

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1 Antecedentes

En Bolivia, las hortalizas constituyen una alternativa, por ser fuente de nutrientes de excelente calidad, aunado el hecho que nuestro país tiene potencial para su producción, sin embargo, la mayoría de los países Latinoamericanos, en especial Bolivia, presenta una serie de limitaciones para masificar su producción, como alternativa para bajar los costos, dando origen a una gran dependencia externa y fragilidad del sistema. Limitaciones como los climáticos, escasa disponibilidad de agua, suelos pobres, aspectos culturales e inadecuada infraestructura productiva, incipiente organización de productores entre otros, que inciden negativamente en los procesos de producción agrícola. Bolivia registra un bajo nivel de consumo de hortalizas, los diversos regímenes alimenticios recomiendan su consumo para promover la salud (Arias et al, 2022).

En el municipio de Yunchará, en ausencia de prácticas de cultivo de hortalizas no tradicionales, el incremento del volumen de producción fue del 100%, en Cercado el incremento fue del 90% y San Lorenzo 80%, debido a la introducción de nuevos cultivos y nuevas variedades de hortalizas. El rendimiento promedio de las hortalizas en general, ha incrementado en un 59,25% superándose la meta prevista. El incremento del nabo como hortaliza estuvo entre (150 – 160) % (Organización Esperanza Bolivia, 2016).

El nabo es un alimento casi tan antiguo como la humanidad. De hecho, hay indicios que incluso antes de que existiera la agricultura ya se consumían tanto las hojas como la raíz de los nabos silvestres. Los griegos y los romanos mejoraron las variedades silvestres y extendieron el cultivo por todo Europa, donde fue el alimento básico durante siglos (Reus, 2020).

Según Hualpa (2010), el nabo es una hortaliza que se adapta muy bien a los climas fríos. Pertenece a la familia de las Crucíferas, que engloba unas 3000 especies propias de regiones templadas. La importancia de esta familia de

hortalizas, reside en que contienen compuestos de azufre considerados como potentes antioxidantes que ayudan a prevenir enfermedades.

## **1.2 Justificación**

- La transformación del nabo en harina permitirá mejorar la calidad nutricional de la población de la provincia Cercado del departamento de Tarija como una excelente manera de aprovechar los beneficios de esta hortaliza, la harina de nabo podría ser una adición nutritiva en la dieta de las personas ofreciendo una fuente de vitaminas, minerales y fibra.
- El nabo es un alimento que contiene una fuente de nutrientes importantes para la salud humana; la vitamina C es un antioxidante que apoya al sistema inmunológico y promueve la salud de la piel, las vitaminas del grupo B son esenciales para el metabolismo energético y el funcionamiento del sistema nervioso, también nos aporta minerales como ser hierro y calcio, que ayudan a fortalecer los huesos.
- La harina de nabo podría ser una alternativa saludable y nutritiva, especialmente para las personas con diabetes, ya que es baja en carbohidratos y tiene un índice glucémico bajo. De tal manera, sería importante promover la información sobre los beneficios de esta harina y enseñar a la población como incorporarla en su dieta diaria.
- La obtención harina de nabo puede ser incorporada como materia prima en la elaboración de nuevos productos alimenticios como ser en la preparación de sopas para espesar y agregar sabor, panificación (pan, galletas) para enriquecer la textura, en pastas para enriquecer su contenido nutricional, etc. Su uso puede ofrecer nuevas opciones gastronómicas y agregar variedad a los productos alimenticios disponibles en el mercado local.

### **1.3 Objetivos**

En el presente trabajo de investigación, se detallan a continuación los siguientes objetivos:

#### **1.3.1 Objetivo general**

Obtener harina de nabo mediante la metodología de secado por aire caliente; con la finalidad de obtener un producto de calidad nutricional en la provincia Cercado del departamento de Tarija.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- ❖ Determinar las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y minerales del nabo, con la finalidad de conocer su composición nutricional.
- ❖ Determinar el tiempo y tipo de tratamiento a realizarse en el nabo con el fin de evitar el pardeamiento enzimático.
- ❖ Identificar el tipo y tamaño de corte de las muestras de nabo con el fin de mejorar la eficiencia en el proceso de secado.
- ❖ Identificar las variables del proceso de secado por aire caliente para establecer las condiciones a nivel experimental del secado de nabo.
- ❖ Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas en la harina de nabo a nivel experimental.
- ❖ Realizar el balance de materia y energía, con la finalidad de establecer las corrientes de entrada y salida del proceso.

### **1.4 Planteamiento del problema**

En el Departamento de Tarija el consumo de nabo se ve limitado por las familias debido a la falta de información sobre las propiedades nutricionales que son importantes en la dieta alimentaria de las personas. Convertir el nabo

en harina no solo ofrece un subproducto innovador, sino que también puede ayudar a promover su consumo al incorporarlo en una variedad de productos alimenticios. Esto podría ampliar las opciones gastronómicas disponibles y también puede contribuir a una dieta más nutritiva y diversa para las familias de la región. La harina de nabo ofrece facilidad de preparación en una variedad de platos, desde sopas hasta repostería, lo que puede ayudar a mejorar la aceptación y el consumo de esta hortaliza nutritiva.

### 1.5 Formulación del problema

¿Se logrará obtener harina de nabo aplicando la metodología de secado por aire caliente con la finalidad de obtener un producto de calidad nutricional para la provincia Cercado del departamento de Tarija?

### 1.6 Objeto de estudio

Aplicación de la metodología para la obtención de harina de nabo por el proceso de secado por aire caliente.

### 1.7 Campo de acción

El campo de acción propuesto para el siguiente trabajo de investigación, se detalla a continuación:

- ❖ **Espacial:** El presente trabajo se realizó en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), provincia Cercado del Departamento de Tarija.
- ❖ **Temporal:** El periodo de tiempo donde se realizó el trabajo de investigación es en gestión 2023 – 2024.
- ❖ **Institución:** Las instituciones donde se realizó el trabajo de investigación son: Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA) y Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), pertenecientes a

la Facultad de Ciencias y Tecnología, dependientes de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

### **1.8 Hipótesis**

La metodología de secado por aire caliente aplicado en la obtención de harina de nabo, permitirá obtener un producto de calidad nutricional para la provincia Cercado del departamento de Tarija.

# **CAPÍTULO II**

## **MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Historia de la harina de tubérculos

Según (Rossana, 2021), se registra el uso de la harina desde hace más de 8000 años, 6000 años antes de Cristo, este producto ya se usaba. Fueron los romanos quienes crearon las primeras máquinas con las que fue posible comenzar a producir este polvo en cantidades considerables. En 1930 la harina comenzó a enriquecerse con nutrientes como el hierro o la riboflavina. Sin embargo (Huallpa, 2010), dice que “el origen del nabo tuvo lugar en el territorio de Afganistán y Pakistán, pero las primeras referencias a esta especie proceden de China donde también lo conocían los antiguos griegos y romanos” (Pág. 4).

## 2.2 Definición de la harina de tubérculos

La harina (término proveniente del latín farina, que a su vez proviene de far y de farris, nombre antiguo del farro) es un polvo fino que se obtiene a partir de tubérculos deshidratados y molidos ricos en almidón y en otros componentes como proteína, azúcares, minerales y vitaminas (Romero & Tuiran, 2017). Por otro lado, WARMA (2018), “es el producto elaborado a partir de tubérculos o raíces, obtenido mediante un proceso de secado o deshidratado y molienda, con o sin fortificación (alimento elaborado industrialmente) (Pág. 57).

### 2.2.1 Clasificación de las harinas de raíces y tubérculos

El Codex Alimentarius (1995) clasifica las harinas de raíces y tubérculos en dos categorías, así:

- **Harina de raíces y tubérculos fina:** es la harina que no menos del 90% en peso pasa con facilidad por un tamiz con orificios de 0,60 mm de apertura.
- **Harina de raíces y tubérculos gruesa:** es la harina que no menos del 90% en peso pasa por un tamiz con orificios de 1,20 mm de apertura



### **2.2.2 Propiedades nutricionales de las harinas de tubérculos**

Romero y Tuiran (2017), afirma que una harina con elevado contenido de vitamina C, es un alimento que al consumirse en forma abundante ayuda a reducir el riesgo de cualquier tipo de cáncer, incluida la leucemia, cáncer de vesícula, mama, cuello del útero, etc. Por otra parte, otro componente importante en la nutrición humana son las proteínas, estas están constituidas por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno, la importancia del aporte de proteínas desde la alimentación radica fundamentalmente, en que el organismo puede obtener algunas grasas a partir de los hidratos de carbono y glucosa a partir de las proteínas.

### **2.3 Aplicación de las harinas de tubérculos en el ser humano**

La harina obtenida de tubérculos hace referencia a sus propiedades físico químicas tales como el contenido de humedad, proteína, grasa, fibra y ceniza, así como organolépticas como aroma, color y textura. Las harinas no convencionales en su mayoría son usadas en la elaboración de galletas, pasteles y snacks. La utilización de harinas no convencionales trae consigo ventajas, ya que, si se obtiene el porcentaje óptimo de sustitución, el valor nutricional tiene a incrementar en su porcentaje de proteínas, aminoácidos esenciales, minerales y fibra dietética (Llumiyinga, 2022).

### **2.4 Caracterización del nabo**

Para la caracterización del nabo se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

#### **2.4.1 Morfología botánica de la planta de nabo**

Se trata de una planta de raíz tuberosa. El tallo tiene la base carnosa engrosada en forma de tubérculo y puede llegar a medir más de 1,5 m de altura. Las hojas de la base y las de la parte superior son dentadas; las primeras, lobuladas o con forma de lira y provistas de peciolo, las superiores, lanceoladas y con el borde dentado. Las flores se sitúan a la misma altura en

los racimos, tienen de 1,5 a 2 cm de diámetro y los pétalos de color amarillo. Los frutos de forma alargada, están formados por una especie de vainas casi cilíndricas, de 5 a 10 cm de longitud, con pico de 2 cm, pedicelo entre (1 a 3) cm y hasta 20 semilla por lóculo. Las semillas presentan una forma globosa, tienen entre (2 a 2,5) mm de diámetro y son ligeramente angulosas, y reticuladas o recubiertas de alveolos, de un color que varía de castaño a rojizo o puede ser negruzco (Condori, 2016). En la figura 2.1, se muestran las características botánicas de la planta de nabo.



**Fuente:** Vibrans, 2009

**Figura 2.1:** Características botánicas de la planta de nabo

#### 2.4.2 Taxonomía de la planta de nabo

Según Marqués (2020), el nabo pertenece a la familia de las crucíferas, que engloba 380 géneros y 3000 especies, propias de regiones frías y templadas del hemisferio norte. En la tabla 2.1, se muestra la descripción taxonómica de la planta de nabo variedad (***brassica rapa***).

**Tabla 2.1**

***Descripción taxonómica del nabo variedad (brassica rapa)***

<b>Reino</b>	Plantae
<b>División</b>	Magnoliophyta (Espermatofita)
<b>Clase</b>	Magnoliopsida (Dicotiledoneas)
<b>Orden</b>	Capparidales (Papaverales)
<b>Familia</b>	Brassicaceae (Crucifereae)
<b>Género</b>	Brassica
<b>Especie</b>	<b><i>Brassica rapa.</i></b>
<b>Nombre común</b>	Nabo

**Fuente:** Condori, 2016

**2.4.3 Valor nutricional del nabo**

Según Flores (2000), el nabo es una hortaliza de escaso aporte calórico porque posee abundante cantidad de agua y un bajo contenido de hidratos de carbono y es buena fuente de fibra. Respecto al contenido vitamínico, aporta una apreciable cantidad de vitamina C y de folatos, y cantidades discretas de vitaminas del grupo B (B<sub>6</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>). En la tabla 2.2, se observa la composición nutritiva del nabo en 100 g de porción comestible.

**Tabla 2.2**

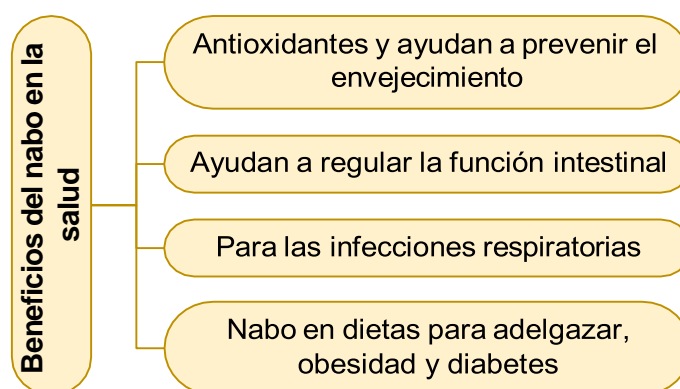
***Composición nutricional del nabo***

<b>Componentes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
<b>Energía</b>	cal	16,0
<b>Agua</b>	g	94,7
<b>Proteína</b>	g	0,6
<b>Grasa</b>	g	0,2
<b>Carbohidrato</b>	g	3,6
<b>Fibra</b>	g	0,6
<b>Ceniza</b>	g	0,9
<b>Calcio</b>	mg	34
<b>Fósforo</b>	mg	34
<b>Hierro</b>	mg	0,1
<b>Riboflavina</b>	mg	0,04
<b>Ácido ascórbico</b>	mg	49,2

**Fuente:** Collazos et al, 1993

#### 2.4.4 Beneficios del nabo en la salud

Según Reus (2014), el nabo es una hortaliza con un valor calórico muy bajo (24,7 kcal por 100 g), el 90% de su peso es agua. Aun así, es una buena fuente de fibra (casi el 3% del peso) de vitaminas, y minerales. En la figura 2.2, se detallan los beneficios del nabo en la salud.



**Fuente:** Carballido, 2020 & Reus, 2014

**Figura 2.2:** Beneficios del nabo en la salud

- **Antioxidantes y ayudan a prevenir el envejecimiento**

Los nabos son ricos en vitaminas antioxidantes (como la vitamina C y los betacarotenos) y compuestos de azufre que ayudan a bloquear los efectos perjudiciales de los radicales libres (Reus, 2014).

- **Ayudan a regular la función intestinal**

La fibra ayuda a reducir el nivel de colesterol en la sangre y es un factor protector del cáncer de colon. La fibra soluble tiene efectos probióticos, es decir, se convierte en un sustrato idóneo para el crecimiento de la flora intestinal (Reus, 2014).

- **Para las infecciones respiratorias**

El nabo es un alimento empleado en curas respiratorias por sus propiedades pectorales, que ayudan a tratar la congestión de pecho. Por su alto contenido en vitamina C son una ayuda para combatir infecciones (Carballido, 2020).

- **Nabo en dietas para adelgazar, obesidad y diabetes**

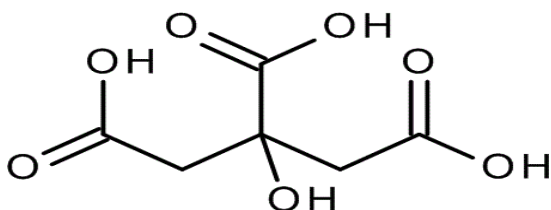
Estos vegetales poseen pocas calorías, son ricos en fibra y, además, tienen beneficios antiinflamatorios y antioxidantes, que mejoran la circulación y la salud del organismo (Carballido, 2020).

## **2.5 Caracterización de los insumos utilizados en el proceso de secado para la obtención de harina de nabo**

Para la caracterización de los insumos utilizados en el proceso de secado, se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

### **2.5.1 Ácido cítrico**

Serrano (2019), dice que “el ácido cítrico es un ácido orgánico tricarboxílico cuya fórmula es  $C_6H_8O_7$ , su nombre IUPAC es ácido 2-hidroxi-1, 2, 3-propanocarboxílico y tiene un peso molecular de 192,12 g/mol. En su forma industrial es un polvo cristalino, blanco, inodoro y con sabor ácido fuerte”. Por otro lado, según Sikorska (2022), el ácido cítrico prolonga la vida útil de los productos y ayuda a conservar su color, el ácido cítrico también hace que los alimentos conserven la acidez adecuada y es un excelente conservante. En la figura 2.3, se muestra la fórmula estructural del ácido cítrico.



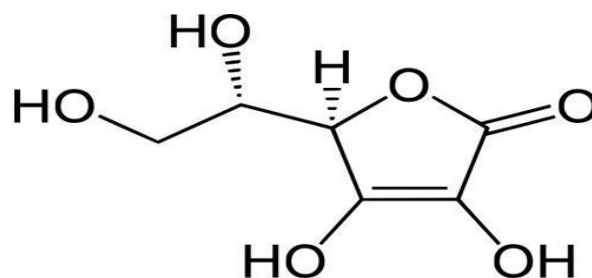
**Fuente:** Serrano, 2019

**Figura 2.3:** Fórmula estructural del ácido cítrico

### **2.5.2 Ácido ascórbico**

El ácido ascórbico es un antioxidante muy efectivo por su capacidad de donar electrones, esto protege moléculas importantes que componen nuestro organismo como proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, pero además protege

de la oxidación a otras vitaminas como la vitamina A, E y algunas de las vitaminas B (Rojas y De La Cruz, 2022). Según Contreras (2015), el ácido L-ascórbico es un compuesto de 6 carbonos relacionado estructuralmente con la glucosa. Es un agente con una elevada capacidad reductora. En la figura 2.4 se muestra la estructura química del ácido ascórbico.



