

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MODELOS CINÉTICOS DE SECADO PARA  
CUANTIFICAR PROPIEDADES FÍSICAS DE LA REMOLACHA (*Beta vulgaris*).**

**NYDIA JOHANA ANGARITA BATECA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PAMPLONA**

**2019**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MODELOS). CINÉTICOS DE SECADO PARA  
CUANTIFICAR PROPIEDADES FÍSICAS DE LA REMOLACHA (*Beta vulgaris***

**NYDIA JOHANA ANGARITA BATECA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico**

**DIRECTOR**

**M.Sc. ERIK GERMAN YANZA HURTADO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PAMPLONA**

**2019**

## DEDICATORIA.

*A Dios padre celestial, que día a día nos da la sabiduría y fortaleza para seguir adelante, a pesar de todas las dificultades que se presentan, cuando he estado a punto de caer, por ello con toda la humildad de mi corazón dedico mi trabajo a Dios.*

*A mí misma porque hoy puedo decir, que gracias a Dios lo logré, aprendí a no rendirme en las dificultades de la vida, y que el carácter de una persona, se logra día a día, es necesario tener dominio sobre uno mismo, mediante hechos, que hagan más fuerte nuestra voluntad.*

*A mis padres y familia en general, porque creyeron en mí, y siempre me apoyaron en todo momento.*

## PENSAMIENTO

*“La vida no es fácil, para ninguno de nosotros.*

*Pero... ¡qué importa! Hay que perseverar y, sobre todo, tener confianza en uno mismo. Hay que sentirse dotado para realizar alguna cosa y que esa cosa hay que Alcanzar, cueste lo que cueste.”*

*(Marie Curie)*

## AGRADECIMIENTOS

*Le doy gracias a Dios, especialmente porque él, es la base fundamental de todo, me enseñó que a pesar de las dificultades que se presenten en el camino siempre hay una salida, siempre y cuando uno quiera lograrlo sin importar los sacrificios y obstáculos.*

*A mis padres porque me enseñaron que para lograr una meta, hay que tener voluntad y perseverancia, valorando cada cosa por más pequeña que sea que nos da la vida. Y que a pesar de las discordias y dificultades siempre guardaron una esperanza en mí en la formación profesional.*

*Mis hermanos que me ven en mí, un ejemplo a seguir.*

*A mi familia en general porque siempre me apoyaron incondicionalmente y me dieron fortaleza de seguir adelante.*

*A mi director, M.sc. Erik German Yanza Hurtado que me enseñó, que todo en la vida se logra de acuerdo a la actitud que uno tenga frente a ello. Por su tiempo y dedicación en la formación académica, de toda mi carrera y a la hora de dirigir este trabajo, por creer en mis capacidades y permitirme trabajar a su lado.*

*A mis amigos, y compañeros de carrera especialmente Johm Sandoval que siempre estuvieron a mi lado en el transcurso de mi formación, apoyándome incondicionalmente, gracias por su amistad sincera y lealtad.*

*Expreso mi gratitud al programa de Ingeniería Química de la Universidad de Pamplona y todo el personal que lo conforma especialmente, la planta docente por su conocimiento, tiempo, dedicación, el cual son herramientas vitales en la formación personal y profesional para un Ingeniero químico.*

## NOMENCLATURA

$Q_1$ : Calor (KJ)

$F_3$ : Cantidad producto final (Kg).

$L_2$ : Cantidad agua salida (Kg).

$L_4$ : Cantidad agua salida (Kg).

$C_p$ : Capacidad calorífica (KJ/Kg.K)

$X_{1s}$ : Cantidad inicial sólidos secos (%).

$X_{3s}$ : Cantidad final sólidos secos (%).

$Z_4$ : Cantidad de agua salida (%).

$\chi^2$ : Coeficiente Chi- cuadrado.

$R^2$ : Coeficiente de determinación.

$M_0$ : Contenido de humedad inicial (base seca).

$D$ = Diámetro equivalente del secador de bandejas (m)

$\rho$ = Densidad del aire a la temperatura proceso (Kg/m<sup>3</sup>)

$\Delta E$ : Diferencia de color.

$H_2$  y  $H_4$  : Entalpía entrada y salida (KJ/kg) aire seco.

$H_3$  : Entalpía producto (KJ/Kg) Producto.

$L^*$ : Espectro claro- oscuro.

$a^*$ : Espectro verde- rojo.

$b^*$ : Espectro azul-amarillo.

RMSE: Error cuadrático medio.

$F_2$ : Flujo aire másico entrada (Kg).

$F_4$ : Flujo de aire seco salida (Kg/h).

$G_4$ : Flujo aire húmedo (Kg/h).

$O_i$ : Frecuencia observada.

$E_i$ : Frecuencia esperada.

$\omega_2$  : Humedad absoluta entrada (Kg agua/ Kg aire seco).

$\omega_4$  : Humedad absoluta salida (Kg agua/ Kg aire seco).

$M_t$ : Humedad (base seca) en el tiempo T.

$M_e$ : Humedad de equilibrio contenido (base seca).

$M_{Rexp,i}$ : Humedad experimental.

$M_{Rteor}$ : Humedad teórica.

$F_1$ : Masa inicial (Kg).

$M$ : Masa inicial (g).

$N$ : Número de observaciones.

$Re$ : Número de Reynolds.

$MR$ : Relación de humedad.

$W$ : Trabajo (J).

$W_t$ : Trabajo teórico (J).

$T_o$ : Temperatura ambiente (°C).

$T_{B_S}$ : Temperatura bulbo seco (°C).

$T_{B_H}$ : Temperatura bulbo húmedo (°C).

$T$ : Tiempo (min).

$\mu$ = Viscosidad del aire calculado a la temperatura de referencia (Kg/m.s).

V= Velocidad de flujo del aire del proceso ( $m^3/s$ ).

## RESUMEN

La deshidratación es la técnica más usada en la conservación de alimentos, para el aprovechamiento de residuos orgánicos a nivel industrial de la remolacha (*Beta vulgaris*), ya que es una hortaliza cultivada en varias zonas del país, representa un interés comercial que depende de la calidad y estabilidad del producto.

En el presente trabajo se estudian modelos matemáticos validados en la cinética de secado de alimentos para determinar el ajuste del mejor comportamiento establecido, por los coeficientes estadísticos y parámetros de temperatura, flujo de aire y espesor de la muestra. Este estudio se aplicó al caso de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*) utilizando regresión lineal, ajuste de mínimos cuadrados para describir la proporción de humedad respecto al tiempo de secado. Se evaluaron 3 modelos de secado de capa fina, incluidos los modelos de Newton, Page, Henderson y Pabis. Se ajustaron a los datos experimentales empleando regresión no lineal. Se determinó que el mejor ajuste del modelo fue el de Henderson y Pabis con espesor de corte de 7(mm) temperatura de 40(°C) y flujo de aire de 595(m<sup>3</sup>/h), dado que proporcionó la mejor correlación entre los datos experimentales para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*).

Asimismo, se evaluó la pérdida de color durante el proceso de secado para los nueve ensayos y se determinó el índice de color correspondiente al ensayo 3, presentó menor grado de pardeamiento enzimático, demostrando una diferencia muy obvia en el cambio del color durante todo el proceso de secado. Además se verificó la reducción de sólidos significativos de 0,16%, reducción de humedad de 0,84% para el ensayo 5 con una eficiencia térmica de 1,22%.

## ABSTRACT

Dehydration is the most used technique in food preservation, for the use of industrial organic waste of beet (*Beta vulgaris*), since it is a vegetable grown in several areas of the country, she represents a commercial interest that depends on the quality and stability of the product.

In the present work, validated mathematical models are studied in the kinetics of food drying to determine the adjustment of the best established behavior, by the statistical coefficients and parameters of temperature, air flow and thickness of the sample. This study was applied to the case of beet slices (*Beta vulgaris*) using linear regression, adjustment of least squares to describe the proportion of humidity with respect to drying time. Three models of thin-film drying were evaluated, including the Newton, Page, Henderson and Pabis models. They were adjusted to the experimental data using non-linear regression. It was determined that the best fit of the model was that of Henderson and Pabis with cut thickness of 7 (mm) temperature of 40 (° C) and air flow of 595 (m<sup>3</sup> / h) since it led to provide the best correlation between the data experiments for the drying of beet slices (*Beta vulgaris*).

In addition, the color loss during the drying process was evaluated for the nine tests and the color index corresponding to the test 3 was determined, which showed a lower degree of enzymatic browning, demonstrating a very obvious difference in the color change during the whole drying process. It was also verified that the significant solid reduction of 0.16% and humidity reduction of 0.84% for the test 5 with a thermal efficiency of 1.22%.

## TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	17
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN .....	19
2	OBJETIVOS .....	20
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	21
3.1	REMOLACHA .....	21
3.1.1	Generalidades.....	21
3.2	DATOS ESTADÍSTICOS DEL CULTIVO DE REMOLACHA EN NORTE DE SANTANDER. ....	22
3.3	CONTENIDO NUTRICIONAL DE REMOLACHA ( <i>Beta vulgaris</i> ). ....	22
3.4	USOS INDUSTRIALES DE LA REMOLACHA ( <i>Beta vulgaris</i> ).....	23
3.5	TINTES NATURALES.....	24
3.6	EXPORTACIONES.....	25
3.7	IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS.....	25
3.7.1	Estabilidad microbiológica de los alimentos.....	25
3.7.2	Fenómenos que se presentan durante el proceso de secado por aire caliente.....	26
4	TEORÍA DEL SECADO.....	27
4.1	IMPORTANCIA DEL SECADO.....	27
4.1.1	Características fundamentales al momento de realizar un proceso de secado para diferentes productos.....	27
4.2	ELECCIÓN DEL TIPO DE SECADOR.....	28
5	OPERACIONES DE SECADO.....	30
5.1	PROCESO SECADO DE ALIMENTOS.....	30
5.2	ASPECTOS TECNOLÓGICOS IMPORTANTES DURANTE UN PROCESO DE SECADO DE ALIMENTOS.....	31
5.3	ELECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SECADO.....	31

5.4	SECADO CONVECTIVO.....	32
5.5	SECADORES EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS. 32	
5.6	EQUIPOS PARA SECADO.....	34
5.6.1	SECADOR ROTATORIO.....	34
5.6.2	SECADOR DE CORREA.....	34
5.6.3	SECADORES DE SPRAY.....	34
5.6.4	SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	35
5.6.5	SECADOR NEUMÁTICO.....	35
5.6.6	SECADORES DE TAMBOR.....	36
5.6.7	SECADOR DE BANDEJAS.....	36
6	PARTE EXPERIMENTAL.....	38
6.1	MODELOS MATEMÁTICOS DE CINÉTICA DE SECADO.....	38
6.2	MODELO DE LEWIS.....	40
6.3	MODELO DE HENDERSON Y PABIS.....	41
6.4	MODELO DE PAGE.....	41
6.5	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS.....	42
6.5.1	Prueba Chi-cuadrado o prueba de Pearson.....	42
6.5.2	Ecuación para calcular Chi-cuadrado $\chi^2$ .....	42
6.5.3	Ecuación para calcular el coeficiente de determinación.....	42
6.6	BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....	43
6.7	BALANCES DE EXERGÍA.....	44
6.8	CARACTERÍSTICAS BALANCE DE EXERGÍA.....	44
6.9	DIFERENCIA DE COLOR.....	45
6.10	ECUACIONES PARA DETERMINAR LA PÉRDIDA DE COLOR DURANTE EL PROCESO DE SECADO.....	46
7	METODOLOGÍA.....	48
7.1.1	Materia Prima.....	48
7.2	PREPARACIÓN DE LAS RODAJAS DE REMOLACHA.....	49
7.3	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA REMOLACHA ( <i>BETA VULGARIS</i> ).....	50
7.4	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE RODAJAS DE REMOLACHA ( <i>BETA VULGARIS</i> ).....	50

7.5	EQUIPO PARA EL PROCESO DE SECADO.....	51
7.6	VARIABLES PROPIAS DEL SECADOR DE BANDEJAS.....	51
7.7	DISEÑO EXPERIMENTAL. ....	52
7.8	PROCEDIMIENTO DE SECADO DE REMOLACHA ( <i>Beta vulgaris.</i> ).....	54
7.9	HIPÓTESIS RELACIÓN DE VARIABLES.....	55
7.10	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	59
8	DESARROLLO DEL SEGUNDO OBJETIVO. ....	59
8.1	COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE ERRORES. ....	64
8.2	MODELOS CINÉTICOS PROPUESTOS.....	65
9	DESARROLLO DEL TERCER OBJETIVO.....	67
9.1.1	Determinación de propiedades físicas de las rodajas de remolacha....	67
9.1.2	Procedimiento para determinación de propiedades físicas .....	67
9.2	MEDIDA DEL COLOR. ....	68
9.3	PARDEAMIENTO ENZIMÁTICO. ....	70
9.4	CONTRACCIÓN.....	70
9.4.1	Variación del espesor.....	71
9.4.2	Variación del diámetro.....	71
10	DESARROLLO DEL CUARTO OBJETIVO.....	73
10.1	BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA DEL SECADOR DE BANDEJAS. .	73
10.2	BALANCE DE EXERGÍA .....	80
11	CONCLUSIONES. ....	83
12	RECOMENDACIONES. ....	87
13	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	88
14	ANEXO A.....	91
14.1	Datos experimentales para cada ensayo, de acuerdo a las condiciones de trabajo.....	91
15	ANEXO B.....	100
15.1	Ecuaciones de los modelos matemáticos propuestos para cada ensayo. .	100
16	ANEXO C.....	103
16.1	Variación del comportamiento del índice de color para cada ensayo. ....	103

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. PRINCIPALES TIPOS DE SECADORES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.	33
TABLA 2. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA PROBAR LA CINÉTICA DE SECADO DE HORTALIZAS Y FRUTAS.....	39
TABLA 3. MODELOS CINÉTICOS EVALUADOS EN ESTE ESTUDIO. ....	39
TABLA 4. FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LOS CAMBIOS DE COLOR DURANTE EL SECADO..	46
TABLA 5. NIVELES DESCRIPTIVOS DE CAMBIO DE COLOR. ....	47
TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA REMOLACHA ( <i>BETA VULGARIS</i> ). ....	50
TABLA 7. DISEÑO EXPERIMENTAL 3X3X2 PARA ESTUDIAR EL PROCESO DE SECADO DE REMOLACHA ( <i>BETA VULGARIS</i> ). ....	52
TABLA 8. HIPÓTESIS PLANTEADA A PARTIR DE LA RELACIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES Y SUS NIVELES PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL. ....	55
TABLA 9. RESUMEN ESTADÍSTICO PARA DATOS. ....	55
TABLA 10. TABLA ANOVA PARA DATOS POR VARIABLES. ....	56
TABLA 11. PRUEBAS DE MÚLTIPLE RANGOS PARA DATOS POR VARIABLES.....	56
TABLA 12. DIFERENCIA SIGNIFICATIVA. ....	57
TABLA 13. MODELOS CINÉTICOS DE SECADO. ....	59
TABLA 14. RESULTADOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LOS MODELOS CINÉTICOS DE SECADO PARA RODAJAS DE REMOLACHA ( <i>BETA VULGARIS</i> ). ....	60
TABLA 15. MODELOS CON MEJOR AJUSTE.....	64
TABLA 16. MODELO MATEMÁTICO CON MEJOR AJUSTE, OBTENIDO POR ANÁLISIS REGRESIÓN MÚLTIPLE. ....	66
TABLA 17. DETERMINACIÓN DE LA DIFERENCIA DE COLOR PARA CADA ENSAYO. ....	68
TABLA 18. CAPACIDAD CALORÍFICA PARA EL AIRE Y AGUA. ....	75
TABLA 19. CORRELACIONES PARA CALCULAR EL CALOR ESPECÍFICO DE LOS COMPONENTES DE LOS ALIMENTOS COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. ....	76
TABLA 20. RESUMEN DE LOS BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA PARA CADA ENSAYO .....	79
TABLA 21. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE EXERGÍA PROCESO DE SECADO. ....	82

## LISTA DE DIAGRAMAS

DIAGRAMA 1. PROCEDIMIENTO PREPARACIÓN DE LA MUESTRA. ....	49
DIAGRAMA 2. COMBINACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EN EL DISEÑO 3X3X2.....	53
DIAGRAMA 3 . PROCEDIMIENTO DE SECADO. ....	54
DIAGRAMA 4. PROCEDIMIENTO PROPIEDADES FÍSICAS. ....	67
DIAGRAMA 5. VARIACIÓN DE COLOR. ....	69
DIAGRAMA 6. ESQUEMA CUALITATIVO DEL PROCESO DE SECADO. ....	74
DIAGRAMA 7. ESQUEMA CUANTITATIVO DEL PROCESO DE SECADO.....	74
DIAGRAMA 8. ESQUEMA CUANTITATIVO BALANCE DE EXERGÍA. ....	80

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. SECADOR DE BANDEJAS.....	37
GRÁFICO 2. DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES. ....	58
GRÁFICO 3. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE HUMEDAD CON LAS CONDICIONES DE SECADO AJUSTADAS POR EL MODELO DE NEWTON.....	61
GRÁFICO 4. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE HUMEDAD CON LAS CONDICIONES DE SECADO AJUSTADAS POR EL MODELO DE PAGE.....	62
GRÁFICO 5. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE HUMEDAD CON LAS CONDICIONES DE SECADO AJUSTADAS POR EL MODELO DE HENDERSON Y PABIS.....	63
GRÁFICO 6. RELACIÓN ESPESOR DE RODAJA 5 Y 7MM.....	71
GRÁFICO 7. RELACIÓN DE DIÁMETRO RODAJA 5 Y 7 MM. ....	71

## 1 INTRODUCCIÓN

El secado es una operación unitaria de tipo (sólido - fluido) que se encuentra en casi todos los sectores industriales, desde la agricultura hasta la farmacéutica. Podría decirse que es el procedimiento de separación más antiguo en la industria. La tecnología de secado es una amalgama de fenómenos de transporte para la ciencia, ya que se trata no solo de la eliminación de un líquido para producir un producto sólido, también en la medida en que el producto seco cumpla con los criterios de calidad necesarios. [1]

Un proceso de secado es complejo, involucra transferencia de calor y masa, además requiere control preciso del proceso. El comportamiento de secado de los materiales alimenticios depende de la composición y el contenido de humedad del alimento a secarse y otros factores como: espesor, geometría, flujo de aire y humedad relativa. Los cambios observados en los materiales alimenticios secos son contracción, hinchamiento, cristalización, aglomeración. En muchos casos, el secado inadecuado puede provocar daños irreversibles a la calidad del producto y por lo tanto un producto no vendible.[2]

El método de secado empleado en muchos países en desarrollo es el secado al aire libre, que se puede hacer bajo la luz directa del sol o bajo sombra. La luz del sol calienta los alimentos con eficacia expulsando la humedad, pero la luz solar directa y el calor pueden afectar a las vitaminas sensibles al calor y pigmentos significativamente. El secado de los alimentos es necesario por muchas razones, permite su conservación y almacenamiento alargando su vida útil reduciendo el volumen para facilitar su manejo y transporte del tamaño deseado. Así los microorganismos que causan el deterioro y la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en la comida seca.[2]

En la industria de alimentos los secadores más empleados para el secado de frutas y verduras son los secadores de bandejas, ya que permiten mejor distribución del producto a secar favoreciendo el contacto de la transferencia de aire hacia todo el producto.

Los secadores de bandejas están formados por una cámara metálica rectangular que contiene soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas, montadas una sobre otras con una separación conveniente que se cargan con el material a secar. En ocasiones se utilizan bandejas perforadas en las que el aire circula a través de la capa de sólidos, así aumenta el contacto de la superficie del sólido expuesta a la acción del aire disminuyendo el tiempo de secado.[3]

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de la cinética de secado de la remolacha (*Beta vulgaris*), basado en un diseño experimental 3X3X2 donde a partir de datos experimentales determinar el ajuste del modelo cinético de secado con mejor comportamiento. Asimismo realizar un análisis estadístico con el software STATGRAPHICS versión XVII Centurion® para considerar los resultados del modelo cinético y cuantificar las propiedades físicas color y encogimiento de la remolacha durante el proceso de secado.

