	
total	79,9%
fibra	1,6%
ceniza	3,7%

*Chamorro Diana, 2012*

### **2.2.3. El agua**

El agua es el constituyente más abundante en la mayoría de los alimentos en estado natural, tiene un papel esencial para la estructura y textura de los productos vegetales y animales de los que nos alimentamos. Las principales funciones biológicas se basan en su capacidad de transportar diferentes sustancias a través del cuerpo, de disolver otras y mantener en solución como en suspensión coloidal.

Todos los alimentos incluyendo los deshidratados contienen cierta cantidad de agua, muchas de las reacciones que suceden en los alimentos tanto positiva y negativamente están relacionadas con la presencia de agua. (Sanez, 2006)

El agua es un factor determinante en la inhibición o propagación de las diferentes reacciones químicas enzimáticas o microbiológicas que puede aumentar o disminuir el valor nutritivo y a la calidad de los alimentos.

Por ejemplo en la **Tabla 5** se muestra el contenido de agua en algunos alimentos (Badui, 2006)

Tabla 5  
*Contenido de agua en algunos alimentos (%)*

<b>Contenido de agua en algunos alimentos (%)</b>				
Lechuga, esparrago, coliflor	95	Carnes	de	res
Brócoli, zanahoria	90	70		
Manzana, durazno, naranja	88	Carne de cerdo, helado		60
Leche	87	Pan		
Papa, pera	80	40		
Huevo, pollo	74	Queso		
		35		
		Mantequilla		
		16		
		Galletas		
		5		

Badui, 2006

**a) Clasificación del agua retenida por los alimentos sólidos.**- Según Badui (2006) el agua puede ser agua libre o agua ligada :

- 1) El agua ligada.**- Fracción de agua retenida por un sólido que no es posible congelar, por muy bajo que sea la temperatura a la que se someta el alimento. El agua ligada no puede intervenir en las posibles reacciones, ni como solvente ni como reactivo ya que está fuertemente

retenida por el sustrato. El agua ligada está retenida en los alimentos por diferentes mecanismos como :

Fuerzas capilares. Agua retenida por capilares de tamaño muy pequeño que no permiten la formación de cristales de hielo.

Fijada sobre grupos polares, generalmente sobre proteínas, almidones, por puentes de hidrogeno, en forma de capa monomolecular sobre puntos activos.

Fijada la monocapa sobre estos puntos activos, se van formando 2 o 3 capas sobre la monocapa que tampoco participan en las reacciones.

**2) Agua libre.-** Fracción de agua retenida que se puede congelar. El agua libre esta retenida en los alimentos por diferentes mecanismos como :

Retenida en capilares, pero de tamaño mayor donde puede formar cristales de hielo.

Fenómenos de absorción.

**3) Agua inmovilizada.-** Retenida por membranas celulares. En el caso de los geles debido a su estructura de los alimentos.

En el caso de los geles, se habla de agua inmovilizada donde una cantidad importante de agua es retenida, debido a la estructura del alimento. Esta agua es diferente a la ligada, y puede participar en reacciones del alimento

**b) Actividad de agua :**

**$A_w$**  : Índice de agua retenida o contenida en los alimentos.

La actividad de agua tiene importancia actual a nivel práctico, en los alimentos y en la actualidad ya existen normas para los alimentos en los que se considera la actividad del agua. El agua se puede encontrar en los alimentos bajo diferentes formas.

Los tejidos animales y vegetales contienen agua en diferentes concentraciones distribuidas de una manera compleja y heterogenia.

La actividad de agua, está definida por el descenso de la presión parcial del vapor de agua a una temperatura  $T_1$  en equilibrio. (Sanez, 2006)

$$A_W = \frac{P_W}{P^0_W}$$

Donde :

$P_W$  = Presión parcial de vapor de un solo alimento.

$P^0_W$  = Presión parcial del vapor de agua pura

En equilibrio hay una igualdad entre la actividad del agua de una solución o alimento y a la presión parcial relativa del vapor de agua ejercida sobre la solución o alimento.

La mayoría de los alimentos naturales como: carnes, pescados, vegetales, frutas tienen una actividad de agua aproximadamente a 0.97 con contenido de humedad de 60%o más de agua como se puede observar en la **Tabla 6 (Ver Pag. N° 48)**

Cualquiera que sea el tipo de alimento, la  $a_w$  es un índice universal que se relaciona con la velocidad de deterioro de un alimento.

Por ejemplo : rancidez, pardeamiento, reacciones enzimáticas, desarrollo de microorganismos (hongos, levaduras y bacterias)

**c) Isotherma de adsorción y desorción.**- Una isoterma de adsorción o desorción, es la curva que indica en el equilibrio y para una temperatura determinada, la cantidad de agua retenida por el alimento en función de la humedad relativa de la atmosfera que la rodea. Sanez (2006)

Los isotermas de equilibrio de los productos alimenticios puede presentar diferentes formas, si bien la más frecuente es de forma sigmoideal como se muestra en la **Figura 11 (Ver pag. N° 49)**

Tabla 6  
*Actividad de agua de algunos alimentos*

<b>Alimento</b>	<b>A<sub>w</sub></b>
Frutas frescas y ensaladas	0,97
Verduras	0,97
Jugos	0,97
Huevos	0,97
Carne	0,97
Queso	0,95
Pan	0,94
Mermeladas	0,86
Frutas secas	0,73
Miel	0,70
Huevo en polvo 5% humedad	0,40
Galletas, cereales	0,35
Azúcar	0,10

Badui, 2006

La zona I indicado en la **Figura 11 (Ver pag. N° 49)** corresponde según la mayoría de los investigadores, al agua fuertemente ligada al alimento, en forma de capa monomolecular fijada a los grupos polares de ciertos compuestos y también al agua de cristalización de las sales y azúcares. Prácticamente esta fracción del agua del alimento no está disponible para actuar como disolvente.

Por encima de la zona I corresponde al agua cada vez más débilmente ligada, agua retenida por capilaridad agua presente en disoluciones.

### **1.1. Conceptual**

El proceso de secado se realiza para separar el agua o humedad contenido en un sólido, en nuestro caso la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) mediante la acción del calor sin que este altere sus propiedades fisicoquímicas y/o nutricionales, se ha seleccionado el secador rotatorio discontinuo debido a que presenta una ventaja significativa frente a otros secadores como el secador de bandejas porque permite la circulación de un flujo de aire caliente que

arrastra la humedad y además cuenta con un motor rotacional que permite un contacto más uniforme del calor frente al área de superficie de la papa amarilla.

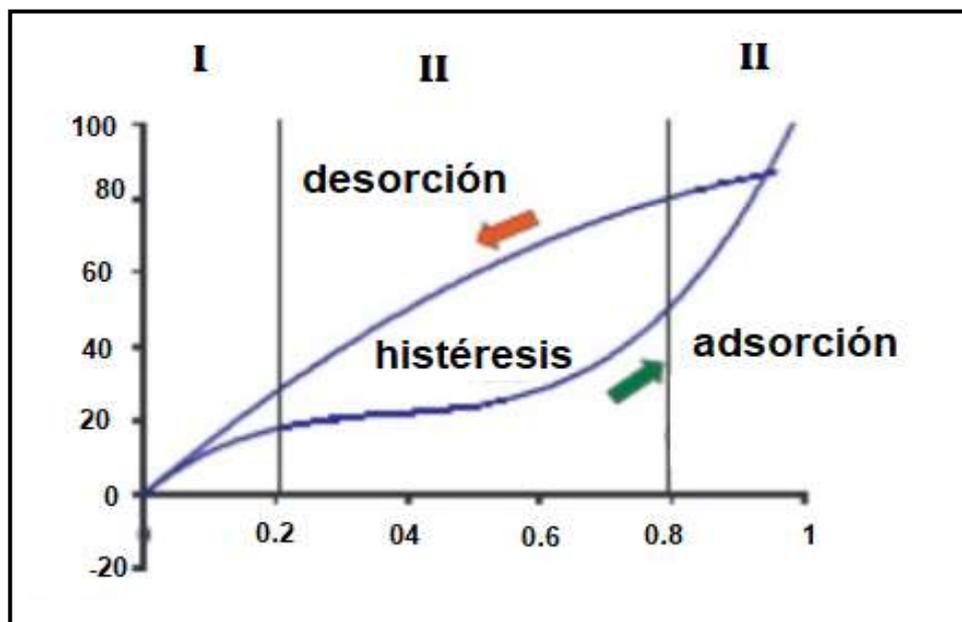


Figura 11 Isoterma de adsorción y desorción

<https://slideplayer.es/slide/10504127/>

La papa es el tubérculo más producido en el Perú y dentro de todas las variedades tenemos a una de las más principales que es la papa amarilla (*Solanum Tuberosum*), que se utiliza en la gastronomía peruana ya que cuenta con alto contenido nutricional y en la que también se ha realizado harina de papa amarilla. Por su variada aplicación, fácil obtención y propiedades nutricionales es que se ha escogido a la papa amarilla (*Solanum Tuberosum*) como objeto de estudio de la presente tesis.

## 1.2. Definición de términos básicos

**A.O.A.C** : Es “La asociación de las comunidades analíticas” tiene por objetivo ser un proveedor activo en el ámbito mundial, responsable de la organización, desarrollo, empleo y armonización de métodos analíticos validados y programas de aseguramiento de la calidad de los servicios de laboratorio.

- a) **Contraflujo.**- Fluido líquido en sentido opuesto al normal. También llamado retorno.
- b) **Densidad.**- Magnitud que refleja el vínculo que existe entre la masa de un cuerpo y su volumen.
- c) **Humedad.**- Agua que impregna un cuerpo o al vapor presente en la atmósfera. El agua está presente en todos los cuerpos vivos sean animales o vegetales.
- d) **Flujo de aire.**- Volumen de aire que atraviesa una superficie dada en un tiempo determinado.
- e) **Organolépticas.**- Propiedades de las sustancias orgánicas e inorgánicas que se pueden apreciarse por los sentidos.
- f) **Operación unitaria.**- Cualquier proceso físico de transformación donde puede existir un intercambio de energía del tipo físico, de una materia prima en otro producto de características diferentes.
- g) **Papa.**- Tubérculo de diversos colores, tamaños y formas.
- h) **Parámetro.**- Elemento o dato importante desde el que se examina un tema, cuestión o asunto
- i) **Secador.**- Equipo utilizado para secar un líquido o un sólido mediante la evaporación. Principalmente es para reducir o eliminar agua.
- j) **Secado.**- Acción que consiste en eliminar totalmente el líquido o humedad contenido en una cosa.
- k) **Sublimación.**- Es el proceso que consiste en el cambio de estado de sólido al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.
- l) **Temperatura.**- Magnitud física que refleja la cantidad de calor sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.

## **II HIPÓTESIS Y VARIABLES**

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

#### **2.1.1. Hipótesis general**

El proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) depende de parámetros óptimos.

#### **2.1.2. Hipótesis específicas**

- 1)** Las propiedades fisicoquímicas son apropiadas para que la papa amarilla (*solanum tuberosum*) pueda ser secada en un secador rotatorio discontinuo.
- 2)** El proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) depende de parámetros como temperatura, flujo de aire y espesor.

### **2.2. Definición conceptual de variables**

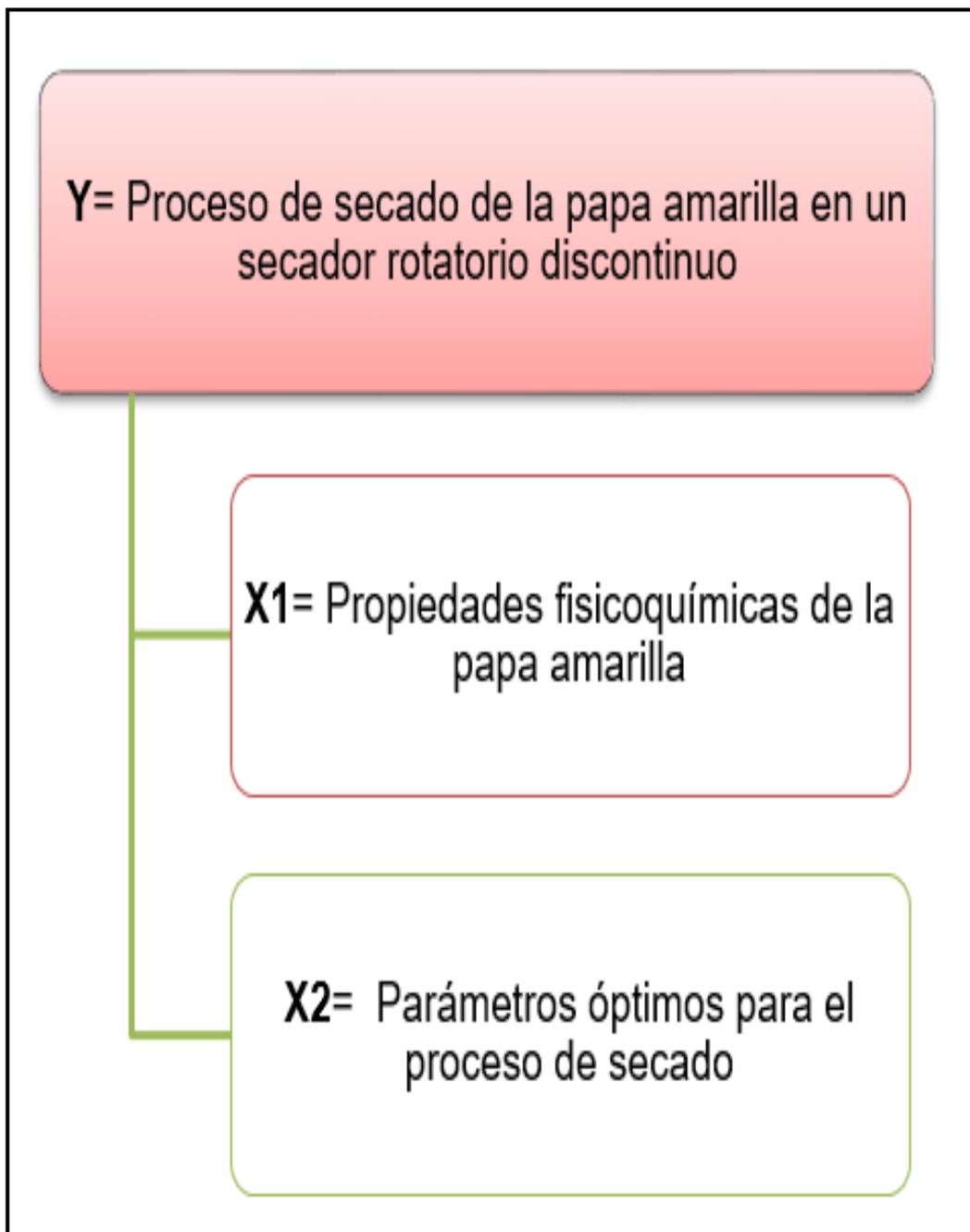
Por su naturaleza, todas las variables determinadas son del tipo cualitativas y cuantitativas. Por su dependencia Y es dependiente, y las variables  $X_1$ ,  $X_2$ , son independientes. En la **Figura 12 (Ver pag. Nº 52)** se muestra la relación entre las variables.

Es decir :

$$Y = f(X_1, X_2)$$

#### **2.2.1. Operacionalización de variables**

La Operacionalización de variables que se trabajan, a través de dimensiones indicadores y métodos se muestra en la **Tabla 7 (Ver pag. Nº 53)**



*Figura 12.* Relación de las variables de la investigación  
Elaboración propia

Tabla 7  
Operacionalización de variables

<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
Proceso de secado de la papa amarilla ( <i>Solanum tuberosum</i> ) en un secador rotatorio discontinuo.	Humedad final de la papa amarilla.	%	Gravimétrico
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
Propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla ( <i>Solanum tuberosum</i> ).	Humedad inicial.	%	Gravimétrico
	Composición química proximal.	%	Instrumental
Parámetros óptimos para el proceso de secado de la papa amarilla ( <i>Solanum tuberosum</i> )	Temperatura.	°C	Instrumental
	Flujo de aire.	L/min	Instrumental
	Espesor.	mm	Instrumental

*Elaboración propia*

### III DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

Los tipos de investigación realizados en el presente trabajo son :

- a) **Por su diseño interpretativo.**- Es experimental ya que se hace uso de conocimientos pre existente para dar una alternativa de uso tecnológico en la solución de problemas de tipo productivo.
- b) **Por su finalidad.**- Es de carácter aplicado porque los resultados obtenidos se pueden llevar a la práctica.
- c) **Por el énfasis de la naturaleza de las variables empleadas.**- Es de carácter cuali – cuantitativas ya que las variables trabajadas son cualitativas y cuantitativas.
- d) **Por la condición de desarrollo.**- Es a nivel de laboratorio, puesto que las corridas experimentales se efectuaron a nivel de laboratorio, donde se manejaron las variables independientes para obtener los resultados deseados.

#### 3.2. Método de investigación

Los experimentos se han de llevar a cabo de acuerdo a las siguientes etapas que se señalan.

- a) **Recepción y selección de la materia prima.**- La materia prima fue adquirida de los cultivos de Ayacucho que fueron transportados en camiones al mercado mayorista de Santa Anita, donde fueron seleccionados de forma aleatoria.
- b) **Limpieza y desinfección.**- En esta etapa del proceso los tubérculos fueron seleccionados de forma manual con la finalidad de separar los que se encuentran en mal estado y todo material extraño que pueda afectar el proceso de secado de la papa amarilla.

Luego se procedió con el lavado con la finalidad de eliminar todo tipo de contaminantes que se encuentran adherido a la piel del tubérculo como; polvo, arena e impurezas. La limpieza se realizó a través de cepillados.

Después del lavado se enjuago con una solución desinfectante con hipoclorito de sodio a 60 ppm



*Figura 13.* Recepción de papa amarilla  
Mercado mayorista de Santa Anita

**c) Tamaño.-** Se realizó el cortado de la papa amarilla de manera manual con la ayuda de utensilios de acero inoxidable en forma de rodajas con la finalidad de obtener tamaños estándares para tener un área de contacto uniforme y así facilitar las mediciones de la humedad. Los cortes que se realizaron para el presente estudio fueron de 3,0; 3,5 y 4,0 mm, de espesor. Posteriormente se tomó nota de la masa con una balanza analítica.



*Figura 14* Limpieza y desinfección de la papa  
Elaboración propia



*Figura 15* Cortes de la papa amarilla 3,0; 3,5 y 4,0 mm de espesor respectivamente  
*Elaboración propia*

**d) Equipo y proceso de secado.**- El secador rotatorio es de forma cilíndrica y está diseñado de un tubo de vidrio. Para su ajuste fue acoplado con una brinda, ensamblado a un soporte de acero inoxidable y cuenta con tuberías para la entrada y salida de aire caliente.

Así como también se encuentra acoplado para el giro a un motor y controlador de velocidad. Para generar un flujo de aire caliente esta encajado a una pistola de calor y conectado a una compresora. También contamos con un medidor diferencial que nos permite registrar el flujo de aire caliente



*Figura 16* *Tubo de vidrio*  
*Elaboración propia*



*Figura 17.* Tuberías para la entrada y salida de aire caliente  
Elaboración propia.



*Figura 18* Motor y controlador de velocidad  
Elaboración propia



*Figura 19* Pistola de calor  
Elaboración propia.

A fin de tener un control de temperaturas se usaron termocuplas, que se encuentran adaptados al secador con el programa data q, que se instálalo a la PC del laboratorio de investigación.

Posteriormente a la instalación del secador rotatorio discontinuo se procedió con las corridas experimentales de las muestras de papa amarilla.

Como se observa en la siguiente **Tabla 8**

*Tabla 8*  
Corridas experimentales

N° experimento	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Flujo (L/min)
1	3	50	400
2	3	50	600
3	3	60	400
4	3	60	600
5	3,5	50	400
6	3,5	50	600
7	3,5	60	400
8	3,5	60	600
9	4	50	400
10	4	50	600
11	4	60	400
12	4	60	600

Elaboración propia

Luego se registró el peso de las muestras en intervalos de 15 min hasta llegar a un peso constante y se procedió a calcular la humedad en base seca.