**Fuente:** Contreras, 2015

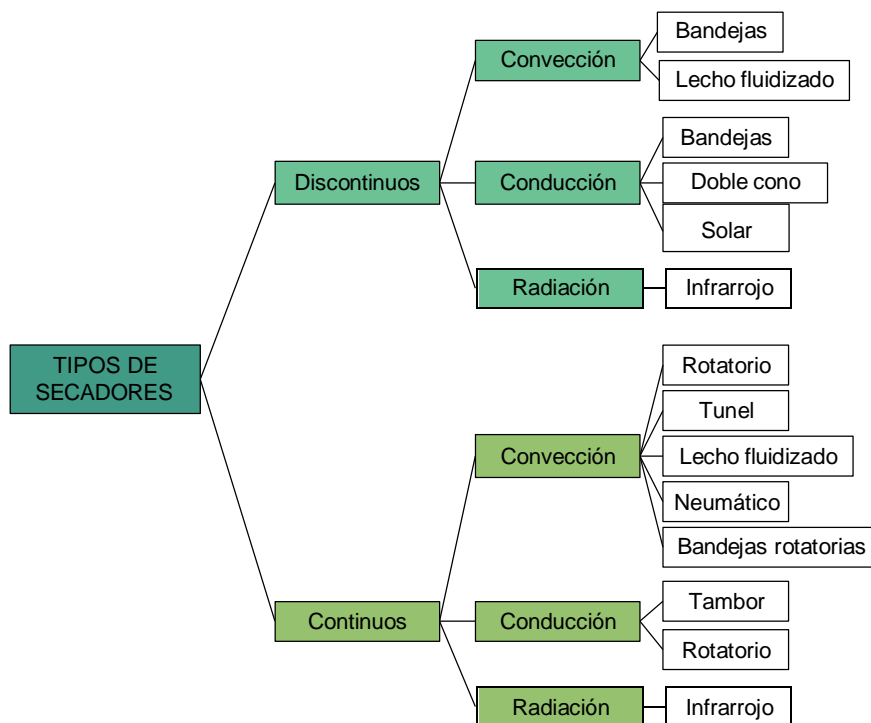
**Figura 2.4:** Estructura química del ácido ascórbico

## 2.6 Secado de alimentos

Según De la Vega (2017), es un proceso de transferencia simultánea de materia (agua) y de energía (calor), se cuenta con una transmisión de calor que proporcione el calor latente de vaporización necesario para eliminar el agua y un transporte de agua desde el alimento hacia el exterior; ambos procesos se realizan simultáneamente, influyendo uno sobre el otro. Por otro lado, Hernandez y Perez (2003), dicen que “el objetivo fundamental del secado es el de disminuir el contenido de agua de sólidos húmedos hasta dejarlos en un límite conveniente para garantizar su conservación en el almacenamiento y comercialización” (Pág. 21).

### 2.6.1 Tipos de secadores

Existe una amplia variedad de secadores industriales, debido a las necesidades requeridas en la industria. En la figura 2.5, se clasifican de la siguiente manera:



**Fuente:** Segura y Osorio, 2018

**Figura 2.5:** Tipos de secadores

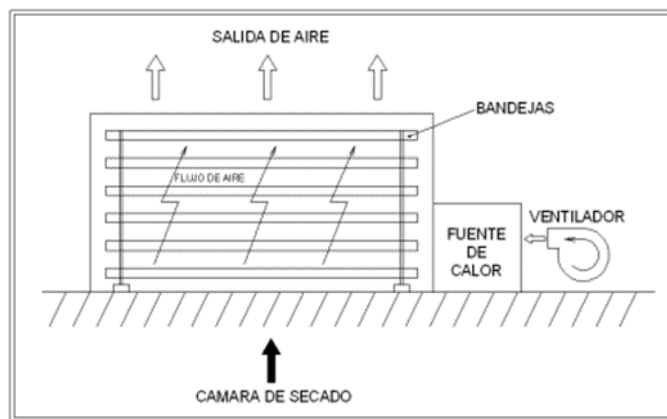
### 2.6.2 Secado por aire caliente

El secado por flujo de aire caliente es una técnica que por medio del calor se elimina el agua que contienen algunos alimentos mediante la evaporación, lo que impide el crecimiento de algunas bacterias que no pueden vivir en medios secos. En el secado de frutas y vegetales mediante el empleo de aire caliente a altas temperaturas se afectan las propiedades sensoriales del producto y su valor nutricional, por lo que la temperatura de secado es una variable a tener en cuenta en los estudios cinéticos (Vega y Fito, 1995).

### 2.6.3 Secador a bandejas

Según Calle y Aparicio (2011), los secadores a bandejas consisten en una cabina aislada provista interiormente de un ventilador para circular aire a través de un calentador; el aire caliente sale por una rejilla de láminas ajustables y es dirigido, horizontalmente entre bandejas cargadas de hierba, o verticalmente a través de las bandejas perforadas y el producto. Estos

secadores pueden disponer de reguladores para controlar la velocidad de aire nuevo y la cantidad de aire de recirculación. En la figura 2.6, se muestra el secador de bandejas.



**Fuente:** Calle y Aparicio, 2011

**Figura 2.6:** Secador de bandejas

## 2.7 Factores que intervienen en el proceso de secado

Los factores que intervienen en el proceso de secado por aire caliente para la obtención de harina de nabo, son los siguientes:

### 2.7.1 Temperatura de secado

La temperatura desempeña un papel importante en el proceso de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles (Villca, 2020).

#### 2.7.1.1 Temperatura de bulbo seco

Según Pardo (2012), “es aquella del ambiente, se mide con instrumentación ordinaria, como un termómetro de mercurio” (Pág. 26).

#### 2.7.1.2 Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección, a la misma, es igual a la transferencia de masa que se aleja de la superficie (Pardo, 2012)



### **2.7.2 Velocidad de secado**

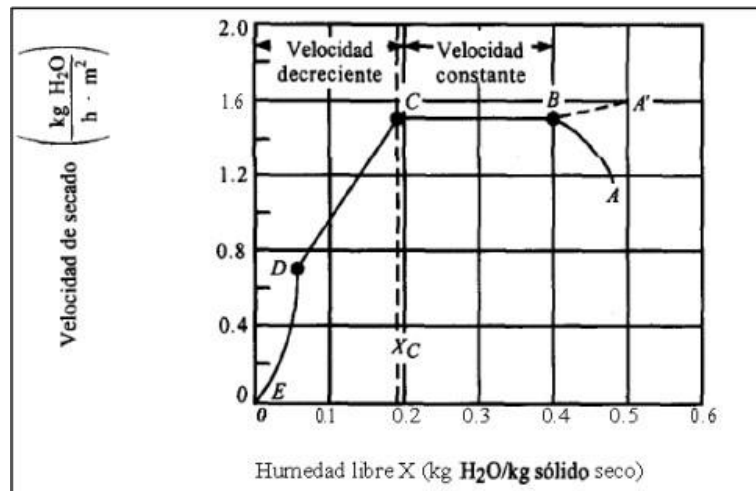
Según (Cerrón & Junchaya, 2019), dice que “esta magnitud permite realizar el análisis del proceso de secado, así como la cantidad de tiempo que demandará en secar un sólido en particular a ciertas condiciones, o también permitirá determinar las dimensiones del equipo destinado a esta operación” (Pág. 34).

La velocidad de secado es la pérdida de masa de humedad por unidad de tiempo, operando a condiciones constantes de temperatura, flujo de aire y presión. Cuando se seca un sólido, se transfiere masa como líquido o vapor al interior del sólido, y como vapor del sólido al aire y se transfiere calor para evaporar el líquido, mientras se va disminuyendo la humedad (Quispe, 2018).

#### **2.7.2.1 Velocidad del aire**

La velocidad de secado aumenta a medida que se incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado. La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juegan un papel importante en el secado. Cuanto menor sea el espesor de la capa límite, más rápida será la remoción de humedad. Del mismo modo el flujo de aire durante el secado es importante ya que un flujo turbulento es mucho más eficaz que uno laminar (Mendoza, 2015).

Pardo (2012), afirma que “la velocidad del aire dentro del secador tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación y, en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material” (Pág. 27). En la figura 2.7, se muestra la curva de velocidad de secado.



Fuente: Quispe, 2018

**Figura 2.7:** Curva de velocidad de secado

### 2.7.3 Contenido de humedad

Martines y Lira (2010), afirman que “el contenido de humedad es una magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido y se puede representar en términos de una base de masa seca o de una base de masa húmeda” (Pág. 1)

#### 2.7.3.1 Humedad en base húmeda

Según (Martínes & Lira, 2010. Pág. 2) la humedad en base húmeda es la cantidad de masa de agua entre la masa del sólido seco más la masa de agua, la determinación de la cantidad de humedad en base húmeda se describe en la ecuación 2.1:

$$HBH = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de sólido seco} + \text{masa de agua}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

#### 2.7.3.2 Humedad en base seca

Según (Martínes & Lira, 2010. Pág. 2), la humedad en base seca es la cantidad de masa de agua entre la masa del sólido seco de la muestra, la determinación de la cantidad de humedad en base seca se describe en la ecuación 2.2:

$$\text{HBS} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de sólido seco}}$$

## Ecuación 2.2

### 2.7.3.3 Humedad ligada

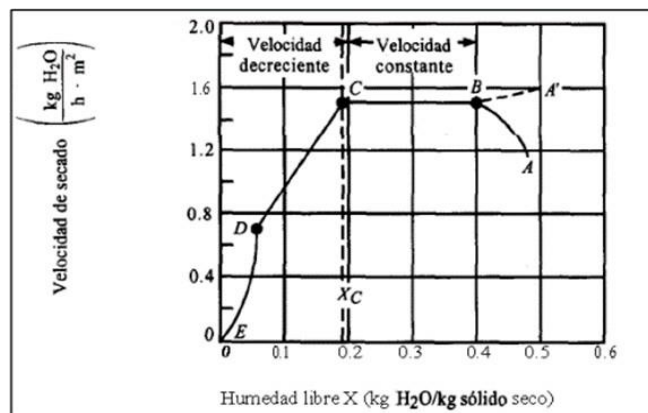
Según (Hernández y Pérez, 2003. Pág. 22), se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

### 2.7.3.4 Humedad no ligada

Según (Hernández y Pérez, 2003. Pág. 22), se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

## 2.8 Curva de secado

En los procesos de secado, los datos generalmente se obtienen del cambio en el peso del producto a lo largo del tiempo, obteniendo los periodos de secado que permiten establecer la cinética de secado. En la figura 2.8, se muestra la curva de secado



Fuente: Quispe, 2018

**Figura 2.8:** Curva de secado

- **Periodo de Estabilización (A-B):** Periodo despreciable debido al poco tiempo en el que ocurre, al inicio de la experiencia el sólido iguala sus

condiciones a las del aire que circula a su alrededor debido a la débil contribución del calor sensible a la evaporación de agua, variando la tendencia de la curva según las condiciones que presenta el sólido frente al aire de secado (Quispe, 2018).

- **Periodo constante (B-C):** También llamado periodo antecrítico es donde la velocidad de secado es casi constante debido a que la superficie del sólido contiene una humedad y esta se evapora de forma lineal, llevando a cabo la difusión de la interfaz aire/humedad y la velocidad por difusión es eliminada (Quispe, 2018).
- **Primer Periodo decreciente (C-D):** También llamado periodo proscrito, en este periodo, la velocidad disminuye progresivamente por la densidad alta y poros pequeños del sólido, siendo la alta resistencia a la difusión dentro del producto la que controle la velocidad de secado (Quispe, 2018).
- **Segundo Periodo decreciente (D-E):** Al igual que el primer periodo decreciente, la evaporación ocurre desde dentro de pequeños poros del sólido con una alta resistencia al flujo por lo que la velocidad disminuye hasta que el sólido llegue a la humedad de equilibrio y no existe más secado (Quispe, 2018).

### 2.8.1 Cinética de secado

El estudio de la cinética está basado en el estudio de la fluctuación de cantidad de humedad en función del tiempo, por lo contrario, se desarrolla también la dinámica de secado que estudia las variaciones de temperatura y humedad. Así la cinética de secado estudia la humedad que se pierde por evaporación, el tiempo, el consumo de energía, etc. Sin embargo, la variación de humedad está sujeta a la transferencia de masa y calor entre el área superficial, el ambiente y la parte interna del material que se secará (Ortiz, 2018).

## **2.9 Molienda del nabo**

Según (Ledesma & Ortega, 2017), la molienda “es una operación unitaria que reduce el tamaño de las partículas, dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta lograr el tamaño deseado (Pág.31). Por otro lado (Casp, 2014), afirma que la molturación o molienda es el proceso por el cual se reduce el tamaño de partícula de un material. En el caso de los cereales, la molturación puede ser llevada a cabo por distintos dispositivos, como molinos de martillos, cilindros, de piedra, etc., con los cuales se obtienen harinas integrales.

## **2.10 Proceso de tamizado**

El proceso de tamizado según (Samaniego & Estrada, 2012), “es una operación unitaria que consiste en la separación de una mezcla de partículas de diferentes tamaños en dos o más fracciones” (Pág. 27). Por otro lado (Abarca et al, 2017), dice que el tamizado es una operación básica en la que una mezcla de partículas sólidas, de diferentes tamaños, se separa en dos o más fracciones, pasándola por un tamiz. Cada fracción es más uniforme en tamaño que la mezcla original. Un tamiz es una superficie que contiene cierto número de aperturas, de igual tamaño.

# **CAPÍTULO III**

## **METODOLOGÍA**

### **EXPERIMENTAL**

### **3.1 Desarrollo de la parte experimental**

La parte experimental del presente trabajo de investigación “obtención de harina de nabo mediante proceso de secado por aire caliente”, se desarrolló en los ambientes de Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA), perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

### **3.2 Tipos de intervención en la parte experimental**

La metodología a considerar en el presente trabajo de investigación, es la metodología experimental de laboratorio para la obtención de resultados experimentales, los cuales se detallan a continuación:

- Análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales para conocer las características del nabo.
- Análisis factorial  $2^3$  en el proceso de secado por aire caliente.
- Análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales de la harina de nabo.
- Operacionalización de las variables del proceso de secado para la obtención de harina de nabo.
- Balance de materia y energía en el proceso de obtención de harina de nabo.

### **3.3 Paradigma investigativo**

El paradigma de investigación según (Álvarez et al, 2017), se basa en un pensamiento de tipo deductivo, que va desde lo general; de un conocimiento extenso, para luego generalizar el resultado obtenido en una escasa muestra (Pág. 73). Por otro lado, (Ricoy, 2006), indica que el paradigma positivista se califica de cuantitativo, empírico-analítico, racionalista, sistemático gerencial y científico tecnológico.

Por tanto, el paradigma positivista sustentará a la investigación que tenga como objetivo comprobar una hipótesis por medios estadísticos o determinar parámetros de una determinada variable mediante la expresión numérica.

El tipo de paradigma a ser desarrollado en el presente trabajo de investigación, es el paradigma positivista de carácter empírico-analítico, con el fin de relacionar las variables para comprobar hipótesis.

### **3.4 Tipo de investigación**

Según (Arias, 2012), la investigación experimental “es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” (Pág. 34).

#### **3.4.1 Enfoque de la investigación**

La investigación cuantitativa (Babativa, 2017), se caracteriza por ser objetiva y deductiva, producto de los diferentes procesos experimentales que pueden ser medibles, su objeto de estudio permite realizar proyecciones, generalizaciones o relaciones en una población o entre poblaciones a través de inferencias estadísticas establecidas en una muestra. Por otro lado, (Rasinger, 2013), indica que “la investigación cuantitativa es inductiva, es decir, la teoría se deriva de los resultados de la investigación” (Pág. 25).

El presente trabajo de investigación, se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo.

### **3.5 Métodos – técnicas e Instrumentos**

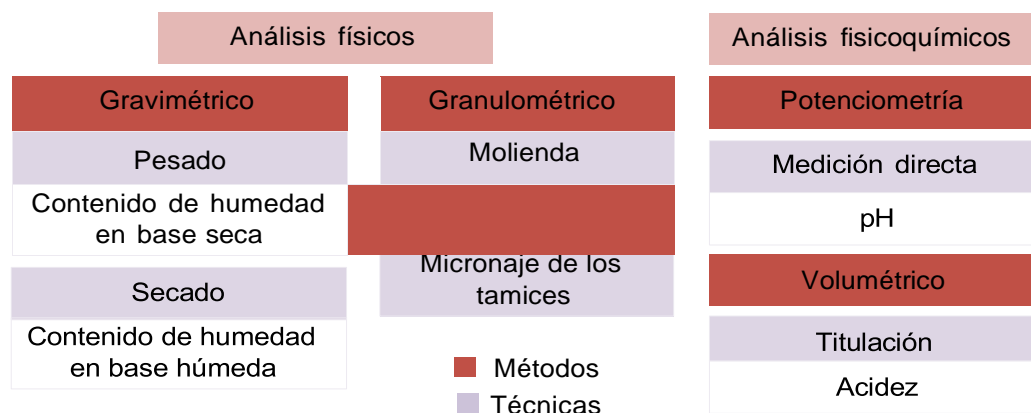
Según (Ñaupas et al, 2018), define que el método científico es un proceso ordenado que permite generar el conocimiento científico de la realidad y verificarlo, empieza con la identificación de un problema, continua con la revisión de la literatura existente sobre el problema identificado, en base a estos conocimientos plantea hipótesis, luego recolecta la información





### 3.5.2 Análisis físicos y fisicoquímicos en el proceso de secado por aire caliente para la obtención de harina de nabo

En la figura 3.2, se muestran los métodos y técnicas de los análisis físicos y fisicoquímicos del nabo en el proceso de secado por aire caliente. Los análisis se realizaron en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA).