Se presenta un análisis de exergía para evaluar la energía disponible en diferentes puntos del sistema. La exergía se define como la cantidad máxima de trabajo que puede producirse por un flujo de materia, calor o trabajo en lo que respecta al equilibrio con un entorno de referencia. El análisis de exergía conduce a una mejor comprensión de la influencia de los fenómenos termodinámicos en la eficiencia del proceso, y comparación de la importancia de los diferentes factores termodinámicos, determinando métodos eficientes de mejorar el proceso. [4]

Actualmente en los procesos de secado de productos agrícolas, se están evaluando diferentes modelos cinéticos de secado con el fin de determinar la temperatura y flujo

de aire adecuado durante todo el proceso, asimismo conservar sus propiedades organolépticas entregando al mercado productos secos de excelente calidad.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

El secado es una alternativa de conservación para el aprovechamiento de residuos orgánicos, el procesamiento industrial de la remolacha (*Beta vulgaris*), permite la utilización de subproductos de alto valor. Por ejemplo la producción de biocombustible, genera residuos orgánicos como (bagazo), que se emplean para la fabricación de concentrados en especies ovinas y avícolas, como materia prima en la elaboración de fertilizantes aprovechando sus nutrientes y minerales, entre otras aplicaciones.

En este estudio se analiza el comportamiento se secado por aire caliente de la remolacha (*Beta vulgaris*) puesto que es una técnica sencilla de conservar alimentos, permite alargar su vida útil evitando la degradación del producto y conservando factores de calidad como textura, color, oxidación y aroma; atributos importantes al momento de evaluar las condiciones de aceptación por los consumidores y apertura del mercado, facilitando el almacenamiento y transporte del producto.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

- Estudiar modelos de cinética de secado a partir de datos experimentales obtenidos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar modelos cinéticos de secado aplicados a la remolacha (*Beta vulgaris*).
- Determinar el modelo cinético de secado que mejor represente los datos experimentales obtenidos.
- Cuantificar la variación de la propiedad física color y encogimiento de la remolacha, durante el proceso de secado.
- Realizar balance energético y exergético al proceso de secado.

### 3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 REMOLACHA

##### 3.1.1 Generalidades.

Nombre: Remolacha, Betarraga.

Nombre científico: (*Beta vulgaris*).

Familia: Amaranthaceae.

Se escogió como materia prima la remolacha (*Beta vulgaris*) teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Es una hortaliza cultivada en varias zonas del país.
- La producción limpia de hortalizas es una nueva tendencia que está generando conciencia a toda la población en consumir alimentos completamente sanos para la salud humana.
- Colombia es un país con los mejores suelos para cultivar hortalizas, por este motivo se quiere acceder a mercados internacionales de hortalizas implementando tecnologías para la conservación de alimentos tanto en mercados internos como externos.

### **3.2 DATOS ESTADÍSTICOS DEL CULTIVO DE REMOLACHA EN NORTE DE SANTANDER.**

Según la base de datos estadísticos (Agronet, 2017) el cultivo de remolacha en todo el departamento de Norte de Santander, presentó gran demanda con una producción de 72,000 hectáreas de áreas cosechadas con un área de producción de 1.190,00 toneladas presentando un rendimiento de 16,53 ton/ha.[5]

La remolacha se cultiva en climas fríos a una temperatura de 14-18°C. Además puede tener una forma redonda alargada u ovalada y con una gama de colores externos que van de un morado o rojo fuerte, hasta amarillo o blanco. La parte interior puede ser morada, roja, amarilla o blanca e incluso roja con aros blancos. Las remolachas necesitan un lugar abierto y soleado con suelo fértil, ligero y arenoso de pH ideal 6,5 a 7. [6]

El cultivo de remolacha depende del clima por lo tanto en el municipio de Chitagá predomina el cultivo de remolacha en veredas como Tapurcuá, Llano Grande y Carrillo por que presenta diferentes tipos de climas como templado, frío y páramo. [7]

### **3.3 CONTENIDO NUTRICIONAL DE REMOLACHA (*Beta vulgaris*).**

La remolacha está constituida por un ingrediente fibroso que se caracteriza por un contenido de hemicelulosas (22% -32%), pectinas (22% -29%) y celulosa (19% -28%), con poco o nada de la lignina (<3%) generalmente, el contenido de fibra de remolacha esta entre 70 y 80 g / 100 g, en base seca, con un contenido limitado de proteínas (5%), ceniza (3%) y humedad (7%). Según estudios científicos realizados a la fibra de remolacha por la Unión Europea, se estableció que su consumo favorece la salud intestinal manteniendo un metabolismo acelerado, además, regula las concentraciones normales de colesterol en la sangre. [8]

### **3.4 USOS INDUSTRIALES DE LA REMOLACHA (*Beta vulgaris*).**

La alternativa más usada es la producción de alcohol a partir del jugo de remolacha o melaza, mediante su composición orgánica están presentes con mayor abundancia el ácido cítrico y ácido oxálico, donde la producción de ácido cítrico se presenta por fermentación de melazas. El ácido glutámico y la glutamina se separan mediante un proceso de hidrólisis. La extracción de betanina presente en la remolacha se realiza por cromatografía de resina, sus usos en la industria es el galvanizado de metales, cosméticos y como vitamina en la cría de pollos. Hay varias saponinas presentes en la remolacha; el más conocido es el glucurónico, Las saponinas se emplean como detergentes. [9]

Algunos de los usos de la pulpa de remolacha incluyen: Producción de fibra para animales por método de prensado. La forma convencional es usar la pulpa como alimento para el ganado, así aumentar la capacidad de producción de leche de las vacas diez veces más de lo normal. [10]

Conversión de Biomasa y bioproductos en químicos valiosos, es un método desarrollado por el Instituto de Química General y Ecológica de la Universidad de Tecnología de Lodz donde a partir de la pulpa y hojas de la remolacha se obtiene hidrólisis ácida usando  $H_2SO_4$  que consiste en la fermentación de biomasa lignocelulósica.[11]

Producción de Biobutanol a partir de pulpa de remolacha azucarera. El butanol es una materia prima importante, que se utiliza principalmente como disolvente o sustrato en la producción de materiales poliméricos como: acrilato de butilo, metacrilato de butilo. También es de interés como un aditivo de combustible líquido. Este alcohol es fabricado a través de vías químicas basadas en la oxosíntesis (hidroformilación de propeno). [11]

### 3.5 TINTES NATURALES.

Se definen como el color natural de cualquier tinte pigmento obtenido de vegetales o minerales. Los colores pueden provenir de una variedad de fuentes tales como semillas, frutas, vegetales, algas e insectos estos se consideran tintes naturales, estos tintes naturales no contienen productos derivados del petróleo.[9]

El extracto de remolacha tiene gran uso en la industria, ya que por ser un agente colorante natural se emplea en la industria textil, cosmética, farmacéutica y de alimentos, principalmente en productos lácteos, helados, bebidas y postres. Para estos fines, este colorante se comercializa con una intensidad de color (535 nm / 1% de sol). Además la producción de colorantes se realiza por medio de un proceso de secado logrando un producto en polvo con alta estabilidad de almacenamiento, más fácil de manejar para algunas aplicaciones y minimizar el peso durante el transporte, en comparación con los concentrados líquidos.[12]

Asimismo los tintes naturales son generalmente designados de altos estándares de calidad. La remolacha roja contiene grandes concentraciones de betalaínas el color natural varia de rojo-violeta a amarillo que se denomina como colorantes de fuentes naturales E163 extracto de antocianina, E162 extracto de betalaínas.[9]

La búsqueda de pigmentos naturales se debe a la creciente evidencia que indica que los colorantes sintéticos pueden causar efectos nocivos para la salud. El rojo de remolacha (E162) y la remolacha deshidratada (o remolacha en polvo) son actualmente los únicos colorantes a base de betalaínas aprobados para su uso en productos alimenticios en Europa ( UE, 2012) y los Estados Unidos ( FDA, 2009) respectivamente, que restringen el espectro de matices que pueden ser explorados por la industria alimentaria.[13]

### **3.6 EXPORTACIONES.**

Según el último reporte de exportaciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) publicado online y sus anexos, las exportaciones totales registradas en junio 2018 comparado con el año anterior fueron un 15.9% más altas, lo que se suma al crecimiento acumulado de 14,7% en lo que va corrido del año y al 15,6% a 12 meses. Por su gran contenido de azúcar presente en la remolacha se realizó exportaciones de azúcar de remolacha o caña sin refinar en estado sólido sin adición. A una variación de 153,7%. [14]

### **3.7 IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS.**

El principal objetivo del procesamiento de alimentos es conservar la calidad general de los alimentos durante cierto tiempo de duración, vida útil. Los tipos de deterioro de los alimentos son microbianos, enzimáticos, químicos y físicos. El deterioro microbiano es el más importante, ya que puede afectar la seguridad de los alimentos. Las principales tecnologías de conservación de alimentos son el procesamiento térmico, enfriamiento, congelación, concentración, secado, radiación ionizante, conservación química, alta presión hidrostática, campo eléctrico pulsado y la luz intensa. [15]

#### **3.7.1 Estabilidad microbiológica de los alimentos.**

En la conservación de alimentos, la estabilidad microbiológica es un aspecto muy importante que se logra mediante la reducción de la carga microbiana inicial, utilizando un procedimiento adecuado (generalmente un proceso térmico). Los factores que afectan el crecimiento microbiano generalmente se clasifican en dos grupos:

- Factores intrínsecos es decir, del alimento. Los principales factores intrínsecos de los alimentos son contenido de agua, pH, acidez, potencial y cantidad de nutrientes. Factores extrínsecos es decir, del medio ambiente.
- Los principales factores extrínsecos son la temperatura y la composición atmosférica. Por lo tanto, el crecimiento microbiano será más rápido o más lento dependiendo de la composición de estos factores en relación con los requisitos microbianos para garantizar productos estables. [16]

### **3.7.2 Fenómenos que se presentan durante el proceso de secado por aire caliente.**

El secado de alimentos por aire caliente que consiste en evaporar la cantidad de agua a altas temperaturas durante el secado, producen un estrés significativo que puede provocar el colapso de las células y los poros, el cambio de forma y la disminución de la dimensión. La contracción, que rara vez es despreciable, es un problema importante en la deshidratación de alimentos donde causa diversos problemas que afectan la calidad del producto. La consecuencia de la contracción afectará el tamaño del producto, la estructura, el color, el sabor y el aroma. Las tensiones por contracción podrían causar numerosas roturas de las paredes celulares y dar lugar a la formación de muchas cavidades pequeñas dentro del material. Las fisuras en la matriz pueden ocurrir cuando la contracción no es uniforme durante el proceso de secado, lo que lleva a la formación de tensiones desequilibradas y fallas del producto. Otra consecuencia importante de la contracción es el cambio de difusividad molecular y la limitación de la velocidad de secado. [17]

## **4 TEORÍA DEL SECADO.**

La operación de separación del secado convierte una materia prima sólida, semisólida o líquida en un producto sólido por evaporación del líquido en una fase de vapor mediante la aplicación de calor. El secado es una operación esencial en la industria química, agrícola, biotecnológica, alimentaria, polimérica, cerámica, Industria farmacéutica, pulpa y papel, procesamiento de minerales y procesamiento de madera.[18]

### **4.1 IMPORTANCIA DEL SECADO.**

El secado de varias materias primas es necesario por las siguientes razones:

- Obtener productos de fácil manejo.
- Prolongar su conservación y almacenamiento.
- Reducción del costo de transporte.
- Lograr la calidad deseada del producto.

En muchos procesos, un proceso de secado inadecuado provoca daños irreversibles en la calidad del producto y por lo tanto, un producto no vendible[18]

#### **4.1.1 Características fundamentales al momento de realizar un proceso de secado para diferentes productos.**

Elección de la materia prima a secar, forma, tamaño, velocidad de flujo de aire, temperatura y tiempo son factores muy importantes al momento de realizar un proceso de secado, donde se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones.

Las características de un proceso de secado, lo convierten en un área fascinante y desafiante para la industria donde se debe considerar lo siguiente:

- El tamaño del producto puede variar desde micras hasta decenas de centímetros (en espesor y diámetro).
- La porosidad del producto puede variar de cero a 99.9 %.
- Los tiempos de secado oscilan entre 0,25 segundos para secado se papel de seda y cinco meses para ciertas especies de madera dura.
- Las capacidades de producción pueden variar desde 0,10 kg / h hasta 100 t /h
- Las velocidades del producto van desde cero estacionarias hasta 2000 m / s papel de seda.
- Las temperaturas de secado varían por debajo del punto triple hasta arriba del punto crítico.
- La presión de operación puede variar desde una fracción de milibares hasta 25 atmósferas.
- El calor puede ser transferido continua o intermitentemente por convección, conducción, radiación o campos electromagnéticos.[18]

#### **4.2 ELECCIÓN DEL TIPO DE SECADOR.**

Actualmente existen una gran variedad de tipos de secadores sofisticados con la última tecnología, que han sido diseñados para el secado de diferentes productos. Sin embargo la elección del tipo de secador depende de la experiencia adquirida en temas de secado donde el ingeniero químico, debe estar familiarizado con los conocimientos básicos en el tema y tener en cuenta los requerimientos que debe tener cada materia prima a secar, para elegir el tipo de secador adecuado, igualmente minimizar los costos de producción, y obtener productos de calidad, es lo que hace un proceso eficiente.

Por otra parte la elección del tipo de secador para alimentos, depende de consideraciones estrictas aparte de la experiencia, el tipo de secador debe contar con especificaciones de diseño donde se debe considerar la naturaleza de la materia prima a secar, además debe cumplir con estándares de higiene, normas técnicas de calidad, guía técnica de análisis que permiten evaluar y aceptar el producto antes de ofrecerlo a los consumidores.

## **5 OPERACIONES DE SECADO.**

El funcionamiento del equipo puede clasificarse en continuo o discontinuo. Estos factores se aplican específicamente desde el punto de vista del producto que se está secando. En las operaciones continuas, tanto el producto que se va a secar, como el flujo de aire, pasan continuamente a través del equipo. Generalmente, no se utilizan métodos normales por etapas; en todas las operaciones ocurre el contacto continuo entre flujo de aire y materia prima. Por tanto los secadores discontinuos son caros de construir y operar, solo se emplean para materiales valiosos que deben secarse a bajas temperaturas o en ausencia de aire para evitar su descomposición, como productos farmacéuticos, en ocasiones donde la humedad eliminada es un disolvente orgánico venenoso que debe recuperarse. [19]

### **5.1 PROCESO SECADO DE ALIMENTOS.**

A pesar de la importancia del secado como operación industrial y los recientes avances en la investigación en secado, se presentan principios físicos de fenómenos complejos que ocurren en el trascurso del secado que no se entiende completamente. El secado es un proceso difícil en el caso de los materiales alimenticios. Actualmente se están realizando estudios de modelos de cinética de secado evaluando modelos teóricos donde solo son aproximaciones comparadas con datos experimentales utilizando diferentes tipos de alimentos, además es una herramienta valiosa en el desarrollo de procesos o diseños de equipos de secado. [20]

## **5.2 ASPECTOS TECNOLÓGICOS IMPORTANTES DURANTE UN PROCESO DE SECADO DE ALIMENTOS.**

- La cinética del secado: El secado es un proceso relativamente lento, el conocimiento de los factores que afectan la velocidad de secado, es esencial para el óptimo diseño y funcionamiento de los sistemas de secado.
- Calidad del producto: La eliminación del agua no es la única consecuencia de la mayoría de las operaciones de secado, otros cambios importantes están relacionados con la calidad del producto como son: el sabor, la apariencia, la textura, la estructura y el valor nutritivo del alimento, estos factores dependen de las condiciones del proceso.
- Consumo de energía: Los procesos de secado más comunes utilizan grandes cantidades de energía a una eficiencia relativamente baja. [20]

## **5.3 ELECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SECADO.**

La temperatura es una variable de proceso de secado importante donde los vegetales de raíz, son sometidos a tratamientos térmicos con altas temperaturas, allí se produce una disminución en el contenido de carotenoides y clorofilas. Este hecho conduce al deterioro del color y de las propiedades biológicas de los productos [21]. Igualmente una elevada temperatura permite aumentar la velocidad de secado, pero conduce a veces a la aparición de una costra en la superficie del producto, fenómeno que dificulta la extracción de humedad. Además una temperatura demasiado baja aumenta considerablemente el tiempo de operación. Algunos productos son termosensibles y no pueden ser secados a temperaturas superiores de 60°C. Como ya se ha mencionado, la convección es el método de transferencia más utilizado en el secado.[22]

#### **5.4 SECADO CONVECTIVO.**

Un ejemplo típico de esta categoría es el secador de bandejas. La materia prima a secar se coloca en una bandeja. Se pasa aire caliente y seco sobre la materia prima (secado de flujo cruzado) o a través de ella (flujo de circulación). El calor fluye desde el aire caliente a los alimentos más fríos en virtud del gradiente de temperatura e induce la evaporación. El vapor de agua pasa de la materia prima, al aire seco en virtud del gradiente de presión de vapor.[20]

#### **5.5 SECADORES EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.**

Los numerosos tipos de secadores utilizados en la industria alimentaria pueden clasificarse en diferentes criterios:

- Por método de operación: discontinuo y continuo.
- Por el mecanismo de transferencia de calor: convección (aire), convección (vapor), conducción (contacto), y radiación (infrarrojo, microondas, sol).
- Por el estado físico del material de alimentación: sólido, líquido y pasta.
- Por el movimiento del material durante el secado: estático, en movimiento y fluidizado.
- Por presión de operación: atmosférica, vacío y alta presión.[20]

En la siguiente tabla se enumeran los principales tipos de secadores utilizados por la industria alimentaria.

Tabla 1. Principales tipos de secadores utilizados en la industria alimentaria.

TIPO SECADOR	TIPO OPERACIÓN	ESTADO ALIMENTO	TIPO MOVIMIENTO	VARIEDAD PRODUCTOS
Gabinete o platos	B	S	O	Frutas, vegetales, carne, pescado
Túnel	C	S	O	Frutas, vegetales
Bandas	C	S,P	O	Frutas, vegetales
Bandas, Canal	C	S	M	Vegetales
Giratorio	C	S	M	Residuos de comida
Compartimiento	B	S	O	Vegetales
Secadores de Granos	B,C	S	O,M	Granos
Spray	C	L,P	M	Leche, Café, Té
Lecho Fluidizado	B,C	S	F	Vegetales, Granos, levadura
Neumático	C	S	M	Harina
Tambor	C	L,P	O	Puré de patatas
Tornillo transportador	C	S,P	M	Granos, residuos
Mezclador	B	S	M	Partículas de polvos
Solar	B,C	Todos	Todos	Todos
Secado al sol	B	S	O	Frutas, verduras, pescado

B, lote; C, continua; S, sólido; L, líquido; P, pasta; O, estático; M, movimiento; F, fluidizado.

Fuente: Food Process Engineering and Technology ( Berk, Z, 2018).