Figura 20 Peso en intervalos de 15 min  
Elaboración propia

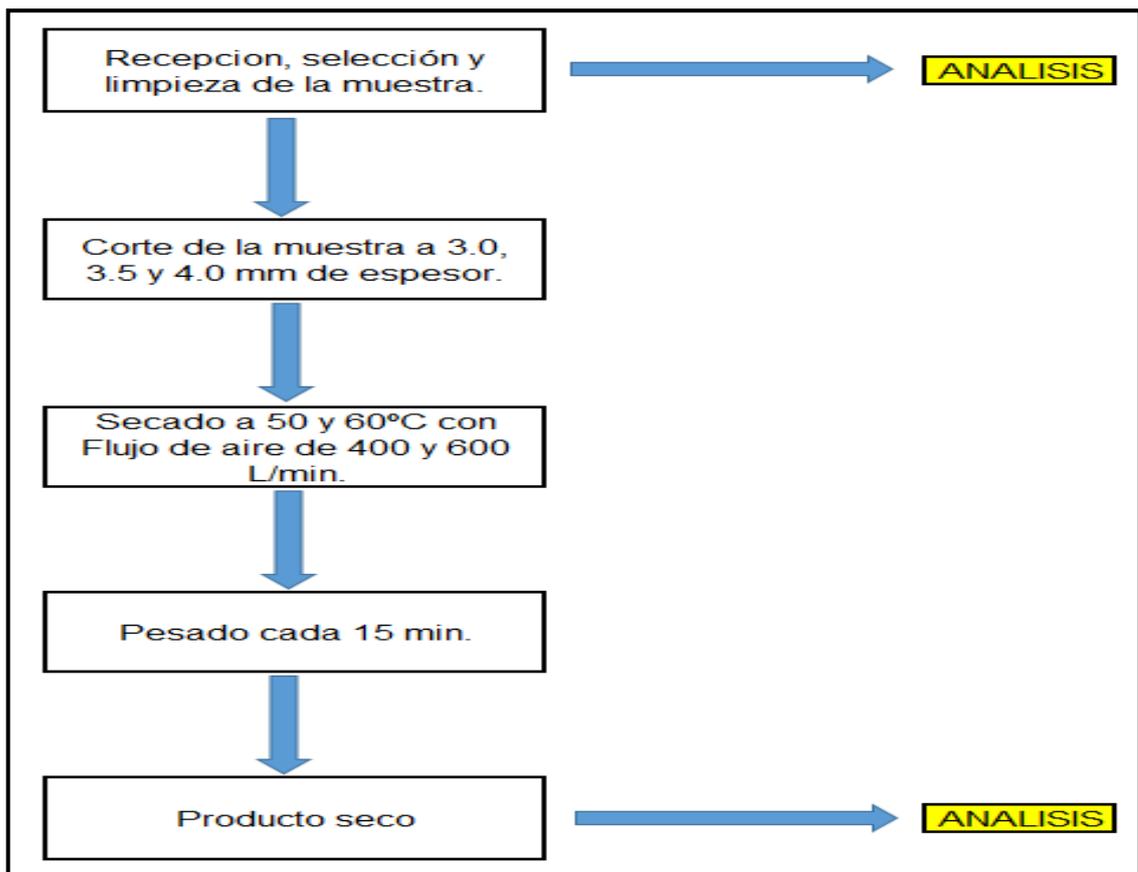


Figura 21 Diagrama de bloques del procedimiento experimental del proceso de secado de la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) en un secador rotatorio discontinuo  
Elaboración propia

### **3.3. Población y muestra**

#### **3.3.1. Población**

La población para el presente estudio está representada por el tubérculo de papa amarilla que proviene del departamento de Ayacucho.

#### **3.3.2. Muestra**

Para la realización de los análisis y para obtener resultados de confiabilidad se tomó en cuenta la forma cómo se recolecta la muestra ya que siendo un diseño experimental se escoge aleatoriamente.

La muestra se tomó al azar, seleccionando 5 Kg de papa amarilla, el cual se transportó al laboratorio de investigación de la facultad de ingeniería química perteneciente a la Universidad Nacional del Callao.

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

El secado de la papa amarilla fue realizado en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

### **3.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información**

Para la recolección de información se utilizó revistas sobre estudios de secado de papa amarilla y normas internacionales como la AOAC Edición 2016 que se tomaran como fundamento para la realización de los análisis, también se usó información de internet lo cual nos fue de gran ayuda para la obtención de bases bibliográficas de Tesis elaboradas.

#### **Análisis proximal**

- a) Humedad.-** Método gravimétrico, diferencias de peso con el extracto seco total, recomendado por la AOAC método 930.04.c3. 20 th. Edición 2016
- b) Proteína cruda.-** Método Kjendahl, se calculó el contenido de proteína como nitrógeno, recomendado por la AOAC método 978.04. Edición 2016
- c) Ceniza.-** Se realizó por incineración de la muestra en la mufla a 600°C durante 6 horas, recomendado por la AOAC método 930.05.c3. Edición 2016

- d) **Grasa.**- Se realizó con éter de petróleo en un equipo extractor de grasa ANKOM XT10 el cual asegura la exactitud de los resultados ya que se encuentra aprobado por el método AOAC930.09.C3. Edición 2016
- e) **Carbohidratos totales.**- Se obtiene por diferencia, restando el 100% los porcentajes de humedad, cenizas, grasa, proteínas.

### 3.5.1. Materiales, reactivos y equipos

- a) **Materia prima.**- Papa amarilla (*Solanum tuberosum*) adquirida en Tambo Ayacucho de regular tamaño procurando un diámetro de 4 a 6 cm, en buen estado y fresco



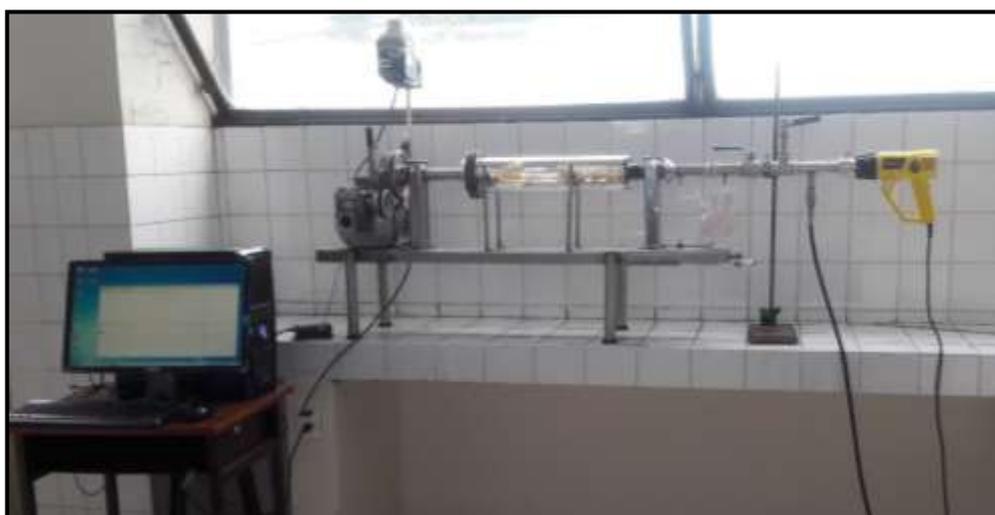
Figura 22. Papa amarilla fresca  
Mercado Mayorista de Santa Anita

b) **Equipos :**

- 1) Secador rotatorio discontinuo
- 2) Balanza analítica, de sensibilidad de 0,001 g
- 3) Monitor y PC

c) **Instrumentos :**

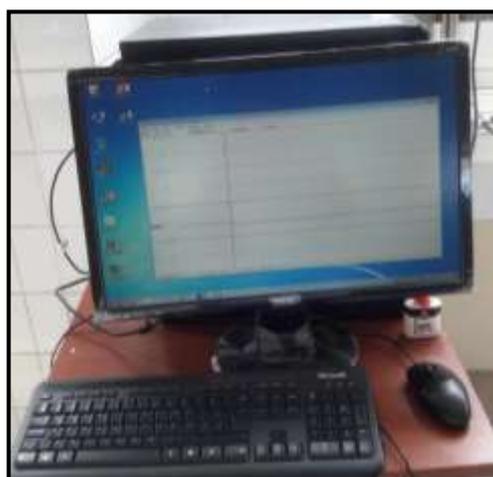
- 1) Utensilios de acero inoxidable
- 2) Calibrador de vernier
- 3) Tabla plástica para cortar
- 4) Cronómetro



*Figura 23. Secador rotatorio discontinuo*  
Elaboración propia



*Figura 25. Balanza analítica,*  
Elaboración propia



*Figura 24. Monitor y PC*  
Elaboración propia.



*Figura 26. Utensilios de acero inoxidable*  
Elaboración propia



*Figura 27.* Calibrador de vernier  
Elaboración propia



*Figura 28.* Tabla plástica para cortar  
Elaboración propia

### **3.6. Análisis y procesamientos de datos**

Interpretamos los resultados obtenidos realizando análisis estadístico con el Software Minitab 18, donde se realizó los ajustes a modelos matemáticos con regresión no lineal y para la elección del modelo más adecuado se realizó un análisis de varianza ANOVA considerando un 95% de confiabilidad por lo tanto el error estándar de estimación (EE) debe ser menor a 0,05

Se realizó un diseño de experimentos con la herramienta DOE en el Software Minitab 18 para evaluar la importancia de uno o más factores al

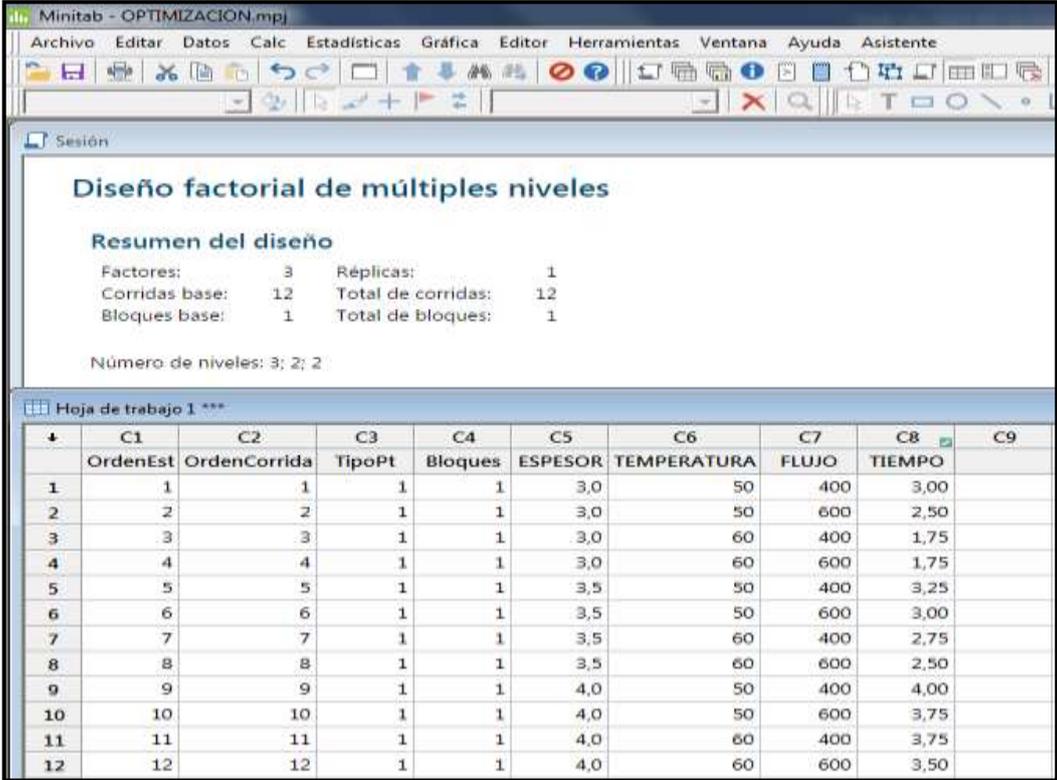
comparar las medias de la variable de respuesta (tiempo de secado) en los diferentes niveles de los factores (espesor, flujo de aire y temperatura)

## IV RESULTADOS

### 4.1. Resultados descriptivos

Para la obtención del número de corridas experimentales se realizó un diseño factorial de múltiples niveles en el software Minitab 18, considerando 3 factores :

- Primer factor.**- Espesor que cuenta con 3 niveles (E1 = 3,0; E2 = 3,5; E3 = 4,0 mm)
- Segundo factor.**- Temperatura que cuenta con 2 niveles (T1 = 50, T2 = 60°C)
- Tercer factor.**- Flujo de aire caliente que cuenta con 2 niveles (F1 = 400, F2 = 600 L/min)



The screenshot shows the Minitab interface for a factorial design. The title bar reads 'Minitab - OPTIMIZACIÓN.mpj'. The menu bar includes 'Archivo', 'Editar', 'Datos', 'Calc', 'Estadísticas', 'Gráfica', 'Editor', 'Herramientas', 'Ventana', 'Ayuda', and 'Asistente'. The main window displays 'Diseño factorial de múltiples niveles' and a 'Resumen del diseño' (Design Summary) with the following data:

Factores:	3	Réplicas:	1
Corridas base:	12	Total de corridas:	12
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Below the summary, it indicates 'Número de niveles: 3; 2; 2'. The bottom part of the screenshot shows a worksheet named 'Hoja de trabajo 1 \*\*\*' with a table of 12 rows and 9 columns. The columns are labeled C1 through C9, with headers: OrdenEst, OrdenCorrida, TipoPt, Bloques, ESPESOR, TEMPERATURA, FLUJO, TIEMPO, and C9. The data rows are as follows:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	ESPESOR	TEMPERATURA	FLUJO	TIEMPO	
1	1	1	1	1	3,0	50	400	3,00	
2	2	2	1	1	3,0	50	600	2,50	
3	3	3	1	1	3,0	60	400	1,75	
4	4	4	1	1	3,0	60	600	1,75	
5	5	5	1	1	3,5	50	400	3,25	
6	6	6	1	1	3,5	50	600	3,00	
7	7	7	1	1	3,5	60	400	2,75	
8	8	8	1	1	3,5	60	600	2,50	
9	9	9	1	1	4,0	50	400	4,00	
10	10	10	1	1	4,0	50	600	3,75	
11	11	11	1	1	4,0	60	400	3,75	
12	12	12	1	1	4,0	60	600	3,50	

Figura 29. Diseño experimental  
Elaboración propia

Se envió a analizar la muestra inicial de papa amarilla fresca a CERPER.

S.A.

Obteniéndose los siguientes resultados :

Tabla 9  
Composición química proximal de la papa amarilla

Ensayos	Resultados (%)
Humedad	79,35
Proteína	2,37
Grasa	0,35
Cenizas	1,05
Carbohidratos	16,88
Calorías	80,15
Calorías provenientes de proteínas	9,48
Calorías provenientes de grasa	3,15
Calorías provenientes de carbohidratos	67,52

Ensayos emitidos por CERPER.S.A.

Con los valores de masa obtenidos en cada intervalo de 15 minutos hasta obtener una masa constante se realizó la conversión a humedad en base seca en donde se utilizó la siguiente ecuación :

$$X = \frac{W_{SH} - W_{SS}}{W_{SS}}$$

Donde :

**W<sub>SH</sub>** : Peso de solido húmedo

**W<sub>SS</sub>** : Peso de solido seco.

Para cada una de las condiciones de espesor, temperatura y flujo de aire, se realizó las gráficas de curva de secado en donde se representa la humedad en base seca vs tiempo.

A continuación, se muestran los gráficos obtenidos que describen el comportamiento experimental de la curva de secado de la papa amarilla con los parámetros utilizados.

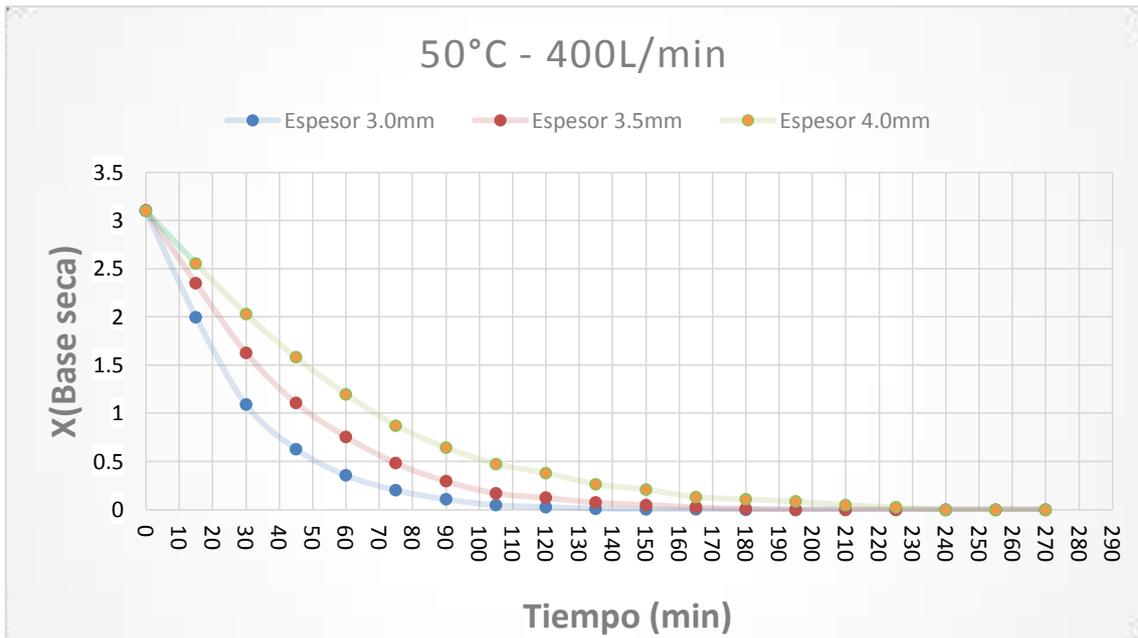


Figura 30. Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla vs el tiempo a una temperatura de 50°C y un flujo de aire de 400 l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm (Tabla de datos en Anexo N° 5)  
Elaboración propia

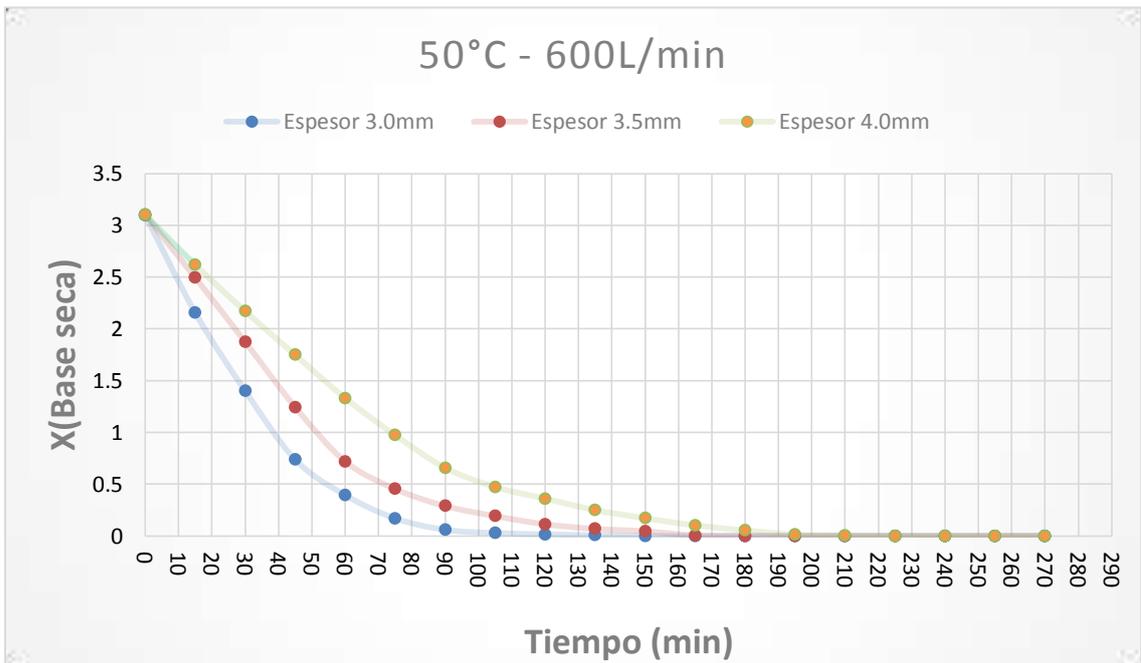


Figura 31. Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla vs el tiempo a una temperatura de 50°C y un flujo de aire de 600 l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm (Tabla de datos en Anexo N° 5)  
Elaboración propia