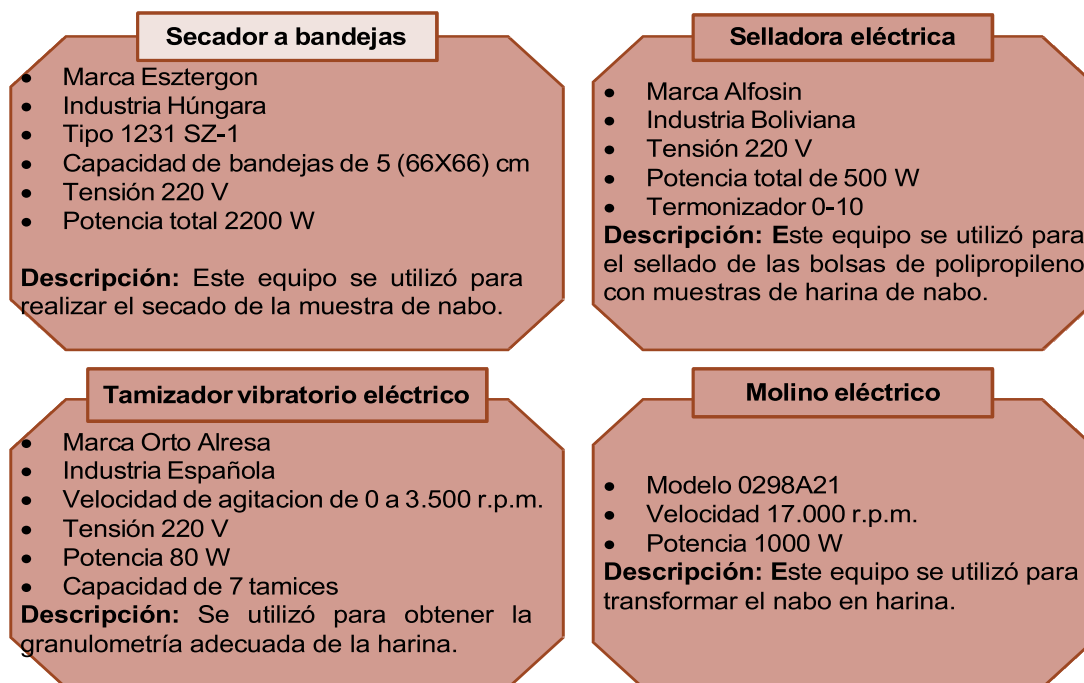
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.2:** Análisis físicos y fisicoquímicos en el proceso de secado de nabo

### 3.5.3 Análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales de la harina de nabo

En la figura 3.3, se muestran los métodos y técnicas que se utilizaron para determinar los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales de la harina de nabo. Los análisis se realizaron en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID).





**Fuente:** Laboratorio de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA) y Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU)

**Figura 3.4:** Equipos para la obtención de harina de nabo

### 3.6.2 Instrumentos de laboratorio para la obtención de harina de nabo

En la figura 3.5, se detallan las especificaciones técnicas de los instrumentos de laboratorio que se utilizaron en el presente trabajo de investigación para obtener harina de nabo, los cuales se encuentran en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA) y Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) y detallados en el (Anexo H).

Termobalanza	Anemómetro digital	Balanza de precisión	Termo-higrómetro digital
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marca Radwag</li> <li>• Modelo PM 60.3Y.WH</li> <li>• Capacidad de peso máximo 60 g</li> <li>• Temperatura máxima 250 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marca HT Instruments</li> <li>• Industria China</li> <li>• Modelo HT-4000</li> <li>• Tensión 9 V</li> <li>• Resolución 0,1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marca Radwag</li> <li>• Capacidad de peso máximo 4500 g</li> <li>• Capacidad de peso mínimo 0,5 g</li> <li>• Error de 0,1 g</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marca Ehdiss</li> <li>• Modelo HT-4000</li> <li>• Tensión 9 V</li> <li>• Humedad relativa (0-100)%</li> <li>• Exactitud <math>\pm 0.5</math> °C</li> </ul>

**Fuente:** Laboratorio de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA)

**Figura 3.5:** Instrumentos de laboratorio para la obtención de harina de nabo

### 3.6.3 Material de laboratorio

Los materiales de laboratorio que se utilizaron en el presente trabajo de investigación, se muestran en el (Anexo H) y son detallados a continuación:

- Δ **Vaso precipitado:** material de vidrio, volumen 200 ml  $\pm$  1 ml.
- Δ **Probeta:** material de vidrio, volumen 100 ml  $\pm$  1 ml.
- Δ **Vernier manual:** material acero inoxidable, tamaño (0-25) cm.
- Δ **Espátula:** material acero inoxidable, tamaño mediano.
- Δ **Tamices:** material acero inoxidable, 0,25 mm.

### 3.6.4 Utensilios

Los utensilios que se utilizaron en el presente trabajo, se muestran en el (Anexo H) y son detallados a continuación:

- Δ **Bandeja:** material acero inoxidable y plástico, tamaño pequeño y mediano.
- Δ **Jarras:** material plástico, volumen 1 L.
- Δ **Cuchara:** material acero inoxidable, tamaño mediano.
- Δ **Espátula:** material plástico, tamaño mediano.
- Δ **Colador:** material plástico, tamaño mediano.
- Δ **Cuchillo:** material acero inoxidable, tamaño mediano.

### 3.7 Insumos alimentarios

Los insumos alimentarios que se utilizaron en el presente trabajo de investigación se detallan en la tabla 3.1.

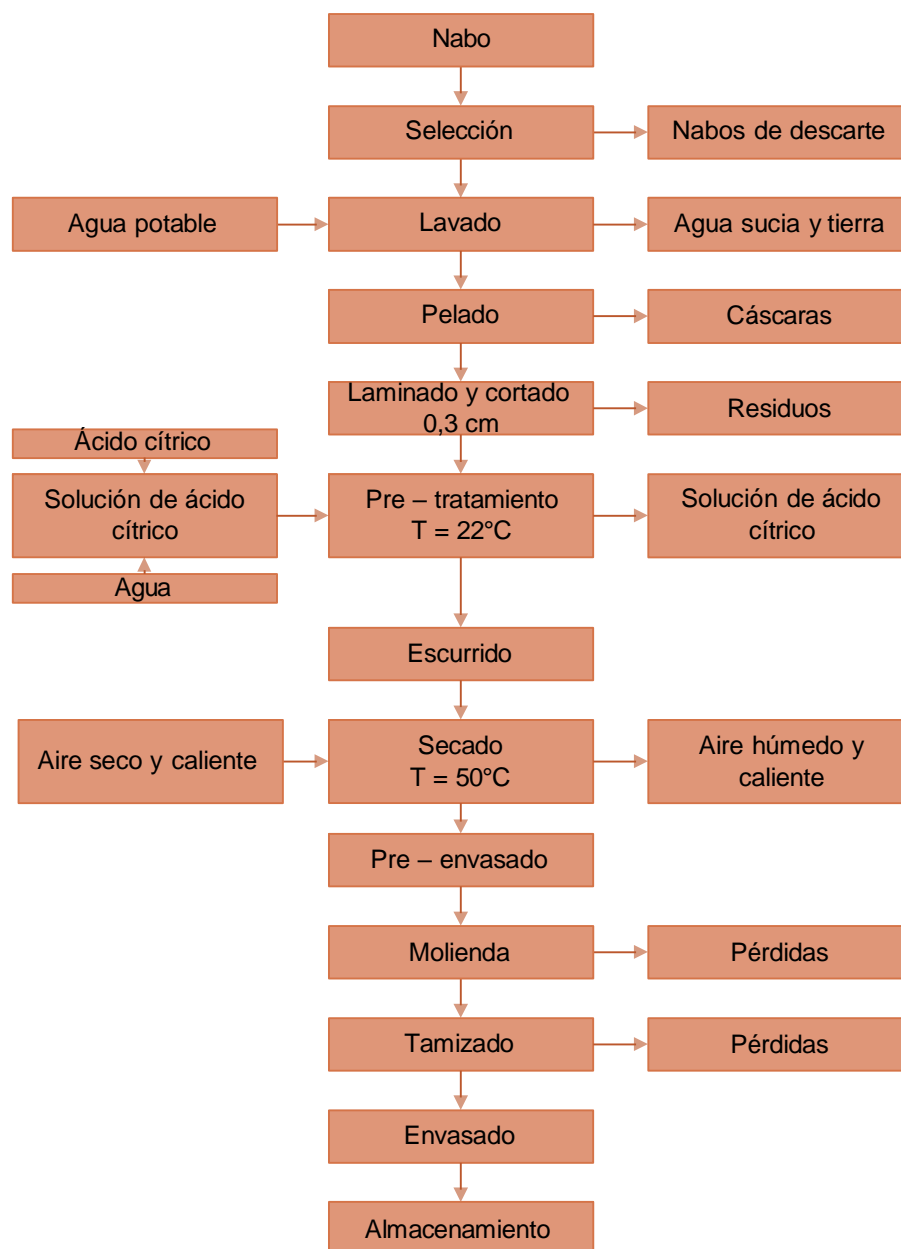
**Tabla 3.1**

<i><b>Insumos alimentarios</b></i>				
<b>Insumos</b>	<b>Estado</b>	<b>Procedencia</b>	<b>Marca</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Ácido ascórbico</b>	Sólido	Boliviana	Solquifar	50 g
<b>Ácido cítrico</b>	Sólido	Boliviana	Solquifar	50 g
<b>Agua destilada</b>	Líquido	Boliviana	-	10 L

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8 Diagrama de flujo para la obtención de harina de nabo

En la figura 3.6, se muestra el diagrama de flujo para la obtención de harina de nabo mediante el método de secado por aire caliente.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.6:** Diagrama de flujo para la obtención de harina de nabo

La descripción del diagrama de flujo para la obtención de harina de nabo, se detalla a continuación:



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.7:** Nabo

### **Nabo**

El nabo que se utilizó para el proceso de obtención de harina de nabo, fue adquirido del mercado Campesino de la ciudad de Tarija, procedente de Erquis perteneciente al municipio de San Lorenzo. En la figura 3.7, se muestra el nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.8:** Selección

### **Selección**

Durante este proceso, se llevó a cabo una selección manual en el que se clasificó el nabo según su tamaño, con el objetivo de garantizar la homogeneidad del tamaño del corte del nabo y separar aquellos que no son aptos para el proceso. En la figura 3.8, se muestra la selección del nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.9:** Lavado

### **Lavado**

Durante este proceso, se utilizó agua potable con el objetivo de eliminar tierra, impurezas y residuos adheridos en la superficie de la cáscara del tubérculo para asegurar la limpieza adecuada del nabo. En la figura 3.9, se muestra el lavado del nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.10:** Pelado

### **Pelado**

El pelado se llevó a cabo manualmente utilizando un cuchillo de acero inoxidable. Este proceso implica separar la porción no comestible (cáscara), de la porción comestible del nabo. En la figura 3.10, se muestra el pelado del nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.11:** Laminado y cortado

### **Laminado y cortado**

Para obtener las rodajas de nabo, se empleó un cortador de hortalizas de acero inoxidable. Así mismo, se utilizó un cuchillo picador de hortalizas para realizar el tipo de corte laminado con el fin de garantizar un corte preciso y uniforme. En la figura 3.11, se muestra el corte rodajas y tipo laminado del nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.12:** Pretratamiento

### **Pretratamiento**

El pretratamiento, se llevó a cabo para prevenir el pardeamiento enzimático durante el proceso de secado. Se preparó una solución de ácido cítrico a concentración (1%). Una vez preparada la solución, se sumergieron las muestras durante 5 minutos. En la figura 3.12, se muestra el pretratamiento en solución de ácido cítrico de las muestras de nabo.





**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.13:** Escorrido



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.14:** Secado

### **Escorrido**

Después del pretratamiento, las muestras se colocaron en un colador de acero inoxidable para eliminar el exceso de solución de ácido cítrico evitando la presencia de residuos que puedan afectar la calidad del producto final. En la figura 3.13, se muestra el escorrido del nabo.

### **Secado**

Para iniciar el proceso de secado, se ajusta el secador de bandejas hasta alcanzar una temperatura de secado de 50°C. Luego, se activa el generador de aire a una velocidad del aire en el secador de 5,0 m/s, con el objetivo de obtener aire seco y eliminar la humedad del equipo. Una vez ajustado el equipo, se introduce una bandeja de dimensiones (35 x 35) cm, conteniendo muestras de nabo previamente escurridas. Durante esta etapa, se realiza un seguimiento de la pérdida de peso cada 5 minutos hasta alcanzar un peso constante en un lapso de 3 horas, con el fin de determinar la pérdida de agua de las muestras de nabo. En la figura 3.14, se muestra el proceso de secado del nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.15:** Pre – envasado

### **Pre – envasado**

Una vez completado el proceso de secado, se retiraron las bandejas con las muestras de nabo laminado seco para permitir que exuden y se enfríen a temperatura ambiente, manteniéndose entre (20 – 25) °C. Posteriormente, se colocaron las muestras en bolsas de polipropileno de alta densidad, para evitar que entren en contacto con la humedad del ambiente para preservar la calidad y la durabilidad de las muestras. En la figura 3.15, se muestra el pre – envasado de las muestras secas de nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.16:** Molienda

### **Molienda**

Durante el proceso de molienda, las muestras secas se introdujeron en el molino eléctrico con el objetivo de reducir el tamaño de las partículas de las muestras hasta alcanzar la granulometría adecuada para obtener una harina de calidad. En la figura 3.16, se muestra la molienda de las muestras secas de nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.17:** Tamizado

### **Tamizado**

Seguido del proceso de molienda, las muestras en polvo se tamizaron utilizando un tamiz vibratorio número 0,25 m/m para obtener la granulometría deseada para el producto final. En la figura 3.17, se muestra el tamizado de la harina de nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.18:** Envasado

### **Envasado**

Después de completar el proceso del tamizado, las muestras de harina de nabo se envasaron en bolsas de polipropileno de alta densidad con cierre hermético para garantizar la protección contra la humedad ambiental y agentes externos que podrían contaminar al producto, asegurando la calidad y la durabilidad de la harina de nabo durante su almacenamiento y transporte. En la figura 3.18, se muestra el envasado de la harina de nabo.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 3.19:** Almacenamiento

### **Almacenamiento**

El producto obtenido es almacenado en condiciones de temperatura ambiente, con la finalidad de prolongar su tiempo de vida útil. En la figura 3.19, se muestra el almacenamiento de la harina de nabo.

### 3.9 Evaluación sensorial

(Torricella et al, 2007), manifiesta que “la evaluación sensorial es una disciplina de la química analítica de los alimentos y se ocupa de los métodos y procedimientos de medición en los cuales los sentidos humanos constituyen como el instrumento” (Pág. 1). Por otro lado, (Grández, 2008) indica que la evaluación sensorial de los alimentos “es una técnica en la ciencia de los alimentos que estudia las características organolépticas de los alimentos a través de la respuesta de un grupo de personas, panel de personas o consumidores, y así aportar objetividad a estas percepciones” (Pág. 11). En la figura 3.20, se detalla la evaluación sensorial que se realizó a las muestras de harina de nabo.

Evaluación sensorial	Tratamientos	Códigos	Atributos	Test
Muestras del ensayo 1	Ácido cítrico	N01-N02	Color-Apariencia	Test 1
Muestras del ensayo 2	Ácido ascórbico	N03-N04	Color-Apariencia	Test 1
Muestras del ensayo 3	Sin tratamiento	N05	Color-Apariencia	Test 1
Diseño experimental	Ácido cítrico	HA	Color-Apariencia	
	Sin tratamiento	HN	Color-Apariencia	
Muestra final	Ácido cítrico	PQ1	Color-Apariencia	

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.20:** Evaluación sensorial de las muestras de harina de nabo

### 3.10 Diseño Experimental

Según (Hernández et al, 2018), indica que “el diseño experimental es una manipulación directa de la variable independiente, por parte del investigador, para determinar su influencia sobre la variable dependiente bajo condiciones de control de las variables ajenas” (Pág. 89). Así mismo, (Ñaupas et al, 2014) menciona que “el diseño experimental es un plan que sirve para orientar al investigador en la realización del experimento” (Pág. 335).

### 3.10.1 Diseño factorial

Según (Gutiérrez & De la Vara, 2008), “el objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores” (Pág. 128). Por otro lado (Badii et al, 2007), manifiesta que “el diseño factorial es aquel en el que el conjunto de tratamientos consiste en todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores. El factor, es una clase de tratamiento, y experimentos factoriales, todo factor proporciona varios tratamientos” (Pág. 311).

### 3.10.2 Diseño factorial $2^k$

(Gutiérrez & De la Vara, 2008) indican que “los diseños factoriales  $2^k$  completos son útiles principalmente cuando el número de factores a estudiar está entre dos y cinco ( $2 \leq k \leq 5$ ), rango en el cual su tamaño se encuentra entre cuatro y 32 tratamientos” (Pág. 168).