## **5.6 EQUIPOS PARA SECADO.**

### **5.6.1 SECADOR ROTATORIO.**

El secador rotatorio en cascada es un secador de contacto directo de funcionamiento continuo que consiste en una carcasa cilíndrica que gira lentamente y está inclinada típicamente hacia la horizontal, unos pocos grados para ayudar al transporte de la materia prima húmeda que se introduce en el tambor en el extremo superior y el producto seco retirado en el extremo inferior. El medio de secado se produce a partir de aire caliente, gases de combustión que fluye axialmente a través del tambor, ya sea simultáneamente con el material de alimentación o en contracorriente. [23]

### **5.6.2 SECADOR DE CORREA.**

Los secadores de banda se encuentran entre los secadores continuos más versátiles para alimentos sólidos. Se utilizan ampliamente, para la deshidratación a gran escala de vegetales. Un secador de cinta funciona como un secador de túnel con la diferencia que las bandejas y camiones han sido reemplazados por cintas transportadoras. Estos secadores pueden ser operados mediante flujo cruzado, flujo continuo o combinación de ambos. En secadores de operación de flujo continuo, la correa está hecha de malla metálica para permitir la circulación de aire; a través de la cama los secadores de banda pueden ser de una etapa o de múltiples etapas. [20]

### **5.6.3 SECADORES DE SPRAY.**

Los secadores por aspersion se utilizan para secar soluciones y suspensiones líquidas, con el fin de producir polvos ligeros y porosos, es el método estándar para la

producción de alimentos como: leche, suero en polvo, crema de café, queso en polvo, extracto de levadura deshidratada, café instantáneo, té y muchos otros productos en forma de polvo, el secado por pulverización es uno de los métodos utilizados para la microencapsulación. El líquido se dispersa (atomiza) como un rocío de gotas finas en el aire muy caliente dentro de una gran cámara, debido a su pequeño tamaño y la alta temperatura del aire, las gotas se secan en cuestión de segundos y se transforman en partículas de polvo sólido. A la salida de la cámara, las partículas sólidas se separan del aire húmedo.[20]

#### **5.6.4 SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO.**

En secadores de lecho fluidizado, el aire caliente y seco se utiliza tanto para la fluidización y para el secado. Se puede aplicar secado en lecho fluidizado de alimentos no pegajosos con un tamaño de partícula dentro del rango de 0.05–10 (mm). Dependiendo de la densidad se puede secar en lecho fluidizado con operación continuo y lotes. Debido a la eficiente transferencia de calor y masa, el producto se seca rápidamente, parte del aire caliente puede recircularse, como en un secador de bandejas, donde se evita en gran medida la adherencia y la acumulación de productos en secadores continuos con movimientos vibratorios. Los secadores de lecho fluidizado también se utilizan para la aglomeración de polvo y recubrimiento de partículas.[20]

#### **5.6.5 SECADOR NEUMÁTICO.**

En los secadores neumáticos, las partículas se secan mientras se mueven por una corriente de aire caliente y seco. Este método se utiliza a menudo para eliminar la humedad "libre" en período de velocidad de secado constante. Se pueden lograr altas

tasas de secado, pero el tiempo de residencia es demasiado corto para un secado completo. Por esta razón, el secado neumático se utiliza a menudo como un método de secado previo, seguido de otro proceso de secado. El uso del secado neumático en la industria alimentaria se limita al secado de harinas, almidón, gluten en polvo, caseína en polvo, etc.[20]

#### **5.6.6 SECADORES DE TAMBOR.**

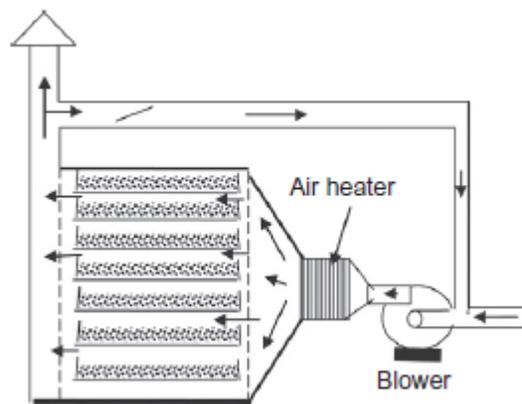
Los diferentes tipos de secadores de tambor varían en el método utilizado para aplicar el material húmedo en la superficie del tambor. Los secadores de tambor se clasifican en dos tipos, tambor simple y tambor doble. Los secadores de tambor doble consisten en dos tambores que giran en direcciones opuestas, con una brecha estrecha, ajustable entre los dos. El método de aplicación es la alimentación por inmersión. El tambor es parcialmente sumergido en el fluido de alimentación contenido en una bandeja. Este tipo de alimentación se utiliza para materiales menos viscosos, como leche y otros productos lácteos.[20]

#### **5.6.7 SECADOR DE BANDEJAS.**

Este tipo de secador se emplea para productos de pequeño tonelaje. Un secador de bandejas por lotes consiste en varias pilas de bandejas que descansan en estantes con un espacio adecuado entre ellas, en la que el aire caliente circula con ventiladores y álabes de guía diseñados apropiadamente, por lo general los fondos de las bandejas son de rejilla o perforados con el fin de proporcionar mejor dispersión del flujo de aire, a través de las bandejas. Variables de proceso como la velocidad de secado, y el contenido de humedad dependen de la posición del producto en las bandejas.[20] Los tiempos de secado son largos (10-60 horas). La clave del éxito de la operación es la distribución uniforme del flujo de aire sobre las bandejas. Es lo que decide el tiempo

de residencia requerido y por lo tanto la capacidad del secador. La deformación de las bandejas también puede causar una mala distribución del aire de secado y, por lo tanto, un rendimiento deficiente del secador.[23]

Gráfico 1. Secador de bandejas.



Fuente: Food Process Engineering and Technology ( Berk, Z, 2018).

## **6 PARTE EXPERIMENTAL.**

### **6.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE CINÉTICA DE SECADO.**

Existen dos grupos de modelos matemáticos que describen el proceso de secado térmico de productos agrícolas, los más usados en la formulación del fenómeno de secado, se destacan los modelos de cinética de secado que se basan en relaciones semiempíricas de capa fina. Estos realizan una simplificación de las ecuaciones que describen el proceso. También se aplican modelos de cinética de secado que emplean la analogía con la transferencia de calor. Analizar el proceso mediante esta analogía implica realizar un estudio profundo de los complejos fenómenos de transporte, por esto la mayor cantidad de investigaciones consultadas abordan principalmente la cinética de secado mediante los modelos de capa fina.[24]

En la literatura se encuentran varios modelos teóricos, semiteóricos y empíricos. Para analizar la cinética de secado durante el secado de alimentos. Los modelos más utilizados se observan en la tabla 2. [25]

Tabla 2. Modelos matemáticos utilizados para probar la cinética de secado de hortalizas y frutas.

NOMBRE MODELO	MODELO	REFERENCIA
Newton	$MR = \exp(-Kt)$	(Liu et al.,1997; Nellist.1987)
Page	$MR = \exp(-Kt^n)$	(Agrawal and Singh,1977;Bruce.1985)
Henderson and Pabis	$MR = a * \exp(-Kt)$	(Pal and Chakraverty, 1997;Rahman and Perera,1996)
Two-Term	$MR = a * \exp(bt) + c * \exp(dt)$	(Henderson,1974)
Asymptotic Logarithmic	$MR = a * \exp(-Kt) + b$	(Yaldyz and Ertekyn,2001)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang and Singh,1978)
Diffusion Approximation	$MR = a * \exp(-Kt) + (1-a) \exp(-Kat)$	(Henderson,1974)
Two term Exponential	$MR = a * \exp(-Kt) + (1-a) \exp(-Kat)$	(Wang and Singh,1978)
Verma et.al.	$MR = a * \exp(-Kx) + (1-a) \exp(-gt)$	(Verma et al,1985)
Modified Henderson and Pabis	$MR = a * \exp(-Kx) + b \exp(-gx) + c \exp(-gx)$	(Karathanos and Belessiotis,1999)

Fuente: Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Mujundar, 2011).

Los modelos cinéticos teóricos de secado que se evaluaron en este estudio se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Modelos cinéticos evaluados en este estudio.

NOMBRE DE MODELO	MODELO	CONSTANTES DE SECADO
NEWTON	$MR = \exp(-Kt)$	K.
PAGE	$MR = \exp(-Kt^n)$	K, n.
HENDERSON AND PABIS	$MR = a * \exp(-Kt)$	K, a.

Fuente: Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Mujundar, 2011).

En este estudio se tomó como partida inicialmente los modelos mencionados en la tabla 3 para ver el comportamiento de cada uno de ellos, sin embargo al no presentar concordancia de los datos evaluar otros modelos.

Este tipo de modelos se desarrollan para las diferentes operaciones de secado por convección, conductivo o radiactivo, estos modelos introducen diferentes constantes, como K en el modelo de Newton o K y n en el modelo de Page. Las constantes se llaman "constantes de secado" y se determinan a partir de datos experimentales, ingresando los datos de la curva de secado en un software que trata el ajuste de curvas, como el software Statgraphics versión XVII Centurion, 2018 entre otros. Luego se obtienen constantes de secado para cada condición operativa. Después las constantes de secado se determinan como funciones de las condiciones de operación. El modelo más preciso es el que presenta el mayor coeficiente de determinación  $R^2$ . [26]

Este estudio se aplicó al caso de rodajas de remolacha utilizando la metodología de análisis de regresión múltiple para describir la proporción de humedad con respecto al tiempo. Evaluando tres modelos de secado de capa fina, incluidos los modelos de Newton, Page y Henderson y Pabis, se ajustaron a datos experimentales, utilizando regresión no lineal y ajuste de mínimos cuadrados. [27]

## **6.2 MODELO DE LEWIS.**

El modelo de Lewis se utiliza inicialmente para ajustarse a los datos experimentales de la cinética de secado debido a su simplicidad. El objetivo de este modelo es que se produce una resistencia interna insignificante, lo que indica que no hay resistencia al movimiento de la humedad desde el interior del material hacia la superficie del material. La velocidad de secado es proporcional a la diferencia en el contenido de humedad entre el material de secado y el contenido de humedad de equilibrio en la

condición del aire de secado. Este modelo se aplicó con éxito para modelar la cinética de secado de las semillas de uva, té negro, entre otros. [28]

### **6.3 MODELO DE HENDERSON Y PABIS.**

El modelo de Henderson y Pabis también se conoce como un modelo exponencial. Este modelo es el primer término de una solución de serie general de la segunda ley de Fick. La pendiente de este modelo, el coeficiente K está vinculado a la difusividad efectiva de la humedad cuando el proceso de secado tiene lugar solo en el período de caída y en el proceso de control de difusión de líquidos. Este modelo se utilizó con éxito para simular el secado del maíz. [28]

### **6.4 MODELO DE PAGE.**

Page propuso una modificación del modelo de Lewis introduciendo un nuevo coeficiente que afecta el tiempo. Las modificaciones fueron sugeridas para corregir algunas deficiencias. Este modelo sugiere el uso de dos constantes empíricas; el modelo ha producido buenos ajustes para caracterizar el secado de varios productos agrícolas, como las hojas de laurel, colza, pistachos entre otros. El modelo de Page modificado se utilizó para describir el proceso de secado de la col rizada.[28]

- Ecuación para calcular la relación de humedad.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

Donde  $M_t$  es la humedad en base seca en el tiempo  $t$ .  $M_e$  es la humedad de equilibrio contenido en base seca. y  $M_o$  es el contenido de humedad inicial en base seca.[27]

## **6.5 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS.**

### **6.5.1 Prueba Chi-cuadrado o prueba de Pearson.**

La distribución de Chi-cuadrado, es la medida que nos permite averiguar el grado de discrepancia entre lo observado y las frecuencias esperadas, para determinar la discrepancia entre las frecuencias observadas y esperadas se debe a error de muestreo o por casualidad. El Chi-cuadrado se denota con el símbolo  $\chi^2$  este valor siempre es positivo y está en el rango de  $(0-\infty)$ . La distribución de  $\chi^2$  se utiliza para probar la bondad del ajuste. Además se usa para encontrar asociación y relación entre atributos. [29]

### **6.5.2 Ecuación para calcular Chi-cuadrado $\chi^2$ .**

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2)$$

Donde  $O_i$  es la frecuencia observada y  $E_i$  es la frecuencia esperada.

### **6.5.3 Ecuación para calcular el coeficiente de determinación.**

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{teor})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$MR_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{teor} - MR_{exp,i})^2} \quad (5)$$

Donde  $MR_{exp,i}$  es el valor de humedad calculado experimentalmente.

$MR_{teor}$  es el valor de la humedad obtenido al calcular cada uno de los modelos.

$N$  es el número de observaciones, obtenidas en cada modelo cinético. [27]

## 6.6 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.

Secador continuo y funcionamiento en paralelo.

$$F_1 \cdot \omega_2 + F_2 \cdot H_{a1} = M_s \cdot \omega_4 + F_4 \cdot H_{a2} \quad (6)$$

Donde  $F_1$  masa sólido inicial (Kg),  $\omega_1$  contenido inicial de humedad en el sólido (Kg de agua / Kg sólido seco),  $\omega_4$  contenido de humedad del sólido saliendo del secador (Kg de agua/Kg sólido seco),  $F_2$  flujo de aire seco (Kg/h),  $H_{a1}$  y  $H_{a2}$  humedad absoluta a la entrada y salida del secador (Kg de agua/Kg de aire seco).

$$F_1 + H_2 + F_2 \cdot Q_{a1} = M_s \cdot H_4 + F_4 \cdot Q_{a2} + Q_t \quad (7)$$

Donde  $H_2$  y  $H_4$  son las entalpías del sólido en la entrada y salida del secador (KJ/Kg),  $Q_{a1}$  y  $Q_{a2}$  son las entalpías del aire en la entrada y salida del secador (KJ/Kg),  $Q_t$  es el calor total perdido (KJ).

## 6.7 BALANCES DE EXERGÍA.

El balance de exergía tiene una consideración para este estudio, donde solo se aplica en términos de entrada y salida del sistema.

$$F_a \cdot e_1 + \omega_1 \cdot (e_p)_1 = F_a \cdot e_3 + \omega_3 \cdot (e_p)_3 \quad (8)$$

Donde  $\omega_1$  Relación de humedad del aire Kg agua/Kg aire,  $e_1$  y  $e_3$  exergía específica en la entrada y salida del sistema,  $(e_p)_1$  y  $(e_p)_3$  exergía específica del producto en la entrada y salida.[30]

## 6.8 CARACTERÍSTICAS BALANCE DE EXERGÍA.

La exergía es la cantidad máxima de trabajo que se puede obtener de una corriente de materia, calor o trabajo cuando cierta materia se lleva a un estado de equilibrio termodinámico con los componentes comunes del entorno natural.[31]

Sin embargo, los secadores de aire caliente presentan ciertas desventajas críticas, como la baja eficiencia energética y las importantes pérdidas de energía térmica. Además basado en investigaciones anteriores, el análisis de exergía es

indudablemente una herramienta útil para mejorar y optimizar los procesos de secado.[32]

El análisis de exergía de los procesos y sistemas de secado se puede clasificar en función de diferentes aspectos. Se puede derivar un grupo a partir de los criterios de clasificación de los secadores, incluyendo el modo de operación, el tipo de entrada de calor, el estado del material en el secador, la presión de operación, el medio de secado, la temperatura de secado, el movimiento relativo entre el medio de secado y los sólidos de secado, el número de etapas, y tiempo de residencia. [31]

## **6.9 DIFERENCIA DE COLOR.**

El color es el atributo más importante, hace parte de la apariencia del producto, que determinará el nivel de aceptación por parte de los consumidores. Los pigmentos de color, condición de temperatura, pH, las reacciones de Maillard y el pardeamiento enzimático juegan un papel importante en los cambios de color del producto durante el secado.

La evaluación del color se puede realizar utilizando métodos destructivos o no destructivos. El método destructivo se lleva a cabo mediante la evaluación espectrofotométrica de los pigmentos de color extraídos o mediante cromatografía líquida de alto rendimiento. Alternativamente, el método no destructivo puede usarse y es preferido por la mayoría de los investigadores, usando el espacio de color CIELAB ( $L^* a^* b^*$ ), los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  representan el espectro claro-oscuro con un rango de 0 (negro) a 100 (blanco), el espectro verde-rojo con un rango de -60 (verde) a +60 (rojo), y el espectro azul-amarillo con un rango de -60 (azul) a +60 (amarillo), respectivamente. [33]

Tabla 4. Factores que contribuyen a los cambios de color durante el secado.

Componentes	Compuestos	Efectos del secado
Pigmentos	Clorofilas	Cambia de verde a amarillo o a rojo.
	Carotenoides	Oxidación de pigmentos carotenoides por oxígeno en aire.
	Antocianos	Bastante estable durante el procesamiento a bajo pH
	Betalainas	Muy sensible al pH, degradado a compuesto marrón a pH neutro
Reacciones		
Reacciones de Maillard	Reducción de azúcar, aminoácidos, proteínas.	Formación de pigmentos marrones o negros, melanoidinas y otros compuestos perfumados.
Ennegrecimiento enzimático	Fenólicos	Transformación de compuestos fenólicos a polímeros marrones o negros.

Fuente: Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Mujundar, 2010).

#### 6.10 ECUACIONES PARA DETERMINAR LA PÉRDIDA DE COLOR DURANTE EL PROCESO DE SECADO.

$$\text{Ángulo de tono} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (9)$$

$$\text{Croma } (C^*) = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (10)$$

$$\text{Cambio total de color } \Delta\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{\text{ref}}^*)^2 + (a^* - a_{\text{ref}}^*)^2 + (b^* - b_{\text{ref}}^*)^2} \quad (11)$$

El alto valor del ángulo de tono indica menos pardeamiento y viceversa, mientras que el croma  $C^*$  es una medida de la intensidad del color, como la intensidad o la saturación. La Tabla 5 muestra los niveles descriptivos de cambio de color según lo determinado a partir de los valores de  $\Delta E$ . En la mayoría de los casos, no es deseable una gran diferencia en  $\Delta E$ , ya que los consumidores tienden a preferir un producto que se asemeje al color del producto fresco antes del secado. Un valor de  $\Delta E$  muy grande podría indicar un mayor grado de pardeamiento, lo que podría tener un aspecto poco atractivo.[33]

Tabla 5. Niveles descriptivos de cambio de color.

Nivel	Rango $\Delta E$
Diferencia de nivel de rastreo	0 - 0.5
Ligeramente diferente	0.5 - 1.5
Diferencia notable	1.5 - 3.0
Diferencia apreciable	3.0 - 6.0
Gran diferencia	6.0 - 12.0
Diferencia muy obvia	> 12.0

Fuente: Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Mujundar, 2010).

## 7 METODOLOGÍA.

Localización. El trabajo se realizó en el laboratorio de ingeniería de alimentos que se encuentra ubicado en la Universidad de Pamplona durante un mes y medio, desarrollando la parte experimental y análisis de propiedades físicas de la remolacha (*Beta vulgaris*).

### 7.1.1 Materia Prima.

Tamaño de muestra: 1000 gramos del tubérculo.

Nombre: Remolacha, Betarraga.

Nombre científico: (*Beta vulgaris*)

Familia: Amaranthaceae.

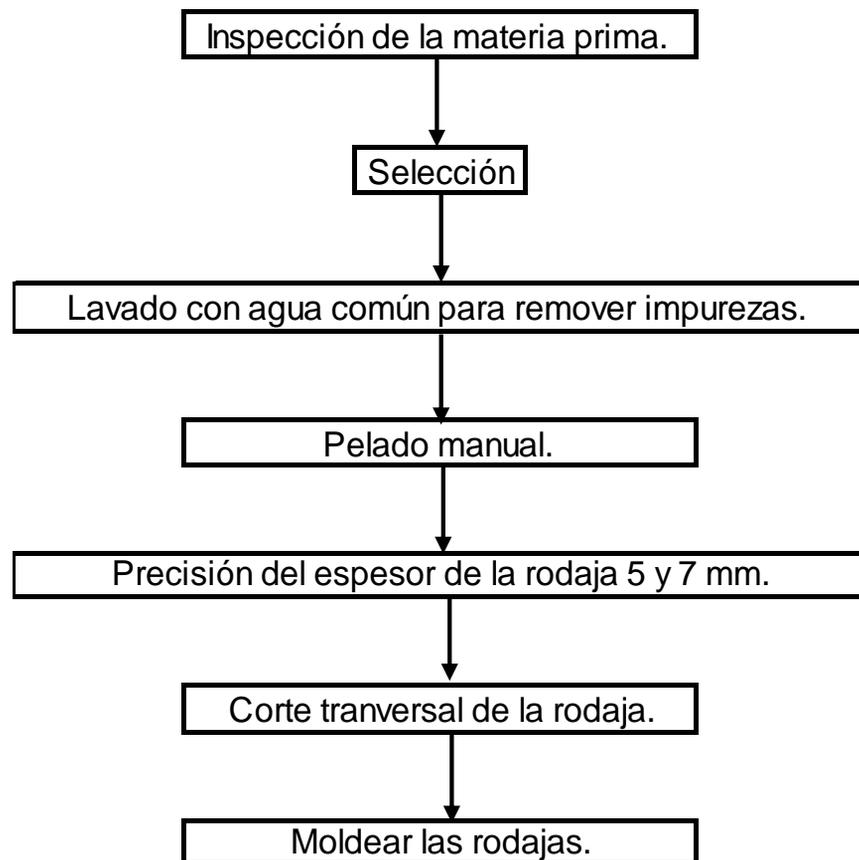
La muestra de remolacha (*Beta vulgaris*) se recolectó de cultivos de remolacha ubicado en la vereda Llano Grande perteneciente al municipio de Chitagá, Norte de Santander. El tubérculo de raíz se clasificó según revisión visual aplicando la Norma Técnica Colombiana NTC 1224, seleccionando su tamaño grande de (80-100) mm correspondiente al grado de calidad primera (1<sup>a</sup>). Debe presentarse entera y bien formada, dura, limpia, sin marcas de ataques de plagas y enfermedades, sin manchas grietas o golpes.