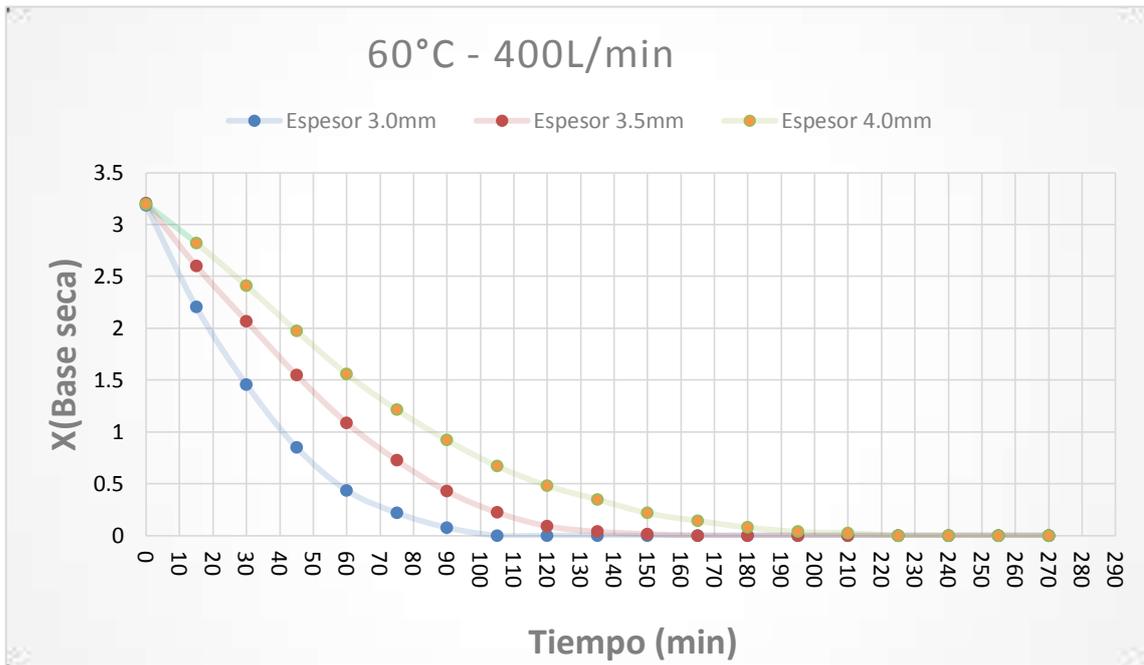


Figura 32. Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla vs el tiempo a una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 400 l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm (Tabla de datos en Anexo N° 5)  
Elaboración propia

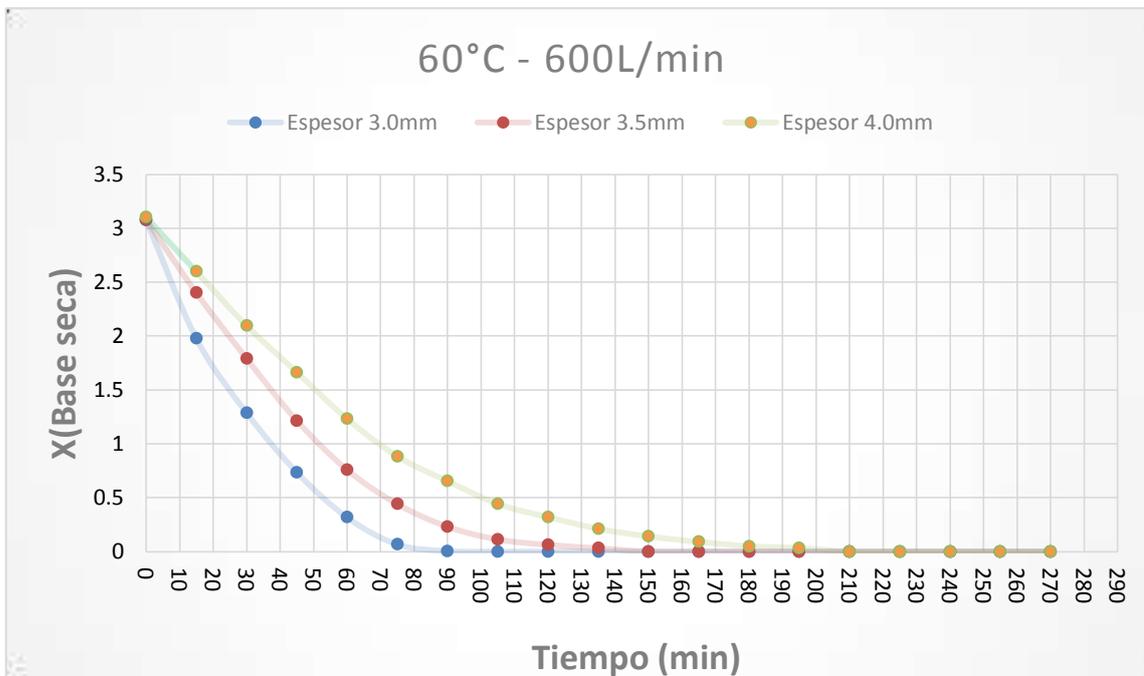


Figura 33. Curva de secado de la humedad en base seca de la papa amarilla vs el tiempo a una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 600 l/min para los espesores 3,0; 3,5 y 4,0 mm (Tabla de datos en Anexo N° 5)  
Elaboración propia

## 4.2. Resultados inferenciales

En la presente investigación se emplearon los modelos matemáticos que se muestran en la **Tabla 10**

Tabla 10  
*Modelo matemáticos*

<b>Modelos matemáticos</b>	
Newton	$X = e^{-kt}$
Henderson – Pabis	$X = ae^{-kt}$
Midilli	$X = ae^{(-kt^n)} + ct$
De dos términos	$X = ae^{-pt} + be^{-qt}$
Exponencial de dos términos	$X = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-akt}$
Wang y Singh	$X = 1 + at + kt^2$
Logarítmico	$X = ae^{-kt} + c$

C. Ertekin, O. Yaldiz, 2003

Para determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a la curva de secado se ha realizado regresiones no lineales en el software Minitab 18

De los modelos matemáticos obtenidos se realizó un análisis de varianza con la herramienta ANOVA considerando un 95% de confiabilidad, por lo tanto, el error estándar de estimación (EE) debe ser menor a 0,05 para cada parámetro y el error cuadrático medio del modelo (MSE) debe ser lo más cercano a cero. Se determinó que el modelo matemático de Midilli es el que mejor se ajusta a cada una de las curvas

Ecuación del modelo de Midilli :

$$X = ae^{(-kt^n)} + ct$$

Tabla 11  
Modelo matemático de Midilli

MODELO DE MIDILLI										
Exp.	Espesor (mm)	T (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo				MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	K	n	c			
1	3,0	50	400	3,69651	2,36502	0,96973	- 0,00103	0,0000635	0,0079698	0,9999365
2	3,0	50	600	2,71953	1,98087	1,55047	0,00019	0,0001112	0,0105432	0,9998888
3	3,0	60	400	2,70562	1,82555	1,57177	- 0,00067	0,0001160	0,0107708	0,9998840
4	3,0	60	600	2,28048	2,02267	1,88410	- 0,00059	0,0003176	0,0178227	0,9996824
5	3,5	50	400	3,11419	1,44596	1,17224	- 0,00111	0,0001104	0,0105072	0,9998896
6	3,5	50	600	3,04491	1,36047	1,41393	0,00127	0,0007604	0,0275754	0,9992396
7	3,5	60	400	2,83937	0,96964	1,67706	- 0,00179	0,0003502	0,0187139	0,9996498
8	3,5	60	600	2,77690	1,30169	1,57489	- 0,00033	0,0000235	0,0048517	0,9999765
9	4,0	50	400	3,10004	0,95579	1,16414	- 0,00212	0,0002607	0,0161474	0,9997393
10	4,0	50	600	2,92078	0,79377	1,43673	- 0,00206	0,0003992	0,0199788	0,9996008
11	4,0	60	400	3,07891	0,67055	1,45977	- 0,00553	0,0001303	0,0114138	0,9998697
12	4,0	60	600	2,96553	0,87520	1,36000	- 0,00233	0,0001334	0,0115483	0,9998666

Elaboración

propia

Tabla 12

*Comparación de R2 en los diferentes modelos matemáticos.*

				Newton	Exp. de dos términos	Wang y Singh	De dos términos	Henderson – Pabis	Midilli	Logarítmico
Exp.	E.(mm)	T (°C)	F.(L/min)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
1	3,0	50	400	0,656340	0,740890	0,648422	0,9988047	0,9984530	0,9999365	0,9985308
2	3,0	50	600	0,610386	0,740377	0,603503	0,9953142	0,9930557	0,9998888	0,9936722
3	3,0	60	400	0,575377	0,718338	0,567992	0,9956282	0,9932626	0,9998840	0,9941549
4	3,0	60	600	0,643206	0,743871	0,636796	0,9842119	0,9934030	0,9996824	0,9940342
5	3,5	50	400	0,558135	0,738284	0,552408	0,9971082	0,9968199	0,9998896	0,9975379
6	3,5	50	600	0,498642	0,739719	0,492127	0,9634507	0,9881350	0,9992396	0,9896399
7	3,5	60	400	0,389161	0,710353	0,386215	0,9456879	0,9817783	0,9996498	0,9865021
8	3,5	60	600	0,525488	0,744422	0,520100	0,9698249	0,9885926	0,9999765	0,9906376
9	4,0	50	400	0,445089	0,739022	0,456909	0,9719828	0,9960697	0,9997393	0,9977092
10	4,0	50	600	0,376745	0,738898	0,395060	0,9551971	0,9868205	0,9996008	0,9924552
11	4,0	60	400	0,218738	0,712891	0,265785	0,900637	0,9793786	0,9998697	0,9899813
12	4,0	60	600	0,407725	0,738965	0,419859	0,9638794	0,9900936	0,9998666	0,9943013

Elaboración propia

Se realizó un diseño factorial en el software Minitab 18 en donde los datos de respuesta es el tiempo de secado y los factores son el espesor, temperatura y flujo.

A continuación, se muestra el efecto de los parámetros de secado de la papa amarilla respecto al tiempo de secado en un secador rotatorio discontinuo.

Cada punto representa la media de tiempo de secado para un nivel de un factor. La línea central horizontal muestra la media de tiempo de secado para todas las corridas.

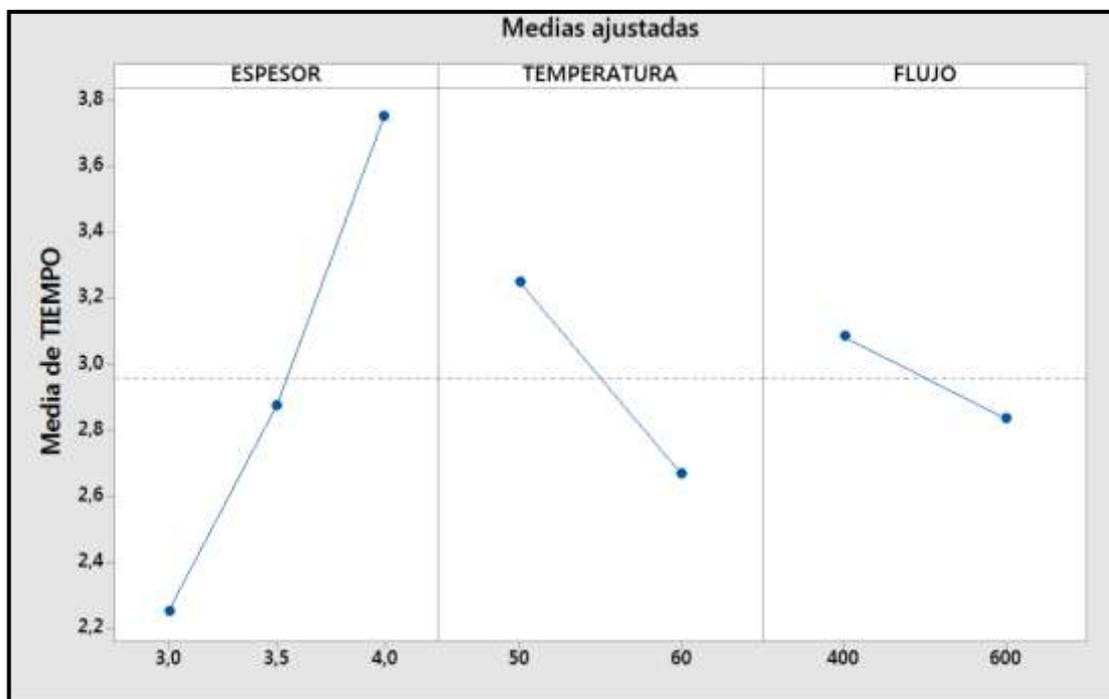


Figura 34. Gráfico de efectos principales para el tiempo de secado  
Elaboración propia

En el gráfico de interacción se muestra el tiempo de secado con diferentes combinaciones de los niveles de los factores. Si las líneas no son paralelas, la gráfica indica que existe una interacción entre los factores.

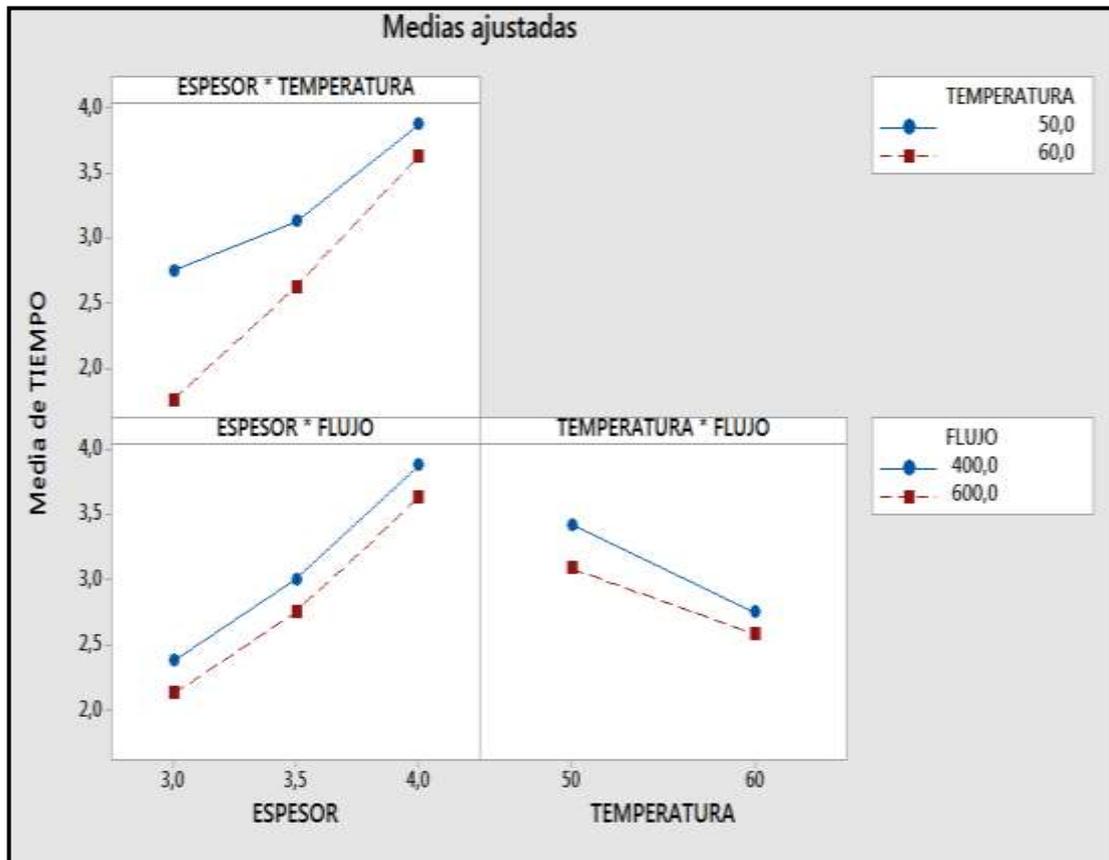


Figura 35. Gráfico de interacción para el tiempo de secado  
Elaboración propia

Se realizó los gráficos de superficie para cada espesor del experimento considerando la temperatura y flujo como las variables de entrada y el tiempo de secado como la variable de salida en el software Minitab 18.

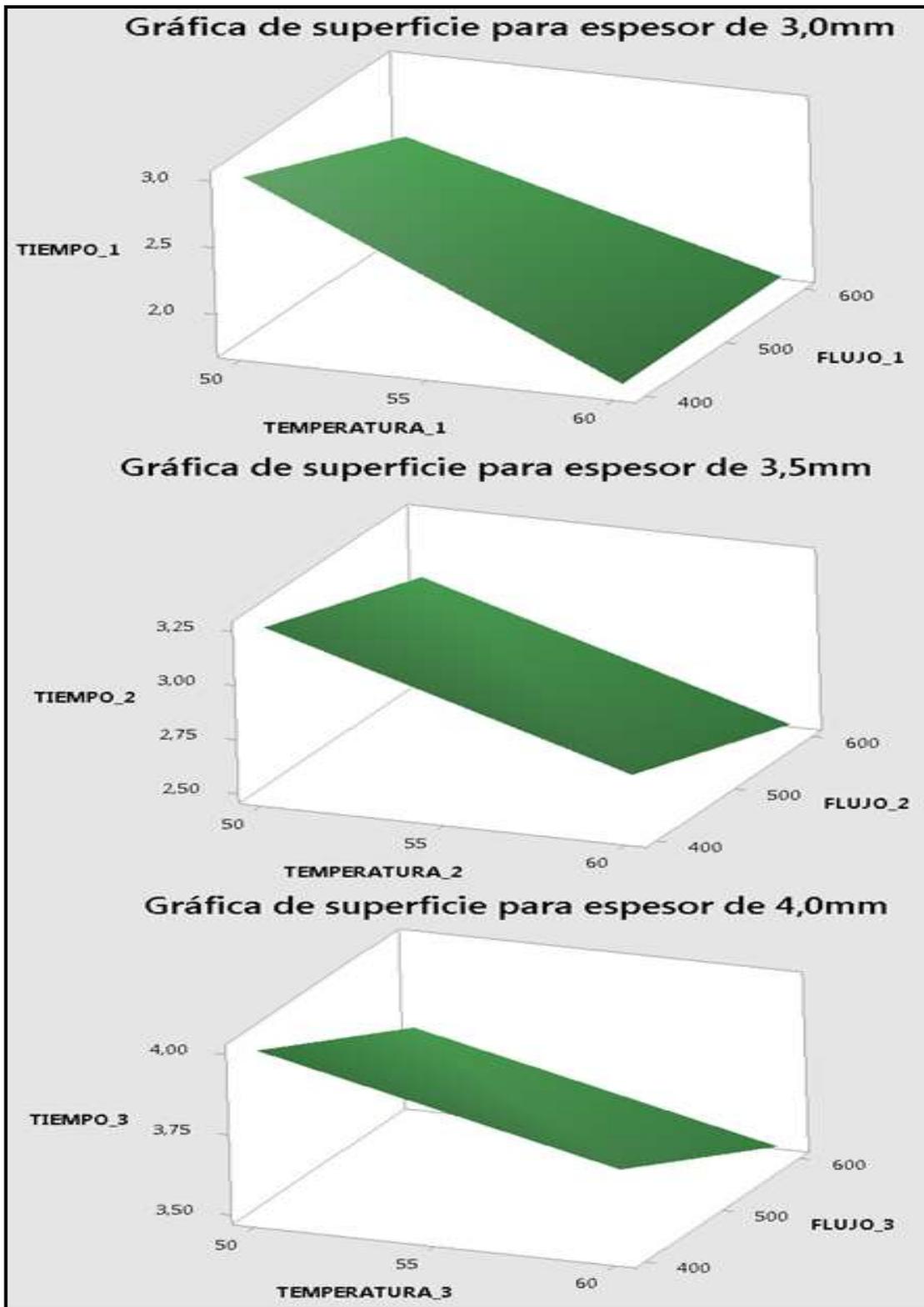


Figura 36. Gráficos de superficie para espesores de 3,0; 3,5 y 4,0 mm  
Elaboración propia

Para la determinación de los parámetros óptimos del proceso de secado de la papa amarilla se realizó el análisis de diseño factorial mediante la herramienta DOE del software Minitab 18, con la meta de minimizar el tiempo de secado.