### 3.10.3 Diseño factorial $2^3$ en el proceso de secado

Según (Gutiérrez & De la Vara, 2008), con el diseño factorial  $2^3$  se estudian tres factores en dos niveles cada uno. Consta de  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$  tratamientos diferentes (Pág. 183). En la tabla 3.2 se muestran los signos del diseño factorial  $2^3$ .

$$2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8 \text{ tratamientos}$$

**Ecuación 3.1**

Tabla 3.2

***Tabla de signos del diseño factorial 2<sup>3</sup> en el proceso de secado***

Tratamientos	Factores			Interacciones				Variable respuesta	
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	H <sub>BS</sub>	H <sub>BS</sub>
(1)	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	H <sub>BS1</sub>	H <sub>BS1</sub>
a	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	H <sub>BS2</sub>	H <sub>BS2</sub>
b	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	H <sub>BS3</sub>	H <sub>BS3</sub>
c	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	H <sub>BS4</sub>	H <sub>BS4</sub>
ab	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	H <sub>BS5</sub>	H <sub>BS5</sub>
ac	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	H <sub>BS6</sub>	H <sub>BS6</sub>
bc	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	H <sub>BS7</sub>	H <sub>BS7</sub>
abc	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	H <sub>BS8</sub>	H <sub>BS8</sub>

Fuente: Elaboración propia

Donde:

A: Tipo de corte (cm)

B: Temperatura (°C)

C: Velocidad del aire (m/s)

H<sub>BS</sub>: Porcentaje de humedad (kg agua/kg sólido seco)

### 3.11 Operacionalización de las variables para la obtención de harina de nabo

Según (Arias, 2021), “la operacionalización de variables consiste en un conjunto de técnicas y métodos que permiten medir la variable en una investigación, es un proceso de separación y análisis de la variable en sus componentes que permiten medirla” (Pág. 46). En la tabla 3.3, se muestra la operacionalización de variables para la obtención de harina de nabo.

Tabla 3.3

**Operacionalización de las variables para la obtención de harina de nabo**

Hipótesis		Variables	Definición de variable	Índice (subvariable)	Indicadores
La metodología de secado por aire caliente a ser aplicado en la obtención de harina de nabo, permitirá obtener un producto de calidad nutricional para la provincia Cercado del departamento de Tarija.	Variable independiente	Proceso de secado por aire caliente	El secado por flujo de aire caliente es una técnica que por medio del calor se elimina el agua que contienen algunos alimentos mediante la evaporación. (Vega & Fito, 1995)	Tipo de corte	Rodajas y laminado
				Temperatura	°C
				Corte de nabo	(0,2 – 0,3) cm
				Velocidad de aire	m/s
				Contenido de humedad	(kg agua/kg sólido seco)
				Tiempo de secado	(2 – 3) horas tiempo
				Cinética de secado	Kg sólido seco/m²h
	Variable dependiente	Harina de nabo	La harina de nabo es un polvo fino que se obtiene a partir de tubérculos deshidratados y molidos ricos en almidón y otros componentes como proteína, azúcares, minerales y vitaminas. (Romero & Tuiran, 2017)	Hidratos de carbono	%
				Proteínas	%
				Grasas	%
				Humedad	%
				Fibras	%
				Valor energético	Kcal/g
				Escherichia coli	UFC/g
				Mohos y levaduras	UFC/g
				Coliformes totales	UFC/g
				Potasio	mg/100g
				Fósforo	mg/100g
				Análisis organolépticos	Color – apariencia

**Fuente:** Elaboración propia

# **CAPÍTULO IV**

## **RESULTADOS Y**

## **DISCUSIÓN**



## 4.1 Caracterización del nabo

Para la caracterización del nabo se tomaron en cuenta las siguientes propiedades físicas, análisis fisicoquímicos, microbiológicos y micronutrientes, los cuales se detallan a continuación:

### 4.1.1 Propiedades físicas del nabo

En la tabla 4.1 se muestran las propiedades físicas de 15 muestras de nabo que fueron tomadas al azar del mercado Campesino; para determinar el peso, porción comestible (PC), porción no comestible (PNC), diámetro longitudinal (DL), diámetro ecuatorial (DE), rodajas útiles (RU) y rodajas no útiles (RNU).

**Tabla 4.1**

#### *Propiedades físicas del nabo*

Muestras	Peso (g)	PC (%)	PNC (%)	DL (mm)	DE (mm)	RU (%)	RNU (%)
M1	163,24	78,76	21,24	62,60	70,25	90,42	9,58
M2	153,88	76,24	23,76	49,70	71,80	80,32	19,68
M3	152,26	76,86	23,14	57,85	72,40	77,94	22,06
M4	117,92	76,60	23,40	56,65	61,60	76,66	23,34
M5	138,88	73,98	26,02	55,60	65,25	83,14	16,86
M6	142,78	67,71	32,29	46,55	76,30	77,67	22,33
M7	127,77	61,67	38,33	62,65	62,90	82,29	17,71
M8	122,94	65,17	34,83	65,75	61,00	89,41	10,59
M9	206,72	70,37	29,63	74,60	67,85	82,00	18,00
M10	120,03	70,63	29,37	57,65	65,10	83,70	16,30
M11	122,31	70,17	29,83	62,85	65,50	83,04	16,96
M12	143,77	64,27	35,73	51,50	75,50	75,40	24,60
M13	110,59	68,93	31,07	44,90	67,00	71,05	28,95
M14	205,70	71,88	28,12	65,70	80,55	75,57	24,43
M15	130,35	67,00	33,00	46,75	75,65	77,69	22,31
Promedio	143,94	70,68	29,32	56,19	69,24	80,42	19,58

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.1, se observa el promedio de los resultados obtenidos de las propiedades físicas del nabo, que presenta: peso total 143,94 g; porción

comestible 70,68 %; porción no comestible 29,32 %; diámetro longitudinal 56,19 mm; diámetro ecuatorial 69,24 mm; rodajas útiles 80,42 %; rodajas no útiles el 19,58 %.

**4.1.2 Análisis fisicoquímicos del nabo**

En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico del nabo de datos extraídos del Anexo A.1 (Anexo A).

**Tabla 4.2**

<i>Análisis fisicoquímico del nabo</i>		
Parámetros	Unidad	Resultado
Humedad	%	89,78
Fibra	%	1,09
Ceniza	%	0,74
Grasa	%	0,10
Proteína (Nx6,25)	%	1,14
Hidratos de carbono	%	8,24
Valor energético	Kcal/100 g	38,42

**Fuente:** CEANID, 2023

En la tabla 4.2, se observan los valores fisicoquímicos del nabo que contiene: humedad 89,78 %; fibra 1,09 %; ceniza 0,74 %; grasa 0,10 %; proteína 1,14%; hidratos de carbono 8,24 % y valor energético 38,42 kcal/100g.

**4.1.3 Análisis microbiológicos del nabo**

En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos de los análisis microbiológicos del nabo de datos extraídos del Anexo A.1 (Anexo A),

**Tabla 4.3**

<i>Análisis microbiológicos del nabo</i>		
Microorganismos	Unidad	Resultado
Coliformes totales	UFC/g	6,2x10 <sup>2</sup>
Escherichia coli	UFC/g	<1,0x10 <sup>1</sup> (*)
Mohos y levaduras	UFC/g	2,7x10 <sup>2</sup>
(*) no se observa desarrollo de colonias		

**Fuente:** CEANID, 2023

En la tabla 4.3, se observan los valores microbiológicos del nabo que contiene: Coliformes totales  $6,2 \times 10^2$  UFC/g; Escherichia coli  $<1,0 \times 10^1$  (\*) UFC/g; mohos y levaduras  $2,7 \times 10^2$  UFC/g. En donde (\*) = No se observa desarrollo de colonias.

#### 4.1.4 Análisis de minerales del nabo

En la tabla 4.4, se muestran los resultados obtenidos del análisis de minerales del nabo de datos extraídos del Anexo A.1 (Anexo A).

**Tabla 4.4**

**Análisis de minerales del nabo**

Minerales	Unidad	Resultado
Fósforo	mg/100g	45,9
Potasio	mg/100g	160,0

**Fuente:** CEANID,2023

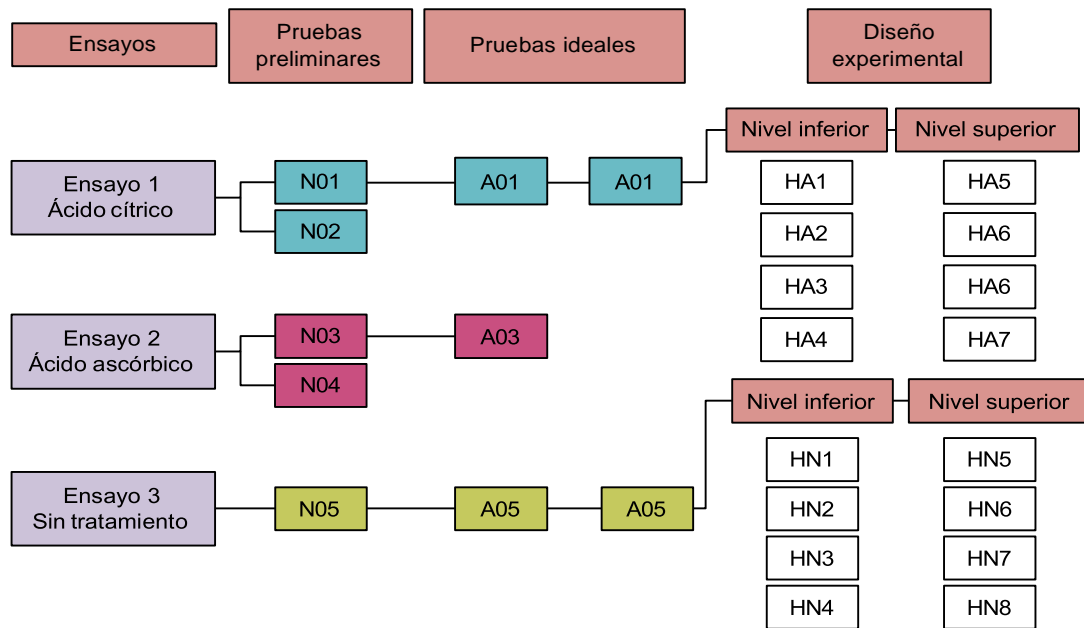
En la tabla 4.4, se observan los valores de minerales del nabo contenido de potasio 160,0 mg/100g de muestra y fósforo 45,9 mg/100g de muestra.

#### 4.2 Caracterización de las variables del proceso de secado para la obtención de harina de nabo

Para la caracterización de las variables del proceso de secado para obtener harina de nabo, se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

##### 4.2.1 Pruebas experimentales del proceso de secado para la obtención de harina de nabo

En la figura 4.1, se muestra el desarrollo de las pruebas preliminares realizadas para la obtención de harina de nabo, donde se procedieron a realizar tres ensayos; ensayo 1 (ácido cítrico en solución 1%), ensayo 2 (ácido ascórbico en solución 1%) con un tiempo de inmersión de 5 minutos y ensayo 3 (sin tratamiento) a temperatura de (50 °C); con la finalidad de determinar el tipo de corte y tipo de pretratamiento a ser utilizado en el proceso de secado para obtener la muestra elegida.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.1:** Pruebas experimentales del proceso de secado para la obtención de harina de nabo

Para el desarrollo de la parte experimental, se tomó en cuenta la ecuación 2.2 para determinar el contenido de humedad en base seca ( $H_{BS}$ ) a partir de datos obtenidos tomando en cuenta la variación del peso en función del tiempo de secado. Así mismo, se tomó en cuenta el valor del contenido de humedad en base húmeda ( $H_{BH}$ ) 89,78% (CEANID, 2023) y la ecuación 2.2 para el cálculo de la masa el sólido seco ( $m_{ss}$ ).

$$HBS = \frac{m_i - m_{ss}}{m_{ss}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$m_{ss} = m_i (1 - H_{BH}) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

$m_{ss}$  = Masa de sólido seco (g)

$m_i$  = Masa inicial (g)

$H_{BH}$  = Contenido de humedad en base húmeda (kg agua/kg sólido húmedo)

$H_{BS}$  = Contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

#### 4.2.2.1 Prueba con ácido cítrico para elegir tipo de corte en el ensayo 1

En la tabla 4.5, se detallan los datos obtenidos de la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras del ensayo 1 en solución de ácido cítrico 1 %, para tiempo de inmersión de 5 minutos y variando el tipo de corte: muestra (N01) corte laminado (0,3 cm) y muestra (N02) corte rodajas (0,3 cm); tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda del 89,78 % (CEANID, 2023).

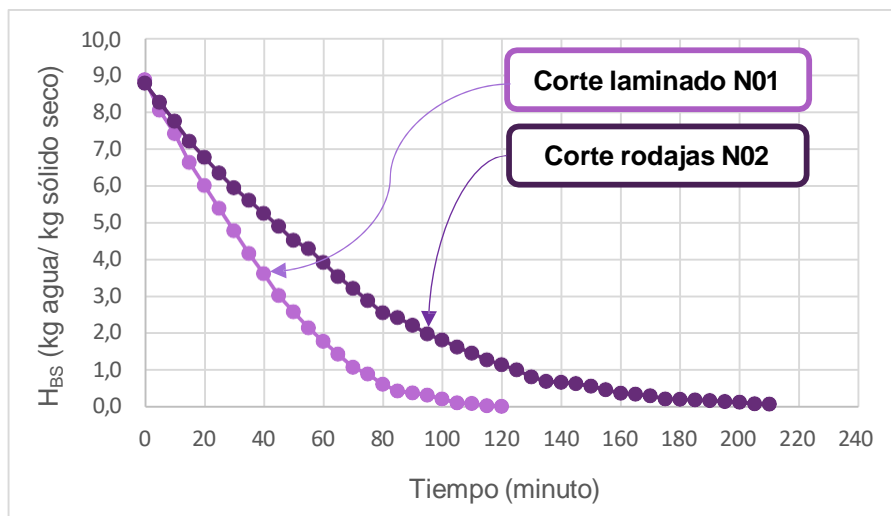
**Tabla 4.5**

##### ***Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 1***

Tiempo (min)	Corte laminado		Corte rodajas		Tiempo (min)	Corte laminado		Corte rodajas	
	Peso (g)	Hbs	Peso (g)	Hbs		Peso (g)	Hbs	Peso (g)	Hbs
0	105,06	8,879	110,52	8,785	110	11,55	0,086	27,75	1,457
5	96,31	8,056	104,73	8,272	115	10,92	0,027	25,69	1,274
10	89,53	7,419	98,89	7,755	120	10,77	0,013	24,16	1,139
15	81,19	6,634	92,69	7,206	125	-	-	22,64	1,004
20	74,54	6,009	87,83	6,776	130	-	-	20,47	0,812
25	67,92	5,387	82,97	6,346	135	-	-	19,11	0,692
30	61,45	4,778	78,46	5,946	140	-	-	18,77	0,662
35	54,91	4,163	74,67	5,611	145	-	-	18,44	0,633
40	49,11	3,617	70,56	5,247	150	-	-	17,64	0,562
45	42,76	3,021	66,67	4,903	155	-	-	16,51	0,462
50	38,09	2,582	62,37	4,522	160	-	-	15,49	0,371
55	33,47	2,147	59,75	4,290	165	-	-	15,12	0,339
60	29,53	1,777	55,58	3,921	170	-	-	14,68	0,300
65	25,87	1,433	51,28	3,540	175	-	-	13,71	0,214
70	22,06	1,074	47,58	3,212	180	-	-	13,59	0,203
75	20,05	0,885	43,81	2,879	185	-	-	13,36	0,183
80	17,13	0,611	40,14	2,554	190	-	-	13,17	0,166
85	15,19	0,428	38,65	2,422	195	-	-	12,89	0,141
90	14,65	0,378	36,32	2,216	200	-	-	12,65	0,120
95	13,95	0,312	33,61	1,976	205	-	-	12,24	0,084
100	12,89	0,212	31,81	1,816	210	-	-	12,12	0,073
105	11,75	0,105	29,56	1,617	-	-	-	-	-

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 4.2, se muestra la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras N01 y N02 para elegir el tipo de corte en función del tiempo. En base a los datos de la tabla 4.5 se observa la variación del contenido de humedad en base seca.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.2:** Curva de secado para elegir el tipo de corte en solución de ácido cítrico

En la figura 4.2, se observa la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras N01 y N02, en donde la muestra N01 para tiempo de secado de 70 minutos contiene 1,074 (kg agua/ kg sólido seco) y tiempo de 70 minutos para la muestra N02 que contiene 3,212 (kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la muestra N01 para tiempo final de 120 minutos contiene 0,013 (kg agua/kg sólido seco) y la muestra N02 para tiempo final de secado de 210 minutos presenta 0,073 (kg agua/kg sólido seco). Así mismo, se procedió a elegir la muestra N01 con tipo de corte laminado porque presenta menor tiempo de secado en comparación a la muestra N02 que presenta mayor tiempo de secado.

#### 4.2.2.2 Prueba con ácido ascórbico para elegir tipo de corte en el ensayo 2

En la tabla 4.6, se detallan los datos obtenidos de la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras del ensayo 2 en solución de ácido ascórbico 1 %, para tiempo de inmersión de 5 minutos y variando el tipo de corte: muestra (N03) con corte laminado (0,3 cm) y muestra (N04) con corte rodajas (0,3 cm); tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda del 89,78 % (CEANID, 2023).