## 7.2 PREPARACIÓN DE LAS RODAJAS DE REMOLACHA.

Instrumentos empleados: Cuchillo de uso doméstico, tabla de madera, molde en lámina galvanizada.

La muestra se preparó a partir del siguiente procedimiento.

Diagrama 1. Procedimiento preparación de la muestra.



Fuente: Autor.

### 7.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA REMOLACHA (*BETA VULGARIS*).

La remolacha, está compuesta de un 75% de agua y un 25% de materia seca.

Tabla 6. Composición química de la remolacha (*Beta vulgaris*).

Componente	%
Agua	75
Celulosa	9
Fibra	8
Proteína	5
Ceniza	3

Fuente: Status and Perspectives in Bioethanol Production From Sugar Beet (Marzo, 2019).

### 7.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE RODAJAS DE REMOLACHA (*BETA VULGARIS*).

Se empleó un instrumento de medición Pie de rey, marca Sterrett 125 MEA, para la toma Pie de rey, para la toma de dimensión del diámetro y espesor de las rodajas de remolacha durante cada media hora. Se determinó la pérdida de peso de la muestra en una balanza analítica marca Smartext durante un tiempo de 12 horas en intervalos de media hora de secado.

## **7.5 EQUIPO PARA EL PROCESO DE SECADO.**

Secado por aire caliente.

Equipo empleado: SBANC. Secador de Bandejas, Controlado desde Computador con sistema de control (SCADA) de EDIBON, se encuentra ubicado en el laboratorio de alimentos en la Universidad de Pamplona.

## **7.6 VARIABLES PROPIAS DEL SECADOR DE BANDEJAS.**

En el equipo se pueden operar las siguientes variables:

- Temperatura de entrada (°C): Es la temperatura de la resistencia controlada desde computador para el calentamiento del flujo de aire, que conduce a lo largo del túnel.
- Temperatura de salida (°C): Es la temperatura registrada por los sensores de temperatura, bulbo seco y húmedo, que determinan la temperatura del aire a la salida del túnel.
- Flujo de alimentación: Es el flujo de entrada generado por un ventilador axial controlado desde computador (PC), situado a la entrada del túnel, para introducir el aire necesario para secar el producto.

La primera variable estudiada fue la temperatura del aire a la entrada por ser la más importante en el proceso de secado, teniendo en cuentas las especificaciones del equipo de una temperatura máxima de (70°C), manteniéndose fijas las demás variables.

La siguiente variable estudiada fue el flujo de alimentación, se toman constantes las demás variables del equipo. En esta variable influye el rango de velocidad del equipo: 0-2500 r.p.m. donde a mayores velocidades, afecta la estabilidad del producto y propiedades organolépticas.

## 7.7 DISEÑO EXPERIMENTAL.

Teniendo en cuenta lo establecido anteriormente se realizó el siguiente diseño experimental.

Variables fijas: Familia: Amaranthaceae remolacha (*Beta vulgaris*).

Variables independientes: Temperatura, velocidad de aire, espesor.

Variables dependientes: Color, humedad final del producto.

Se realizará un diseño experimental 3\*3\*2 del cual resultan 18 tratamientos con 3 repeticiones como se observa a continuación en la tabla 7.

Tabla 7. Diseño experimental 3X3X2 para estudiar el proceso de secado de remolacha (*Beta vulgaris*).

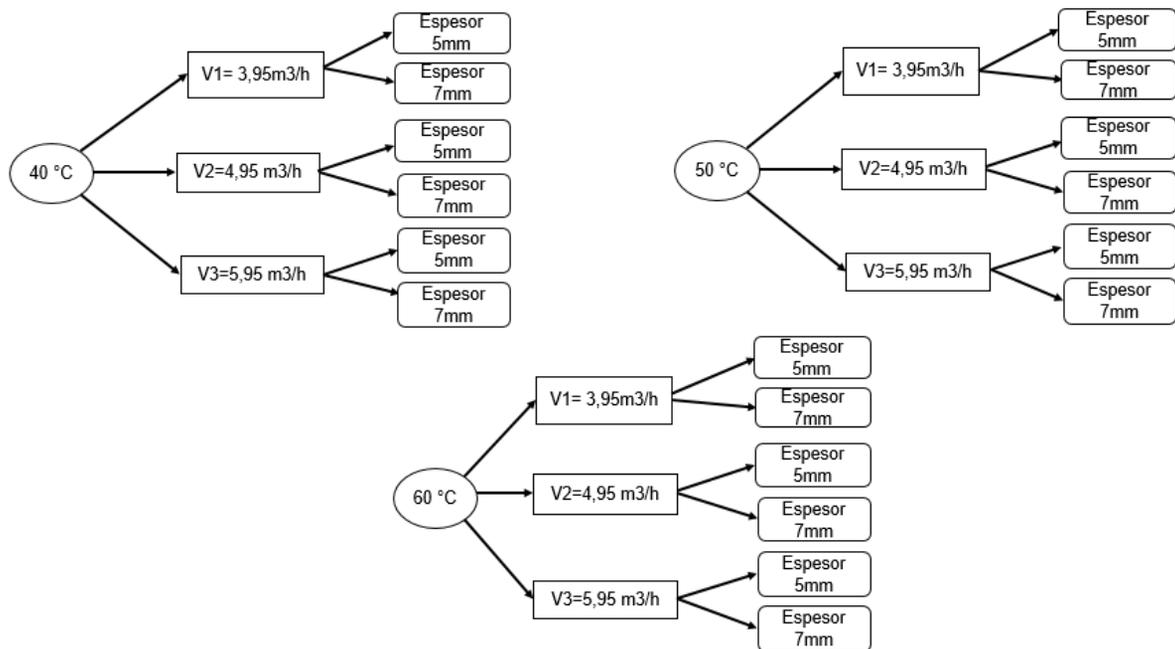
Variable	Nivel	valores
Temperatura (°C)	3	40, 50, 60
Velocidad Aire (m <sup>3</sup> /h)	3	800, 1200, 1600
Espesor (mm)	2	5, 7

Fuente: Autor.

En el siguiente diagrama se observan las combinaciones de los 18 tratamientos resultantes con 3 repeticiones.

### Diagrama secuencia del diseño experimental.

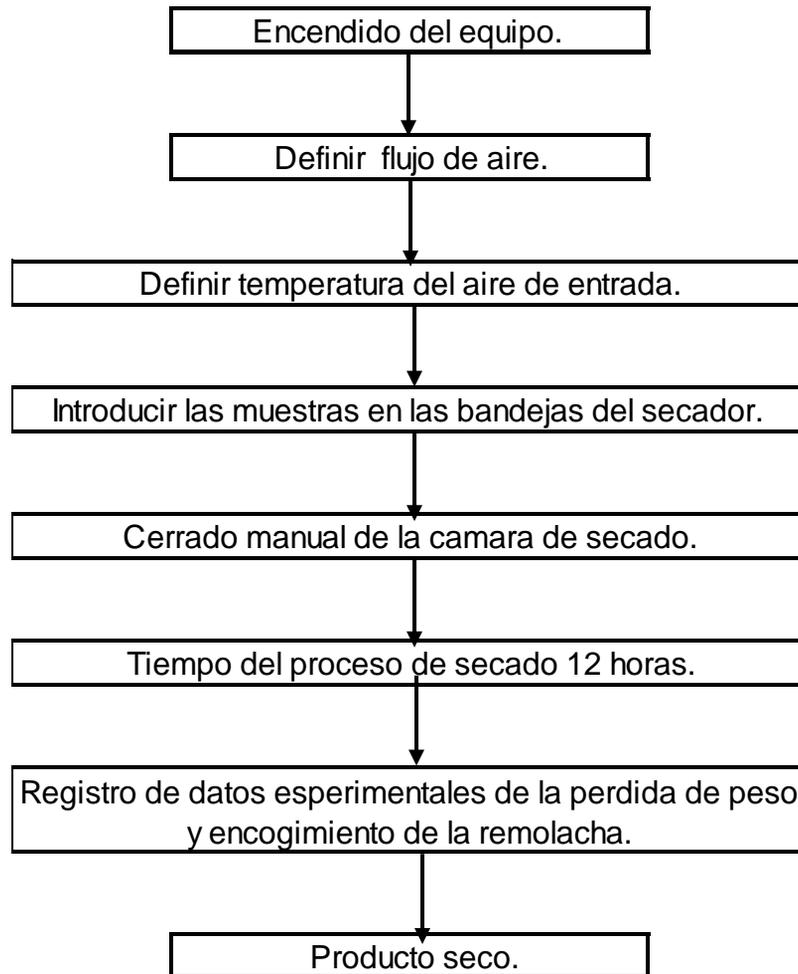
Diagrama 2. Combinación de los tratamientos en el diseño 3X3X2.



Fuente: Autor

## 7.8 PROCEDIMIENTO DE SECADO DE REMOLACHA (*Beta vulgaris.*)

Diagrama 3 . Procedimiento de secado.



Fuente: Autor.

## 7.9 HIPÓTESIS RELACIÓN DE VARIABLES.

Se planteó una hipótesis de análisis Anova Simple empleando el software Statgraphics Version XVII Centurion ® licencia temporal.

Tabla 8. Hipótesis planteada a partir de la relación de las variables independientes y sus niveles para el diseño experimental.

Variables		Niveles		
X1= T	Temperatura flujo de aire ( °C)	40	50	60
X2= V	Velocidad flujo de aire (m3/h)	3,95	4,95	5,95
X3= E	Espesor de corte (mm)	5	7	

Fuente: Autor.

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para datos. Construye varias pruebas y la gráfica de caja y bigotes para comparar los valores medios de datos para los 3 diferentes niveles de variables. La prueba-F en la tabla ANOVA determina que hay diferencias significativas entre las medias. Por tanto, las pruebas de rangos múltiples determinan cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

Tabla 9. Resumen estadístico para datos.

Variables	Recuento	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Error Estándar
E	2	2	1,41421	23,57%	1
T	3	100	10	20,00%	5,7735
V	3	1	1	20,20%	0,57735
Total	8	562,86	23,7247	107,32%	8,38793

Fuente: Autor.

La tabla 10 muestra diferencias estadísticas de datos para cada uno de los 3 niveles de variables. La intención principal del análisis de varianza de un factor es comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados aquí.

Tabla 10. Tabla ANOVA para datos por variables.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3736,02	2	1868,01	45,7845	0,0006
Intra grupos	204	5	40,8		
Total (Corr.)	3940,02	7			

Fuente: Autor.

La tabla ANOVA descompone la varianza de datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F= 45,7845, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de datos entre un nivel de variables y otro, con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se seleccionó las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 11. Pruebas de Múltiple Rangos para Datos por Variables.

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD			
Variables	Casos	Media	Grupos Homogéneos
V	3	4,95	X
E	2	6	X
T	3	50	X

Fuente: Autor.

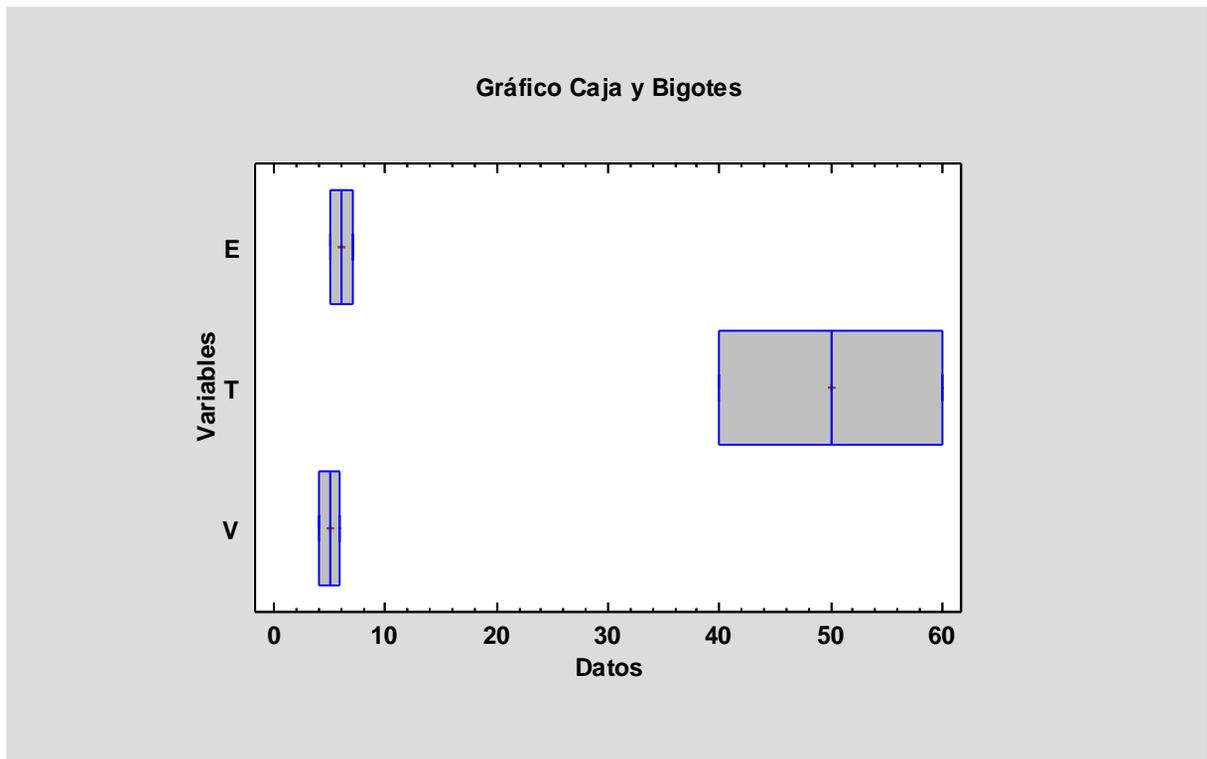
Tabla 12. Diferencia significativa.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
E - T	*	-44	18,9728
E - V		1,05	18,9728
T - V	*	45,05	16,9698
* indica una diferencia significativa.			

Fuente: Autor.

En la tabla 12 se muestran los resultados del procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El cual indica que la mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. Además se identificaron 2 grupos homogéneos según la alineación de las X en columnas en la tabla 11. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X. Por esta razón se empleó el método para discriminar entre las medias, el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0. Las tablas 9 y 12 se obtienen de los datos reportados en la tabla 8 que corresponden a los niveles de cada variable.

Gráfico 2. Diagrama de cajas y bigotes.



Fuente: Autor.

En el gráfico 2 los cuadros nos indican que hay una distancia significativa entre ellos por esta razón si trazamos una línea horizontal desde la variable T hacia las variables V y E que los intercepte, no hay una diferencia significativa porque nunca se tocan. Por tanto la temperatura durante todo el proceso se mantiene constante, donde se hace una aproximación dado que la disminución del espesor de la rodaja de remolacha (*Beta vulgaris*) depende de la velocidad de flujo de aire del secador.

## 7.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8 DESARROLLO DEL SEGUNDO OBJETIVO.

Determinar el modelo cinético de secado que mejor represente los datos experimentales obtenidos.

Tabla 13. Modelos cinéticos de secado.

NOMBRE MODELO	MODELO	REFERENCIA
Newton	$MR = \exp(-Kt)$	(Liu et al.,1997; Nellist.1987)
Page	$MR = \exp(-Kt^n)$	(Agrawal and Singh, 1977;Bruce.1985)
Henderson and Pabis	$MR = a * \exp(-Kt)$	(Pal and Chakraverty, 1997; Rahman and Perera,1996)

Fuente: Autor.

Se seleccionaron tres modelos cinéticos de secado que corresponden al Modelo de Newton, Henderson y Pabis y Page, estos modelos se basan en relaciones empíricas de capa fina. Se escogieron estos modelos porque presentan una simplificación de las ecuaciones que describen el proceso de secado de rodajas de remolacha (*Beta Vulgaris*). Por tanto, en este estudio se hace una descripción completa utilizando los datos experimentales del secado de rodajas de remolacha (*Beta Vulgaris*), para obtener cada una de las constantes de los modelos seleccionados mediante el uso de ecuaciones con ajuste de mínimos cuadrados y regresión lineal, por esta razón se empleó el software Statgraphics Centurión® versión XVII prueba gratuita, donde se

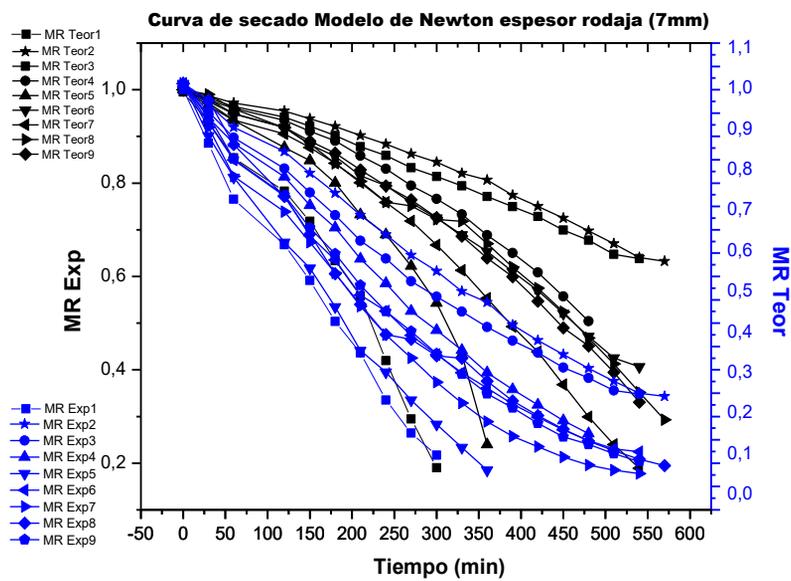
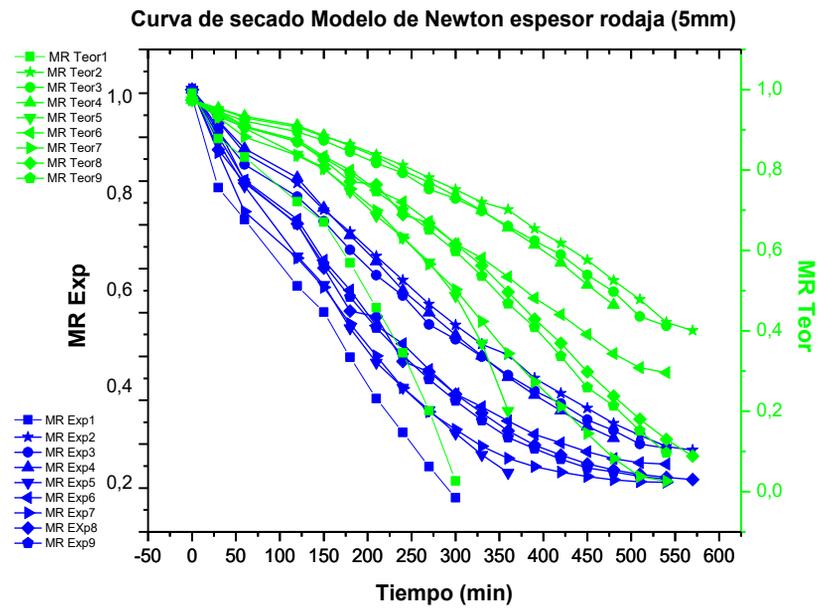
realizó un ajuste de regresión no lineal y de esta forma determinar el mejor ajuste. Además se formulan los modelos matemáticos en la tabla 31 anexos B, para cada ensayo, evaluados en análisis de regresión no lineal. Donde se rigen únicamente por las condiciones de operación del secador en el laboratorio, para el secado de rodajas de remolacha (*Beta Vulgaris*).

Tabla 14. Resultados estadísticos obtenidos de los modelos cinéticos de secado para rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*).