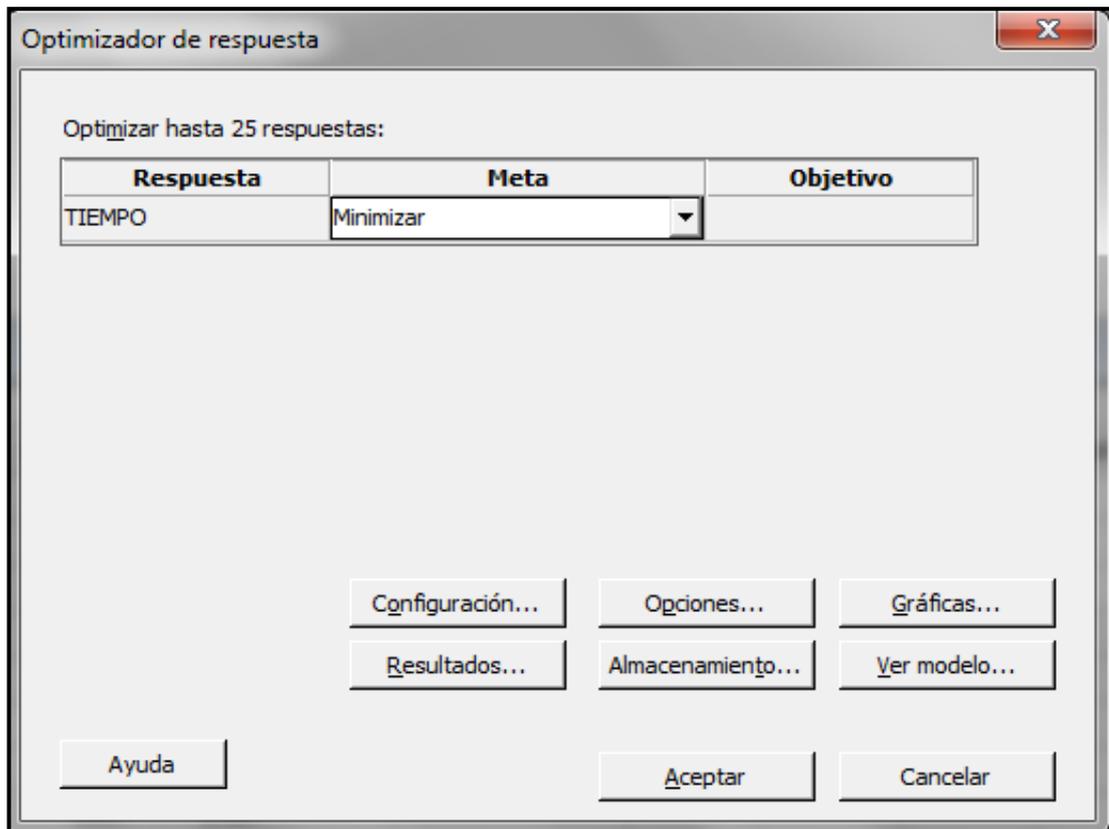


Figura 37. Gráfico de la ventana de optimizador de respuesta  
Elaboración propia

Con la herramienta optimizador de respuesta del software Minitab18 se determinó que los parámetros óptimos de secado son :

- a) Espesor de 3 mm
- b) Temperatura de 60°C
- c) Flujo de aire de 600 L/min

Sin embargo, se aprecia que no hay una diferencia significativa en el flujo de aire en la condición de temperatura de 60°C y espesor 3 mm, por lo que se

determina que el flujo de aire de 400 L/min es el flujo óptimo ya que reduce el costo de energía.

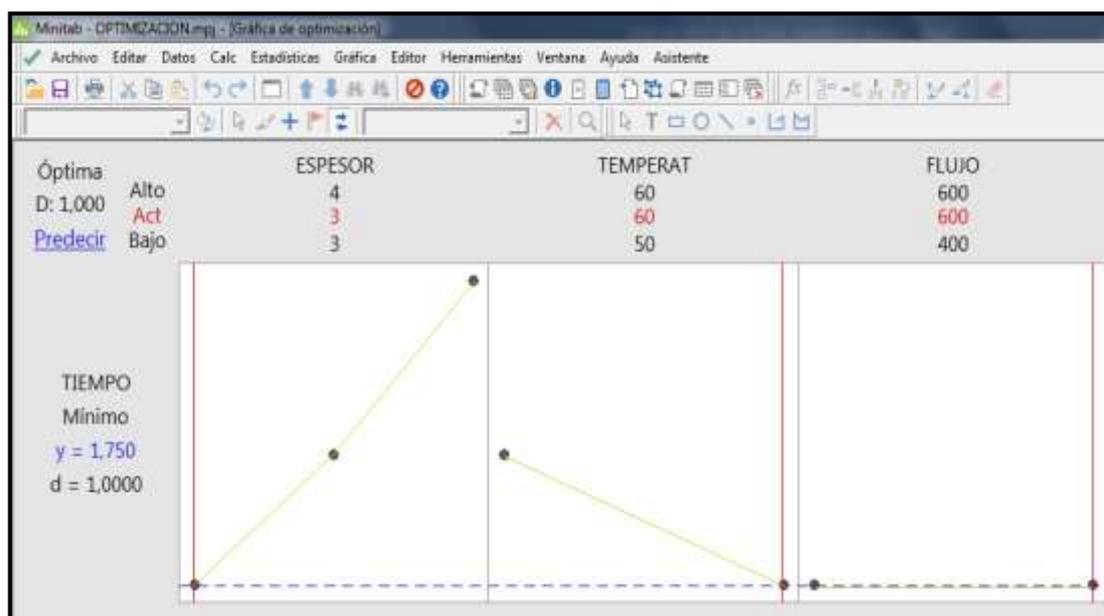


Figura 38. Gráficos de la determinación de parámetros óptimos de secado de la papa amarilla  
Elaboración propia

Tabla 13

Composición química proximal de la papa amarilla secado a las condiciones óptimas

Ensayos	Resultados (%)
Humedad	12,67
Proteína	8,15
Grasa	0,63
Cenizas	3,80
Carbohidratos	74,75
Calorías	337,27
Calorías provenientes de proteínas	32,60
Calorías provenientes de grasa	5,67
Calorías provenientes de carbohidratos	299,00

Ensayos emitidos por CERPER.S.A.



Figura 39 Producto seco a las condiciones óptimas  
Elaboración propia

#### 4.3. Otro tipo de resultados estadísticos

A las condiciones óptimas de secado de la papa amarilla y con el modelo matemático obtenido, la ecuación de la curva de secado queda expresada de la siguiente manera :

$$X = 2,70562 e^{(-1,82555t^{1,57177})} - 0,00067 t$$

Con la ecuación de la curva de secado se determina la gráfica de velocidad de secado.

$$N = -\left(\frac{Ls}{A}\right) \left(\frac{dX}{dt}\right) \frac{g}{cm^2h}$$

**Ls** = 2,15 g, peso del solido seco

$A = 26,3 \text{ cm}^2$ , área de la superficie del sólido.

Tabla 14  
Velocidad de secado

t (hr)	X = f (t)	X prom	dx/dt	N
0,1	2,57633957			
0,2	2,33918771	2,45776364	- 2,37151855	0,19362790
0,3	2,05463151	2,19690961	- 2,84556207	0,23233224
0,4	1,75547719	1,90505435	- 2,99154318	0,24425119
0,5	1,46374113	1,60960916	- 2,91736053	0,23819439
0,6	1,19374756	1,32874435	- 2,69993577	0,22044226
0,7	0,95380666	1,07377711	- 2,39940901	0,19590508
0,8	0,74759809	0,85070237	- 2,06208567	0,16836357
0,9	0,57541927	0,66150868	- 1,72178817	0,14057922
1,0	0,43528384	0,50535156	- 1,40135431	0,11441669
1,1	0,32383649	0,37956016	- 1,11447354	0,09099367
1,2	0,23706759	0,28045204	- 0,86768894	0,07084439
1,3	0,17083278	0,20395019	- 0,66234813	0,05407889
1,4	0,12119902	0,1460159	- 0,49633756	0,04052458
1,5	0,08464833	0,10292368	- 0,36550696	0,02984263

Elaboración propia

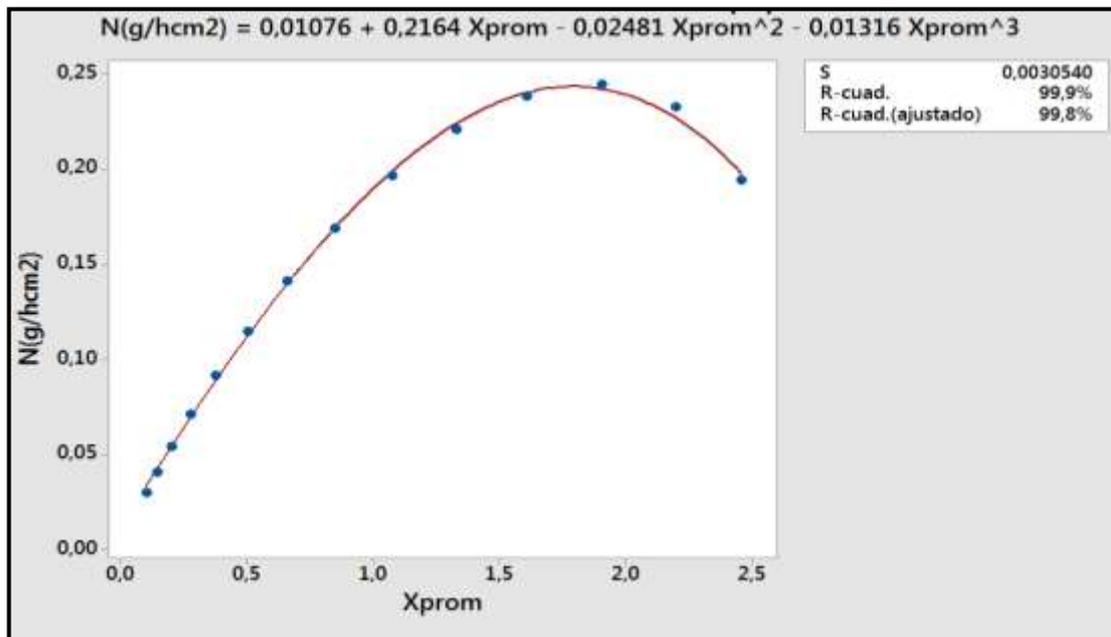


Figura 40 Gráfico de la velocidad de secado de la papa amarilla a las condiciones óptimas  
Elaboración propia

$$N = 0,01076 + 0,2164 X - 0,02481 X^2 - 0,01316 X^3 \frac{g}{cm^2 h}$$

Considerando una humedad final en base húmeda de 10% equivalente a 0,111 en base seca, se calcula el tiempo óptimo de secado.

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{0,111}^{3,183} \frac{dX}{0,01076 + 0,2164 X - 0,02481 X^2 - 0,01316 X^3} = 1,9 h$$

## **V DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **5.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados**

#### **Hipótesis general :**

El proceso de secado de la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) muestra resultados óptimos en un secador rotatorio discontinuo trabajando a las condiciones de temperatura de 60°C, espesor de 3,0 mm y flujo de aire caliente de 400 L/min, alcanzando un tiempo de secado óptimo de 1,9 horas, si se desea llegar a una humedad de 10% en base húmeda. Por ende podemos decir que es aceptada nuestra hipótesis general de la presente investigación

#### **Hipótesis específicas :**

- 1) Las propiedades físico químicas de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) son adecuadas para que se pueda realizar el proceso de secado de la papa amarilla en el secador rotatorio discontinuo ya que se ha observado mediante los ensayos emitidos por la CERPER S.A. que las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) se concentran a las condiciones óptimas de secado. Por lo tanto es aceptada la primera hipótesis específica de la presente investigación.
- 2) Se verificó que el proceso de secado de la papa amarilla (*solanum tuberosum*) depende de la temperatura, flujo de aire, espesor. Por lo que la segunda hipótesis específica del presente estudio es aceptada.

### **5.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

En 1993 López, A. realizó una evaluación de la papa Bintje cortada en un espesor de 2,5 mm a temperaturas de 60°C, 70°C, 80°C y 85°C y flujo de aire de 0,5, 1 y 1,5 m/s en una planta piloto de secado con flujo de aire en donde concluyeron que la influencia de la temperatura es más importante y significativo que la influencia de la velocidad del aire de secado al igual que nuestros resultados obtenidos en donde comprobamos que el flujo de aire no era significativo en las condiciones óptimas de secado.

En 2013 Bonilla, S. realizó el proceso de secado de papa *Solanum Tuberosum* para producir harina de papa y utilizarla en panificación. Para el proceso de secado cortó la papa en rodajas de espesores entre 3 y 5 mm e hizo un pre tratamiento en inmersión en bisulfito de sodio a 1% durante 10 min con el objetivo de evitar el pardeamiento que pueda provocar el secado de la papa, donde comprobó que las propiedades nutricionales se conservan al igual que el presente trabajo de investigación sin embargo al realizar el proceso de secado en un secador rotatorio discontinuo no fue necesario realizar el pre tratamiento ya que el flujo de aire que entra y sale evita el pardeamiento a diferencia de otro tipo de secado sin flujo de aire.

## CONCLUSIONES

- 1) Se realizó el proceso de secado y se obtuvo el tiempo de secado óptimo de 1,9 horas en un secador rotatorio discontinuo trabajando a las condiciones óptimas de secado, determinando así que el secador rotatorio discontinuo es apropiado para el secado de la papa amarilla (*Solanum tuberosum*), debido a que se alcanzó minimizar la humedad, reducir el tiempo de secado y trabajar a distintas condiciones
- 2) Las propiedades fisicoquímicas son apropiadas para secar la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) en el secador rotatorio discontinuo porque se ha observado mediante los ensayos emitidos por la CERPER S.A. que las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) se concentran a las condiciones óptimas de secado.
- 3) Se definió los parámetros óptimos de secado de la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) en un secador rotatorio discontinuo las cuales fueron temperatura de 60°C, espesor de 3,0 mm, y un flujo de aire caliente de 400 L/min logrando un tiempo de secado de 1,90 horas y el modelo matemático que mejor describió el proceso fue el modelo de Midilli ya que presenta el valor más alto del coeficiente de determinación igual a 0,999 y el menor valor de error cuadrático medio igual a 0,0001

## **RECOMENDACIONES**

- 1) Realizar investigaciones donde puedan desarrollar el proceso de secado de la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) en otros tipos de secadores.
- 2) Realizar trabajos de investigación dándole un pre tratamiento a la papa amarilla antes de someterla al proceso de secado para obtener un producto seco de mejor calidad.
- 3) Realizar investigaciones de secado de otras variedades de papa en el secador rotatorio discontinuo.
- 4) Evaluar la influencia de velocidad de rotación del secador rotario discontinuo en el secado de la papa amarilla.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángeles, C. (2016) *Secadores convectivos – fundamentos de cálculo y aplicación* (Proyecto de investigación) Universidad Nacional del Callao, Perú.
- Alonso, J., García – Jarquín, K., González – Lindo, K., & Benavente, M. (2014) Producción de harina de papa para puré instantáneo. *Nexo Revista Científica*, 27(2), 99 – 114
- Badui, S. (2006) *Química de los alimentos* (4<sup>ta</sup> Ed.) México : Pearson Education.
- Bonilla, S. (2013) *Harina de Papa Soloma (Solanum tuberosum) para Utilizarlo en Panificación* (tesis profesional) Universidad Doctor José Matías Delgado, El salvador.
- Carranza, A. (2010) *Implementación de una planta para la elaboración de puré de papa amarilla tumbay deshidratada con agregados* (tesis profesional) Universidad de Lima, Perú
- Calor y luz (2010, 29 de junio) *Calor y luz*. Mensaje dirigido a <http://www.noemi-g-noemi.blogspot.com/2010/06/5.html>.
- Centro Internacional de la papa (s.f.) *Potato*. Mensaje dirigido a <https://cipotato.org/crops/potato/>.
- Chamorro, D. (2012) *Construcción de una maquina secadora de pellets de balanceado* (tesis profesional). Universidad Técnica Del Norte, Ecuador
- Dávila, R. (2004) *Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire* (tesis profesional). Universidad de las Américas Puebla, México
- Deleite. (2013) *La papa peruana origen e historia*. Mensaje dirigido a <http://deleite-portal.blogspot.com/2013/10/la-papa-peruana-origen-e-historia.html>.
- Egúsquiza, E. (2000) *La papa producción, transformación y comercialización* Perú: International Potato Center, 2000
- Ertekin, C., Yaldiz O. (2003) *Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model*. Turquía : Journal of food engineering.
- FAO, (2008) *Año internacional de la papa, tesoro enterrado*. Mensaje dirigido a <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/origenes.html>.
- Fito, P. (2006) *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. España : Universidad Politécnica de Valencia
- Hernández, J., Quinto, P. (2005) *Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso*. México: Universidad de Quintana
- Incropera, F, (1996) *Fundamentos de transferencia de calor*, (4<sup>ta</sup> Ed.) México : Pearson Education
- Karim y Hawlader (2005) *Mathematical modelling and experimental Investigation of Tropical Fruits Drying*, Australia: International Journal of Heat and Mass Transfer
- Kneule Friedrich (1982) *El secado volumen 1 de la enciclopedia de la tecnología química*. España : Editorial Urmo, Bilbao
- Kreith F., Black W. (1990) *Basic Heat Transfer*, Harer & Row. USA: Publishers, New York

- Lima, A. (1999) *Fenómeno de Difusión en Sólidos Esferoidales Prolatos, estudio de caso: Secado de Banana* (tesis de doctorado) Universidad Estadual de Campinas, Brasil
- López, A., et al. (1993) *Modelización de la cinética de secado de patata cortada en láminas*. Universidad Pública de Navarra, España
- Luikov A. (1966) *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*, New York, USA
- Marca Perú (s.f.) *Productos oriundos, papa nativa peruana: el legado andino que alimenta al mundo*. Mensaje dirigido a [https://peru.info/es-pe/gastronomia/noticias/2/12/natural-y-saludable--nuestras-papas-nativas?fbclid=IwAR1ru3b703zIYf3f8xIJS8m4j9aTC9yh4XDu7Yva3u\\_qmp0BS70jmYQKqr8](https://peru.info/es-pe/gastronomia/noticias/2/12/natural-y-saludable--nuestras-papas-nativas?fbclid=IwAR1ru3b703zIYf3f8xIJS8m4j9aTC9yh4XDu7Yva3u_qmp0BS70jmYQKqr8).
- Moltado, A. (1984) Cultivo y mejoramiento de la papa. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books/about/Cultivo\\_y\\_mejoramiento\\_de\\_la\\_papa.html?id=ZLocZrEbTDIC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Cultivo_y_mejoramiento_de_la_papa.html?id=ZLocZrEbTDIC&redir_esc=y).
- Montes, E. et al. (2008) Modelado de la cinética de secado de ñame (discorea rotundata) en capa delgada, Revista ingeniería e investigación Vol. 28 N° 2
- Mujumdar A. (1987) *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker
- Nonhebel, G.; Mass, A.A. H., (2003) *Secado de sólidos en la industria química*. Barcelona : Reverté
- Osorio, C., Segura, C. (2018) *Proceso de secado de arracacha (arracacia xanthorrhiza) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo (tesis profesional)*. Universidad Nacional del Callao, Perú
- Ratti C., Mujumdar A., (1993) Fixed – bed batch drying of shrinking particles with time varying drying air conditions, Canada
- Roquel, C., Mercedes E., (2008) *Diseño de una línea de producción para la elaboración de harina de camote (ipomea batata)*. (Tesis profesional) Universidad de San Carlos, Guatemala
- Salcedo, J., Contreras, J., García, A., Fernández, A. (2016) *Modelado de la cinética de secado del afrecho de yuca (Manihot esculenta Crantz)* (Trabajo de investigación). Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. México
- Sanez, L. (2006) *Química de los alimentos*. (Proyecto de investigación) Universidad Nacional del Callao, Perú
- Treybal, Robert E. (1997) *Mass Transfer Operations* (3rd Ed). New York : Mc Graw Hill
- Vega, A., et al. (2005) *Cinética de transferencia de materia durante el proceso de rehidratación de cubos de pimiento seco (Capsicum Annuum L.) (Tesis profesional)*. Universidad politécnica de valencia, España

# **ANEXOS**

**ANEXO N° 1**  
**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

**“PROCESO DE SECADO DE LA PAPA AMARILLA (*Solanum tuberosum*) PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO”**

Tabla 15  
*Matriz de consistencia*

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cómo debe ser el proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo?	Definir el proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo.	El proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) depende de parámetros óptimos.	Y = proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) en un secador rotatorio discontinuo.	– Humedad final de la papa amarilla.	%	Gravimétrico
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> )?	a) Identificar las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> )	Las propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) son apropiadas para ser secadas en un secador rotatorio discontinuo.	X <sub>1</sub> = Propiedades fisicoquímicas de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> )	– Humedad inicial – Composición química proximal – Temperatura	% % °C	Gravimétrico Instrumental Instrumental
b) ¿Cuáles son los parámetros óptimos para el proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) en un secador rotatorio discontinuo?	b) Definir los parámetros óptimos para el proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ).	El proceso de secado de la papa amarilla ( <i>solanum tuberosum</i> ) depende de parámetros como temperatura, flujo de aire y tiempo.	X <sub>2</sub> = parámetros óptimos para el proceso de secado.	– Flujo de aire – Espesor	L/min mm	Instrumental Instrumental

Elaboración propia

## Anexo N° 2

### POSICIÓN TAXONÓMICA DE LA PAPA AMARILLA



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



"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

#### CONSTANCIA N° 135-USM-2016

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

La muestra vegetal (tubérculo), recibida de **Eva Milagros CARHUANCHO AYUQUE**; estudiante de la Universidad Nacional del Callao; ha sido estudiada y clasificada como: ***Solanum tuberosum* L.**; y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1981):

**DIVISION: MAGNOLIOPHYTA**

**CLASE: MAGNOLIOPSIDA**

**SUB CLASE: ASTERIDAE**

**ORDEN: SCROPHULARIALES**

**FAMILIA: SOLANACEAE**

**GENERO: *Solanum***

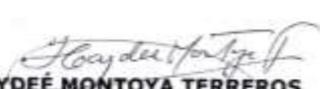
**ESPECIE: *Solanum tuberosum* L.**

Nombre vulgar: "papa amarilla".  
Determinado por: Mag. María Isabel La Torre A.