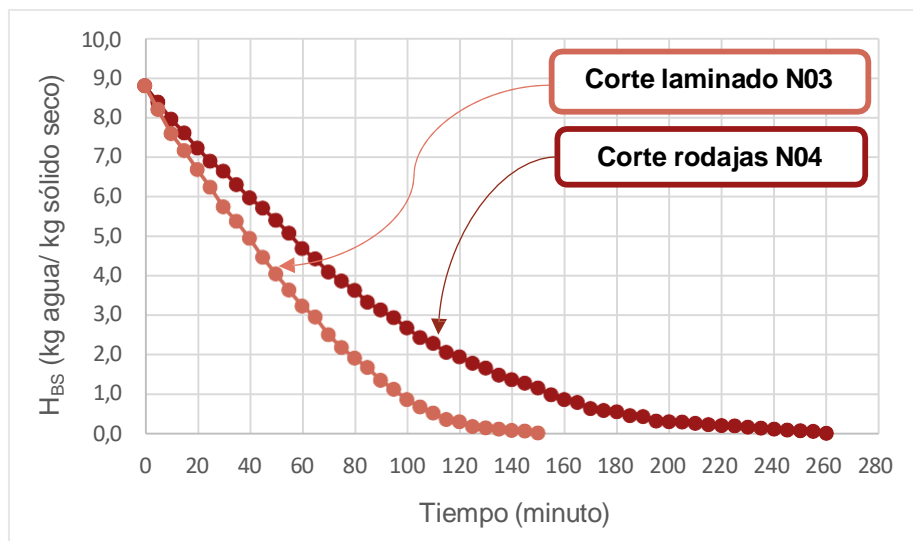
Tabla 4.6

***Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 2***

Tiempo (min)	Corte laminado		Corte rodajas		Tiempo (min)	Corte laminado		Corte rodajas	
	Peso (g)	Hbs	Peso (g)	Hbs		Peso (g)	Hbs	Peso (g)	Hbs
0	109,31	8,785	115,68	8,785	135	12,41	0,111	29,24	1,473
5	102,66	8,189	110,79	8,371	140	12,09	0,082	27,97	1,366
10	95,85	7,580	105,73	7,943	145	11,87	0,063	26,87	1,273
15	90,99	7,145	101,6	7,594	150	11,31	0,012	25,39	1,148
20	85,68	6,670	97,05	7,209	155	-	-	23,44	0,983
25	80,66	6,220	93,11	6,876	160	-	-	21,98	0,859
30	75,15	5,727	90,19	6,629	165	-	-	21,15	0,789
35	71,11	5,365	86,13	6,285	170	-	-	19,32	0,634
40	66,3	4,935	82,21	5,954	175	-	-	18,76	0,587
45	60,97	4,458	79,14	5,694	180	-	-	18,38	0,555
50	56,21	4,032	75,47	5,384	185	-	-	17,14	0,450
55	51,65	3,623	71,64	5,060	190	-	-	16,92	0,431
60	47,19	3,224	67,06	4,672	195	-	-	15,51	0,312
65	44,05	2,943	63,97	4,411	200	-	-	15,37	0,300
70	39,09	2,499	60,09	4,083	205	-	-	15,23	0,288
75	35,46	2,174	57,41	3,856	210	-	-	14,88	0,259
80	32,45	1,905	54,64	3,622	215	-	-	14,49	0,226
85	29,82	1,669	51,03	3,316	220	-	-	14,22	0,203
90	26,23	1,348	48,79	3,127	225	-	-	14,09	0,192
95	23,71	1,122	46,47	2,931	230	-	-	13,78	0,166
100	20,79	0,861	43,36	2,668	235	-	-	13,41	0,134
105	18,7	0,674	40,53	2,428	240	-	-	13,16	0,113
110	16,99	0,521	38,75	2,278	245	-	-	12,89	0,090
115	15,17	0,358	36,08	2,052	250	-	-	12,67	0,072
120	14,55	0,302	34,74	1,938	255	-	-	12,45	0,053
125	13,19	0,181	32,79	1,774	260	-	-	11,94	0,010
130	12,81	0,147	31,42	1,658	-	-	-	-	-

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 4.3, se muestra la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras N03 y N04 para elegir el tipo de corte en función del tiempo. En base a los datos de la tabla 4.6 se observa la variación del contenido de humedad en base seca.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.3:** Curva de secado para elegir el tipo de corte en solución de ácido ascórbico

En la figura 4.3, se observa la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras N03 y N04, en donde la muestra N03 para tiempo de secado de 95 minutos contiene 1,122 (kg agua/ kg sólido seco) y tiempo de 95 minutos para la muestra N04 que contiene 2,931 (kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la muestra N03 para tiempo final de 150 minutos contiene 0,012 (kg agua/kg sólido seco) y la muestra N04 para tiempo final de secado de 260 minutos presenta 0,010 (kg agua/kg sólido seco). Así mismo, se procedió a elegir la muestra N03 con tipo de corte laminado porque presenta menor tiempo de secado en comparación a la muestra N04 que presenta mayor tiempo de secado.

#### 4.2.2.3 Prueba sin tratamiento para elegir el tipo de corte en el ensayo 3

En la tabla 4.7, se detallan los datos obtenidos de la variación del contenido de humedad en base seca de la muestra del ensayo 3 sin tratamiento con tipo de corte laminado (0,3 cm); tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda del 89,78 % (CEANID, 2023).



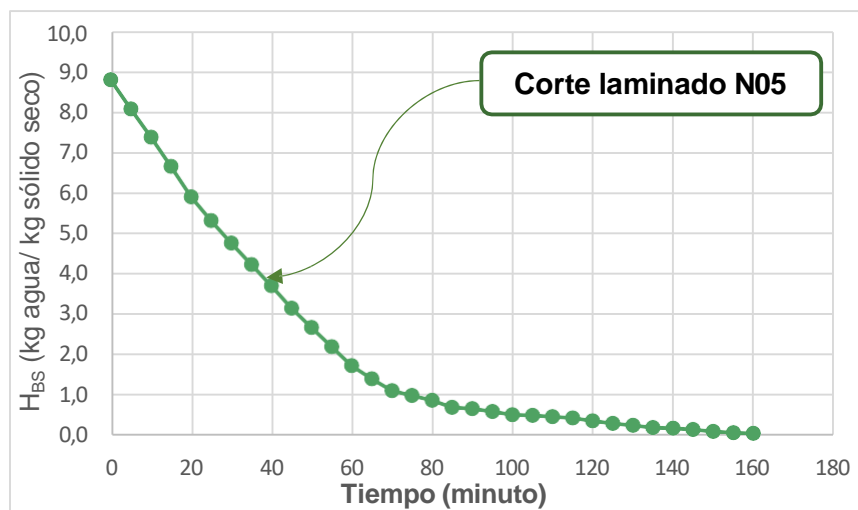
Tabla 4.7

**Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 3**

Tiempo (min)	Corte laminado		Tiempo (min)	Corte laminado	
	Peso (g)	Hbs		Peso (g)	Hbs
0	109,62	8,785	85	18,75	0,674
5	101,54	8,063	90	18,31	0,634
10	93,75	7,368	95	17,56	0,567
15	85,61	6,642	100	16,63	0,484
20	77,12	5,884	105	16,44	0,467
25	70,59	5,301	110	16,12	0,439
30	64,29	4,739	115	15,77	0,408
35	58,37	4,210	120	14,96	0,335
40	52,48	3,684	125	14,28	0,275
45	46,25	3,128	130	13,74	0,226
50	40,85	2,646	135	13,12	0,171
55	35,5	2,169	140	12,89	0,151
60	30,27	1,702	145	12,56	0,121
65	26,68	1,381	150	12,04	0,075
70	23,34	1,083	155	11,65	0,04
75	21,98	0,962	160	11,47	0,024
80	20,69	0,847	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.4, se muestra la variación del contenido de humedad en base seca de la muestra N05 con tipo de corte laminado. En base a los datos de la tabla 4.7 se observa la variación del contenido de humedad en base seca.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.4:** Curva de secado sin tratamiento

En la figura 4.4, se observa la variación del contenido de humedad en base seca de la muestra N05, el cual presenta tiempo de secado de 100 minutos contiene 0,484 (kg agua/ kg sólido seco). Por otro lado, un tiempo final de secado de 160 minutos contiene 0,024 (kg agua/kg sólido seco), presentando un menor tiempo de secado debido al tipo de corte laminado.

#### 4.3 Prueba preliminar en función del tiempo para las muestras de nabo con tratamiento y sin tratamiento

En la tabla 4.8, se muestran los resultados obtenidos de las muestras con tratamiento (ácido cítrico y ácido ascórbico) y sin tratamiento, tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda del 89,78 % (CEANID,2023).

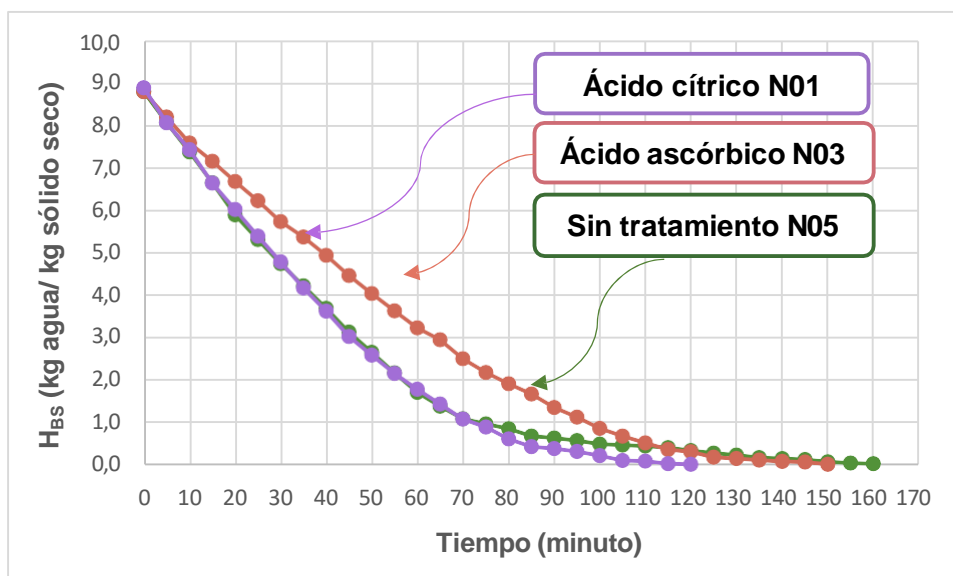
**Tabla 4.8**

##### ***Variación del contenido de humedad en base seca para las muestras con tratamiento y sin tratamiento***

Tiempo (min)	Ácido cítrico Hbs	Ácido ascórbico Hbs	Sin tratamiento Hbs	Tiempo (min)	Ácido cítrico Hbs	Ácido ascórbico Hbs	Sin tratamiento Hbs
0	8,879	8,785	8,785	85	0,428	1,669	0,674
5	8,056	8,189	8,063	90	0,378	1,348	0,634
10	7,419	7,580	7,368	95	0,312	1,122	0,567
15	6,634	7,145	6,642	100	0,212	0,861	0,484
20	6,009	6,670	5,884	105	0,105	0,674	0,467
25	5,387	6,220	5,301	110	0,086	0,521	0,439
30	4,778	5,727	4,739	115	0,027	0,358	0,408
35	4,163	5,365	4,210	120	0,013	0,302	0,335
40	3,617	4,935	3,684	125	-	0,181	0,275
45	3,021	4,458	3,128	130	-	0,147	0,226
50	2,582	4,032	2,646	135	-	0,111	0,171
55	2,147	3,623	2,169	140	-	0,082	0,151
60	1,777	3,224	1,702	145	-	0,063	0,121
65	1,433	2,943	1,381	150	-	0,012	0,075
70	1,074	2,499	1,083	155	-	-	0,040
75	0,885	2,174	0,962	160	-	-	0,024

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 4.5, se muestra la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras con tratamiento (ácido cítrico y ácido ascórbico) y sin tratamiento que fueron elegidas por presentar menor tiempo de secado, siendo así las muestras con el tipo de corte laminado. En base a los datos de la tabla 4.8 se observa la variación del contenido de humedad en base seca.



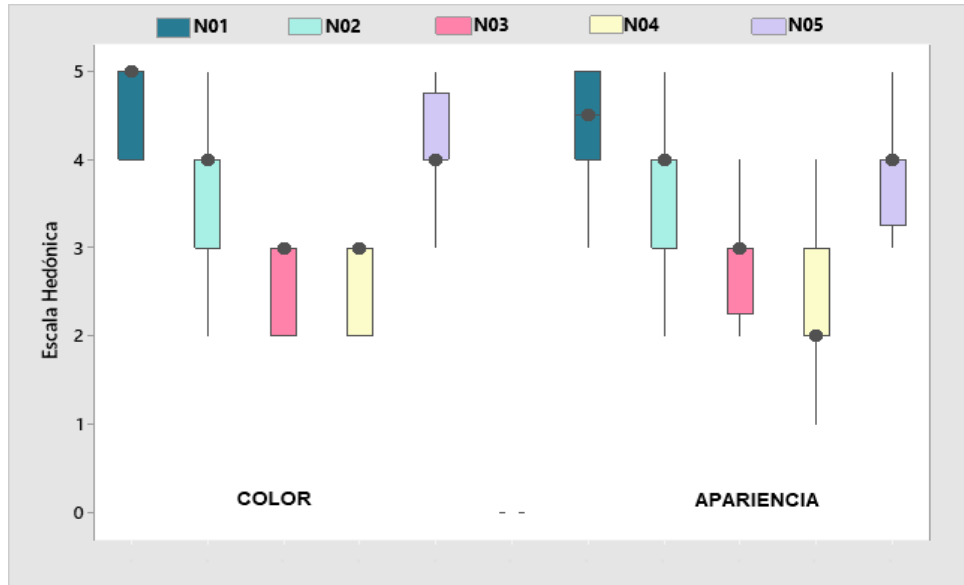
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.5:** Curva de secado de las muestras con tratamiento y sin tratamiento

En la figura 4.5, se observa la variación del contenido de humedad en base seca de las muestras elegidas por presentar menor tiempo de secado en función del tipo de corte; así mismo, fueron elegidas las muestras con tratamiento (ácido cítrico y ácido ascórbico), y sin tratamiento con tipo de corte laminado; obteniendo la muestra con ácido cítrico (1%) tiempo de secado final de 120 minutos, ácido ascórbico (1%) tiempo de secado final de 150 minutos y sin tratamiento tiempo de secado final de 160 minutos; para tal efecto, se tomaron los datos cada un intervalo de tiempo de 5 minutos, en condiciones de temperatura de 50 °C, velocidad de aire 5 m/s y corte de 0,3 cm, en base a los datos de la tabla 4.8.

#### 4.3.1 Estadístico de caja y bigote para la selección del tipo de tratamiento de la muestra preliminar

En la figura 4.6, se muestra el estadístico caja y bigote para el atributo color (tabla C.2.1) y apariencia (tabla C.2.4) de las muestras con tratamiento (ácido cítrico y ácido ascórbico), y sin tratamiento de datos extraídos del (Anexo C).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.6:** Caja y bigote para atributo color y apariencia de muestras con tratamiento y sin tratamiento

Según la figura 4.6, se puede observar los resultados en función de la mediana para el atributo color N01 (5,0), N05 (4,0) y apariencia N01 (4,5), N05 (4,0). Así mismo, se realizó el análisis estadístico de varianza en donde se pudo observar que si existe diferencia para un nivel de significancia  $\alpha=0,05$  entre las muestras en función a los atributos evaluados.

#### 4.3.2 Estadístico Tukey para el atributo color

En la tabla 4.9, se muestran los resultados del análisis estadístico Tukey para el atributo color de datos extraídos del Anexo C (tabla C.2.3).

**Tabla 4.9****Estadístico Tukey para el atributo color**

Tratamiento	N° de jueces	Mediana	Agrupación
N01	20	4,65	A
N02	20	3,60	CD
N03	20	3,00	DE
N04	20	2,65	E
N05	20	4,20	ABC

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.9, se puede observar que existe significancia en los tratamientos N01 con mediana 4,65 y la muestra N04 con mediana 2,65. Sin embargo, no existe diferencia significativa para las muestras N02 con mediana 3,60; N03 con mediana 3,00 y N05 con mediana 4,20.

**4.3.3 Estadístico Tukey para el atributo apariencia**

En la tabla 4.10, se muestran los resultados del análisis estadístico Tukey para el atributo apariencia de datos extraídos del Anexo C (tabla C.2.6).

**Tabla 4.10****Estadístico Tukey para el atributo apariencia**

Tratamiento	N° de jueces	Mediana	Agrupación
N01	20	4,40	AB
N02	20	3,50	CD
N03	20	2,90	DE
N04	20	2,40	E
N05	20	3,85	BC

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.10, se puede observar que existe significancia en el tratamiento N04 con mediana 2,40. Sin embargo, no existe diferencia significativa para las muestras N01 con mediana 4,40; N02 con mediana 3,50 y N03 con mediana 2,90 y N05 con mediana 3,85.

#### 4.4 Diseño experimental en el proceso de secado en solución con ácido cítrico

En base a la muestra ideal (A01) se aplicó de manera experimental el diseño factorial  $2^3$  en el proceso de secado para la obtención de harina de nabo, donde las variables tomadas en cuenta son: corte (0,2 – 0,3) cm, temperatura (50 – 60) °C y velocidad del aire (5 - 5,5) m/s. Se tomó como variable respuesta al contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco) empleando la termobalanza y su metodología aplicada detallada en el Anexo G.2.

##### 4.4.1 Diseño factorial $2^3$ en el proceso de secado de las muestras de nabo en solución de ácido cítrico

En la tabla 4.11, se observan los datos obtenidos de la variable respuesta del contenido de humedad en base seca de acuerdo a las variables controladas en el proceso de secado de las muestras de nabo.