N° Ensayo	Temperatura (°C)	Flujo de Aire (m3/h)	Espesor (mm)	Modelo Cinético N°	Parametros de modelos.			R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE
					K	a	n			
1	40	3,95	5	0,1	0,0062			0,9786	18,44760317	0,0026719
	40	3,95	7	0,1	0,0056			0,9827	15,30240361	0,002275307
2	40	4,95	5	0,1	0,0041			0,9774	60,22312387	0,004451594
	40	4,95	7	0,1	0,0028			0,9891	28,52275784	0,002218972
3	40	5,95	5	0,1	0,0043			0,9864	53,87083536	0,004182473
	40	5,95	7	0,1	0,0029			0,9986	26,65314795	0,002167806
4	50	5,95	5	0,1	0,0041			0,9733	34,43937398	0,003067896
	50	5,95	7	0,1	0,0043			0,9801	37,23874876	0,003317178
5	50	3,95	5	0,1	0,0077			0,9292	63,53769419	0,007394718
	50	3,95	7	0,1	0,0074			0,9087	57,64987104	0,006706236
6	50	4,95	5	0,1	0,0053			0,9904	100,9198004	0,007747779
	50	4,95	7	0,1	0,0045			0,9844	69,36796581	0,0052826
7	60	5,95	5	0,1	0,0076			0,9833	282,60732229	0,023537343
	60	5,95	7	0,1	0,0061			0,9687	143,6098459	0,015510591
8	60	3,95	5	0,1	0,0064			0,9779	203,0371746	0,006893603
	60	3,95	7	0,1	0,0048			0,9722	94,76213843	0,015170407
9	60	4,95	5	0,1	0,0067			0,9765	188,2257521	0,006385708
	60	4,95	7	0,1	0,0049			0,9727	83,09055894	0,004957083
1	40	3,95	5	0,2	0,0034548	1,093	0,9987	0,014972284	0,025582399	
	40	3,95	7	0,2	0,00185026	1,191	0,9951	0,006355686	0,016271133	
2	40	4,95	5	0,2	0,00097444	1,221	0,9944	0,016688022	0,01544114	
	40	4,95	7	0,2	0,00072567	1,211	0,9948	0,002731187	0,008051593	
3	40	5,95	5	0,2	0,00171748	1,139	0,9976	0,012112644	0,013750592	
	40	5,95	7	0,2	0,00186195	1,07	0,9994	0,000766373	0,003948815	
4	50	5,95	5	0,2	0,00069862	1,293	0,9904	0,006281609	0,011420624	
	50	5,95	7	0,2	0,00081355	1,265	0,992	0,006929057	0,012537314	
5	50	3,95	5	0,2	0,00096748	1,326	0,988	0,039838179	0,027584766	
	50	3,95	7	0,2	0,00072289	1,368	0,9853	0,051973527	0,03330176	
6	50	4,95	5	0,2	0,00125651	1,225	0,9938	0,012681806	0,019603788	
	50	4,95	7	0,2	0,00094635	1,241	0,993	0,005852411	0,01664459	
7	60	5,95	5	0,2	0,00178542	1,212	0,9944	0,053967198	0,030171029	
	60	5,95	7	0,2	0,0006282	1,345	0,9867	0,032525641	0,026861027	
8	60	3,95	5	0,2	0,00117056	1,25	0,9925	0,041219913	0,027112668	
	60	3,95	7	0,2	0,00086574	1,259	0,9921	0,030235998	0,02070608	
9	60	4,95	5	0,2	0,00073207	1,337	0,9872	0,021409122	0,020763112	
	60	4,95	7	0,2	0,00056649	1,332	0,9876	0,014575835	0,018595873	
1	40	3,95	5	0,3	0,00558535	1,0054	0,9979	0,022934023	0,028523127	
	40	3,95	7	0,3	0,00509168	1,0289	0,9981	0,019057132	0,026774715	
2	40	4,95	5	0,3	0,00359491	1,0464	0,9974	0,06802024	0,03066639	
	40	4,95	7	0,3	0,00261123	1,0437	0,9986	0,021872498	0,02264069	
3	40	5,95	5	0,3	0,00384148	1,0267	0,9962	0,037236434	0,022626484	
	40	5,95	7	0,3	0,00283934	1,0178	0,9998	0,002480806	0,007940709	
4	50	5,95	5	0,3	0,00380138	1,0575	0,9978	0,055352051	0,034410865	
	50	5,95	7	0,3	0,00281758	1,0158	0,9904	0,001493517	0,007101757	
5	50	3,95	5	0,3	0,00571222	1,044	0,9924	0,119892633	0,046951567	
	50	3,95	7	0,3	0,00538711	1,0445	0,9926	0,143423364	0,053342474	
6	50	4,95	5	0,3	0,00456871	1,038	0,9937	0,073129002	0,03376306	
	50	4,95	7	0,3	0,00385926	1,042	0,9942	0,067781736	0,033204802	
7	60	5,95	5	0,3	0,00578932	1,0261	0,9934	0,169952433	0,039476263	
	60	5,95	7	0,3	0,00398777	1,0662	0,9922	0,070087005	0,034346657	
8	60	3,95	5	0,3	0,00485902	1,0345	0,9931	0,167094181	0,041227062	
	60	3,95	7	0,3	0,00402409	1,0691	0,9932	0,089417262	0,034270138	
9	60	4,95	5	0,3	0,00499377	1,0589	0,9919	0,174564005	0,04397141	
	60	4,95	7	0,3	0,00392692	1,0575	0,9931	0,119098839	0,04232298	

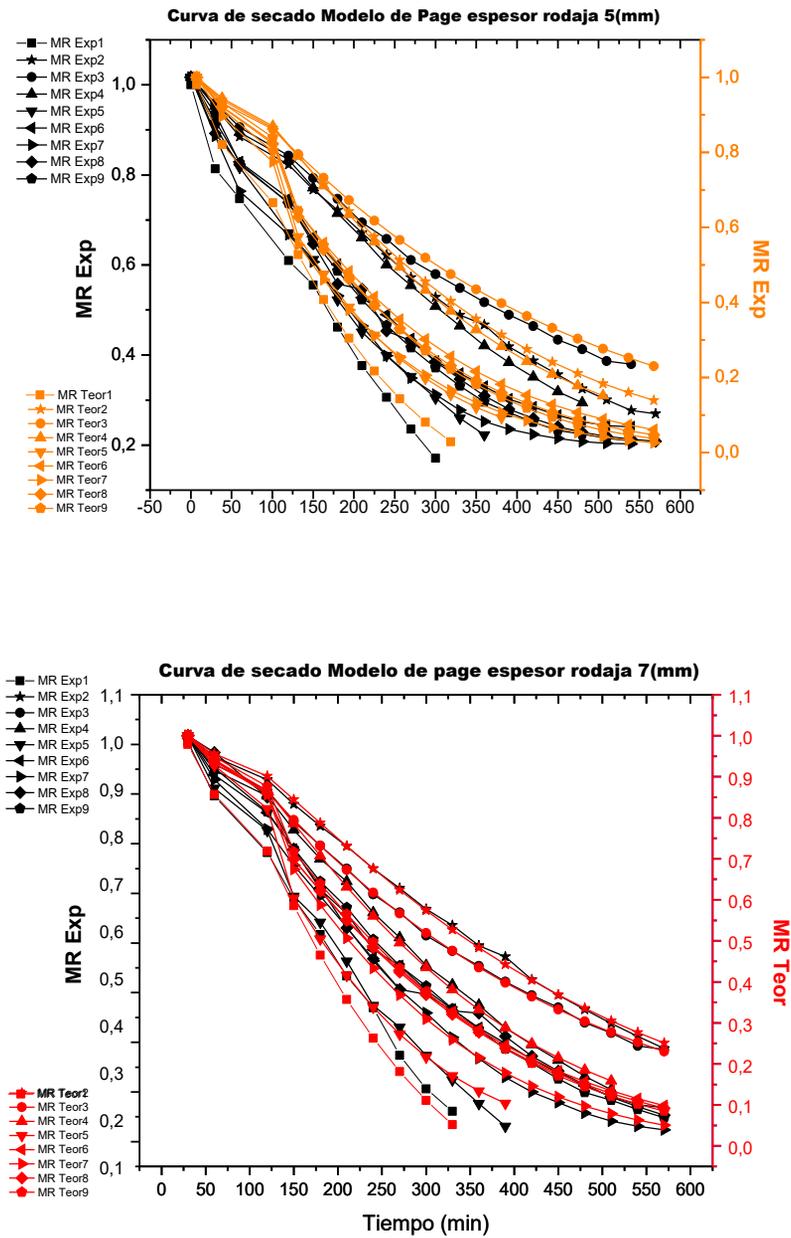
Fuente: Autor.

Gráfico 3. Variación de la relación de humedad con las condiciones de secado ajustadas por el modelo de Newton.



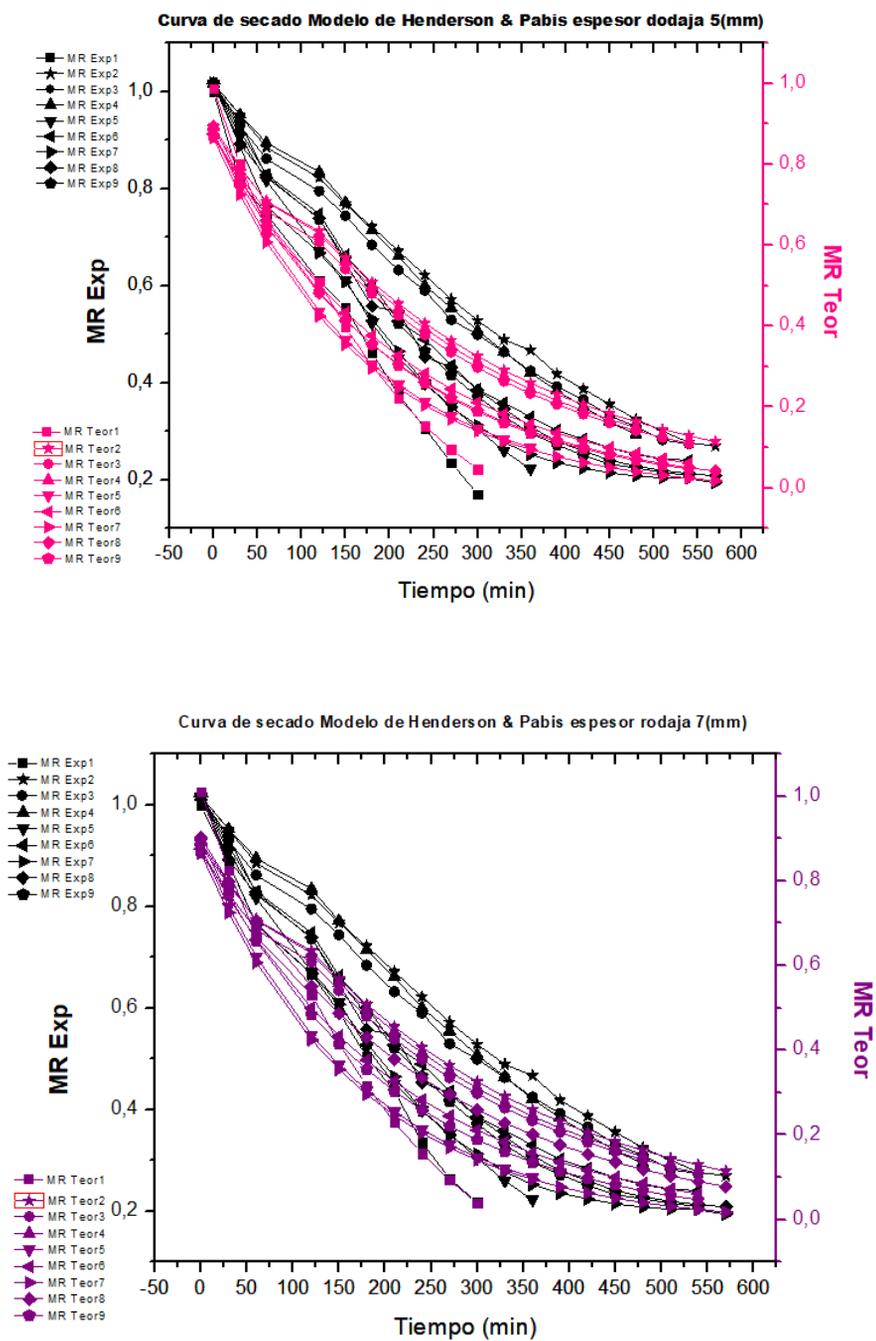
Fuente: Autor.

Gráfico 4. Variación de la relación de humedad con las condiciones de secado ajustadas por el modelo de Page.



Fuente: Autor.

Gráfico 5. Variación de la relación de humedad con las condiciones de secado ajustadas por el modelo de Henderson y Pabis.



Fuente: Autor.

## 8.1 COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE ERRORES.

Para determinar el ajuste del mejor modelo cinético de secado se consideraron los siguientes criterios. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue uno de los criterios importantes para determinar el mejor comportamiento de las curvas de secado. Además se analizaron parámetros estadísticos como Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) y el error cuadrático medio (RMSE) se utilizaron para determinar la calidad del ajuste. [27] Estos parámetros fueron calculados por las ecuaciones 9, 10, 11 respectivamente, mencionadas anteriormente.

En la tabla 14 se evidencian los resultados estadísticos para cada modelo cinético. De manera que la adaptación del modelo a los datos experimentales se evaluó con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Especificando que el modelo que tiene el valor más alto de ( $R^2$ ) y los valores más bajos del error de la media cuadrática RMSE (cerca de cero) y Chi-cuadrado reducido ( $\chi^2$ ) determina el mejor ajuste.

Tabla 15 Modelos con mejor ajuste.

Temperatura (°C)	Flujo aire (m <sup>3</sup> /h)	Espesor (mm)	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	Modelo mejor ajuste
40	5,95	7	0,9998	0,002481	0,007941	Henderson y Pabis
40	5,95	7	0,9994	0,000766	0,003949	Page

Fuente: Autor.

En la tabla 15 se muestran los modelos matemáticos con mejor adaptación a los datos experimentales, por lo tanto el modelo con mayor ( $R^2$ ) =0,9998 corresponde al modelo de Henderson y Pabis. Seguidamente está ( $R^2$ ) =0,9994 corresponde al modelo de Page. En síntesis se indica que la evaluación de estos modelos se relaciona a las mismas condiciones de operación del proceso de temperatura, flujo de aire y espesor.

El modelo de Page, es una de las ecuaciones empíricas más recurrentes aplicadas para describir la migración del agua a través de los procesos de secado de alimentos. Sin embargo, cuando se analiza en detalle, la derivación matemática muestra una serie de inconsistencias. A lo largo del tiempo autores han sugerido que la ecuación de Page es una mejora del modelo exponencial: “Para superar las deficiencias del modelo exponencial, el modelo de Page es aplicado con una modificación empírica al término de tiempo introduciendo un exponente n”. [34]

Actualmente se ha realizado estudios de modelos empíricos y semiempíricos de secado de capa delgada (incluida la ecuación de Page) y se concluye que los modelos de Henderson & Pabis y Alis modificados eran los mejores en términos de ( $R^2$ ). En primer lugar, es cuestionable elegir entre modelos basados únicamente en el criterio de ( $R^2$ ). Si la decisión de seleccionar entre modelos se fundamenta, solo en criterios estadísticos, se recomienda complementar el criterio ( $R^2$ ) con al menos un análisis de error. [34]

## **8.2 MODELOS CINÉTICOS PROPUESTOS.**

A partir del análisis de regresión múltiple, se propone las ecuaciones del modelo cinético, con mejor ajuste para el secado de remolacha (*Beta vulgaris*). Por esta razón el modelo matemático solo se cumple a condiciones de operación del proceso, correspondientes a temperatura= 40(°C), Flujo aire= 5,95(m<sup>3</sup>/h) y espesor= 7(mm).

Tabla 16. Modelo matemático con mejor ajuste, obtenido por análisis de regresión múltiple.

Mejor ajuste	Espesor (mm)	Tipo ajuste	Modelo Matemático.
Henderson y Pebis	7	Lineal	$T = 1435,1 - 6,56545 * M - 23,859 * E - 14,495 * D$
	7	Regresión no lineal	$T = 1749,66 - 32,682 * M - 30,1692 * E - 17,7393 * D + 0,278211 * (M)^2 + 2,92604 * (E)^2 + 0,0832853 * (D)^2$

Fuente: Autor.

Asimismo en el apéndice del anexo B, se proponen las ecuaciones correspondientes para cada ensayo.

## 9 DESARROLLO DEL TERCER OBJETIVO

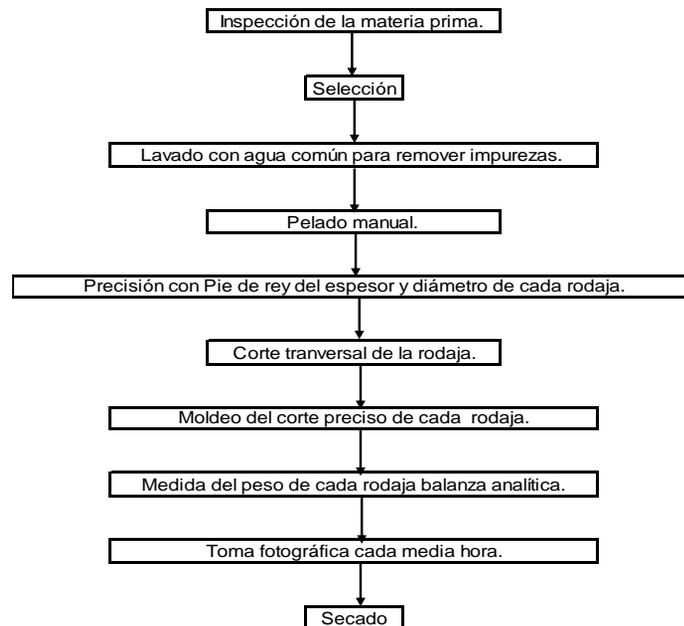
Cuantificar la variación de la propiedad física color y encogimiento de la remolacha, durante el proceso de secado.

### 9.1.1 Determinación de propiedades físicas de las rodajas de remolacha.

Para determinar con precisión los cambios de color de la superficie transversal de la remolacha durante todo el proceso de secado, se utilizó el software ColoRotate® utilizando una cámara digital marca kodak Easyshare de 12 megapíxeles, donde se tomaron fotografías cada media hora, que fueron introducidas al software ColoRotate® allí se analizó la variación de color en 3D en tiempo real.

### 9.1.2 Procedimiento para determinación de propiedades físicas

Diagrama 4. Procedimiento propiedades físicas.



Fuente: Autor

## 9.2 MEDIDA DEL COLOR.

Para determinar el efecto de la temperatura de secado en los cambios de color de la remolacha (*Beta vulgaris*) seca, se aplicó un sistema de visión por computadora. Ingresando la imagen de cada muestra, tomada cada media hora con una cámara digital marca kodak Easyshare de 12 megapíxeles. El escaneo de la imagen se logró utilizando el software ColoRotate ® licencia gratuita. De esta forma se visualizó el color como señales LAB, para determinar las constantes L\* a\* b\* para cada uno de los ensayos como se indica en la tabla 17.

Tabla 17. Determinación de la diferencia de color para cada ensayo.

Ensayo	Velocidad de aire m <sup>3</sup> /h	Temperatura °C	Espesor Rodaja (mm)	Ángulo de Tono	ΔE*
1	3,95	40	5	6,239507826	26,7620867
1	3,95	40	7	1,60887721	42,9720749
2	4,95	40	5	10,99480202	18,6837534
2	4,95	40	7	10,31930774	11,2828865
3	5,95	40	5	13,61117836	10,2682547
3	5,95	40	7	11,35281262	13,5764425
4	3,95	50	5	15,19358002	18,3851098
4	3,95	50	7	-8,293842844	21,3476614
5	4,95	50	5	13,33139746	32,7410343
5	4,95	50	7	2,636900368	23,3905965
6	5,95	50	5	2,359275451	22,5441472
6	5,95	50	7	-5,081314939	24,0730956
7	3,95	60	5	8,724115494	26,6280474
7	3,95	60	7	8,085250079	40,4769538
8	4,95	60	5	8,534430639	43,7310459
8	4,95	60	7	3,655210451	32,7436836
9	5,95	60	5	7,301417088	37,136226
9	5,95	60	7	4,542181913	40,3761486

Fuente: Autor.

En la tabla 17 se indican los resultados del ángulo de tono e índice de color  $\Delta E^*$  para cada uno de los ensayos. A partir de los resultados nos muestra que el ensayo 3 con las siguientes condiciones de operación de temperatura= 40°C y flujo de aire= 5,95 m<sup>3</sup>/h, espesor de rodaja= 5mm. Representó el valor más alto del ángulo de tono = 13,61117836 significa que hay menos pardeamiento. Según la comparación de los datos obtenidos con la tabla 5 de niveles descriptivos del cambio de color, el índice de color correspondiente al ensayo 3  $\Delta E^* = 10,2682547 > 12$  nos demuestra que hay una diferencia muy obvia en el cambio del color durante todo el proceso de secado.