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

Fecha, 21 de junio de 2016



  
**Dra. HAYDEÉ MONTOYA TERREROS**  
JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

DD8

## Anexo N° 3

### ANÁLISIS DE LA PAPA AMARILLA ANTES Y DESPUÉS DEL SECADO

#### INFORME DE ENSAYO N° 1-07001/17

Pág. 1/1

Solicitante : MARCHENA SEGOVIA, ROBERTO GUILLERMO  
Domicilio legal : Jr. José María Arguedas N° 182 San Juan de Lurigancho - Lima - Lima  
Producto declarado : PAPA AMARILLA  
Cantidad de Muestras para el Ensayo : 1 muestra x 300 g  
 : Muestra proporcionada por el solicitante  
Identificación de la muestra : PRESENTACIÓN NATURAL  
Forma de Presentación : En bolsa de polietileno, cerrado  
Fecha de recepción : 2017 - 07 - 20  
Fecha de inicio del ensayo : 2017 - 07 - 21  
Fecha de término del ensayo : 2017 - 07 - 24  
Ensayo realizado en : Laboratorio de Físico Química  
Identificado con : H/S 17009794 (EXAI-13660-2017)  
Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestra descrita

Ensayos	Unidad	Resultados
Proteína (N x 6,25)	g/100 g	2,37
Grasa	g/100 g	0,35
Humedad	g/100 g	79,35
Ceniza	g/100 g	1,05
Carbohidratos	g/100 g	16,88
Calorías	Kcal/100g	80,15
Calorías provenientes de proteínas	Kcal/100g	9,48
Calorías provenientes de grasa	Kcal/100g	3,15
Calorías provenientes de carbohidratos	Kcal/100g	67,52

#### MÉTODOS

**Proteína:** AOAC 978.04, c3, 20th Ed. 2016. Nitrogen (total) (crude protein) in plants. Kjeldahl methods.  
**Ceniza:** AOAC 930.05, c3, 20th Ed 2016. Ash of plants  
**Grasa:** AOAC 930.09, c3, 20th Ed. 2016. Ether Extract of plants. Gravimetric method  
**Humedad:** AOAC 930.04, c3, 20th Ed.2016. Loss on Drying (Moisture) in plants.  
**Carbohidratos, Calorías, Calorías proveniente de las Proteínas, Grasas y Carbohidratos:** Por cálculo.

#### OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.  
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 31 de julio de 2017  
DA

## INFORME DE ENSAYO N° 1-07002/17

Pág. 1/1

Solicitante : **MARCHENA SEGOVIA, ROBERTO GUILLERMO**  
Domicilio legal : **Jr. José María Arguedas N° 162 San Juan de Lurigancho - Lima - Lima**  
Producto declarado : **PAPA AMARILLA SECA**  
Cantidad de Muestras para el Ensayo : **1 muestra x 200 g**  
 : **Muestra proporcionada por el solicitante**  
Identificación de la muestra : **PRESENTACIÓN POLVO**  
Forma de Presentación : **En bolsa de polietileno, cerrado**  
Fecha de recepción : **2017 - 07 - 20**  
Fecha de inicio del ensayo : **2017 - 07 - 21**  
Fecha de término del ensayo : **2017 - 07 - 24**  
Ensayo realizado en : **Laboratorio de Físico Química**  
Identificado con : **H/S 17009794 (EXAI-13660-2017)**  
Validez del documento : **Este documento es válido solo para la muestra descrita**

Ensayos	Unidad	Resultados
Proteína (N x 6,25)	g/100 g	8,15
Grasa	g/100 g	0,83
Humedad	g/100 g	12,67
Ceniza	g/100 g	3,80
Carbohidratos	g/100 g	74,75
Calorías	Kcal/100g	337,27
Calorías provenientes de proteínas	Kcal/100g	32,80
Calorías provenientes de grasa	Kcal/100g	6,87
Calorías provenientes de carbohidratos	Kcal/100g	299,00

### MÉTODOS

**Proteína:** AOAC 978.04, c3, 20Th Ed. 2016. Nitrogen (total) (crude protein) in plants. Kjeldahl methods.

**Ceniza:** AOAC 930.05, c3, 20th Ed 2016. Ash of plants

**Grasa:** AOAC 930.09, c3, 20th Ed. 2016. Ether Extract of plants. Gravimetric method

**Humedad:** AOAC 930.04, c3, 20th Ed.2016. Loss on Drying (Moisture) in plants.

**Carbohidratos, Calorías, Calorías proveniente de las Proteínas, Grasas y Carbohidratos:** Por cálculo.

### OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 31 de julio de 2017

DA

**Anexo N° 4**  
**DISEÑO FACTORIAL EXPERIMENTAL**

$$N^{\circ} \text{ Experimentos} = \text{Factor 1} * \text{Factor 2} * \text{Factor 3} = 3 * 2 * 2$$

$$N^{\circ} \text{ Experimentos} = 12$$

**Factor 1** : El factor espesor presenta 3 niveles (E1 = 3,0; E2 = 3,5; E3 = 4,0 mm)

**Factor 2** : El factor temperatura presenta 2 niveles (T1 = 50, T2 = 60°C)

**Factor 3** : El factor flujo de aire presenta 2 niveles (F1 = 400, F2 = 600 L/min)

Tabla 16  
*Detalles de experimentos*

N° Experimento	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Flujo(L/m)
1	E1	T1	F1
2	E1	T1	F2
3	E1	T2	F1
4	E1	T2	F2
5	E2	T1	F1
6	E2	T1	F2
7	E2	T2	F1
8	E2	T2	F2
9	E3	T1	F1
10	E3	T1	F2
11	E3	T2	F1
12	E3	T2	F2

Elaboración propia

## Anexo N° 5

### TABLAS DE DATOS DE LSA CURVAS DE SECADO

Tabla 17  
*Datos de la figura 30*

<b>t (min)</b>	<b>X (3 mm)</b>	<b>X (3,5 mm)</b>	<b>X (4,0 mm)</b>
0	3,09739369	3,10687023	3,09731544
15	1,99817101	2,34732824	2,55369128
30	1,09099223	1,62595420	2,03020134
45	0,62688615	1,10458015	1,58053691
60	0,35528121	0,75572519	1,19798658
75	0,20027435	0,48091603	0,87248322
90	0,10699588	0,29389313	0,64429530
105	0,04618198	0,16793893	0,47315436
120	0,02697759	0,12213740	0,37919463
135	0,01005944	0,07251908	0,26510067
150	0,00182899	0,04961832	0,20805369
165	0,00045725	0,02290076	0,13087248
180	0	0,00763359	0,10738255
195	0	0	0,08389262
210	0	0	0,04697987
225	0	0	0,02348993
240	0	0	0
255	0	0	0
270	0	0	0

Elaboración propia

Tabla 18  
 Datos de la figura 31

<b>t (min)</b>	<b>X (3 mm)</b>	<b>X (3,5 mm)</b>	<b>X (4,0 mm)</b>
0	3,09687641	3,10112360	3,09986413
15	2,15527388	2,49438202	2,61752717
30	1,39927569	1,87265918	2,16915761
45	0,73698506	1,24344569	1,74796196
60	0,39339067	0,71910112	1,33016304
75	0,16976007	0,45318352	0,97282609
90	0,05885016	0,28838951	0,65760870
105	0,02761431	0,19101124	0,47214674
120	0,01539158	0,11235955	0,35971467
135	0,00633771	0,06741573	0,24898098
150	0	0,04494382	0,17085598
165	0	0,00374532	0,10122283
180	0	0	0,05332880
195	0	0	0,01222826
210	0	0	0,00305707
225	0	0	0
240	0	0	0
255	0	0	0
270	0	0	0

Elaboración propia

Tabla 19  
 Datos de la figura 32

<b>t (min)</b>	<b>X (3 mm)</b>	<b>X (3,5 mm)</b>	<b>X (4,0 mm)</b>
0	3,18291551	3,20377358	3,19594595
15	2,20334262	2,60000000	2,82094595
30	1,45589601	2,06792453	2,40878378
45	0,85004643	1,54716981	1,97297297
60	0,43639740	1,08679245	1,55743243
75	0,21866295	0,72452830	1,21283784
90	0,07706592	0,42641509	0,91891892
105	0	0,22264151	0,66891892
120	0	0,09056604	0,47972973
135	0	0,03773585	0,34797297
150	0	0,01509434	0,21621622
165	0	0	0,14189189
180	0	0	0,07770270
195	0	0	0,03716216
210	0	0	0,02364865
225	0	0	0
240	0	0	0
255	0	0	0
270	0	0	0

Elaboración propia

Tabla 20  
 Datos de la figura 33

<b>t (min)</b>	<b>X (3 mm)</b>	<b>X (3,5 mm)</b>	<b>X (4,0 mm)</b>
0	3,07543860	3,07833397	3,10091124
15	1,97543860	2,39969431	2,59770503
30	1,28684211	1,78983569	2,09483631
45	0,73464912	1,21398548	1,66284171
60	0,31622807	0,75850210	1,23084711
75	0,06578947	0,44058082	0,88322646
90	0,00438596	0,23041651	0,65372933
105	0	0,11196026	0,44110699
120	0	0,06228506	0,31960850
135	0	0,03171571	0,21160985
150	0	0	0,14073574
165	0	0	0,09044887
180	0	0	0,04961188
195	0	0	0,03273709
210	0	0	0
225	0	0	0
240	0	0	0
255	0	0	0
270	0	0	0

Elaboración propia

## Anexo N° 6

### GRÁFICOS DE LAS CURVAS DE SECADO CON SUS AJUSTES DEL MODELO MIDILLI

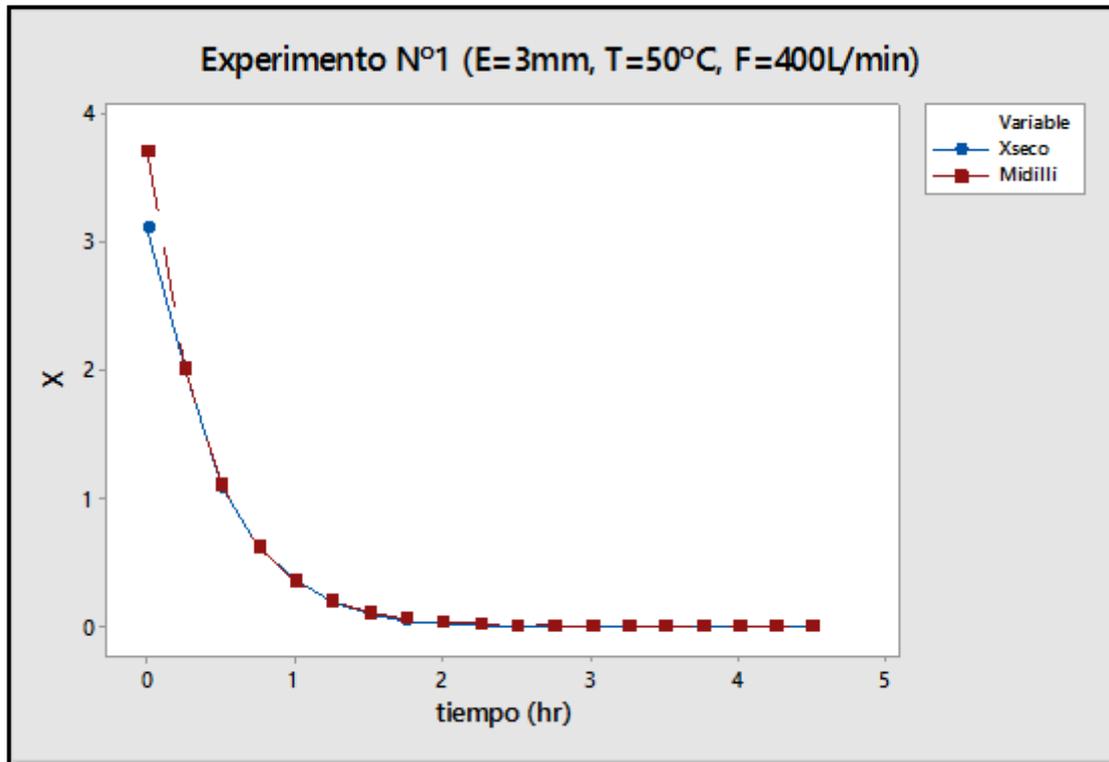


Figura 41. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T= 50°C, F = 400 L/min)

Elaboración propia.

#### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	3,69651	0,108676
k	2,36502	0,028794
n	0,96973	0,024947
c	-0,00103	0,000759

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

#### Resumen

Iteraciones	7
SSE final	0,0008892
DFE	14
MSE	0,0000635
S	0,0079698

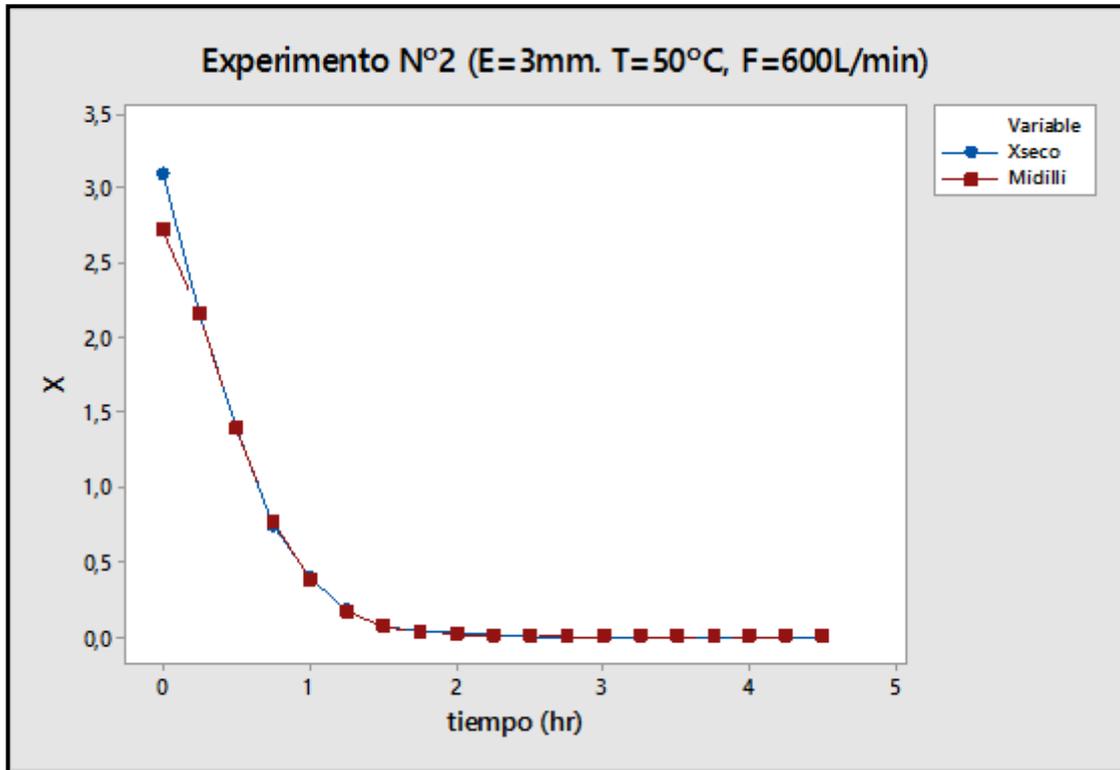


Figura 42. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T= 50°C, F = 600 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,71953	0,0402555
k	1,98087	0,0194298
n	1,55047	0,0354944
c	0,00019	0,0009476

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	6
SSE final	0,0015562
DFE	14
MSE	0,0001112
S	0,0105432

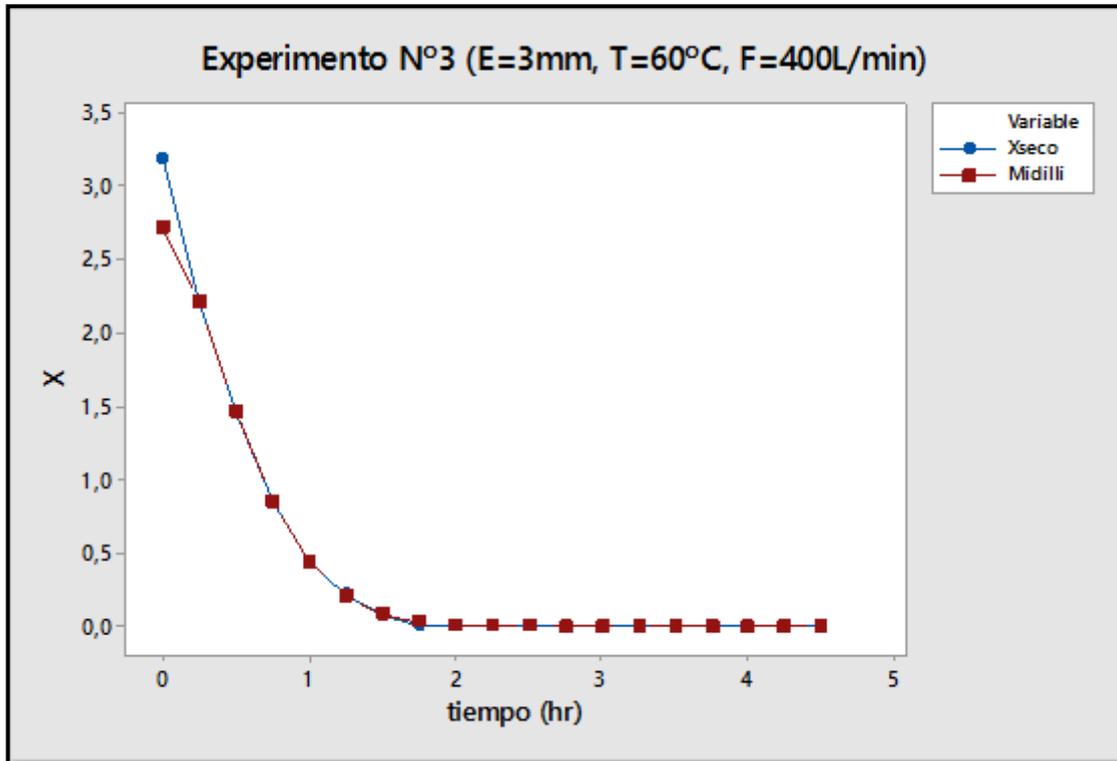


Figura 43. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T= 60°C, F = 400 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,70562	0,0365531
k	1,82555	0,0181327
n	1,57177	0,0342052
c	-0,00067	0,0009717

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	8
SSE final	0,0016241
DFE	14
MSE	0,0001160
S	0,0107708

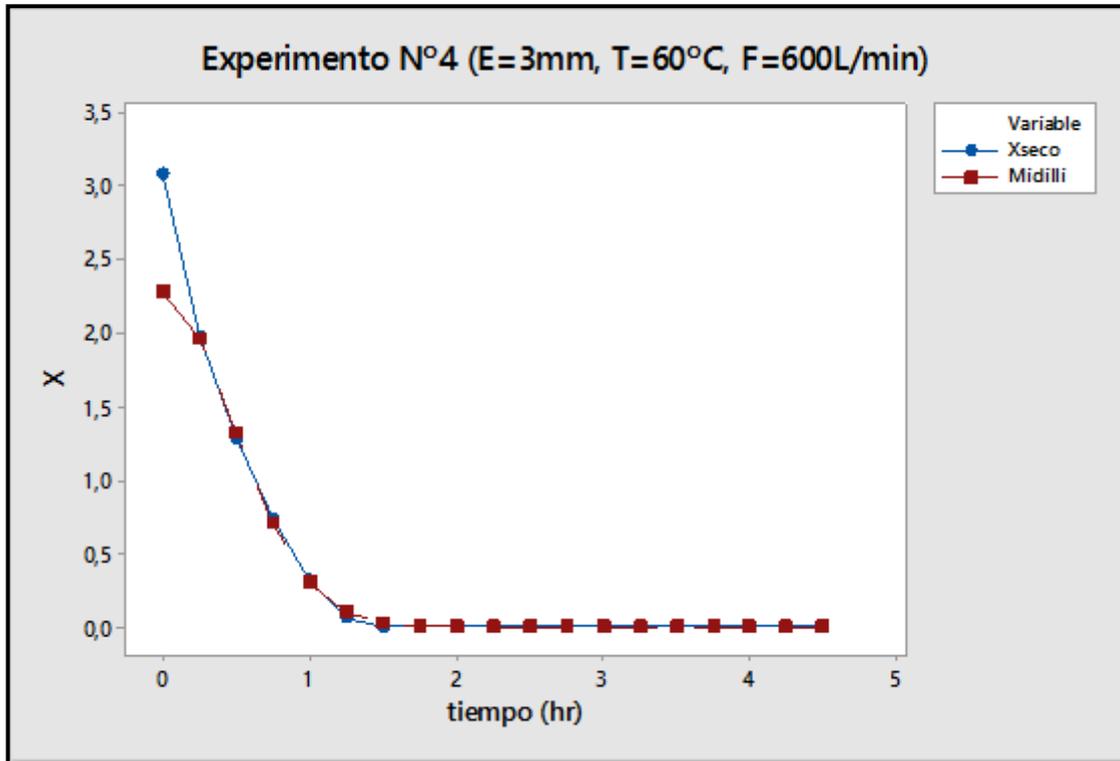


Figura 44. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,0 mm, T= 60°C, F = 600 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,28048	0,0472978
k	2,02267	0,0388222
n	1,88410	0,0746127
c	-0,00059	0,0015840