**Tabla 4.11**

***Contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo en solución de ácido cítrico***

Tratamientos	Variables			Réplica I	Réplica II	Total (Yi)
	Corte (cm)	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)			
	A	B	C			
(1)	0,2	50	5,0	0,0805	0,0894	0,17
a	0,3	50	5,0	0,0922	0,0912	0,18
b	0,2	60	5,0	0,0664	0,0718	0,13
ab	0,3	60	5,0	0,0729	0,0767	0,15
c	0,2	50	5,5	0,0559	0,0598	0,12
ac	0,3	50	5,5	0,0758	0,0566	0,13
bc	0,2	60	5,5	0,0704	0,0719	0,14
abc	0,3	60	5,5	0,0824	0,0896	0,17

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.4.1.1 Análisis de varianza del diseño factorial para las muestras de nabo en solución de ácido cítrico

De acuerdo al diseño factorial  $2^3$ ; en la tabla 4.12, se muestran los resultados del análisis de varianza aplicado en el proceso de secado para las muestras de nabo en función de la variable respuesta del contenido de humedad en base seca, los cuales fueron obtenidos del programa estadístico Statgraphics Centurión XVI para Windows detallados en el Anexo G.2.

**Tabla 4.12**

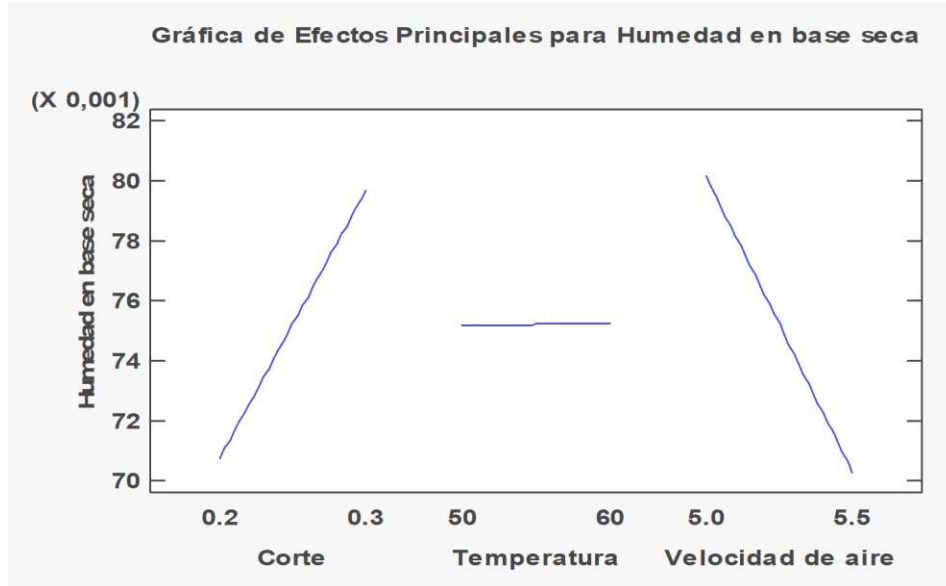
##### *Análisis de varianza en función de la variable respuesta*

Fuente de varianza (FV)	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	Fcal	Ftab	Valor-P
<b>A</b>	0,00031773	1	0,00031773	9,05	5,32	0,0169
<b>B</b>	0,00000003	1	0,00000003	0	5,32	0,9772
<b>C</b>	0,00038711	1	0,00038711	11,03	5,32	0,0105
<b>AB</b>	0,00000743	1	0,00000743	0,21	5,32	0,6578
<b>AC</b>	0,00002889	1	0,00002889	0,82	5,32	0,3908
<b>BC</b>	0,00108406	1	0,00108406	30,88	5,32	0,0005
<b>ABC</b>	0,00001425	1	0,00001425	0,41	5,32	0,5419
<b>Error</b>	0,00028088	8	0,00003511	–	–	–
<b>Total</b>	0,00212036	15	–	–	–	–

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.12, se observa que entre el factor B e interacciones (AB, AC, ABC) no existe diferencia significativa en el proceso de secado ya que  $F_{cal} < F_{tab}$ , de tal manera, se acepta la hipótesis planteada. Sin embargo, para el factor A y C e interacciones (BC) existe diferencia significativa en el proceso de secado ya que  $F_{cal} > F_{tab}$ , de tal manera, se rechaza la hipótesis planteada para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

En la figura 4.7, se observa la relación de los factores: corte (A), temperatura (B), velocidad del aire (C) en función al contenido de humedad en base seca para las muestras de nabo.



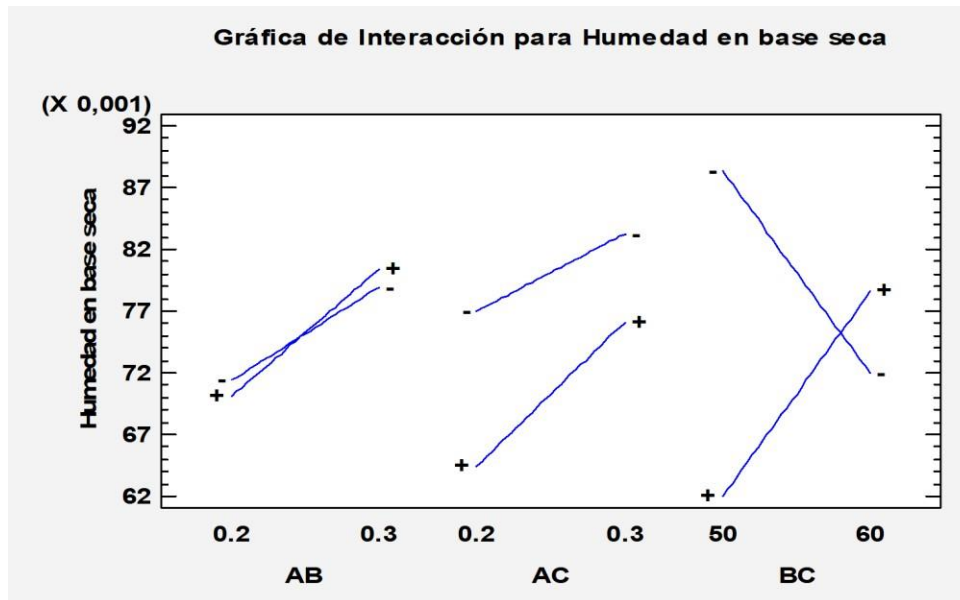
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.7:** Efectos principales para el contenido de humedad

En la figura 4.7, se puede observar que los factores: A “tipo de corte” (0,2 – 0,3) cm, C “velocidad de aire” (5,0 – 5,5) m/s influyen significativamente sobre el contenido de humedad en base seca cuando se encuentran en su nivel alto y bajo, en cuanto al factor B “temperatura” entre (50 – 60) °C no influye significativamente cuando se encuentren en su nivel alto y bajo; debido a que la variación del contenido de humedad en base seca es mínima.

En la figura 4.8, muestran las interacciones de los factores: AB (corte – temperatura), AC (corte – velocidad del aire) y BC (temperatura – velocidad de aire) en función del contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo.



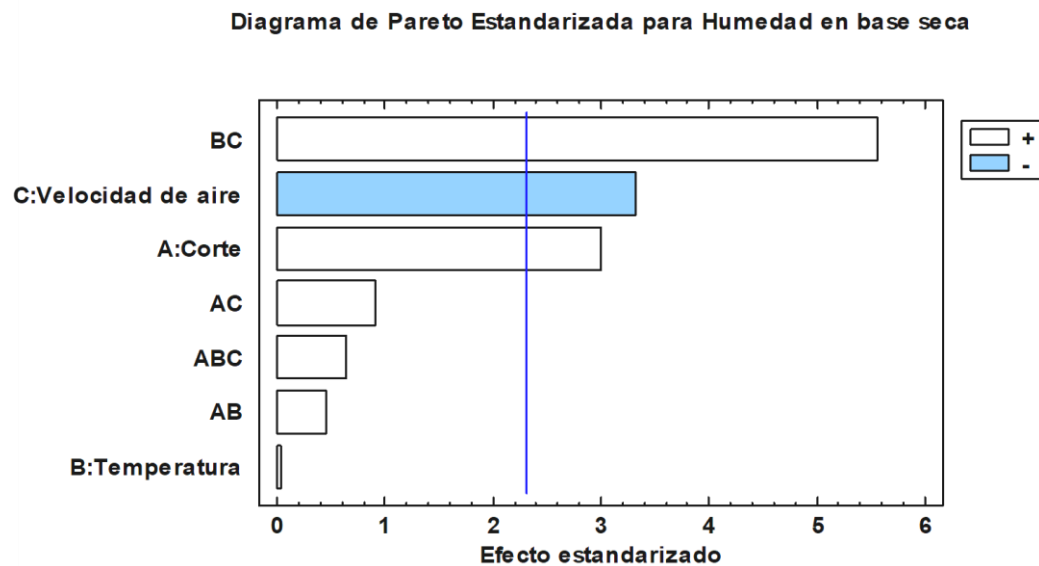


**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.8:** Interacción de factores para el contenido de humedad en base seca

En la figura 4.8, se observa que la interacción AB es significativa debido a que los factores de las variables interaccionan entre sí, para un corte de 0,2 cm el contenido de humedad se ve afectado cuando el factor B (temperatura) se encuentra en su nivel alto y bajo (50 – 60) °C. Sin embargo, la interacción AC es significativa debido a que la humedad es mínima en un nivel alto y bajo del factor C (velocidad del aire), por otro lado, la interacción BC es significativa debido a que existe una interacción en su nivel alto y bajo entre las variables del factor B (temperatura) y C (velocidad del aire).

En la figura 4.9, se muestra el diagrama de Pareto estandarizado de los factores tomados en cuenta para el diseño experimental. Por lo cual el nivel de significancia estadística lo determina la línea de referencia con valor de 2,306, por lo tanto, los factores que pasen la línea de referencia indican que son significativos para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.9:** Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad

En la figura 4.9, se puede observar que los factores: C (velocidad de aire), A (corte) y la interacción BC (temperatura – velocidad del aire); sobrepasan la línea de referencia, por lo cual estos factores son significativos en comparación al factor B (temperatura) e interacciones AC (corte – velocidad de aire), ABC (corte – temperatura – velocidad de aire) y AB (corte – temperatura), no son estadísticamente significativos, para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

#### 4.4.1.2 Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo con ácido cítrico

Según la ecuación 3.1 del modelo de regresión para un diseño  $2^k$ ; en la ecuación 4.1 se observa el modelo de regresión que se ajusta a los datos experimentales para el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo con ácido cítrico de datos extraídos de la tabla D.1.3. (Anexo D).

$$\text{Humedad} = 1,1457 + 3,735 * A - 0,015425 * B - 0,2011 * C - 0,07655 * A * B \\ 0,723 * A * C + 0,00281 * B * C + 0,0151 * A * B * C$$

(Ecuación 4.3)

En donde los factores A (corte cm), B (temperatura °C) y C (velocidad del aire m/s) están especificados en sus unidades originales.

#### 4.4.1.3 Optimización de respuesta del diseño factorial $2^3$ de las muestras de nabo con ácido cítrico

Para las muestras de nabo en el proceso de secado a nivel experimental se obtuvieron ocho muestras con solución de ácido cítrico en donde las variables que se tomaron en cuenta se describen en la tabla 4.13.

**Tabla 4.13**

Muestras de nabo con ácido cítrico			
Muestras	Corte (cm)	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)
HA1	0,3	50	5,0
HA2	0,2	50	5,0
HA3	0,3	60	5,0
HA4	0,2	60	5,0
HA5	0,3	50	5,5
HA6	0,2	50	5,5
HA7	0,3	60	5,5
HA8	0,2	60	5,5

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.14, se muestran los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo de datos extraídos de la tabla D.1.7. (Anexo D).

**Tabla 4.14**

#### Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad

Factores	Bajo	Alto	Óptimo
Corte (A)	0,2	0,3	0,3
Temperatura (B)	50	60	50
Velocidad del aire (C)	5,0	5,5	5,0

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.14, se observa que los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo son: corte (0,3 cm), temperatura (50°C) y velocidad del aire (5,0 m/s) en donde la muestra HA2 tiene el valor óptimo minimizando el contenido de humedad en base seca.

Por tanto, de acuerdo al valor óptimo del contenido de humedad en base seca 0,0917 (kg agua/kg sólido seco); se seleccionaron los factores de la muestra HA2 (corte 0,3 cm, temperatura 50°C y velocidad del aire 5,0 m/s); debido a que minimiza el contenido de humedad en base seca siendo así la muestra elegida.

#### **4.5 Diseño experimental en el proceso de secado sin tratamiento**

En base a la muestra ideal (A05) se aplicó de manera experimental el diseño factorial  $2^3$  en el proceso de secado para la obtención de harina de nabo, donde las variables tomadas en cuenta son: corte (0,2 – 0,3) cm, temperatura (50 – 60) °C y velocidad del aire (5 - 5,5) m/s. Se tomó como variable respuesta al contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco) empleando la termobalanza y su metodología aplicada detalladas en el Anexo D.

##### **4.5.1 Diseño factorial $2^3$ en el proceso de secado para las muestras de nabo sin tratamiento**

En la tabla 4.15, se observan los datos obtenidos de la variable respuesta del contenido de humedad en base seca de acuerdo a las variables controladas en el proceso de secado de las muestras de nabo.

Tabla 4.15

**Contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo sin tratamiento**

Tratamientos	Variables			Réplica I	Réplica II	Total (Yi)
	Corte (cm)	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)			
	A	B	C			
(1)	0,2	50	5,0	0,0751	0,0641	0,14
a	0,3	50	5,0	0,0979	0,0919	0,19
b	0,2	60	5,0	0,0614	0,0678	0,13
ab	0,3	60	5,0	0,0768	0,0704	0,15
c	0,2	50	5,5	0,0722	0,0626	0,13
ac	0,3	50	5,5	0,0875	0,0808	0,17
bc	0,2	60	5,5	0,0634	0,0781	0,14
abc	0,3	60	5,5	0,0678	0,0633	0,13

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.1.1 Análisis de varianza del diseño factorial de las muestras de nabo sin tratamiento

De acuerdo al diseño factorial  $2^3$ ; en la tabla 4.16, se muestran los resultados del análisis de varianza aplicado en el proceso de secado para las muestras de nabo en función de la variable respuesta del contenido de humedad en base seca, los cuales fueron obtenidos del programa estadístico Statgraphics Centurión XVI para Windows detallados en el Anexo G.2.

Tabla 4.16

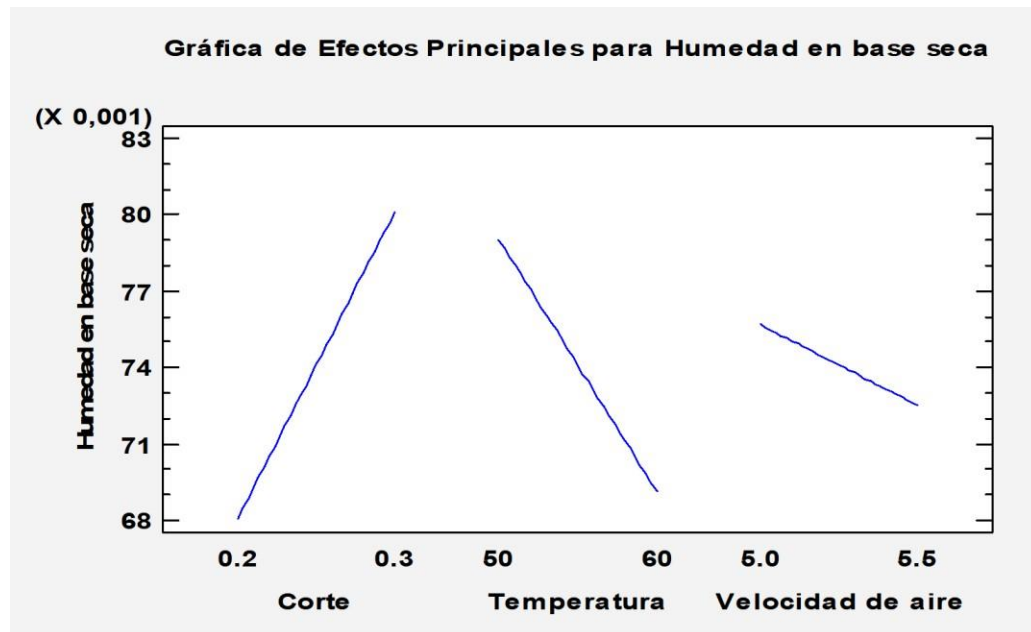
**Análisis de varianza en función de la variable respuesta**

Fuente de varianza (FV)	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	Fcal	Ftab	Valor-P
<b>A</b>	0,000514	1	0,000514	12,16	5,32	0,0102
<b>B</b>	0,000343	1	0,000343	8,12	5,32	0,0247
<b>C</b>	0,000035	1	0,000035	0,83	5,32	0,3914
<b>AB</b>	0,000288	1	0,000288	6,81	5,32	0,0349
<b>AC</b>	0,000093	1	0,000093	2,21	5,32	0,1809
<b>BC</b>	0,000039	1	0,000039	0,93	5,32	0,3671
<b>ABC</b>	0,000003	1	0,000003	0,06	5,32	0,8124
<b>Error</b>	0,000296	7	0,000042	–	–	–
<b>Total</b>	0,001734	14	–	–	–	–

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.16, se observa que entre el factor C e interacciones (AC, BC, ABC) no existe diferencia significativa en el proceso de secado ya que  $F_{cal} < F_{tab}$ , de tal manera, se acepta la hipótesis planteada. Sin embargo, para el factor A y B e interacciones (AB) existe diferencia significativa en el proceso de secado ya que  $F_{cal} > F_{tab}$ , de tal manera, se rechaza la hipótesis planteada para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

En la figura 4.10, se observa la relación de los factores: corte (A), temperatura (B), velocidad del aire (C) en función al contenido de humedad en base seca para las muestras de nabo.