Diagrama 5. Variación de color.

(a)



(b)



(c)



En el diagrama 5 se muestra el cambio de color durante el proceso de secado a temperatura 40°C. Flujo de aire (a). 3,95 m<sup>3</sup>/h, (b). 4,95m<sup>3</sup>/h, (c). 5,95m<sup>3</sup>/h respectivamente

### **9.3 PARDEAMIENTO ENZIMÁTICO.**

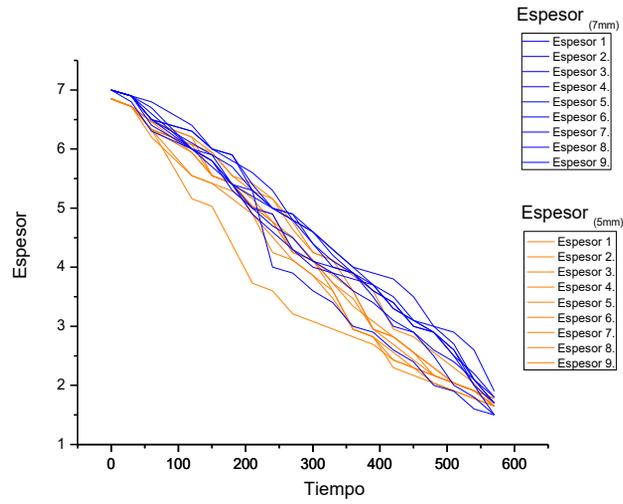
Es un fenómeno natural que ocurre ampliamente en muchas frutas y verduras. Cuando las frutas y verduras están magulladas, cortadas, peladas, enfermas o expuestas a condiciones anormales, se oscurecen rápidamente con la exposición al aire como resultado de la formación de melaninas marrones por la oxidación de los compuestos fenólicos. [34]

### **9.4 CONTRACCIÓN.**

Cuando se elimina la humedad dentro de la red sólida de un producto alimenticio durante el secado, se produce un desequilibrio de presión entre la parte interna y externa del material alimenticio, lo que genera tensiones de contracción del material, que producen cambios en la forma y, a veces, agrietamiento del producto. El atractivo visual también se ve afectado si el producto experimenta una contracción severa. Normalmente, la contracción aumenta proporcionalmente con el volumen de agua que se elimina durante el secado. [34]

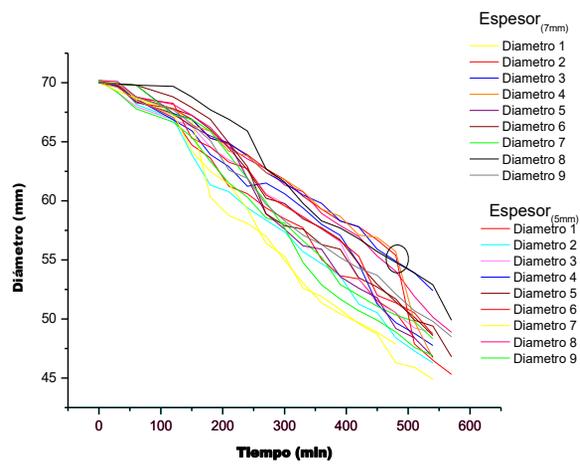
### 9.4.1 Variación del espesor.

Gráfico 6. Relación espesor de rodaja 5 y 7mm.



### 9.4.2 Variación del diámetro.

Gráfico 7. Relación de diámetro rodaja 5 y 7 mm.



Fuente: Autor.

El grafico 6 indica la relación del espesor de la rodaja de 5 y 7mm, donde su comportamiento es de tendencia lineal a medida que transcurre el tiempo se secado.

Por lo tanto el grafico 7 muestra la relación del diámetro para las rodajas de 7mm, a medida que transcurre el tiempo de secado se presentan fluctuaciones, donde el punto de referencia indica que la gráfica cae abruptamente, esto sucede porque se produce un agrietamiento interno en las paredes del alimento indicando que hay mayor eliminación de agua.

## 10 DESARROLLO DEL CUARTO OBJETIVO.

Realizar balance energético y exergético al proceso de secado.

### 10.1 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA DEL SECADOR DE BANDEJAS.

Para realizar los balances de materia y energía se dispone de la siguiente información: Humedad relativa promedio: 82%, Temperatura ambiente: 18°C, altitud sobre el nivel del mar: 2200 m, Presión atmosférica: 583 mmHg. Humedad absoluta: 0,0253381 Kg de agua/Kg aire seco, Contenido masa inicialmente 0,0271255 Kg, Temperatura bulbo húmedo promedio: 45,1 °C, Temperatura bulbo seco promedio 28,1°C, Temperatura del aire a la entrada promedio (40, 50, 60) °C flujo aire de entrada promedio 3,4337 Kg/h, contenido sólidos secos inicialmente: 13 %. Y las ecuaciones (6) y (7).

Para calcular la humedad absoluta Kg de agua/Kg aire seco, y las entalpías KJ/Kg aire seco de entrada y salida  $H_2$  y  $H_4$  respectivamente de cada balance, se empleó el software CYTSoft Psychrometric Chart 2.2 Demo modelo de licencia, prueba gratuita. Se construyó la carta psicrométrica teniendo en cuenta las condiciones ambiente de Pamplona Norte de Santander a partir de la lectura de los sensores de temperatura bulbo seco y húmedo del secador de bandejas, para cada uno de los ensayos.

Diagrama 6. Esquema cualitativo del proceso de secado.

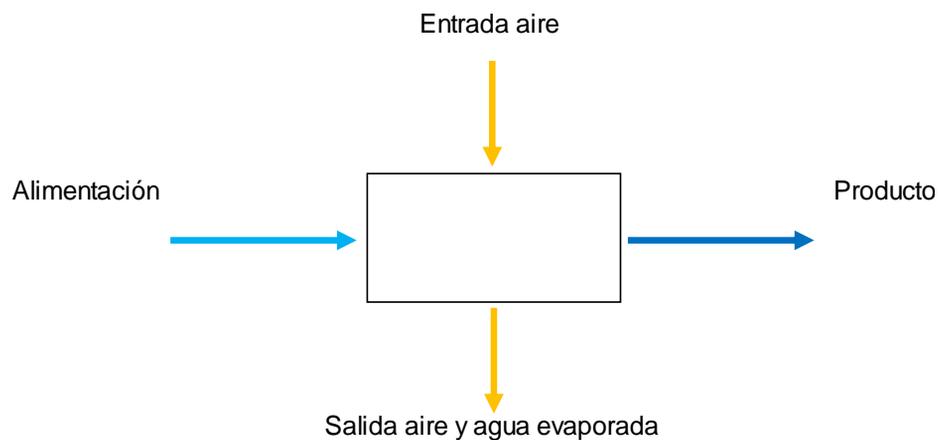
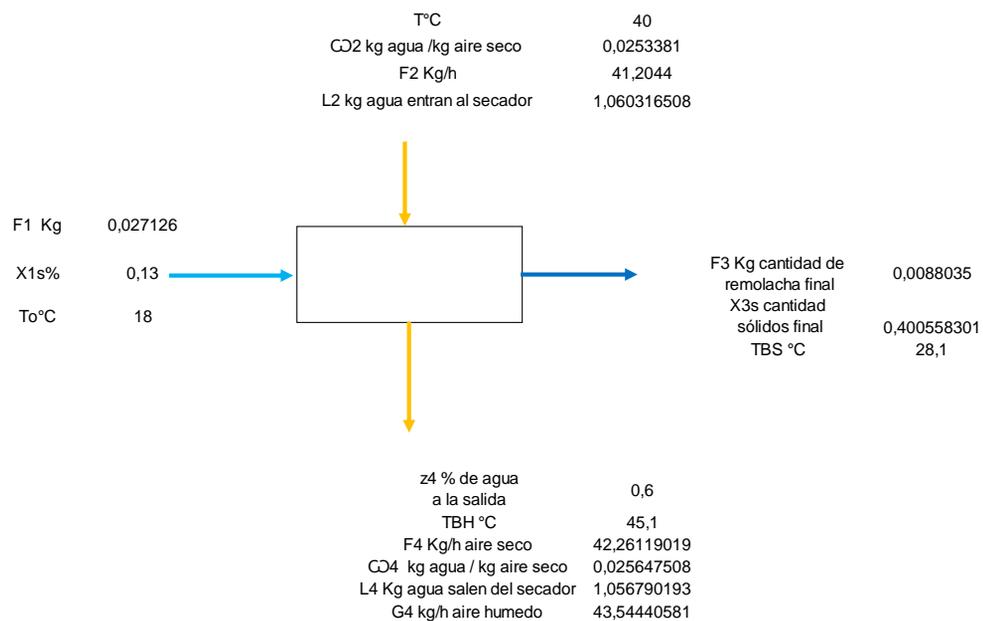


Diagrama 7. Esquema cuantitativo del proceso de secado.



Fuente: Autor.

Balance de materia para sólidos

$$X^1S \cdot F1 = F3 \cdot X^3S \quad (12)$$

$$0,13 \cdot 0,027126 = 0,0088035 \cdot X^3S$$

$$X^3S = 0,400558301\%$$

Balance para el agua

$$\text{Kg agua perdida en 12 horas} = F1 - F3 \quad (13)$$

$$0,027126 - 0,0088035 = 0,0183225 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

La capacidad calorífica del aire y el agua en estado líquido y gaseoso se determinaron por las siguientes ecuaciones mostradas en la tabla 18, teniendo en cuenta las condiciones ambiente de Pamplona que corresponde a 18 °C y presión 583 mmHg.

Tabla 18 Capacidad calorífica para el aire y agua.

Sustancia	Ecuación
Aire 273 < T < 1800 K (J/mol-K)	$CP = 28.09 + 0,1965 \times 10^{-2} \cdot T + 0,4799 \times 10^{-5} \cdot T^2 - 1.965 \times 10^{-9} \cdot T^3$
Agua (L) 273 < T < 373 K (J/mol-K)	$CP = 18.2964 + 47.212 \times 10^{-2} \cdot T - 133.88 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 1314.2 \times 10^{-9} \cdot T^3$
Agua (g) 0 < T < 1500 °C (J/mol-°C)	$CP = 33.46 + 0,688 \times 10^{-2} \cdot T + 0.7604 \times 10^{-5} \cdot T^2 - 3.593 \times 10^{-9} \cdot T^3$

Fuente: Principios básicos y cálculos en ingeniería química (Himmelblau, 1997).

La capacidad calorífica del sólido se calculó empleando la correlación dada por Choi y Oikos, se encuentran en función de la composición química del alimento, tal como se ilustra en la tabla 19. [22]

Tabla 19. Correlaciones para calcular el calor específico de los componentes de los alimentos como función de la temperatura.

Componente	Ecuación
Proteína	$C_p=2.0082+1.2089 \times 10^{-3} \cdot T - 1.3129 \times 10^{-6} \cdot T^2$
Grasa	$C_p=1.9842+1.4733 \times 10^{-3} \cdot T - 4.8008 \times 10^{-6} \cdot T^2$
Carbohidratos	$C_p=1.5488+1.9625 \times 10^{-3} \cdot T - 5.9399 \times 10^{-6} \cdot T^2$
Fibra	$C_p=1.8459+1.8306 \times 10^{-3} \cdot T - 4.6508 \times 10^{-6} \cdot T^2$
Ceniza	$C_p=1.0926+1.8896 \times 10^{-3} \cdot T - 3.6817 \times 10^{-6} \cdot T^2$

Fuente: Diseño de dos congeladores rápidos para frutas. (Alvarez, 1999). Todas las ecuaciones tienen rango de validez entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ .

Balance de energía

$$w + Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (14)$$

Se hace la siguiente consideración para el secador de bandejas como sistema adiabático por lo tanto  $Q_1 = 0$  entonces.

$$H_2 = 28,22507833 \text{ KJ/Kg aire seco}$$

$$Q_2 = F_2 \cdot H_2 \quad (15)$$

$$Q_2 = 1162,997418 \text{ KJ}$$

$$H_3 = \int_{T_1}^{T_2} (x_{3_s} \cdot C_{p_s}) + (Z_{4_a} \cdot C_{p_a})^* dt \quad (16)$$

Donde  $C_{p_s} = 19,5510794$  (KJ/Kg) integrando se calculó a partir de las correlaciones de la tabla 20, según la composición química de la remolacha (*Beta vulgaris*). Asimismo  $C_{p_a} = 755,783607$  (KJ/Kg) integrando se calculó a partir de la ecuación de la tabla 19 correspondiente al estado gaseoso.

$$H_3 = 4659,317456 \text{ KJ/Kg producto}$$

Se considera aditivo el calor a la salida de los ensayos 5 y 7 mm de espesor de rodaja de remolacha (*Beta vulgaris*)

Por tanto

$$Q_3 = F_3 \cdot H_3 \quad (17)$$

$$Q_3 = 474,0806183 \text{ KJ}$$

$$H_4 = 38,288 \text{ KJ/Kg aire seco}$$

$$Q_4 = F_4 \cdot H_4 \quad (18)$$

$$Q_4 = 1577,634067 \text{ KJ}$$

Reemplazando los valores de cada variable en la ecuación 19 despejo  $w$  calculado experimentalmente.

$$w = Q_4 + Q_3 - Q_2 - Q_1 \quad (19)$$

$$W = 1577,634067 \text{ KJ} + 474,0806183 \text{ KJ} - 1162,997418 \text{ KJ} - 0$$

$$W = 888,717268 \text{ KJ}$$

Conversión de unidades a Julios.

$$W = 888717,268 \text{ J}$$

Trabajo teórico se calculó a partir de la potencia de la resistencia del secador.

$$w_t = 74057142,86 \text{ J}$$

Se esta forma se calculó la eficiencia del trabajo en cada ensayo

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{W}{w_t} \quad (20)$$

Donde

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{88717,268 \text{ J}}{74057142,86 \text{ J}}$$

$$\text{Eficiencia} = 1,20\%$$

Por tanto las ecuaciones descritas anteriormente se aplicaron para cada balance de materia y energía realizadas a diferentes condiciones de operación, considerando las indicaciones de 5 y 7 mm de espesor de la muestra. El resumen de los datos se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20. Resumen de los balances de materia y energía para cada ensayo

Ensayo	Temperatura (°C)	Flujo de aire (m <sup>3</sup> /h)	Espesor (mm)	% Agua a la salida	% Sólidos secos	% Eficiencia térmica	Reynolds (Re)
1	40	3,95	5	0,60	0,40	1,20	15,91289
1	40	3,95	7	0,73	0,27		
2	50	3,95	5	0,57	0,43	0,79	15,06696
2	50	3,95	7	0,66	0,34		
3	60	3,95	5	0,53	0,47	0,68	14,28719
3	60	3,95	7	0,27	0,73		
4	40	4,95	5	0,64	0,36	1,26	19,94148
4	40	4,95	7	0,72	0,28		
5	50	4,95	5	0,84	0,16	1,22	18,88139
5	50	4,95	7	0,51	0,49		
6	60	4,95	5	0,44	0,56	0,87	17,90419
6	60	4,95	7	0,52	0,48		
7	40	5,95	5	0,55	0,45	1,13	23,97006
7	40	5,95	7	0,69	0,31		
8	50	5,95	5	0,48	0,52	1,32	22,69581
8	50	5,95	7	0,70	0,30		
9	60	5,95	5	0,27	0,73	0,88	21,5212
9	60	5,95	7	0,33	0,67		

Fuente: Autor.

Para determinar el régimen del flujo de aire en el proceso de secado, se calculó el número de Reynolds a partir de las condiciones de operación para cada ensayo.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (21)$$

Teniendo en cuenta las siguientes especificaciones

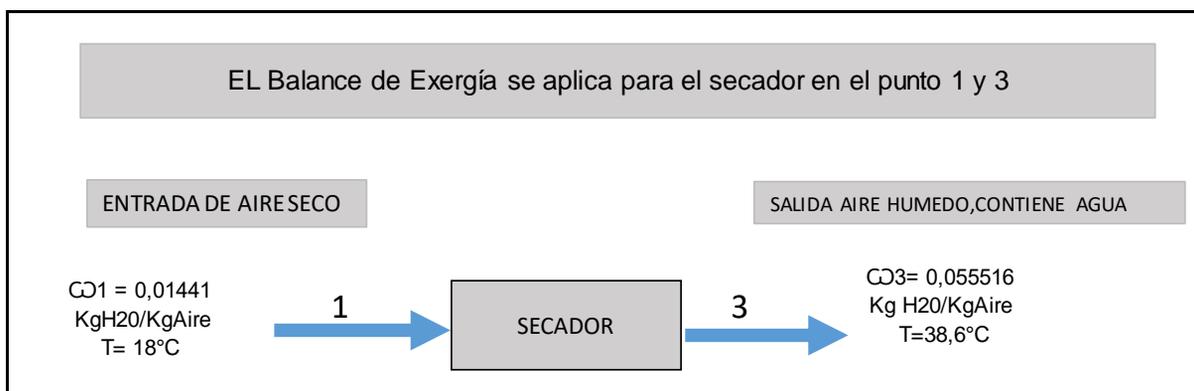
Si  $Re < 2000$  = Flujo laminar

Si  $Re > 3000$  = Flujo turbulento

Si  $2000 < Re < 3000$  = Flujo inestable

## 10.2 BALANCE DE EXERGÍA

Diagrama 8. Esquema cuantitativo Balance de exergía.



Fuente: autor.

Por tanto para calcular la exergía en el punto 1 se tienen en cuenta las siguientes variables.

Variable	Nomenclatura
$\omega_1$ (Kg H <sub>2</sub> O/Kg Aire)	Relación de humedad del aire en la entrada
$\omega_0$ (Kg H <sub>2</sub> O/Kg Aire)	Relación de humedad del aire estado referencia
$\omega_3$ (Kg H <sub>2</sub> O/Kg Aire)	Relación de humedad del aire en la salida
R aire (KJ/Kg.k)	Constante de los gases
R vapor (KJ/Kg.k)	Constante de los gases para el agua
$\ln(p_1/p_0)$	relación de la presión inicial y final
T <sub>1</sub> (°C)	Temperatura del proceso
T <sub>0</sub> (°C)	Temperatura ambiente
Cp aire (KJ/Kg.K)	Capacidad calorífica aire
Cp agua (KJ/Kg.°C)	Capacidad calorífica agua
1.6078	Constante ecuación de exergía

A partir de la siguiente ecuación se calculó la exergía en el punto 1 entrada del aire seco.

$$\begin{aligned} \Phi_1 = & [((Cp)_a + \omega_1(Cp)_v)(T_1 - T_0) - T_0 \{ [(Cp)_a + \omega_1(Cp)_v] \ln \left( \frac{T_1}{T_0} \right) - (R_a + \omega_1 R_v) \cdot \\ & \ln \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \} + T_0 \{ (R_a + \omega_1 R_v) \ln \left( \frac{1 + 1.6078 \omega_0}{1 + 1.6078 \omega_1} \right) + 1.6078 \omega_1 R_a \ln \left( \frac{\omega_1}{\omega_0} \right) \} \end{aligned} \quad (22)$$

Reemplazando en la ecuación 22 se calculó  $\Phi_1$

$$\Phi_1 = 125,5225699 \text{ (KJ/Kg)}$$

A partir de la siguiente ecuación se calculó la exergía en el punto 3 salida del aire húmedo.

$$\begin{aligned} \Phi_3 = & [((Cp)_a + \omega_3(Cp)_v)(T_3 - T_0) - T_0 \{ [(Cp)_a + \omega_3(Cp)_v] \ln \left( \frac{T_3}{T_0} \right) - (R_a + \omega_3 R_v) \cdot \\ & \ln \left( \frac{P_3}{P_0} \right) \} + T_0 \{ (R_a + \omega_3 R_v) \ln \left( \frac{1 + 1.6078 \omega_0}{1 + 1.6078 \omega_3} \right) + 1.6078 \omega_3 R_a \ln \left( \frac{\omega_3}{\omega_0} \right) \} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\Phi_3 = 243,13643 \text{ (KJ/Kg)}$$

La exergía específica para el producto húmedo da como resultado

$$\Phi_p = [h_p(T, P) - h_p(T_0, P_0)] - T_0 [S_p(T, P) - S_p(T_0, P_0)] \quad (24)$$

Se realizó una aproximación para determinar la exergía del producto utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada. Tabla: A-4 en función de la temperatura.

[35]

Aplicando la ecuación 24 se calculó la exergía del producto a condiciones de operación del proceso.