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	10
SSE final	0,0044471
DFE	14
MSE	0,0003176
S	0,0178227

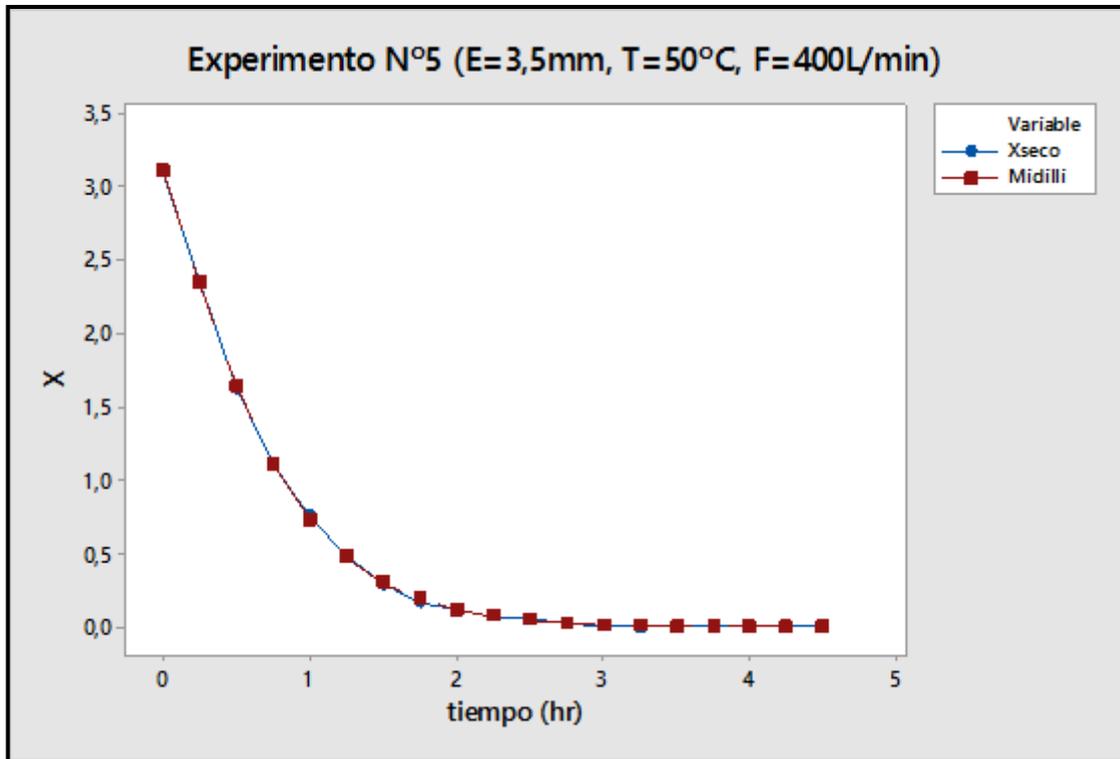


Figura 45. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T= 50°C, F = 400 L/min)  
Elaboración propia.

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	3,11419	0,0458947
k	1,44596	0,0180148
n	1,17224	0,0228241
c	-0,00111	0,0010673

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	7
SSE final	0,0015456
DFE	14
MSE	0,0001104
S	0,0105072

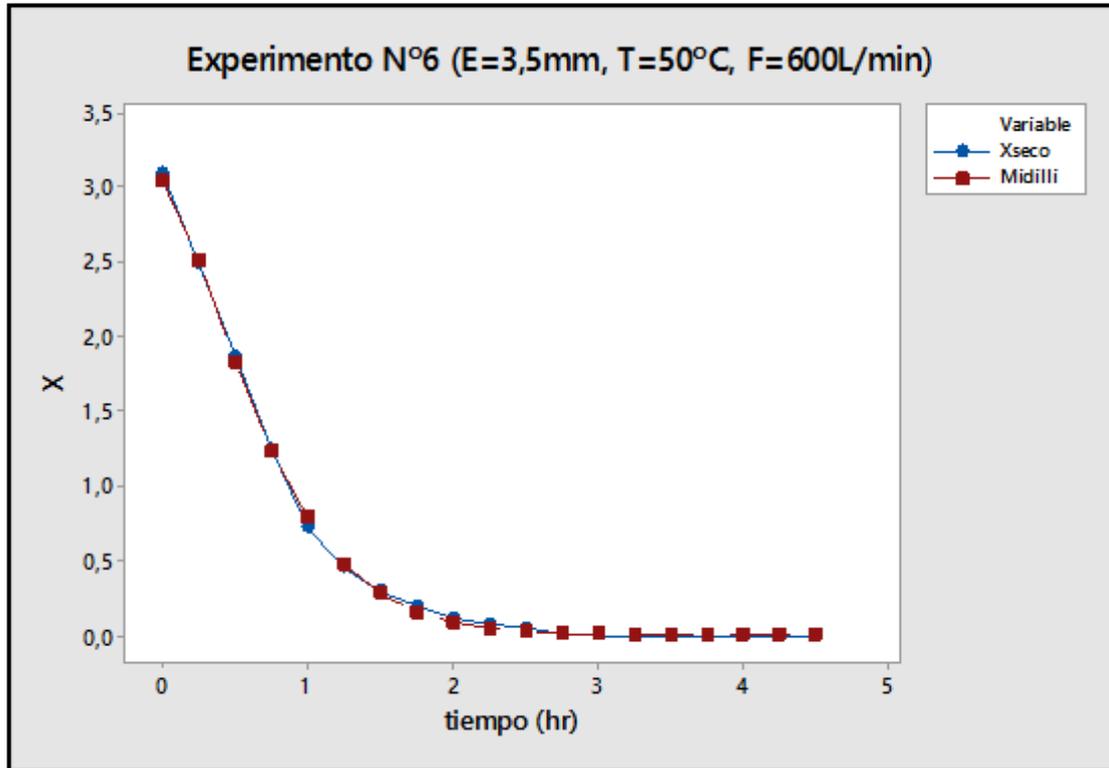


Figura 46. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T= 50°C, F = 600 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	3,04491	0,0830792
k	1,36047	0,0363989
n	1,41393	0,0611287
c	0,00127	0,0026181

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	10
SSE final	0,0106457
DFE	14
MSE	0,0007604
S	0,0275754

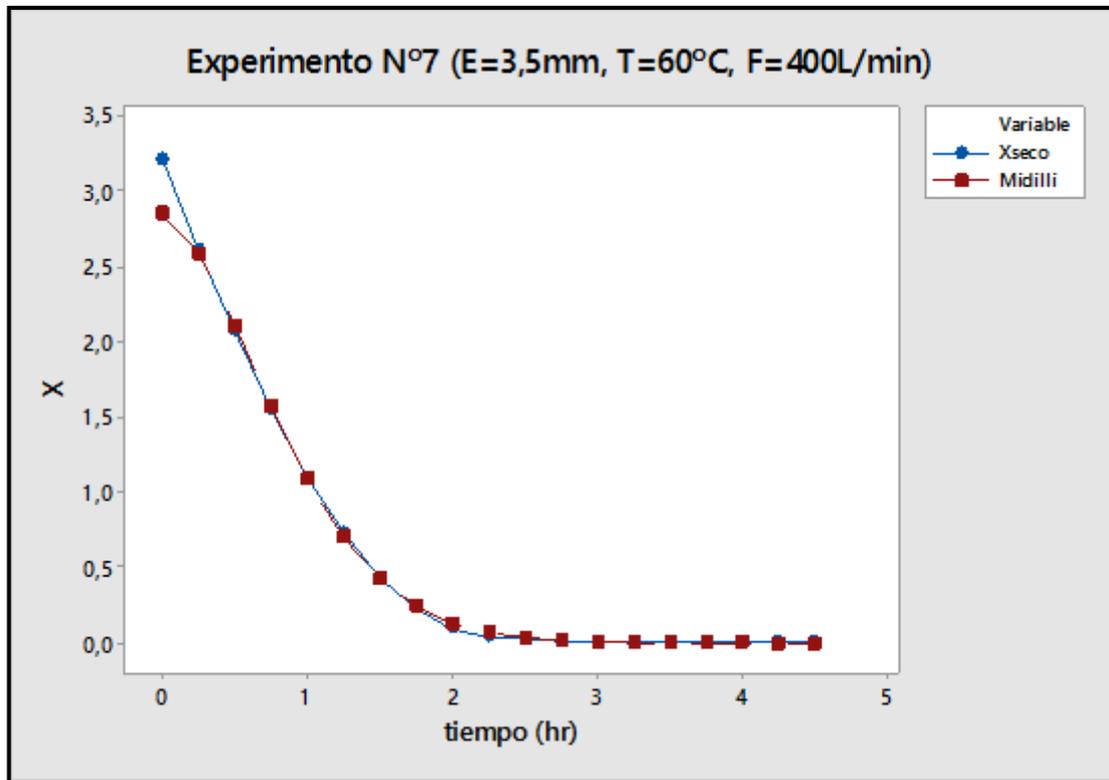


Figura 47. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T= 60°C, F = 600 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,83937	0,0343021
k	0,96964	0,0181721
n	1,67706	0,0402119
c	-0,00179	0,0017899

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	9
SSE final	0,0049029
DFE	14
MSE	0,0003502
S	0,0187139

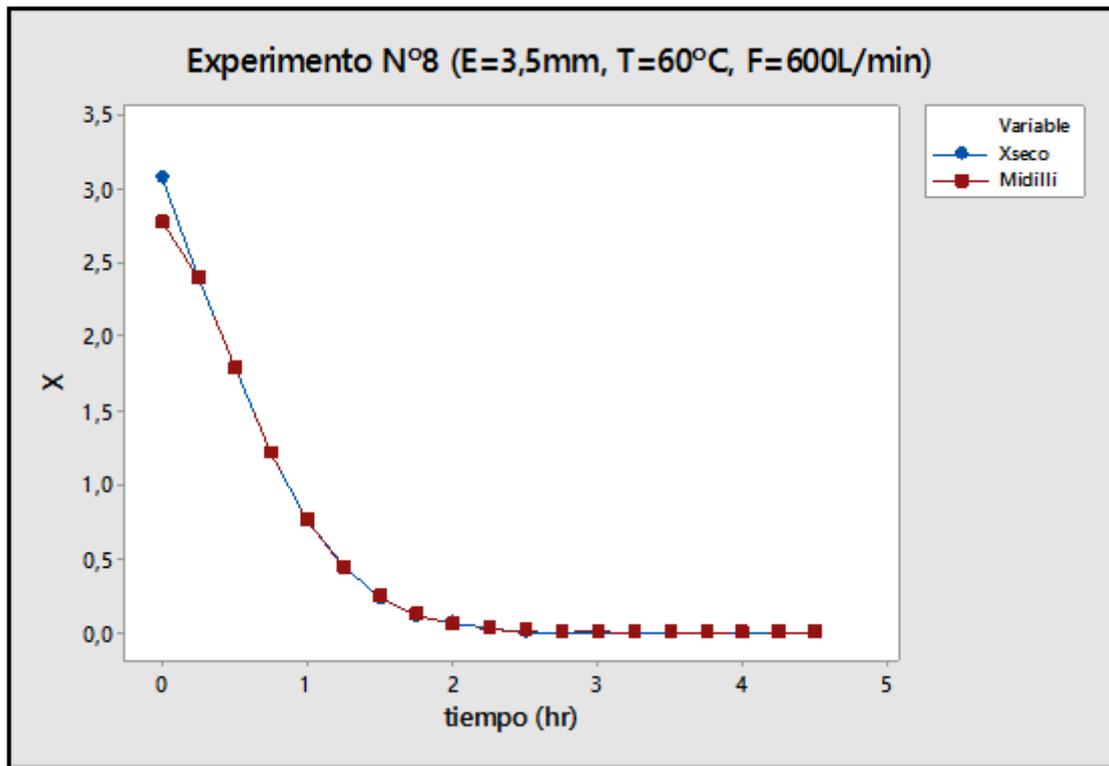


Figura 48. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 3,5 mm, T= 60°C, F = 400 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,77690	0,0119389
k	1,30169	0,0061053
n	1,57489	0,0119664
c	-0,00033	0,0004513

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	9
SSE final	0,0003295
DFE	14
MSE	0,0000235
S	0,0048517

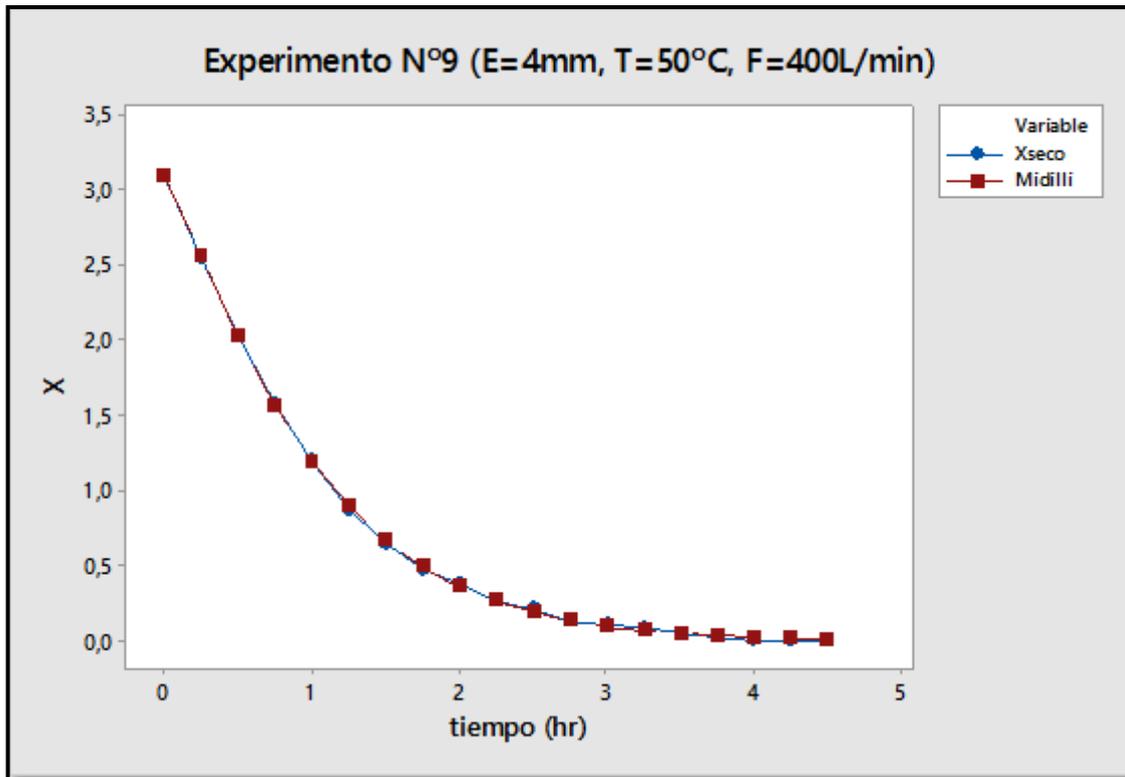


Figura 49. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 50°C, F = 400 L/min)

Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,92078	0,0386702
k	0,79377	0,0183140
n	1,43673	0,0358342
c	-0,00206	0,0022713

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	8
SSE final	0,0055881
DFE	14
MSE	0,0003992
S	0,0199788

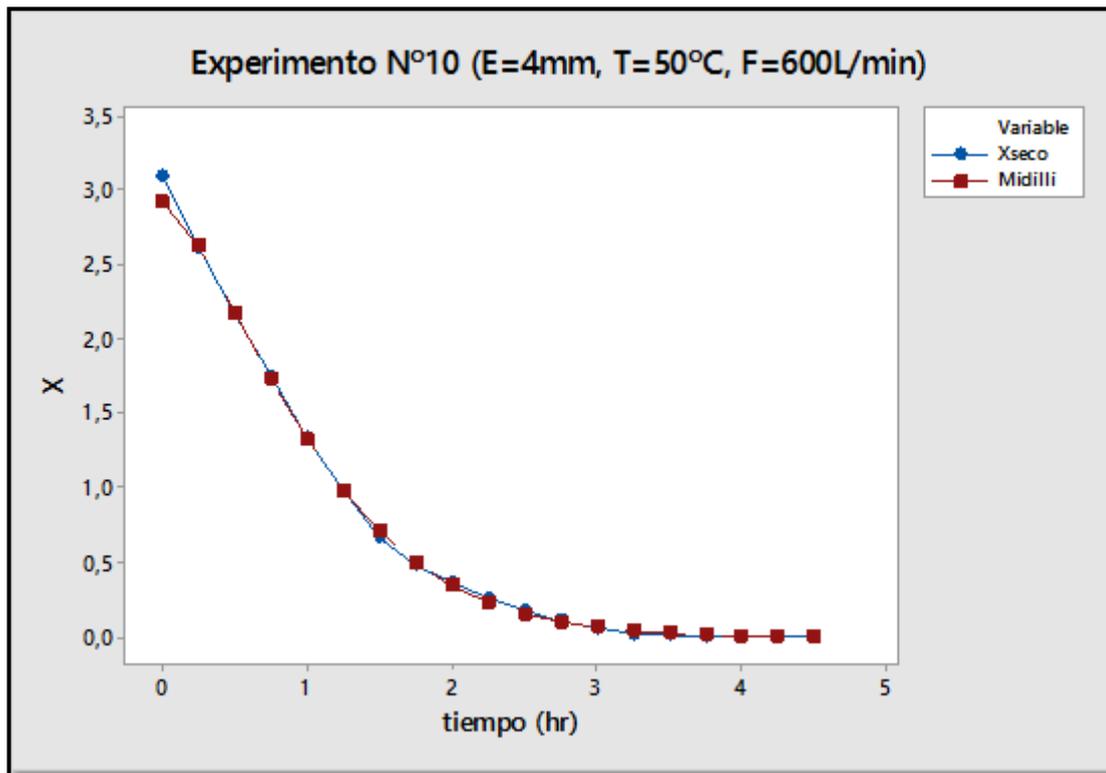


Figura 50. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 50°C, F= 600 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	3,10004	0,0477822
k	0,95579	0,0194125
n	1,16414	0,0285194
c	-0,00212	0,0021551

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	8
SSE final	0,0036504
DFE	14
MSE	0,0002607
S	0,0161474

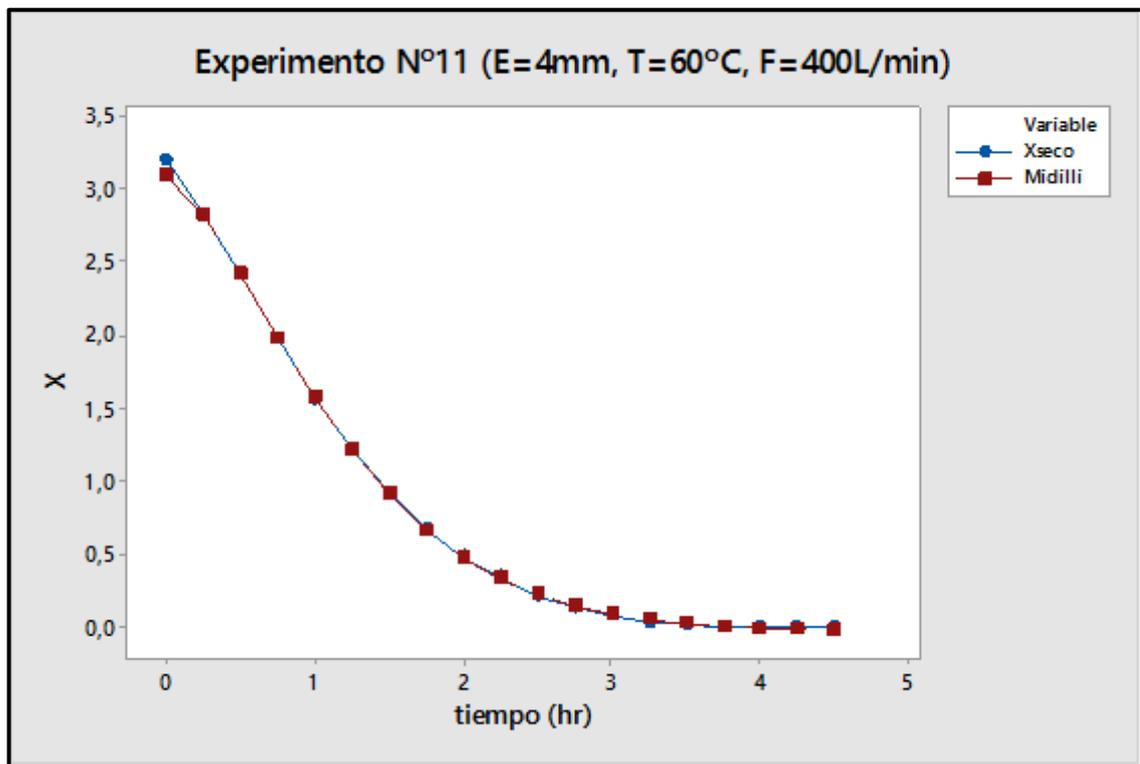


Figura 51. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T = 60°C, F = 400 L/min)  
Elaboración propia.