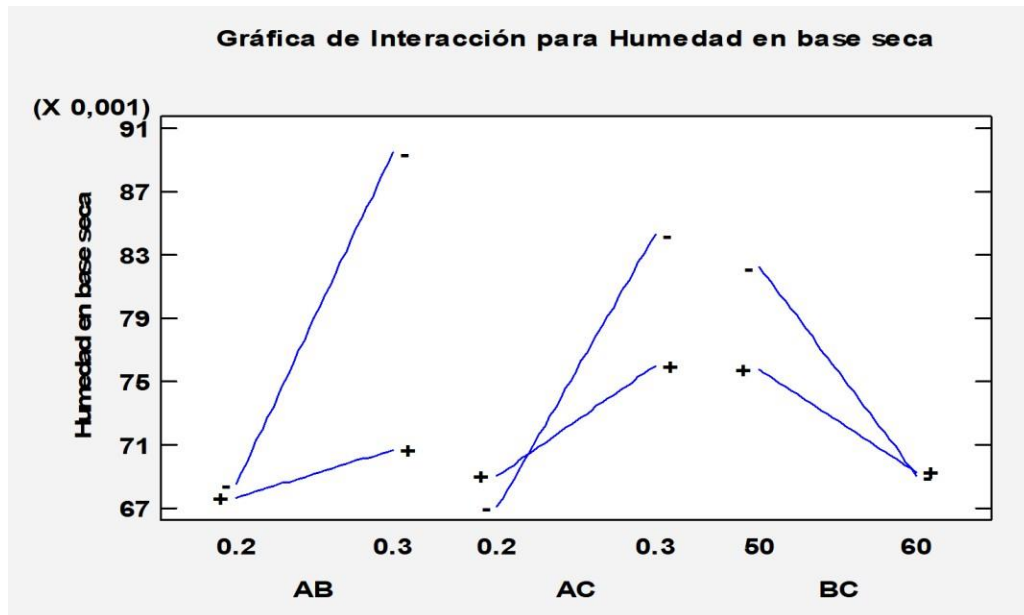


**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.10:** Efectos principales para el contenido de humedad

En la figura 4.10, se puede observar que los factores: A “tipo de corte” (0,2 – 0,3) cm, B “temperatura” (50 – 60) °C influyen significativamente sobre el contenido de humedad en base seca cuando se encuentran en su nivel alto y bajo, en cuanto al factor C “velocidad de aire” entre (5,0 – 5,5) m/s no influye significativamente cuando se encuentren en su nivel alto y bajo; debido a que la variación del contenido de humedad en base seca es mínima.

En la figura 4.11, se muestran las interacciones de los factores: AB (corte – temperatura), AC (corte – velocidad del aire) y BC (temperatura – velocidad de aire) en función del contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo.



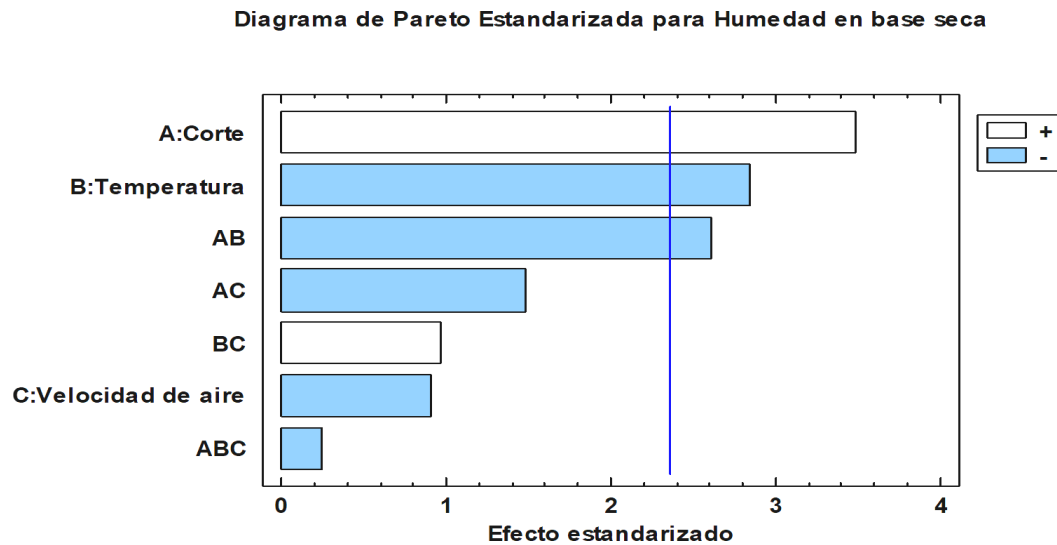
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.11:** Interacción de factores para el contenido de humedad en base seca

En la figura 4.11, se observa que la interacción AB a un corte de (0,2) cm, el contenido de humedad se ve afectado cuando la temperatura se encuentra en su nivel alto (60) °C y bajo (50) °C; sin embargo, a un corte de (0,3) cm se observa un cambio del contenido de humedad siendo mínima cuando se encuentra en su nivel alto. Por otro lado, la interacción AC es significativa debido a que las variables interaccionan entre sí, en cuanto a la interacción BC, se observa que a una temperatura de (60) °C existe interacción significativa en su nivel alto y bajo del factor C (velocidad del aire) (5,0 – 5,5 m/s).

En la figura 4.12, se muestra el diagrama de Pareto estandarizado de los factores tomados en cuenta para el diseño experimental. Por lo cual el nivel de significancia estadística lo determina la línea de referencia con valor de 2,306, por lo tanto, los factores que pasen la línea de referencia indican que son significativos para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .





**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.12:** Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad

En la figura 4.12, se puede observar que los factores: A (corte), B (temperatura) y la interacción AB (corte – temperatura); sobrepasan la línea de referencia, por lo cual estos factores son significativos en comparación al factor C (velocidad del aire) e interacciones AB (corte – temperatura), AC (corte – velocidad de aire), BC (temperatura – velocidad del aire) y ABC (corte – temperatura – velocidad del aire), no son estadísticamente significativos, para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

#### 4.5.1.2 Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo sin tratamiento

Según la ecuación 3.2 del modelo de regresión para un diseño  $2^k$ ; en la ecuación 4.2 se observa el modelo de regresión que se ajusta a los datos experimentales para el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo sin tratamiento de datos extraídos de la tabla D.2.3. (Anexo D).

$$\text{Humedad} = 1,1457 + 3,735 * A - 0,015425 * B - 0,2011 * C - 0,07655 * A * B \\ 0,723 * A * C + 0,00281 * B * C + 0,0151 * A * B * C$$

(Ecuación 4.4)

En donde los factores A (corte cm), B (temperatura °C) y C (velocidad del aire m/s) están especificados en sus unidades originales.

#### 4.5.1.3 Optimización de respuesta del diseño factorial $2^3$ de las muestras de nabo sin tratamiento

Para las muestras de nabo en el proceso de secado a nivel experimental, se obtuvieron ocho muestras sin tratamiento en donde las variables que se tomaron en cuenta se describen en la tabla 4.17.

**Tabla 4.17**

Muestras de nabo sin tratamiento			
Muestras	Corte (cm)	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)
HN1	0,3	50,0	5,0
HN2	0,2	50,0	5,0
HN3	0,3	60,0	5,0
HN4	0,2	60,0	5,0
HN5	0,3	50,0	5,5
HN6	0,2	50,0	5,5
HN7	0,3	60,0	5,5
HN8	0,2	60,0	5,5

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.18, se muestran los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo de datos extraídos de la tabla D.2.7. (Anexo D).

**Tabla 4.18**

#### Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad

Factores	Bajo	Alto	Óptimo
Corte (A)	0,2	0,3	0,3
Temperatura (B)	50	60	50
Velocidad del aire (C)	5,0	5,5	5,0

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.18, se observan que los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de nabo son: corte (0,3 cm), temperatura (50°C) y velocidad del aire (5,0 m/s) en donde la muestra HN2 tiene el valor óptimo minimizando el contenido de humedad en base seca.

Por tanto, de acuerdo al valor óptimo del contenido de humedad en base seca 0,0949 (kg agua/kg sólido seco); se seleccionaron los factores de la muestra HN2 (corte 0,3 cm, temperatura 50°C y velocidad del aire 5,0 m/s); debido a que minimiza el contenido de humedad en base seca siendo así la muestra elegida.

#### 4.6 Influencia de las variables sobre el contenido de humedad en el proceso de secado de las muestras de nabo

La variación del contenido de humedad se determinó a partir de la pérdida de peso durante el proceso de secado por aire caliente de las muestras de nabo, tomándose peso inicial de 100 g de nabo, tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda ( $H_{BH}$ ) del 89,78 % (CEANID, 2023) y la ecuación (2.1) para el cálculo de la masa del sólido seco. El contenido de humedad en base seca estuvo en función de las siguientes variables: tipo de corte (A), temperatura (B) y velocidad del aire (C). Por tanto, la influencia de las variables sobre el contenido de humedad, se detalla en la tabla 4.19.

**Tabla 4.19**

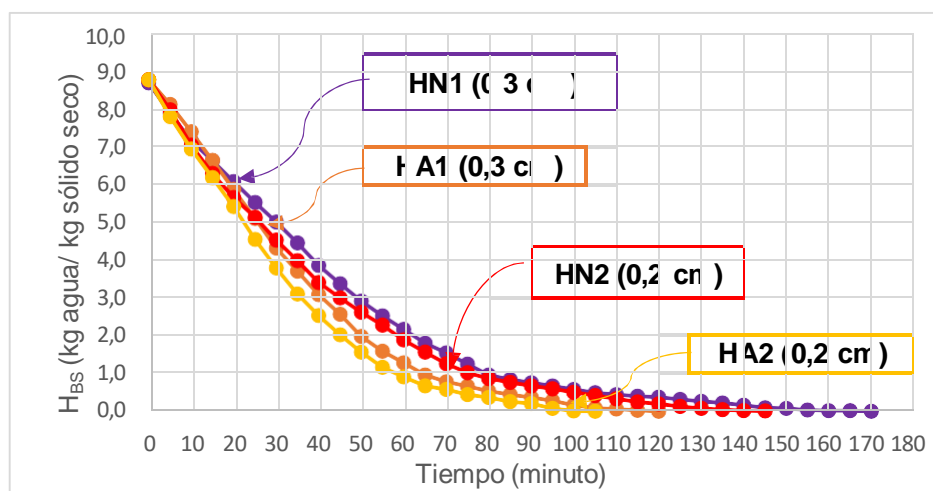
##### ***Influencia de las variables sobre el contenido de humedad***

Variables	
Corte laminado	A <sub>1</sub> =0,2 cm
	A <sub>2</sub> =0,3 cm
Temperatura	B <sub>1</sub> =50 °C
	B <sub>2</sub> =60 °C
Velocidad de aire	C <sub>1</sub> =5,0 m/s
	C <sub>2</sub> =5,5 m/s

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.6.1 Variación del contenido de humedad en función del corte $A_{12}$ (0,2 – 0,3) cm: $B_1$ (50,0 °C) versus $C_1$ (5,0 m/s)

En la figura 4.13, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA1 y HA2) y sin tratamiento (HN1 y HN2). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando el corte entre (0,2 – 0,3) cm; manteniendo constantes la velocidad de aire (5,0 m/s) temperatura (50 °C), los resultados se detallan en la tabla E.1 y tabla E.2 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

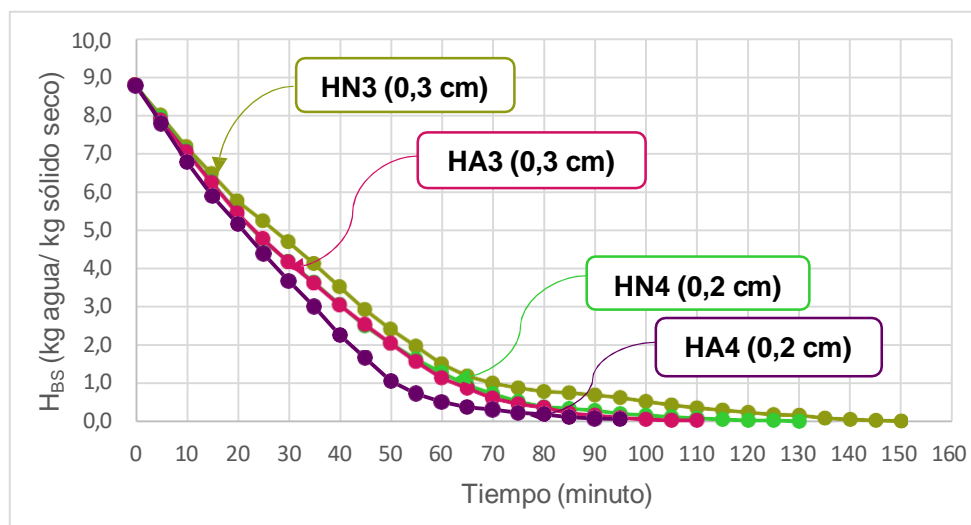
**Figura 4.13:** Variación del contenido de humedad en función al corte  $A_{12}$  (0,2 – 0,3) cm:  $B_1$  (50,0 °C)  $C_1$  (5,0 m/s)

En la figura 4.13 se observa el contenido de humedad en base seca de las muestras HN1 y HA1 con corte 0,3 cm, temperatura 50,0 °C y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN1 con mayor tiempo de secado de 170 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (50 – 100) minutos a (2,923 – 0,583) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA1 para un tiempo de 120 minutos presenta 0,006 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN2 y HA2 con corte 0,2 cm, temperatura 50,0 °C y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN2 para un tiempo de 145 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). La muestra HA2 con menor tiempo de secado de 105 minutos presenta 0,04 (kg agua/kg

sólido seco). Además, puede observar la pérdida de agua entre (30 – 70) minutos a (3,798 – 0,588) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.2 Variación del contenido de humedad en función del corte $A_{12}$ (0,2 – 0,3) cm: $B_2$ (60 °C) versus $C_1$ (5,0 m/s)

En la figura 4.14, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA3 y HA4) y sin tratamiento (HN3 y HN4). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando el corte entre (0,2 – 0,3) cm; manteniendo constantes la velocidad de aire (5,0 m/s) temperatura (60 °C), los resultados se detallan en la tabla E.3 y tabla E.4 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

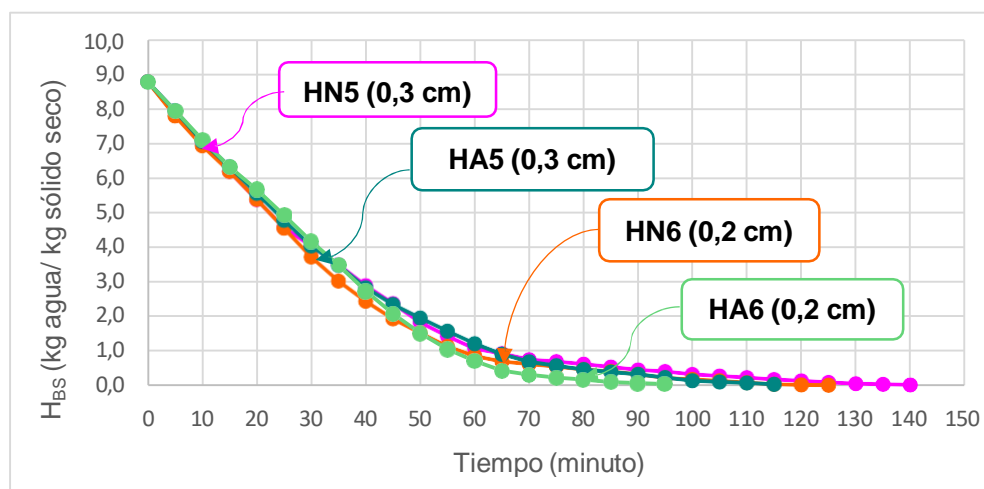
**Figura 4.14:** Variación del contenido de humedad en función al corte  $A_{12}$  (0,2 – 0,3) cm:  $B_2$  (60 °C)  $C_1$  (5,0 m/s)

En la figura 4.14 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN3 y HA3 con corte 0,3 cm, temperatura 60,0 °C y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN3 con mayor tiempo de secado de 150 minutos presenta 0,007 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (40 – 115) minutos a (3,517 – 0,296) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA3 para un tiempo de 110 minutos presenta

0,025 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN4 y HA4 con corte 0,2 cm, temperatura 60,0 °C y velocidad de aire 5,0 m/s, la muestra HN4 para un tiempo de 130 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA4 con menor tiempo de secado de 95 minutos presenta 0,045 (kg agua/kg sólido seco). Además, se muestra la pérdida de agua entre (20 – 65) minutos a (5,148 – 0,355) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.3 Variación del contenido de humedad en función del corte A12 (0,2 – 0,3) cm: B1 (50,0 °C) versus C2 (5,5 m/s)