Un resumen más detallado se muestra en la tabla 20.

$$\epsilon_{\text{producto}} = 548,5309512 \text{ (KJ/Kg)}$$

Tabla 21. Resultados del análisis de exergía proceso de secado.

Temperatura °C	Exergía entrada KJ/Kg	Exergía Salida KJ/Kg	Exergía producto KJ/Kg
40	125,6149431	243,13643	548,5309512
50	541,312411	370,84795	2099,359482
60	855,524773	615,09027	3529,510016

Fuente: Autor.

## 11 CONCLUSIONES.

- Antes de modelar la cinética de secado de un alimento, por medio de ecuaciones semiempíricas de capa fina, es fundamental establecer las variables de proceso como: Temperatura, humedad, flujo de aire y considerar parámetros como dimensión, geometría y propiedades organolépticas de las hortalizas de raíz.
- Para determinar el mejor modelo cinético, se compararon los parámetros estadísticos del coeficiente de determinación  $R^2$ , Chi- cuadrado  $\chi^2$  y error cuadrático medio RMSE. En la evaluación de los modelos escogidos hubo una aproximación entre el modelo de Page y Henderson y Pabis. Por esta razón el modelo de Henderson y Pabis determinó mejores resultados y mostró concordancia con los datos experimentales donde  $R^2=0,9998$ ,  $\chi^2=0,002481$ ,  $RMSE=0,0079407$  respectivamente.
- Por otra parte el modelo de Page tiene buena correlación donde  $R^2=0,9994$ ,  $\chi^2=0,000766$ ,  $RMSE=0,0039488$  indica que se adapta a los datos experimentales. Sin embargo, el modelo de Page para este estudio no es el que presenta mejor ajuste, debido a que cuando se analiza en detalle, la derivación matemática del modelo muestra una serie de inconsistencias.
- Según los datos registrados en la tabla 17. Determinación de la diferencia de color para cada ensayo. El ensayo 3 con condiciones de operación: temperatura= 40(°C), flujo de aire= 5,95 (m<sup>3</sup>/h) y espesor de 5(mm) presentó el mayor valor de ángulo de tono= 13,61117836 e índice de color

$\Delta E^*=10,2682547$  lo que indica que entre más alto sea el valor de ángulo de tono del color de una hortaliza el fenómeno de pardeamiento es mínimo, presentando disminución del ennegrecimiento enzimático por la transformación de compuestos fenólicos a polímeros marrones o negros.

- En el diagrama 5 se muestran las imágenes de variación de color durante todo el proceso de secado, la imagen (b) corresponde al ensayo 3 confirmado en la tabla 17 donde se demuestra que obtuvo el menor grado de pardeamiento enzimático.
- A Partir de los gráficos mostrados en el apéndice anexos C, al comparar las gráficas, se determinó que el comportamiento que presentó un equilibrio térmico, por lo tanto menor grado de pardeamiento enzimático, es el ensayo 3 aproximadamente en un tiempo de 8 horas y 30 minutos. Este es un factor importante que indica que se puede reducir el tiempo de secado para este estudio.
- Además la remolacha (*Beta vulgaris*) contiene grandes concentraciones de betalaínas el color natural varía de rojo-violeta a amarillo, estas se ven afectadas ya que sometidas a altas temperaturas son muy sensibles al pH formando un compuesto marrón. Por tanto los resultados de los datos experimentales para la diferencia de color determinan que se debe trabajar con la temperatura mínima del proceso en este caso de 40°C.
- De acuerdo a las gráficas 6 y 7 de la variación de espesor y diámetro respectivamente, se concluye que a medida que transcurre el tiempo de secado la rodaja de remolacha se ve afectada por una disminución de espesor y diámetro hasta llegar a una estabilidad térmica, en el que permanece constante

con espesor de 1,5(mm) y diámetro=47,5(mm) alcanzando un equilibrio más estable con mejor comportamiento la rodaja de espesor de 5(mm).

- A partir de los datos reportados en la tabla 20. Resumen de balances de materia y energía para cada ensayo, se determinó que el ensayo que obtuvo una reducción de sólidos significativa de 0,16% es el ensayo 5.
- Es más óptimo trabajar con una temperatura= 50°C, flujo de aire= 4,95 (m<sup>3</sup>/h) y espesor de rodaja= 5(mm). Ya que determina una reducción de humedad del 0,84%.
- No se recomienda trabajar con una temperatura de 60°C y flujo de aire=3,95 m<sup>3</sup>/h porque genera pérdida de eficiencia térmica y energética.
- La determinación del número Reynolds para cada ensayo indicó, que el flujo de aire es acelerado y si pasa muy rápido genera turbulencia, por tanto quedan espacios vacíos produciendo un enfriamiento, en consecuencia no hay contacto entre aire caliente y superficie de la muestra.
- Se debe tener presente el tiempo de residencia ya que es el tiempo que demora el aire en pasar por las bandejas del secador y hacer la transferencia.
- A menor tiempo de residencia, el flujo de aire no alcanza a generar el contacto con la muestra, conviene destacar que en el punto intermedio del flujo del aire= 4,95(m<sup>3</sup>/h) hay más eficiencia térmica, además se produce una conversión forzada por la turbulencia que se genera facilitando el contacto aire remolacha.

- A mayor tiempo de residencia se demora más tiempo por circular el flujo de aire y no hay contacto de transferencia calórica, no se genera proceso de convección, se presenta una evaporación por radiación de la temperatura del secador.
- En los datos reportados en la tabla 20 se observó que la exergía a la entrada del secador aumentaba con respecto al tiempo, temperatura y flujo de aire. La exergía del producto fue inversamente proporcional al contenido de humedad y aumentó al eliminar el agua de las muestras a diferentes temperaturas.
- Una de las principales fuentes de pérdida de exergía en este proceso de secado se debe a la saturación de aire.
- Además, el tamaño del secador contribuye de forma significativa a la pérdida de esta propiedad termodinámica; este factor puede reducirse aislando adecuadamente el secador. Además es muy importante el tamaño del secador entre más grande sea el equipo, hay mayor pérdida de exergía durante todo el proceso.

## 12 RECOMENDACIONES.

- Se recomienda calibrar los sensores del secador de bandejas cada vez que se realice un respectivo ensayo.
- Para permitir un mejor contacto entre flujo de aire y materia prima, se recomienda distribuir muy bien las muestras de alimentos en las bandejas de la cámara de secado.
- Se recomienda usar un sistema de aislamiento térmico al equipo, para aumentar la eficiencia y evitar pérdidas considerables.
- Para la preparación de la muestra se propone realizar el corte transversal lo más rápido posible, para no causar oxidación y evitar la contaminación por agentes patógenos presentes en el ambiente.
- Comparar con otros modelos cinéticos.
- Se deben tener en cuenta las condiciones ambiente en el lugar donde se realizará el proceso de secado.

### 13 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

1. KUDRA Tadeusz, M.A.S., *Advanced drying technologies* Vol. Second Edition. 2009, London New York: Taylor y Francis Group, LLC.
2. Jasim, A., *Handbook of vegetables and vegetable processing*, in *Drying of vegetables: Principles and Dryer design*, N.K. Sinha, Editor. 2011. p. 20.
3. Maupoey, P.F., et al., *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. 2001: Editorial U.P.V.
4. Nazghelichi, T., M.H. Kianmehr, and M. Aghbashlo, Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy*, 2010. **35**(12): p. 4679-4684.
5. AGRONET. Análisis- Estadísticas. 2017; Available from: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb/Estadística/Paginas/default.aspx>.
6. POLLOCK, M., *Enciclopedia del cultivo de frutas y hortalizas*. Royal Horticultural Society, ed. edición. 2003, España. 275p.
7. VILLAMIZAR, D., Municipio de Chitagá (Norte de Santander): Concejo municipal para la gestión del riesgo de desastres. , in CMGRD. 2012. p. 76P.
8. Harland, J.I., *Authorised EU health claim for sugar beet fibre*. 2018: p. 113-128.
9. Grumezescu M.A, H.A.M., *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes*, ed. A. press. Vol. Volume 7 2018. 568.
10. Jan, T., *Utilization of fiber and other non sugar products from sugarbeet*, in *Chemistry and processing of sugarbeet and sugarcane* 1988: Amsterdam. p. 139 p.
11. Grumezescu M.A, H.A.M., *Handbook of food Bioengineering: Advances in Biotechnology for Food Industry*. Academic Press ed. 2018, London.
12. Obón, J.M., et al., *Production of a red–purple food colorant from Opuntia stricta fruits by spray drying and its application in food model systems*. *Journal of Food Engineering*, 2009. **90**(4): p. 471-479.

13. Celli, G.B. and M.S.-L. Brooks, Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins — A current review. *Food Research International*, 2017. **100**: p. 501-509.
14. SAC. Sociedad de agricultores de colombia 1871; Available from: <http://www.sac.org.co/es/>.
15. Berk, Z., Chapter 16 - Spoilage and preservation of foods, in *Food Process Engineering and Technology (Third Edition)*, Z. Berk, Editor. 2018, Academic Press. p. 395-398.
16. Augusto, P.E.D., B.M.C. Soares, and N. Castanha, Chapter 1 - Conventional Technologies of Food Preservation, in *Innovative Technologies for Food Preservation*, F.J. Barba, et al., Editors. 2018, Academic Press. p. 3-23.
17. Nguyen, T.K., M. Mondor, and C. Ratti, Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering*, 2018. **230**: p. 8-17.
18. Arun, M.S., *Industrial Transfer processes: Departament of Mechanical Engineering National University Singapore*. 2012, Singapore. 141.
19. Treybal, R.E., *Operaciones de Transferencia de masa Segunda Edicion ed.*, México. 865.
20. Berk, Z., *Food Process Engineering and Technology*. Academic Press is an Imprint of El sevier ed. Vol. Third Edition 2018, Israel. 744.
21. Babu, A.K., et al., Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. **90**: p. 536-556.
22. Hurtado, Erik. Diseño de un secador por atomizacion a nivel piloto para jugo concentrado de tomate de árbol. Manizales, 2003, p.153. Trabajo de grado (para optar al título de Ingeniero químico). Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Facultad de ingeniería y arquitectura. Departamento de Ingeniería química.
23. S., M.A., *Classification and Selection of Industrial Dryers*. p. 55.

24. Collazo-Abreu, P.L., et al., Modelos matemáticos y experimentales para el análisis del secado solar de semillas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2018. **27**: p. 89-98.
25. Sachin V Jangam, C.L.L., Arun S Mujumdar, *Drying of Foods, vegetables and Fruits*. Vol. 2. 2011, Singapore. 220.
26. Bennamoun, L. and J. Li, Chapter 2 - Drying Process of Food: Fundamental Aspects and Mathematical Modeling, in *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes*, A.M. Grumezescu and A.M. Holban, Editors. 2018, Academic Press. p. 29-82.
27. Benseddik, A., et al., Mathematical empirical models of thin-layer airflow drying kinetics of pumpkin slice. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2018. **11**(4): p. 220-231.
28. Avhad, M.R. and J.M. Marchetti, Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. *Industrial Crops and Products*, 2016. **91**: p. 76-87.
29. Molugaram, K. and G.S. Rao, Chapter 9 - Chi-Square Distribution, in *Statistical Techniques for Transportation Engineering*, K. Molugaram and G.S. Rao, Editors. 2017, Butterworth-Heinemann. p. 383-413.
30. Dincer, I. and A. Sahin, A new model for thermodynamic analysis of a drying process. Vol. 47. 2004. 645-652.
31. Aghbashlo, M., et al., A review on exergy analysis of drying processes and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. **22**: p. 1-22.
32. Beigi, M., M. Tohidi, and M. Toriki-Harchegani, Exergetic analysis of deep-bed drying of rough rice in a convective dryer. *Energy*, 2017. **140**: p. 374-382.
33. S.V. Jangam, C.L.L., A.S. Mujumdar *Drying of Foods Vegetables and Fruits* Vol. 1. 2010, Singapore.
34. Jiang, Y., et al., Browning: Enzymatic Browning, in *Encyclopedia of Food and Health*, B. Caballero, P.M. Finglas, and F. Toldrá, Editors. 2016, Academic Press: Oxford. p. 508-514.
35. Yunes A. Cengel, M.A.B., *Termodinámica*. Vol. Séptima edición. 2011, España *Thermodynamics. An Engineering Approach*.

## 14 ANEXO A.

**14.1** Datos experimentales para cada ensayo, de acuerdo a las condiciones de trabajo.

Tabla 1A. Ensayo 1: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 40°C flujo de aire 3,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (Min)	Promedio Masa (g)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	27,1255333	5	70	43,241	7	70
30	24,1187667	4,5	67	40,0053	6,5	69
60	21,5577667	4	66,5	37,16653333	6	68,5
90	19,1536	3,25	66	34,37696667	6,5	68
120	17,2221333	3,1	65,5	32,19886667	5,15	64
150	15,2497333	2,7	61	30,1766	5,5	62
180	13,2613	1,5	55,5	28,22736667	5,4	61
210	11,6660667	1,3	52	26,13266667	5,2	59
240	10,053	1,1	51	24,21246667	4,5	5,2
270	8,8035	1	48	20,79823333	4,45	4,9

Fuente: Autor.

Tabla 2A. Ensayo 2: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 40°C flujo de aire 4,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	26,6377333	5	70	35,45163333	7	70
30	24,9999	4,9	68	33,93156667	6,9	69
60	23,6428	4,5	65	32,40316667	6,7	68
90	22,3091667	4	64	31,0716	6,6	67
120	20,9321667	3	63	29,6055	6,5	66
150	19,8230667	3,5	62	28,50683333	6	65
180	18,6249667	3	61	27,24626667	5,8	64
210	17,4607	2,8	59	25,96846667	5,6	63
240	16,4226667	2,6	58	24,77396667	5,8	62
270	15,4162333	2,5	57	23,63906667	5,5	61
300	14,4673	2,2	56	22,53143333	4,8	60
330	13,9549	1,9	55	21,89576667	4,5	59
360	12,849	1,8	54	20,5839	4,2	58
390	12,1463	1,7	53	19,7229	4	57
420	11,4627667	1,6	52	18,91073333	3,8	56
450	10,7758	1,5	51	17,98473333	3,5	55
480	10,2742667	1,4	50	17,25383333	2,9	47
510	9,7618	1,2	48	16,47873333	2,6	46
540	9,6043	1,1	47	16,30543333	2,5	45

Fuente: Autor.

Tabla 3A. Ensayo 3: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 40°C flujo de aire 5,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	28,96523	5	70	37,63197	7	70
30	26,7666	4,9	68	35,4157	6,9	69
60	24,86	4,2	67	33,45803	6,8	68
90	22,94623	4,1	66	31,53477	6,6	67
120	21,37523	4	64	30,00977	6,5	66
150	19,7251	3,9	63	28,3141	6,2	65
180	18,0926	3,8	62	26,65883	6	64
210	16,89237	3,4	60	25,4937	5,6	63
240	15,24027	3,3	57	23,78767	5,3	62
270	14,31353	3	56	22,6587	5	61
300	13,32953	2,9	55	21,5617	4,8	60
330	12,22217	2,7	54	20,39817	4,5	59
360	11,32747	2,5	53	19,3959	4,1	58
390	10,61727	2,3	51	18,5224	3,9	57
420	9,712633	2	50	17,44163	3,5	55
450	9,117733	1,8	48	16,70013	3	54
480	8,4205	1,6	47	15,80127	2,8	53
510	8,1948	1,5	46	15,55693	2,6	52

Fuente: Autor.

Tabla 4A. Ensayo 4: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 50°C flujo de aire 3,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	30,77167	5	70	41,18727	7	70
30	28,53773	4,9	69,7	38,53003	6,9	69,6
60	26,59027	4,7	69,5	36,59643	6,8	69,5
90	24,5533	4,5	68,7	34,4058	6,7	68,4
120	22,37203	4,3	67,9	32,33887	6,6	67,3
150	20,67143	4,2	66,8	30,75307	6,4	66,1
180	18,6789	4,1	65,6	28,85793	6,2	65,8
210	16,87193	4	64,5	27,29377	6,1	64,7
240	15,29423	3,95	58,7	25,60943	6	63,8
270	13,9488	3,75	57,9	24,29923	5,9	62,8
300	12,60363	3,69	57,5	22,9972	5,4	61,6
330	11,29411	3,65	54,1	21,66493	5,2	60,6
360	10,228	3,55	52,5	20,59543	5,1	61,8
390	9,264767	3,49	50,7	19,59443	4,9	59,7
420	8,356667	3,35	48,2	18,58837	4,6	58,8
450	7,666867	3,27	45,5	17,7525	4,4	56,6

Fuente: Autor.

Tabla 5A. Ensayo 5: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 50°C flujo de aire 4,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	22,09427	5	70	28,04487	7	70
30	20,1467	4,95	69,4	25,76623	6,86	69,9
60	18,234	4,94	69,2	23,74847	6,76	69,8
120	15,21097	3,98	66,9	20,73257	6,56	68,4
150	13,96413	3,78	64,8	19,45803	6,34	67,3
180	12,447	3,34	63,9	17,8021	6,1	66,5
210	11,24687	4,22	57,9	15,80247	5,55	65,9
240	10,23877	3,34	56,6	14,78457	5,45	64,9
270	9,2461	3,9	55,9	13,62523	5,35	63,9
300	8,322433	3,7	52,6	12,6233	4,29	63,6
330	7,449667	3,5	51,5	11,51567	4,12	62,2
360	6,6841	3,4	50,9	10,58327	3,9	60,1

Fuente: Autor.

Tabla 6A. Ensayo 6: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 50°C flujo de aire 5,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)			Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)			
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	20,31323	5	70	27,7825	7	70
30	18,1574	4,9	699	25,35693	6,9	69,9
60	16,27317	4,8	698	23,42943	6,8	69,8
120	14,44237	4,7	678	21,28727	6,5	68,8
150	12,52083	4,4	658	19,22907	5,9	67,9
180	11,18777	4,3	643	18,0684	5,7	66,9
210	9,561567	4,1	589	15,88923	4,9	64,9
240	9,069467	3,9	569	14,6197	4,7	62,9
270	7,522	3,8	558	13,59893	4,8	58,9
300	6,378	3,7	539	12,45467	4,6	57,9
330	5,814967	3,6	498	11,51157	4,3	57,6
360	4,9563	3,4	485	10,65517	4,1	56,3
390	4,5238	3,2	475	9,791233	4,7	55,9
420	4,0942	2,9	468	9,129167	4,4	53,5
450	3,713967	2,8	448	8,455333	4,2	52,7
480	3,445833	2,7	439	7,857267	3,9	51,7
510	3,293467	2,4	398	7,423167	3,6	49,9
540	3,248767	2,2	396	7,266033	3,4	49,4

Fuente: Autor.

Tabla 7A. Ensayo 7: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 60°C flujo de aire 3,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	24,57507	5	70	26,6407	7	70
30	22,0422	4,9	699	26,1281	6,9	699
60	20,13413	4,8	698	24,00833	6,8	698
120	17,99617	4,7	697	21,4526	6,7	697
150	15,8627	4,6	674	19,4992	6,6	688
180	13,79193	4,4	659	17,47833	5,9	677
210	12,4072	4,3	648	16,0818	5,7	669
240	10,6165	3,9	639	14,52363	5,6	659
270	9,7256	3,6	598	13,72433	4,9	627
300	8,603067	3,3	569	11,9367	4,7	616
330	7,674567	3,1	558	11,24807	4,5	598
360	6,874967	3	536	10,2772	4,1	595
390	6,258	2,9	534	9,453433	3,9	577
420	5,790167	2,8	528	8,806367	3,8	568
450	5,399533	2,7	519	8,189367	3,7	557
480	5,121433	2,6	506	7,6828	3,6	548
510	4,9186	2,5	499	7,2725	3,5	539
540	4,781333	2,4	489	6,9306	3,4	529
570	4,687367	2,3	478	6,685467	3,3	499

Fuente: Autor.