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	3,07891	0,0196976
k	0,67055	0,0087079
n	1,45977	0,0187706
c	-0,00553	0,0014227

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	9
SSE final	0,0018239
DFE	14
MSE	0,0001303
S	0,0114138

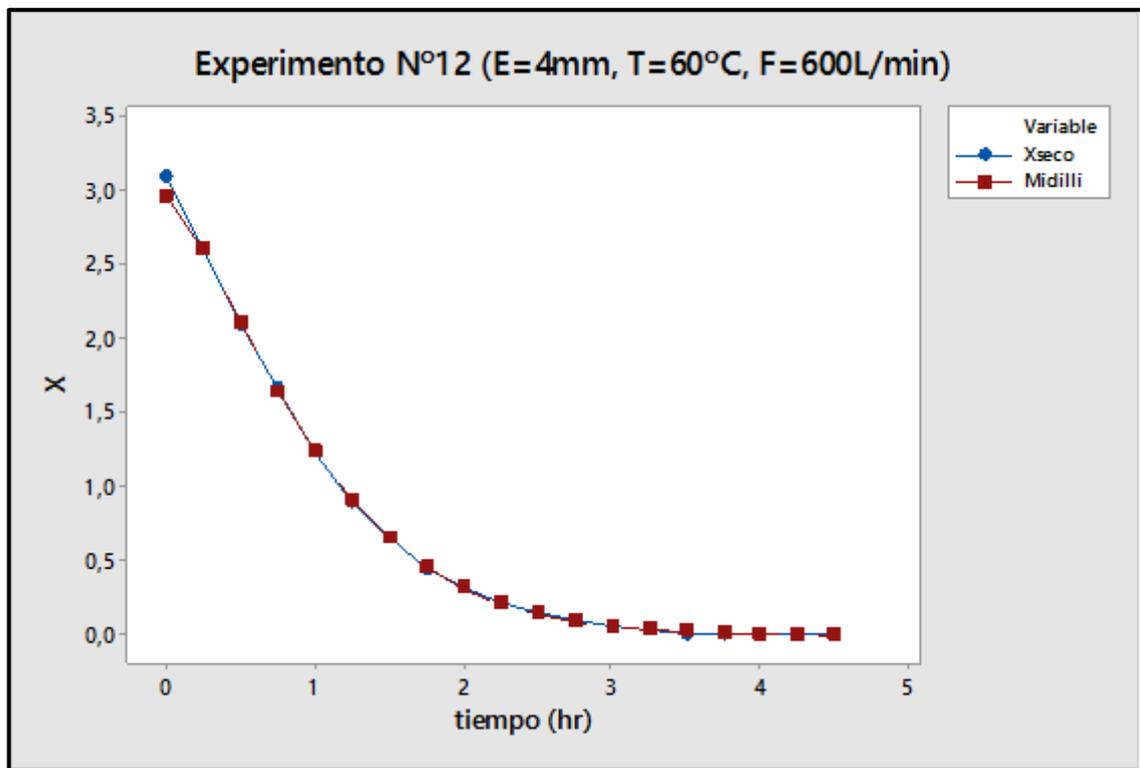


Figura 52. Curvas de secado con sus ajustes del modelo de Midilli (E = 4,0 mm, T= 60°C, F = 600 L/min)  
Elaboración propia

### Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
a	2,96553	0,0255408
k	0,87520	0,0116805
n	1,36000	0,0207554
c	-0,00233	0,0013206

$$X_{seco} = a * \exp(-k * tiempo ^ n) + c * tiempo$$

### Resumen

Iteraciones	7
SSE final	0,0018671
DFE	14
MSE	0,0001334
S	0,0115483

## Anexo N° 7

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CONSTANTES DE CADA MOEDLO

### Modelo de newton

$$X = e^{-kt}$$

Tabla 21  
*Modelo de newton*

MODELO DE NEWTON							
Exp.	Espesor (mm)	T. (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo k	MSE	S	R <sup>2</sup>
1	3	50	400	0,865071	0,3436600	0,5862250	0,656340
2	3	50	600	0,806471	0,3896140	0,6241910	0,610386
3	3	60	400	0,771394	0,4246230	0,6516310	0,575377
4	3	60	600	0,885247	0,3567940	0,5973230	0,643206
5	3,5	50	400	0,585870	0,4418650	0,6647290	0,558135
6	3,5	50	600	0,565923	0,5013580	0,7080670	0,498642
7	3,5	60	400	0,487496	0,6108390	0,7815620	0,389161
8	3,5	60	600	0,597679	0,4745120	0,6888480	0,525488
9	4	50	400	0,380612	0,5549110	0,7449240	0,445089
10	4	50	600	0,376987	0,6232550	0,7894650	0,376745
11	4	60	400	0,311460	0,7812620	0,8838900	0,218738
12	4	60	600	0,397026	0,5922750	0,7695940	0,407725

Elaboración propia

## Modelo de Henderson – Pabis

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

Tabla 22  
Modelo de Henderson Pabis

MODELO DE HENDERSON - PABIS								
Exp.	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo		MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	k			
1	3	50	400	3,1531700	2,092840	0,0015470	0,0393316	0,998453
2	3	50	600	3,2110400	1,901140	0,0069443	0,0833323	0,9930557
3	3	60	400	3,2900400	1,846500	0,0067374	0,0820819	0,9932626
4	3	60	600	3,1523800	2,038460	0,0065970	0,0812219	0,993403
5	3,5	50	400	3,2087900	1,455800	0,0031801	0,0563925	0,9968199
6	3,5	50	600	3,2950500	1,401490	0,0118650	0,1089270	0,988135
7	3,5	60	400	3,4149400	1,233710	0,0182217	0,1349880	0,9817783
8	3,5	60	600	3,2491700	1,441160	0,0114074	0,1068050	0,9885926
9	4	50	400	3,2245200	1,031680	0,0039303	0,0626924	0,9960697
10	4	50	600	3,3049900	1,007380	0,0131795	0,1148020	0,9868205
11	4	60	400	3,4697400	0,902960	0,0206214	0,1436010	0,9793786
12	4	60	600	3,2859300	1,049470	0,0099064	0,0995311	0,9900936

Elaboración propia

## Modelo de Midilli

$$X = ae^{(-kt^n)} + ct$$

Tabla 23  
Modelo de Midilli.

MODELO DE MIDILLI										
Exp.	Espesor (mm)	T(°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo				MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	k	n	c			
1	3	50	400	3,69651	2,36502	0,96973	-0,00103	0,0000635	0,0079698	0,9999365
2	3	50	600	2,71953	1,98087	1,55047	0,00019	0,0001112	0,0105432	0,9998888
3	3	60	400	2,70562	1,82555	1,57177	-0,00067	0,0001160	0,0107708	0,9998840
4	3	60	600	2,28048	2,02267	1,88410	-0,00059	0,0003176	0,0178227	0,9996824
5	3,5	50	400	3,11419	1,44596	1,17224	-0,00111	0,0001104	0,0105072	0,9998896
6	3,5	50	600	3,04491	1,36047	1,41393	0,00127	0,0007604	0,0275754	0,9992396
7	3,5	60	400	2,83937	0,96964	1,67706	-0,00179	0,0003502	0,0187139	0,9996498
8	3,5	60	600	2,77690	1,30169	1,57489	-0,00033	0,0000235	0,0048517	0,9999765
9	4	50	400	3,10004	0,95579	1,16414	-0,00212	0,0002607	0,0161474	0,9997393
10	4	50	600	2,92078	0,79377	1,43673	-0,00206	0,0003992	0,0199788	0,9996008
11	4	60	400	3,07891	0,67055	1,45977	-0,00553	0,0001303	0,0114138	0,9998697
12	4	60	600	2,96553	0,87520	1,36000	-0,00233	0,0001334	0,0115483	0,9998666

Elaboración propia

## Modelo de dos términos

$$X = ae^{-pt} + be^{-qt}$$

Tabla 24  
Modelo de dos términos

MODELO DE DOS TERMINOS										
Exp.	Espesor (mm)	T (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo				MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	p	b	q			
1	3	50	400	8,35300	1,61320	-5,22220	1,41402	0,0011953	0,0345730	0,9988047
2	3	50	600	10,98380	1,33630	-7,81400	1,18400	0,0046858	0,0684530	0,9953142
3	3	60	400	10,88990	1,24450	-7,65030	1,08640	0,0043718	0,0661194	0,9956282
4	3	60	600	-6,59173	3,10986	9,67951	2,83759	0,0157881	0,1256510	0,9842119
5	3,5	50	400	8,36630	1,04369	-5,20704	0,89466	0,0028918	0,0537757	0,9971082
6	3,5	50	600	12,00830	0,84410	-9,24780	0,77540	0,0365493	0,1911790	0,9634507
7	3,5	60	400	11,51290	0,66580	-8,74400	0,59440	0,0543121	0,2330500	0,9456879
8	3,5	60	600	12,86540	0,81570	-10,11200	0,74170	0,0301751	0,1737100	0,9698249
9	4	50	400	6,94952	0,74353	-3,79482	0,67062	0,0280172	0,1673830	0,9719828
10	4	50	600	13,94080	0,55950	-11,24610	0,51070	0,0448029	0,2116670	0,9551971
11	4	60	400	12,67460	0,62830	-9,99730	0,60430	0,0993630	0,3152190	0,9006370
12	4	60	600	12,89070	0,59690	-10,16440	0,54250	0,0361206	0,1900540	0,9638794

Elaboración propia

## Modelo exponencial de dos términos

$$X = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-akt}$$

Tabla 25  
Modelo exponencial de dos términos

MODELO EXPONENCIAL DE DOS TERMINOS								
Exp.	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo		MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	k			
1	3	50	400	4,17146	2,55606	0,2591100	0,5090290	0,740890
2	3	50	600	4,41230	2,38523	0,2596230	0,5093200	0,740377
3	3	60	400	4,42986	2,27328	0,2816620	0,5307190	0,718338
4	3	60	600	4,17285	2,45315	0,2561290	0,5060920	0,743871
5	3,5	50	400	4,37778	1,82091	0,2617160	0,5115820	0,738284
6	3,5	50	600	4,66194	1,81085	0,2602810	0,5101770	0,739719
7	3,5	60	400	4,75273	1,55854	0,2896470	0,5381880	0,710353
8	3,5	60	600	4,54075	1,82849	0,2555780	0,5055480	0,744422
9	4	50	400	4,52105	1,32723	0,2609780	0,5108600	0,739022
10	4	50	600	4,68149	1,29853	0,2611020	0,5109810	0,738898
11	4	60	400	4,94049	1,17443	0,2871090	0,5358250	0,712891
12	4	60	600	4,63619	1,35031	0,2610350	0,5109160	0,738965

Elaboración propia

## Modelo de Wang y Singh

$$X = 1 + at + kt^2$$

Tabla 26  
Modelo de Wang Singh

MODELO DE WANG Y SINGH								
Exp.	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo		MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	k			
1	3	50	400	-0,6310640	0,093844	0,3515780	0,5929400	0,648422
2	3	50	600	-0,6112600	0,088424	0,3964970	0,6296800	0,603503
3	3	60	400	-0,5934500	0,083643	0,4320080	0,6572730	0,567992
4	3	60	600	-0,6512120	0,098888	0,3632040	0,6026640	0,636796
5	3,5	50	400	-0,4358360	0,042977	0,4475920	0,6690230	0,552408
6	3,5	50	600	-0,4168780	0,037742	0,5078730	0,7126520	0,492127
7	3,5	60	400	-0,3117910	0,009888	0,6137850	0,7834440	0,386215
8	3,5	60	600	-0,4531950	0,046923	0,4799000	0,6927480	0,520100
9	4	50	400	-0,1368590	-0,032187	0,5430910	0,7369470	0,456909
10	4	50	600	-0,1104450	-0,040683	0,6049400	0,7777790	0,395060
11	4	60	400	0,0545328	-0,082769	0,7342150	0,8568630	0,265785
12	4	60	600	-0,1546170	-0,029256	0,5801410	0,7616700	0,419859

Elaboración propia

## Modelo logarítmico

$$X = ae^{-kt} + c$$

Tabla 27  
Modelo logarítmico

MODELO LOGARITMICO									
Exp.	Espesor (mm)	T. (°C)	Flujo (L/min)	Constantes de modelo			MSE	S	R <sup>2</sup>
				a	k	c			
1	3	50	400	3,1641200	2,06025	-0,01571	0,0014692	0,0383300	0,9985308
2	3	50	600	3,2397900	1,83291	-0,03959	0,0063278	0,0795473	0,9936722
3	3	60	400	3,3220800	1,77301	-0,04483	0,0058451	0,0764531	0,9941549
4	3	60	600	3,1810800	1,96636	-0,03852	0,0059658	0,0772384	0,9940342
5	3,5	50	400	3,2345700	1,39595	-0,04248	0,0024621	0,0496194	0,9975379
6	3,5	50	600	3,3388500	1,31728	-0,06763	0,0103601	0,1017850	0,9896399
7	3,5	60	400	3,4933400	1,11230	-0,12076	0,0134979	0,1161800	0,9865021
8	3,5	60	600	3,2904000	1,34695	-0,07363	0,0093624	0,0967594	0,9906376
9	4	50	400	3,2706400	0,95388	-0,08183	0,0022908	0,0478621	0,9977092
10	4	50	600	3,4022100	0,87717	-0,15754	0,0075448	0,0868608	0,9924552
11	4	60	400	3,6322700	0,74143	-0,25015	0,0100187	0,1000940	0,9899813
12	4	60	600	3,3640800	0,93355	-0,12946	0,0056987	0,0754900	0,9943013

Elaboración

propia

## Anexo N° 8

### ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA LA ELECCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO CON EL SOFTWARE MINITAB 18

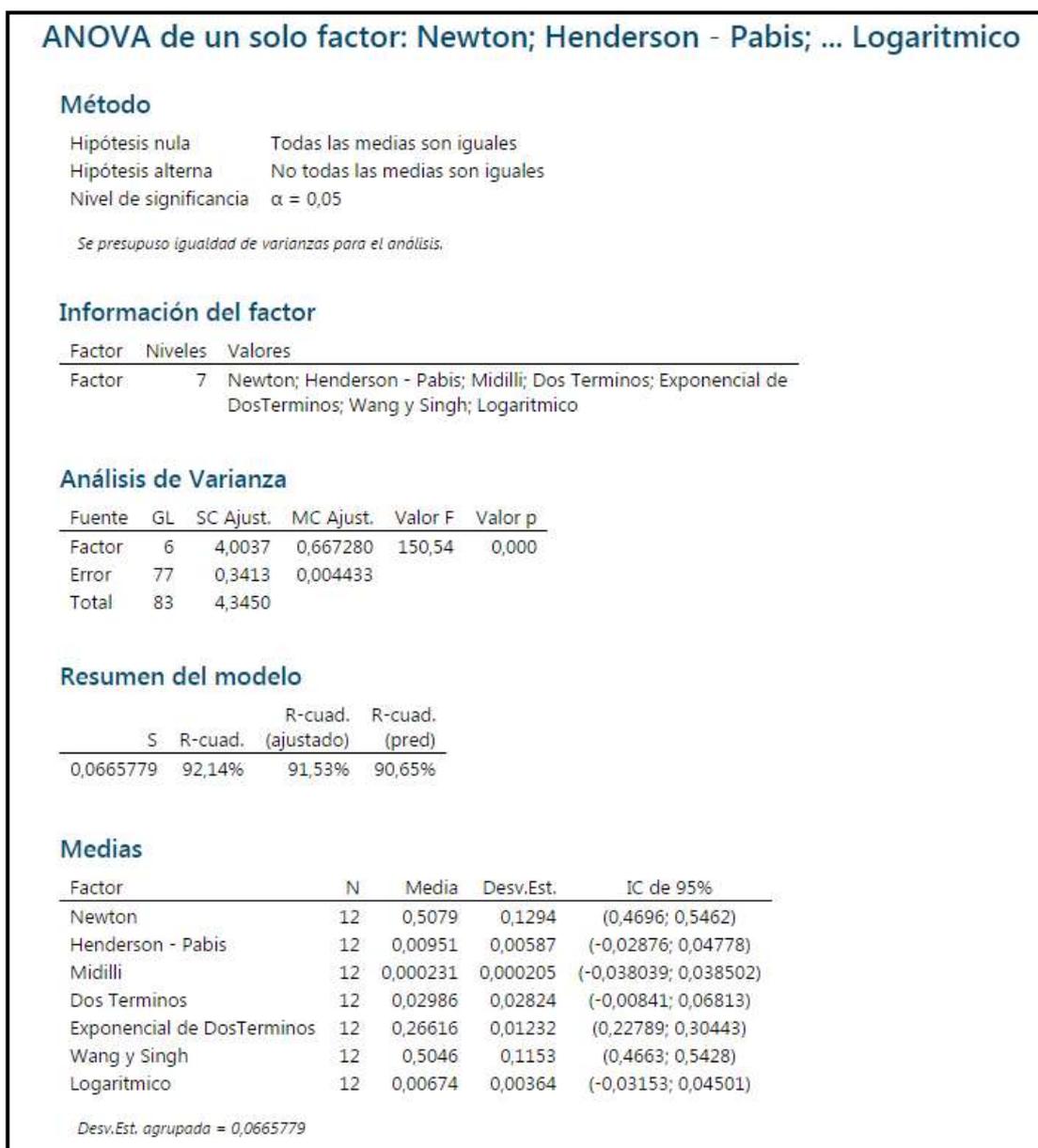


Figura 53. Análisis de varianza (ANOVA) para la elección del modelo matemático en el software Minitab 18  
 Elaboración propia

### Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Newton	12	0,5079	A
Wang y Singh	12	0,5046	A
Exponencial de DosTerminos	12	0,26616	B
Dos Terminos	12	0,02986	C
Henderson - Pabis	12	0,00951	C
Logaritmico	12	0,00674	C
Midilli	12	0,000231	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Henderson - - Newton	-0,4984	0,0272	(-0,5807; -0,4161)	-18,34	0,000
Midilli - Newton	-0,5077	0,0272	(-0,5899; -0,4254)	-18,68	0,000
Dos Terminos - Newton	-0,4781	0,0272	(-0,5603; -0,3958)	-17,59	0,000
Exponencial - Newton	-0,2417	0,0272	(-0,3240; -0,1595)	-8,89	0,000
Wang y Singh - Newton	-0,0033	0,0272	(-0,0856; 0,0789)	-0,12	1,000
Logaritmico - Newton	-0,5012	0,0272	(-0,5834; -0,4189)	-18,44	0,000
Midilli - Henderson -	-0,0093	0,0272	(-0,0915; 0,0730)	-0,34	1,000
Dos Terminos - Henderson -	0,0203	0,0272	(-0,0619; 0,1026)	0,75	0,989
Exponencial - Henderson -	0,2567	0,0272	(0,1744; 0,3389)	9,44	0,000
Wang y Singh - Henderson -	0,4951	0,0272	(0,4128; 0,5773)	18,21	0,000
Logaritmico - Henderson -	-0,0028	0,0272	(-0,0850; 0,0795)	-0,10	1,000
Dos Terminos - Midilli	0,0296	0,0272	(-0,0526; 0,1119)	1,09	0,929
Exponencial - Midilli	0,2659	0,0272	(0,1837; 0,3482)	9,78	0,000
Wang y Singh - Midilli	0,5043	0,0272	(0,4221; 0,5866)	18,56	0,000
Logaritmico - Midilli	0,0065	0,0272	(-0,0758; 0,0888)	0,24	1,000
Exponencial - Dos Terminos	0,2363	0,0272	(0,1540; 0,3186)	8,69	0,000
Wang y Singh - Dos Terminos	0,4747	0,0272	(0,3925; 0,5570)	17,47	0,000
Logaritmico - Dos Terminos	-0,0231	0,0272	(-0,1054; 0,0591)	-0,85	0,979
Wang y Singh - Exponencial	0,2384	0,0272	(0,1561; 0,3207)	8,77	0,000
Logaritmico - Exponencial	-0,2594	0,0272	(-0,3417; -0,1772)	-9,54	0,000
Logaritmico - Wang y Singh	-0,4978	0,0272	(-0,5801; -0,4156)	-18,32	0,000

Nivel de confianza individual = 99,66%

Figura 54. Comparaciones en parejas de Tukey  
Elaboración propia

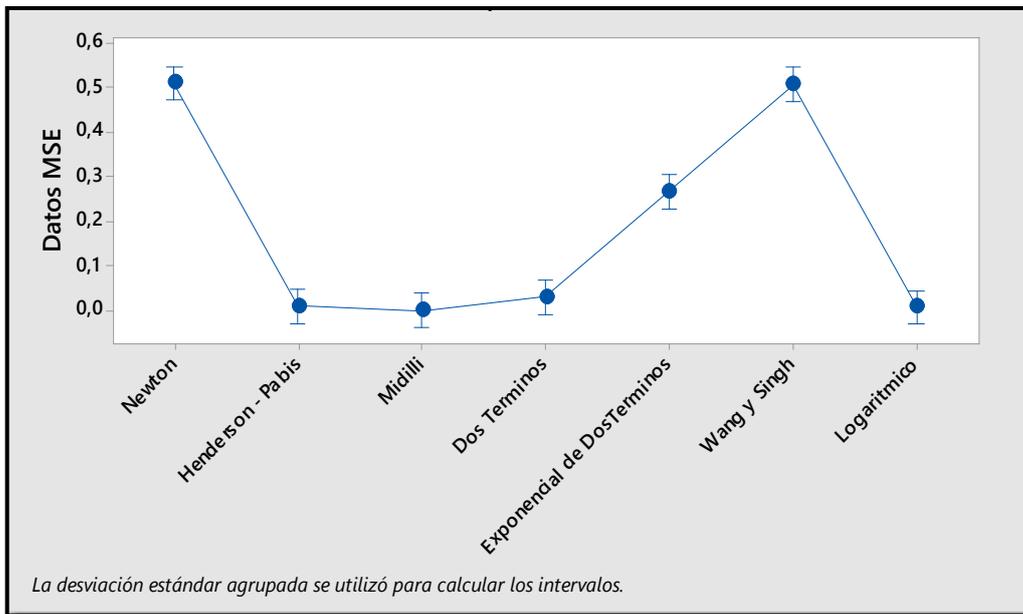


Figura 55 Gráfico de intervalos de los modelos matemáticos 95% IC para la media  
Elaboración propia

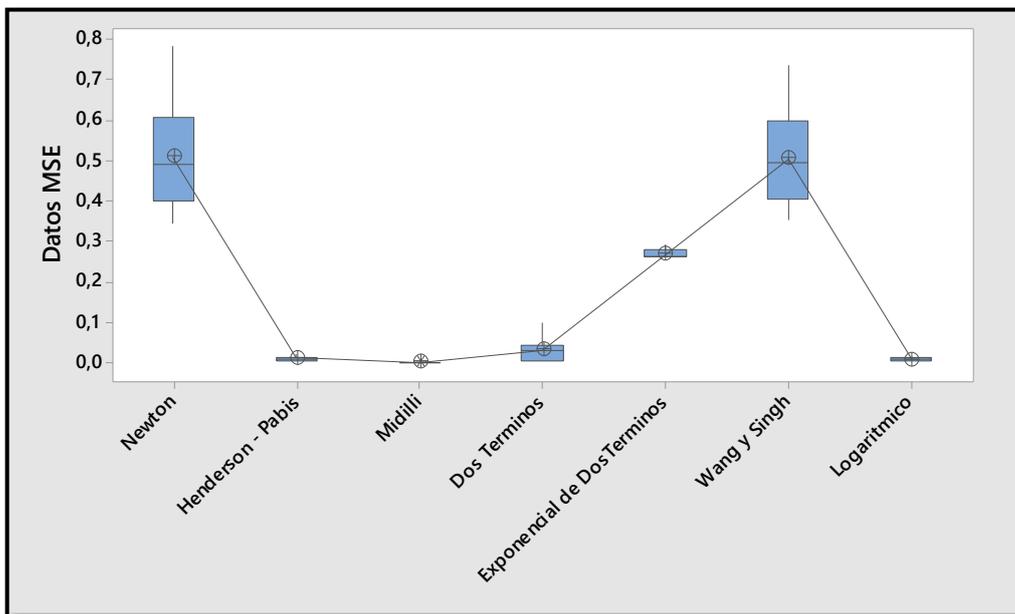


Figura 56. Gráfica de caja de los modelos matemáticos  
Elaboración propia

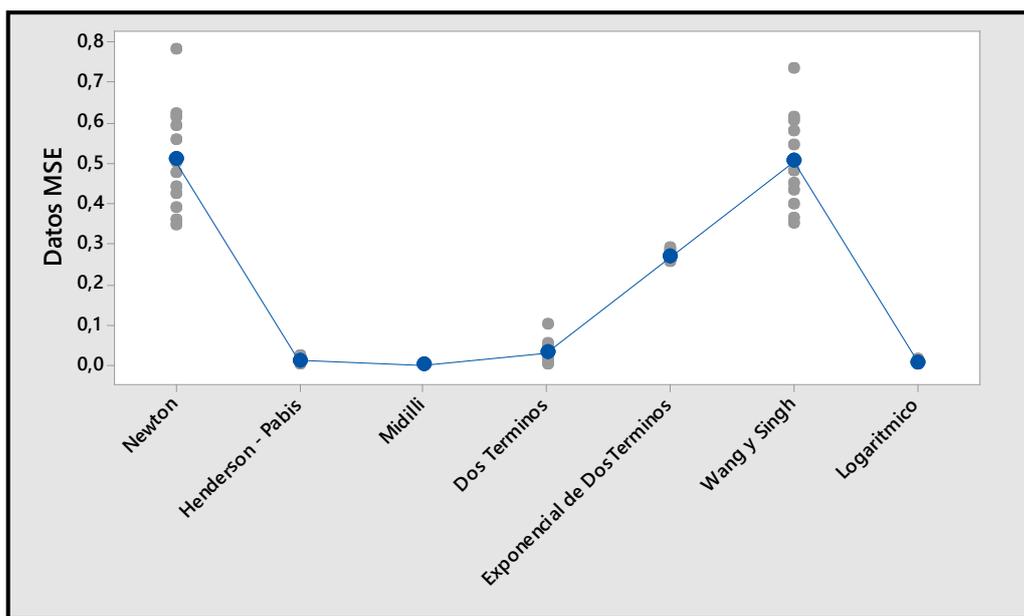


Figura 57 Gráfico de valores individuales de los modelos matemáticos  
Elaboración propia

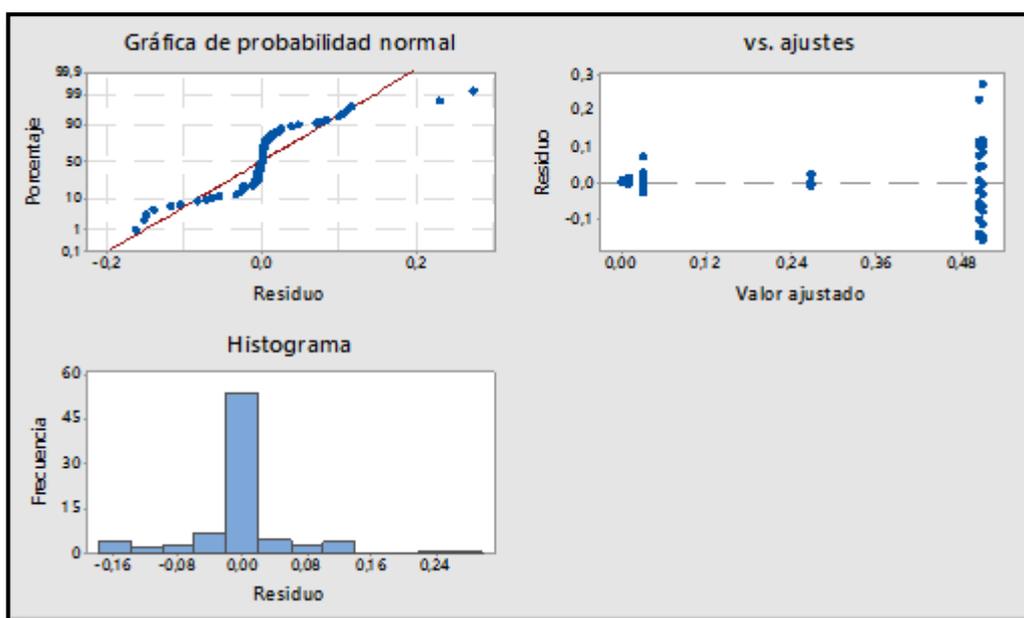


Figura 58 Gráficos de residuos de los modelos matemáticos  
Elaboración propia

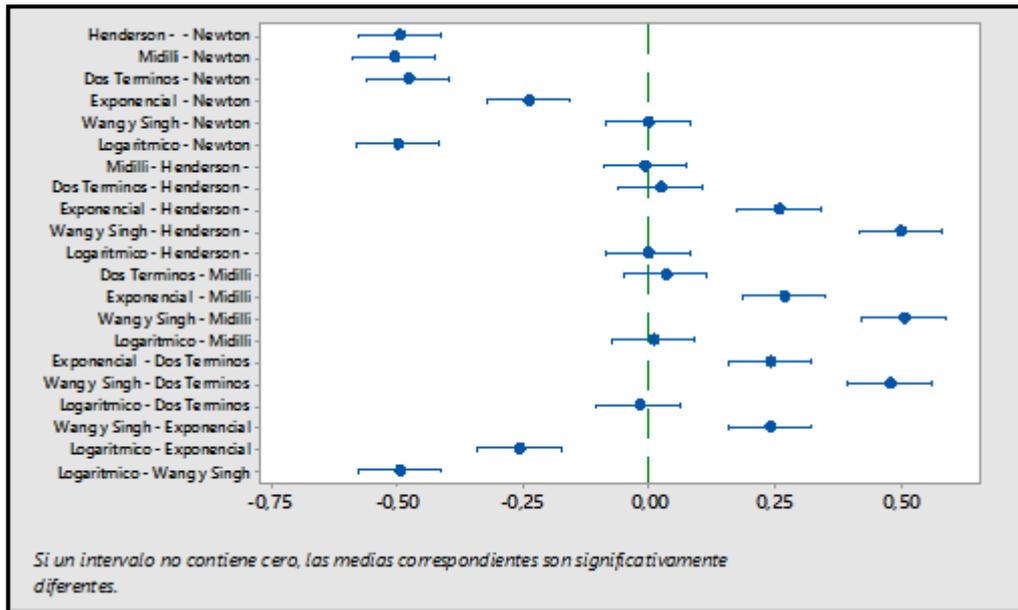


Figura 59 ICs Simultáneos de 95% de Tukey diferencia de las medias para los modelos matemáticos  
Elaboración propia

Minitab - OPTIMIZACION.mjt

Archivo Editar Datos Calc Estadísticas Gráfica Editor Herramientas Ventana Ayuda Asistente

Sesión

### Diseño factorial de múltiples niveles

**Resumen del diseño**

Factores: 3 Réplicas: 1  
 Corridas base: 12 Total de corridas: 12  
 Bloques base: 1 Total de bloques: 1

Número de niveles: 3; 2; 2

Hoja de trabajo 1 \*\*\*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	ESPESOR	TEMPERATURA	FLUJO	TIEMPO	
1	1	1	1	1	3,0	50	400	3,00	
2	2	2	1	1	3,0	50	600	2,50	
3	3	3	1	1	3,0	60	400	1,75	
4	4	4	1	1	3,0	60	600	1,75	
5	5	5	1	1	3,5	50	400	3,25	
6	6	6	1	1	3,5	50	600	3,00	
7	7	7	1	1	3,5	60	400	2,75	
8	8	8	1	1	3,5	60	600	2,50	
9	9	9	1	1	4,0	50	400	4,00	
10	10	10	1	1	4,0	50	600	3,75	
11	11	11	1	1	4,0	60	400	3,75	
12	12	12	1	1	4,0	60	600	3,50	
13									

Figura 60 Diseño factorial de múltiples niveles  
Elaboración propia

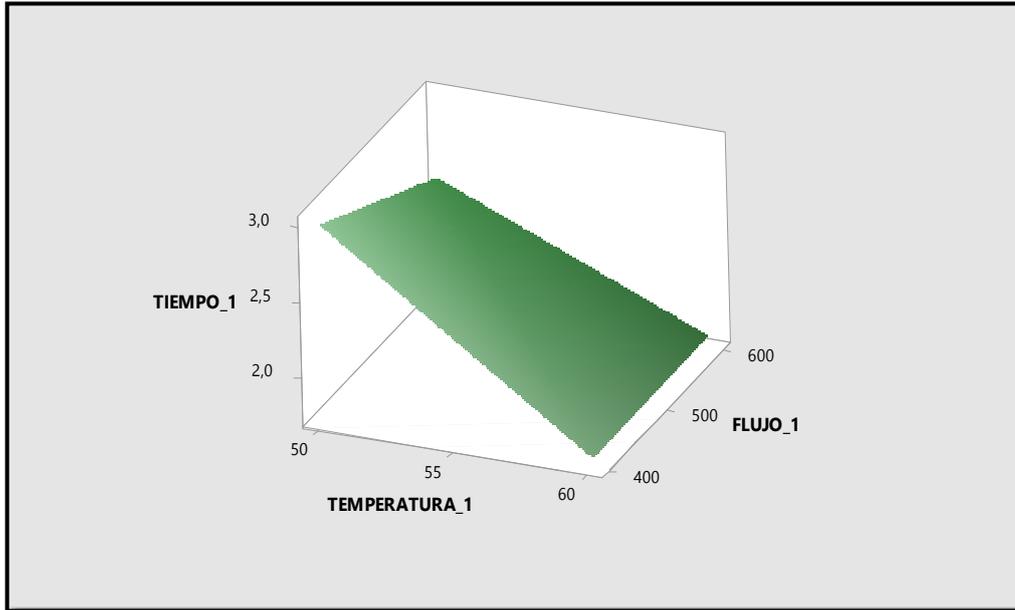


Figura 61 Gráfico de superficie de espesor 3,0 mm  
Elaboración propia

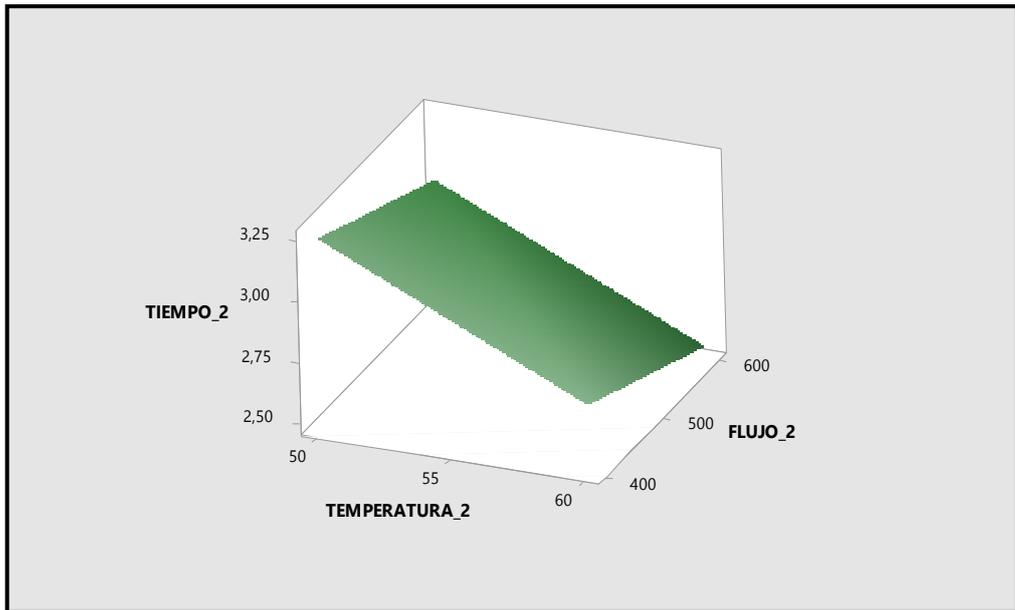


Figura 62 Gráfico de superficie para espesor de 3,5 mm  
Elaboración propia.

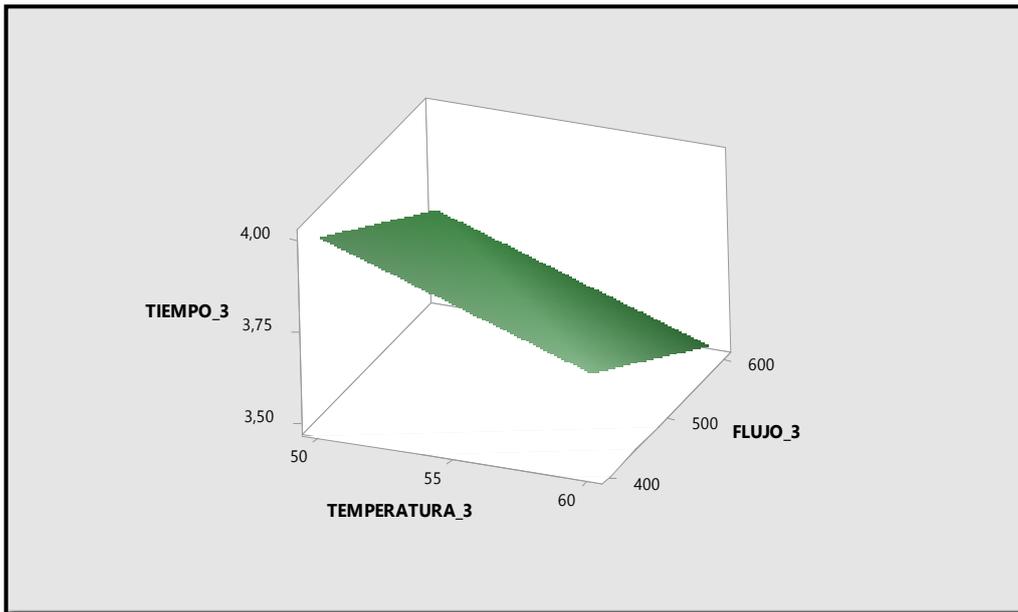


Figura 63 Gráfico de superficie para espesor de 4,0 mm  
Elaboración propia

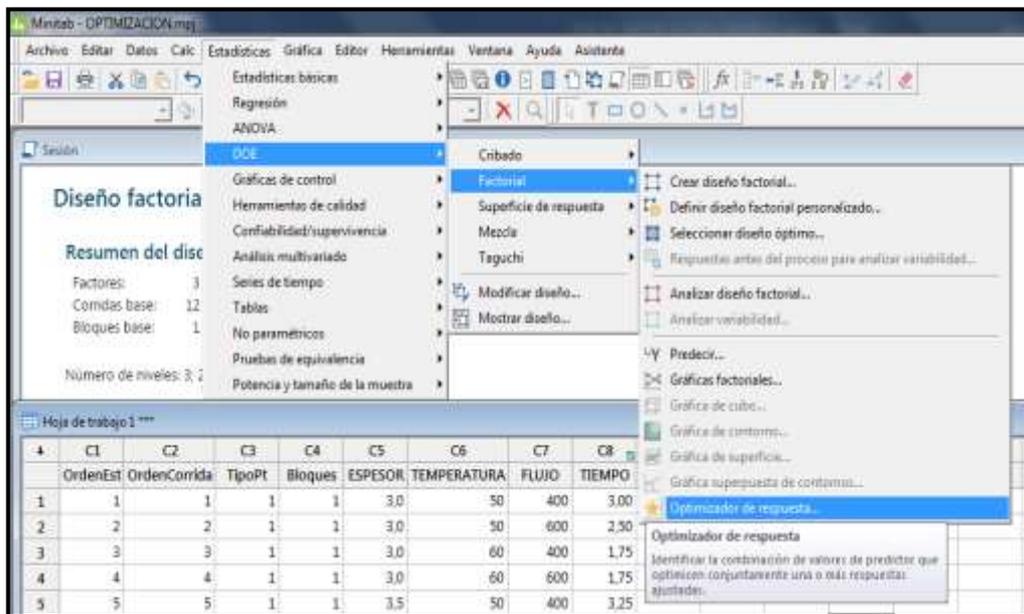


Figura 64 Optimizador de respuesta  
Elaboración propia