Tabla 8A. Ensayo 8: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 60°C flujo de aire 4,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)				Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)		
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	23,0411	5	70	31,88967	7	70
30	20,8887	4,9	69,9	29,63837	6,9	69,9
60	18,47437	4,8	69,8	27,01937	6,8	69,8
120	16,60073	4,7	68,5	24,92713	6,7	69,7
150	14,82623	4,6	67,9	22,96317	6,6	69,5
180	13,3734	4,5	66,9	21,21973	6,5	68,1
210	11,8433	4,4	65,9	19,32863	6,4	67,9
240	10,59997	4,2	64,8	17,72633	5,9	65,9
270	9,602	3,8	60,9	16,36167	5,7	63,8
300	8,686633	3,6	59,9	14,9909	5,5	61,7
330	7,887767	3,5	58,7	13,753	5,4	59,9
360	7,1849	3,3	57,8	12,55043	5,3	68,6
390	6,703933	3,2	55,8	11,70257	5,2	57,8
420	6,2395	3,1	53,9	10,77047	4,9	56,8
450	5,857233	3	51,9	9,930267	4,6	55,9
480	5,6789	2,9	49,8	9,490767	4,5	54,9
510	5,4688	2,8	48,8	8,9471	4,4	53,7
540	5,314233	2,7	47,9	8,493867	4,3	52,8

Fuente: Autor.

Tabla 9A. Ensayo 9: Datos obtenidos experimentalmente para el secado de rodajas de remolacha (*Beta vulgaris*), condiciones operación. Temperatura 60°C flujo de aire 5,95m<sup>3</sup>/h.

Rodaja 5 mm (Bandeja superior)			Rodaja 7 mm (Bandeja inferior)			
Tiempo (min)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)	Promedio Masa (g)	espesor (mm)	Diámetro (mm)
0	23,19693	5	70	27,1069	7	70
30	20,22283	4,9	69,9	26,10617	6,9	69,9
60	17,44567	4,8	68,6	21,4668	6,8	69,8
120	15,23677	4,6	66,9	19,22047	6,7	68,9
150	13,62783	3,9	66,5	17,56087	6,5	66,9
180	11,9196	3,8	59,9	15,885	5,9	65,9
210	10,21317	3,6	55,9	14,07917	5,8	63,9
240	8,742233	3,4	54,9	12,53323	5,6	61,9
270	7,619433	3,2	53,9	11,29647	4,9	59,9
300	6,6734	3,9	52,9	10,03397	4,4	57,7
330	5,5245	3,6	49,9	8,958133	4,1	54,8
360	5,269233	3,4	48,8	8,016433	3,9	52,9
390	4,831933	3,2	46,8	7,207033	3,6	51,7
420	4,574	3,1	45,9	6,667133	3,4	50,7
450	4,3449	2,9	45,7	6,115667	3,2	49,9
480	4,193233	2,7	44,8	5,673467	3,1	48,9
510	4,1066	2,5	44,6	5,366667	3	47,6
540	4,084133	2,4	43,9	5,235433	2,9	46,9

Fuente: Autor.

## 15 ANEXO B.

### 15.1 Ecuaciones de los modelos matemáticos propuestos para cada ensayo.

Tabla 1B. Modelos matemáticos propuestos para el secado de remolacha (*Beta vulgaris*). Donde D es el diámetro de la rodaja de remolacha, M es el peso de la rodaja de remolacha, E es el espesor de la rodaja de remolacha y T es el tiempo de secado.

N° Ensayo	Espesor (mm)	Tipo ajuste	Modelo Matemático.
1	5	Lineal	$T = 626,994 - 5,99571*M + 4,56973*E - 6,91762*D$
1	7	Lineal	$T = 553,293 - 12,9329*M + 3,04373*E - 0,379628*D$
1	5	Regresión no lineal	$T = 1119,33 - 27,3127*M + 80,7*E - 23,7334*D + 0,582238*(M)^2 - 14,0076*(E)^2 + 0,163317*(D)^2$
1	7	Regresión no lineal	$T = 808,069 - 27,0833*M - 8,55871*E + 0,36971*D + 0,211278*(M)^2 + 0,535088*(E)^2 - 0,00540239*(D)^2$
2	5	Lineal	$T = 1916,49 + 0,194858*M - 12,1841*E - 29,1557*D$
2	7	Lineal	$T = 983,712 - 18,4385*M - 39,1355*E - 2,15239*D$
2	5	Regresión no lineal	$T = 2570,78 - 0,542005*M - 32,4461*E - 62,1319*D + 0,000188415*(M)^2 + 4,09158*(E)^2 + 0,439081*(D)^2$
2	7	Regresión no lineal	$T = 1997,66 - 57,1009*M - 3,00865*E - 29,136*D + 0,521307*(M)^2 - 0,709778*(E)^2 + 0,277512*(D)^2$
3	5	Lineal	$T = 1232,95 + 0,00591373*M - 45,2112*E - 14,496*D$
3	7	Lineal	$T = 1435,1 - 6,56545*M - 23,859*E - 14,495*D$

3	5	Regresión no lineal	$T = 1981,34 - 20,9067*M - 60,6171*E - 43,6931*D + 0,0216063*(M)^2 + 6,11808*(E)^2 + 0,369609*(D)^2$
3	7	Regresión no lineal	$T = 1749,66 - 32,682*M - 30,1692*E - 17,7393*D + 0,278211*(M)^2 + 2,92604*(E)^2 + 0,0832853*(D)^2$
4	5	Lineal	$T = 1282,47 - 2,9527*M - 23,4347*E - 15,3016*D$
4	7	Lineal	$T = 982,84 - 11,7936*M - 77,3517*E - 0,0143553*D$
4	5	Regresión no lineal	$T = 2246,48 - 15,5251*M + 29,2778*E - 59,6782*D - 0,0505861*(M)^2 - 4,15702*(E)^2 + 0,508144*(D)^2$
4	7	Regresión no lineal	$T = 1141,1 - 38,6122*M - 86,2409*E + 0,39432*D + 0,348012*(M)^2 + 8,02603*(E)^2 - 0,000509691*(D)^2$
5	5	Lineal	$T = 465,866 - 25,9301*M + 19,538*E - 0,0588001*D$
5	7	Lineal	$T = 618,35 - 16,1136*M - 19,5032*E - 0,0254379*D$
5	5	Regresión no lineal	$T = 583,03 - 50,0391*M + 23,1221*E + 0,0119388*D + 0,977985*(M)^2 - 3,02922*(E)^2 + 0,0000145158*(D)^2$
5	7	Regresión no lineal	$T = 810,993 - 22,0064*M - 109,286*E + 0,330118*D + 0,0533962*(M)^2 + 11,0347*(E)^2 - 0,00045789*(D)^2$
6	5	Lineal	$T = 869,669 - 8,10751*M - 141,311*E + 0,00791112*D$
6	7	Lineal	$T = 714,417 - 25,9459*M + 13,0661*E - 0,121516*D$
6	5	Regresión no lineal	$T = 1257,84 - 26,3474*M - 335,859*E - 0,415264*D + 0,0331631*(M)^2 + 38,6272*(E)^2 + 0,000502451*(D)^2$
6	7	Regresión no lineal	$T = 1560,16 - 44,2601*M - 207,479*E - 1,10806*D + 0,306631*(M)^2 + 20,9413*(E)^2 + 0,0013849*(D)^2$
7	5	Lineal	$T = 836,872 - 13,1517*M - 104,059*E - 0,118256*D$

7	7	Lineal	$T = 717,593 - 8,26358 * M - 65,3552 * E + 0,00299139 * D$
7	5	Regresión no lineal	$T = 1748,05 - 41,5782 * M - 498,027 * E - 1,10569 * D + 0,459727 * (M)^2 + 60,7842 * (ESPESOR)^2 + 0,00139698 * (DIAMETRO)^2$
7	7	Regresión no lineal	$T = 1321,03 - 30,0789 * M - 195,628 * E - 1,18146 * D + 0,120846 * (M)^2 + 19,2616 * (E)^2 + 0,00144984 * (D)^2$
8	5	Lineal	$T = 871,65 - 6,15715 * M - 144,765 * E + 0,0138158 * D$
8	7	Lineal	$T = 851,323 - 12,9641 * M - 71,7367 * E - 0,0272172 * D$
8	5	Regresión no lineal	$T = 1968,62 + 0,494713 * M - 703,066 * E - 0,952551 * D - 0,855716 * (M)^2 + 83,4454 * (E)^2 + 0,00108456 * (D)^2$
8	7	Regresión no lineal	$T = 765,313 - 30,3964 * M - 172,137 * E + 1,97109 * D + 0,209469 * (M)^2 + 19,6524 * (E)^2 - 0,00251546 * (D)^2$
9	5	Lineal	$T = 938,941 - 7,4621 * M - 148,775 * E + 0,00123588 * D$
9	7	Lineal	$T = 1014,39 - 10,1263 * M - 95,3217 * E + 0,000123357 * D$
9	5	Regresión no lineal	$T = 1469,84 - 10,3193 * M - 681,557 * E + 1,65151 * D - 0,314329 * (M)^2 + 91,912 * (E)^2 - 0,0021578 * (D)^2$
9	7	Regresión no lineal	$T = 1849,99 - 23,7217 * M - 408,088 * E + 0,010565 * D + 0,0706928 * (M)^2 + 35,3634 * (E)^2 - 0,000026113 * (D)^2$

Fuente: Autor.

## 16 ANEXO C.

### 16.1 Variación del comportamiento del índice de color para cada ensayo.

Gráfico 1C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 1.

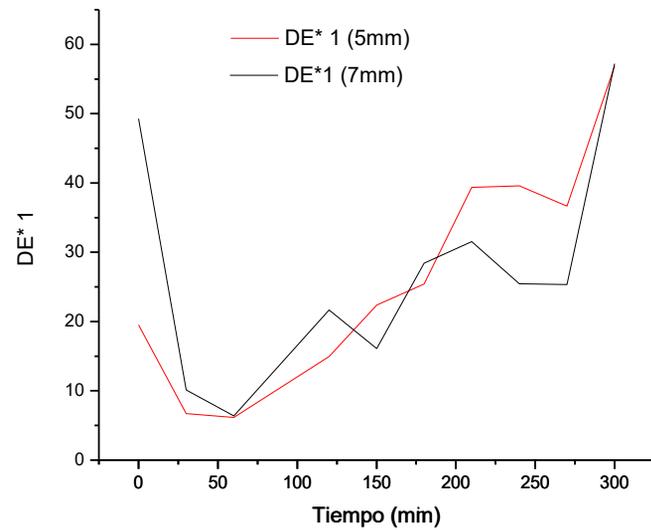


Gráfico 2C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 2.

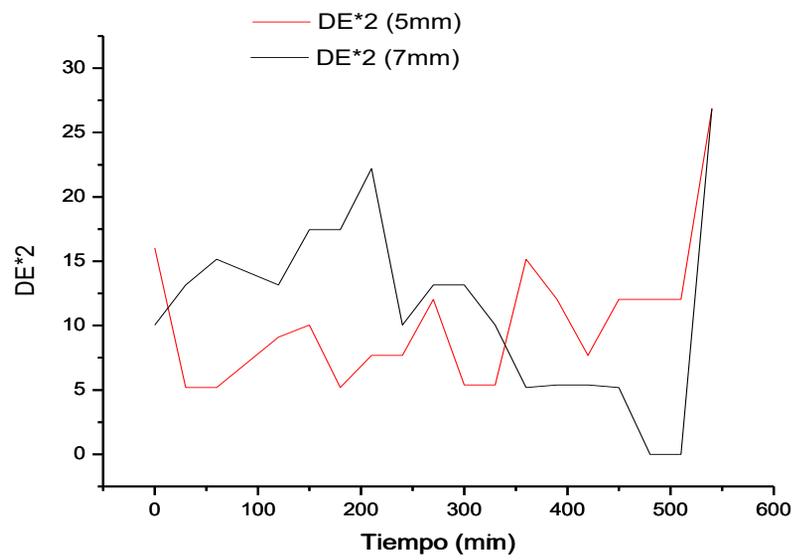


Gráfico 3C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 3.

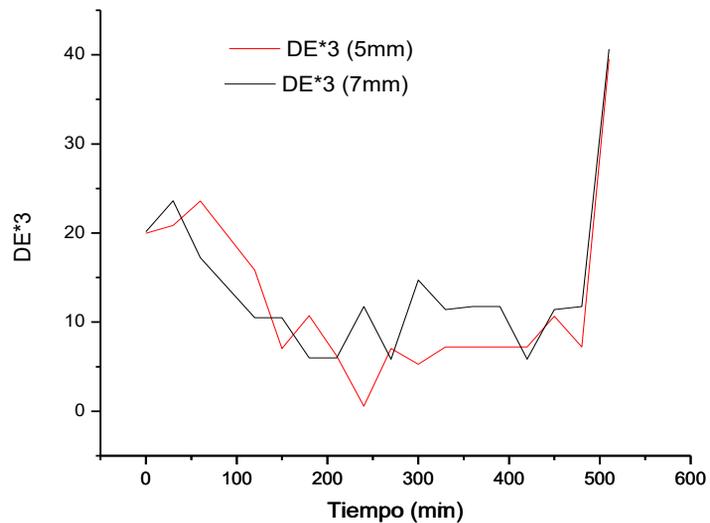


Gráfico 4C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 4.

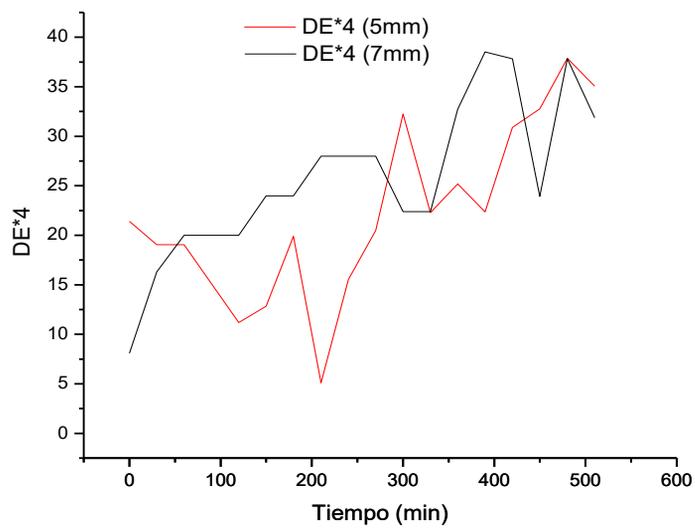


Gráfico 5C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 5.

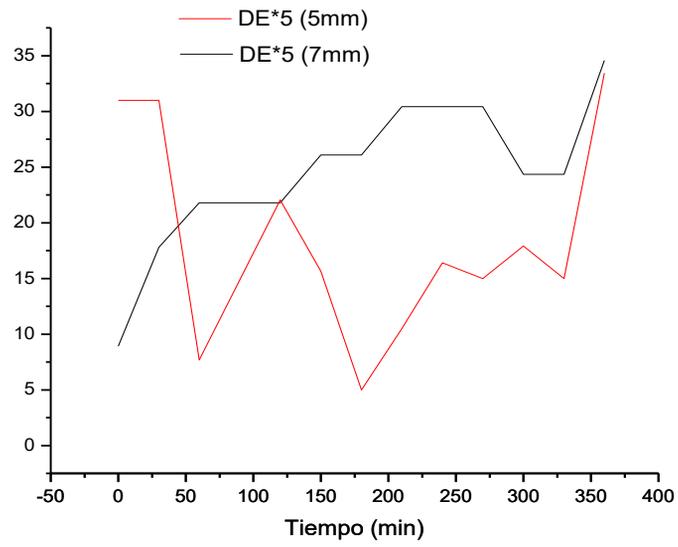


Gráfico 6C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 6.

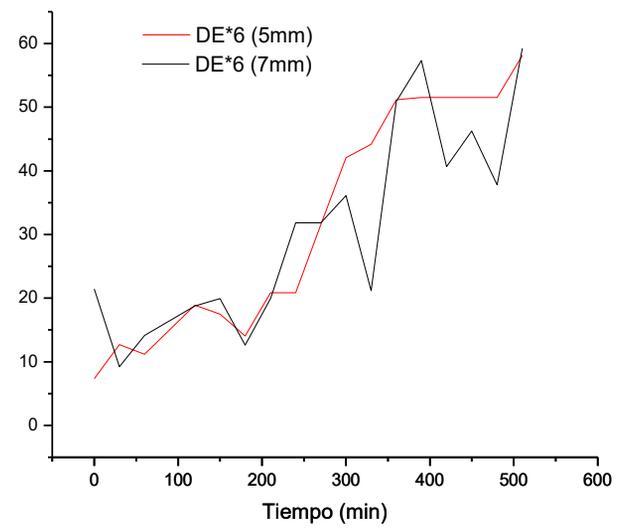


Gráfico. 7C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 7.

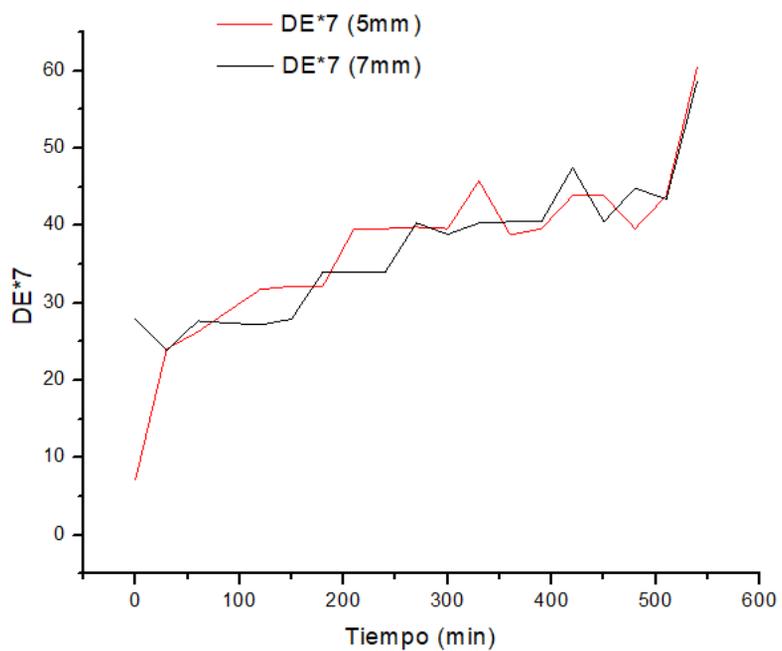


Gráfico 8C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 8.

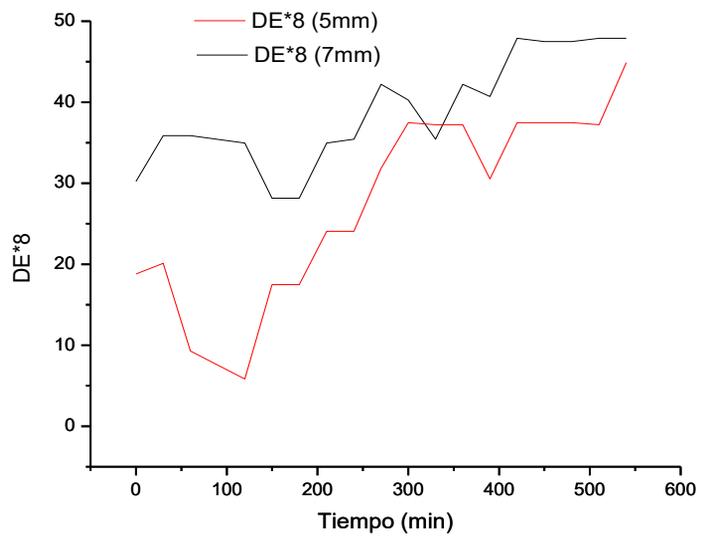
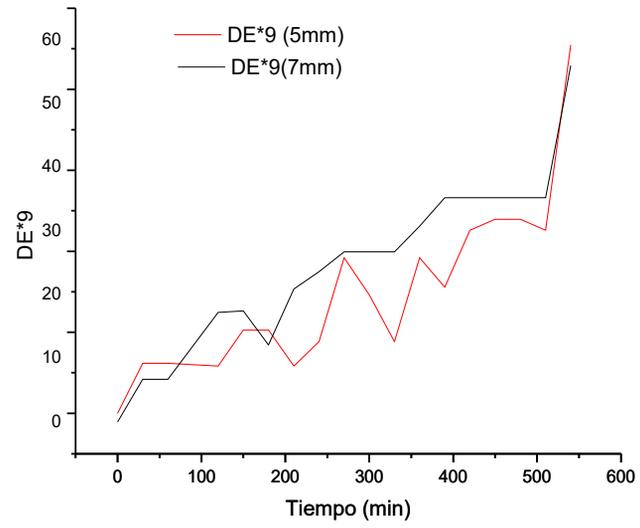


Gráfico 9C. Comportamiento del índice de color respecto al tiempo. Ensayo 9.



Fuente: Autor.