En la figura 4.15, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA5 y HA6) y sin tratamiento (HN5 y HN6). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando el corte entre (0,2 – 0,3) cm; manteniendo constantes la velocidad de aire (5,5 m/s) temperatura (50 °C), los resultados se detallan en la tabla E.5 y tabla E.6 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

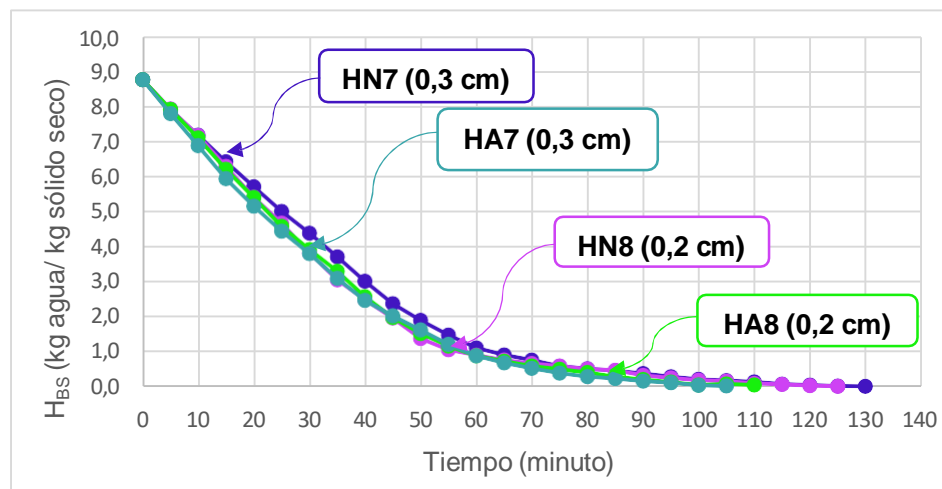
**Figura 4.15:** Variación del contenido de humedad en función al corte A<sub>12</sub> (0,2 – 0,3) cm: B<sub>1</sub> (50,0 °C) C<sub>2</sub> (5,5 m/s)

En la figura 4,15 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN5 y HA5 con corte 0,3 cm, temperatura 50,0 °C y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN5 con mayor tiempo de secado de 140 minutos presenta 0,013 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede

observar la pérdida de agua entre (55 – 105) minutos a (1,423 – 0,270) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA5 para un tiempo de 115 minutos presenta 0,028 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN6 y HA6 con corte 0,2 cm, temperatura 50,0 °C y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN6 para un tiempo de 125 minutos presenta 0,002 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA6 con menor tiempo de secado de 95 minutos presenta 0,016 (kg agua/kg sólido seco). Además, se muestra la pérdida de agua entre (25 – 70) minutos a (4,923 – 0,288) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.4 Variación del contenido de humedad en función del corte $A_{12}$ (0,2 – 0,3) cm: $B_2$ (60 °C) versus $C_2$ (5,5 m/s)

En la figura 4.16, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA7 y HA8) y sin tratamiento (HN7 y HN8). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando el corte entre (0,2 – 0,3) cm; manteniendo constantes la velocidad de aire (5,5 m/s) temperatura (60 °C), los resultados se detallan en la tabla E.7 y tabla E.8 (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

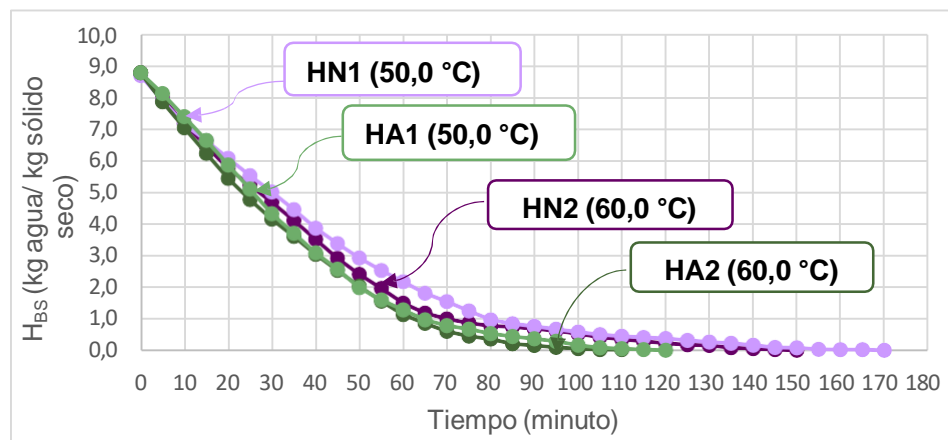
**Figura 4.16:** Variación del contenido de humedad en función al corte  $A_{12}$  (0,2 – 0,3) cm:  $B_2$  (60 °C)  $C_2$  (5,5 m/s)

En la figura 4.16 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN7 y HA7 con corte 0,3 cm, temperatura 60,0 °C

y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN7 con mayor tiempo de secado de 130 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (35 – 85) minutos a (3,711 – 0,459) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA7 para un tiempo de 105 minutos presenta 0,012 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN8 y HA8 con corte de 0,2 cm, temperatura 60,0 °C y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN8 para un tiempo de 125 minutos presenta 0,008 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA8 con menor tiempo de secado de 110 minutos presenta 0,041 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (40 – 80) minutos a (2,575 – 0,398) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.5 Variación del contenido de humedad en función de la temperatura $B_{12}$ (50,0 – 60,0) °C: $A_2$ (0,3 cm) versus $C_1$ (5,0 m/s)

En la figura 4.17, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA1 y HA2) y sin tratamiento (HN1 y HN2). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la temperatura entre (50,0 – 60,0) °C; manteniendo constantes el corte (0,3 cm) velocidad de aire (5,0 m/s), los resultados se detallan en la tabla E.9 y tabla E.10 (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

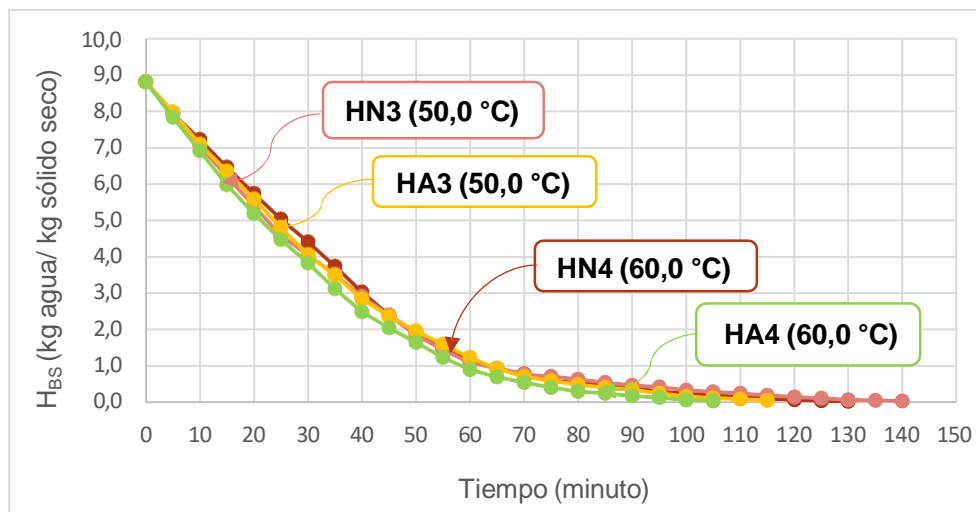
**Figura 4.17:** Variación del contenido de humedad en función a la temperatura  $B_{12}$  (50,0 – 60,0) °C:  $A_2$  (0,3 cm)  $C_1$  (5,0 m/s)



En la figura 4.17 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN1 y HA1 con temperatura 50,0 °C, corte de 0,3 cm y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN1 con mayor tiempo de secado de 170 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (75 – 155) minutos a (1,256 – 0,041) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA1 para un tiempo de 120 minutos presenta 0,006 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN2 y HA2 con temperatura 60,0 °C, corte 0,3 cm y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN2 para un tiempo de 150 minutos presenta 0,007 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA2 con menor tiempo de secado de 110 minutos presenta 0,025 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (40 – 80) minutos a (3,039 – 0,362) kg agua/kg sólido seco.

#### **4.6.6 Variación del contenido de humedad en función de la temperatura B<sub>12</sub> (50,0 – 60,0) °C: A<sub>1</sub> (0,3 cm) versus C<sub>2</sub> (5,5m/s)**

En la figura 4.18, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA3 y HA4) y sin tratamiento (HN3 y HN4). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la temperatura entre (50,0 – 60,0) °C; manteniendo constantes el corte (0,3 cm) velocidad de aire (5,5 m/s) y los resultados se detallan en la tabla E.11 y tabla E.12 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

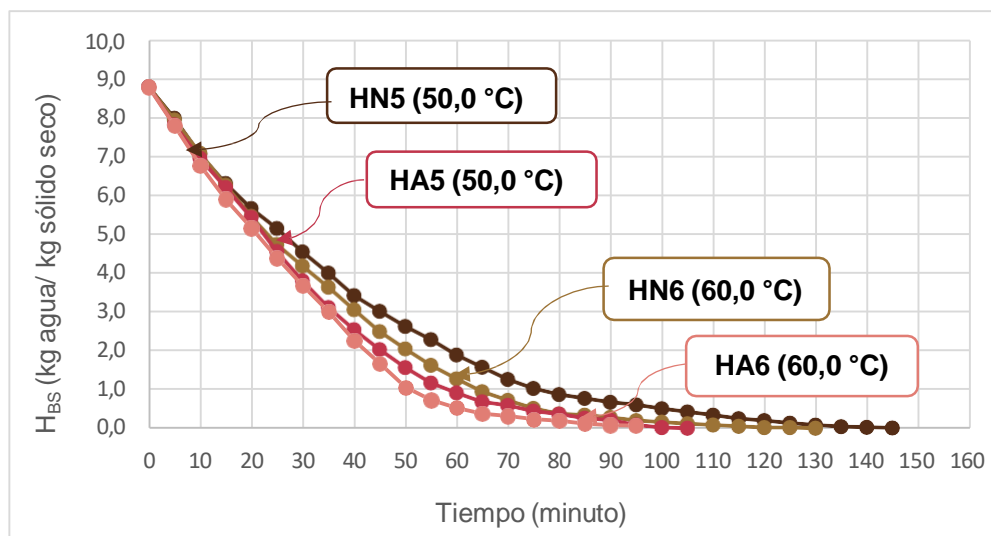
**Figura 4.18:** Variación del contenido de humedad en función de la temperatura  $B_{12}$  (50,0 – 60,0) °C:  $A_1$  (0,3 cm)  $C_2$  (5,5m/s)

En la figura 4.18 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN3 y HA3 con temperatura 50,0 °C, corte de 0,3 cm y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN3 con mayor tiempo de secado de 140 minutos presenta 0,013 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (55 – 95) minutos a (1,423 – 0,399) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA3 para un tiempo de 115 minutos presenta 0,006 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN4 y HA4 con temperatura 60,0 °C, corte 0,3 cm y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN4 para un tiempo de 130 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA4 con menor tiempo de secado de 105 minutos presenta 0,012 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (45 – 85) minutos a (2,024 – 0,226) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.7 Variación del contenido de humedad en función de la temperatura $B_{12}$ (50,0 – 60,0) °C: $A_1$ (0,2 cm) versus $C_1$ (5,0 m/s)

En la figura 4.19, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA5 y HA6) y sin tratamiento (HN5 y HN6). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la temperatura entre (50,0 – 60,0) °C; manteniendo constantes el

corte (0,2 cm) velocidad de aire (5,0 m/s), los resultados se detallan en la tabla E.13 y tabla E.14 (Anexo E).



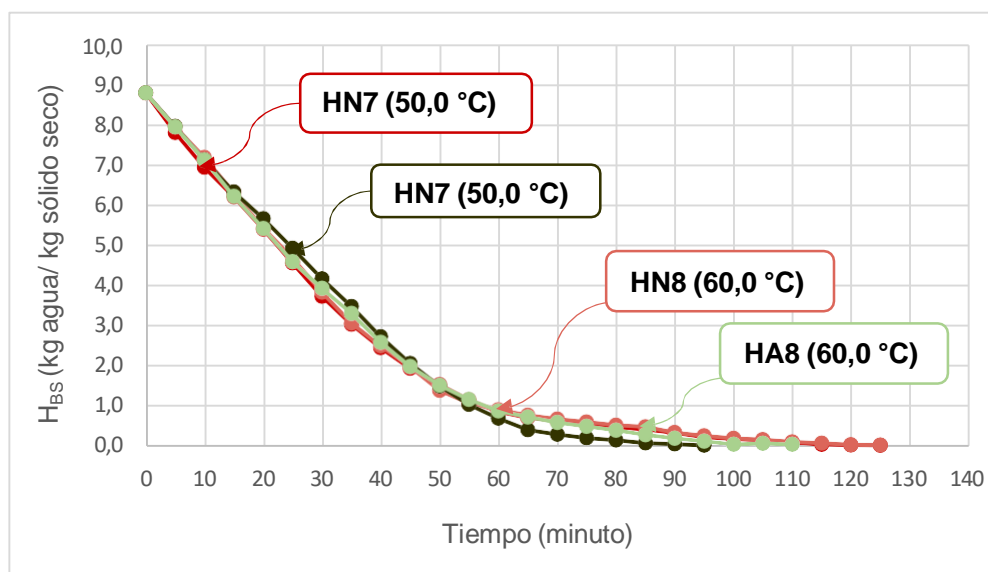
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.19:** Variación del contenido de humedad en función de la temperatura  $B_{12}$  (50,0 – 60,0) °C:  $A_1$  (0,2 cm)  $C_1$  (5,0 m/s)

En la figura 4.19 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN5 y HA5 con temperatura 50,0 °C, corte de 0,2 cm y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN5 con mayor tiempo de secado de 145 minutos presenta 0,014 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (65 – 115) minutos a (1,571 – 0,254) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA5 para un tiempo de 105 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN6 y HA6 con temperatura 60,0 °C, corte 0,2 cm y velocidad de aire 5,0 m/s; la muestra HN6 para un tiempo de 130 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA6 con menor tiempo de secado de 95 minutos presenta 0,045 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (25 – 75) minutos a (4,377 – 0,209) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.8 Variación del contenido de humedad en función de la temperatura $B_{12}$ (50,0 – 60,0) °C: $A_1$ (0,2 cm) versus $C_2$ (5,5 m/s)

En la figura 4.20, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA7 y HA8) y sin tratamiento (HN7 y HN8). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la temperatura entre (50,0 – 60,0) °C; manteniendo constantes el corte (0,2 cm) velocidad de aire (5,5 m/s), los resultados se detallan en la tabla E.15 y tabla E.16 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

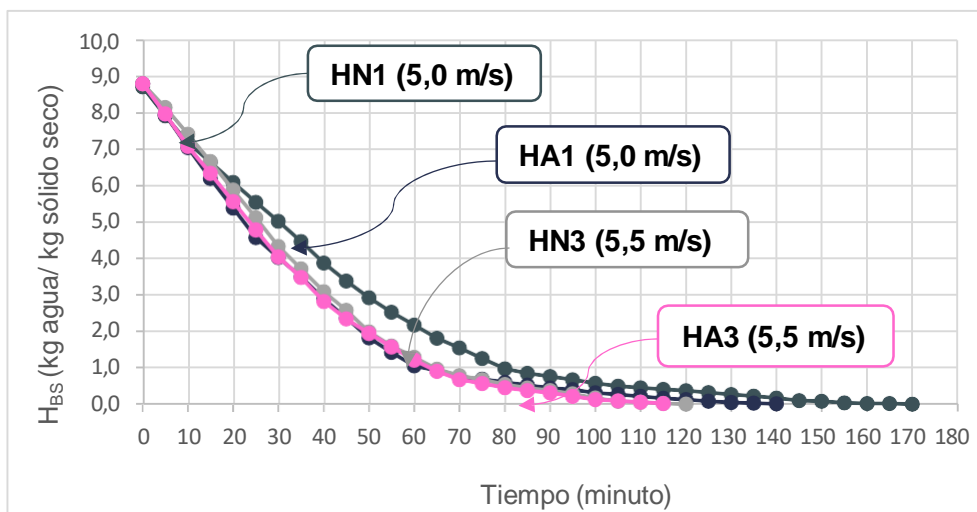
**Figura 4.20:** Variación del contenido de humedad en función de la temperatura  $B_{12}$  (50,0 – 60,0) °C:  $A_1$  (0,2 cm)  $C_2$  (5,5 m/s)

En la figura 4.20 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN7 y HA7 con temperatura 50,0 °C, corte de 0,2 cm y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN7 con mayor tiempo de secado de 125 minutos presenta 0,002 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (50 – 100) minutos a (1,516 – 0,164) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA7 con menor tiempo de secado de 95 minutos presenta 0,016 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN8 y HA8 con temperatura 60,0 °C, corte 0,2 cm y velocidad de aire 5,5 m/s; la muestra HN8 para un tiempo de 125 minutos presenta 0,008 (kg agua/kg

sólido seco); la muestra HA8 para un tiempo de secado de 110 minutos presenta 0,041 (kg agua/kg sólido seco).

#### 4.6.9 Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire C<sub>12</sub> (5,0 – 5,5) m/s: A<sub>2</sub> (0,3 cm) versus B<sub>1</sub> (50 °C)

En la figura 4.21, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA1 y HA3) y sin tratamiento (HN1 y HN3). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la velocidad de aire entre (5,0 – 5,5) m/s; manteniendo constantes el corte (0,3 cm) temperatura (50 °C), los resultados se detallan en la tabla E.17 y tabla E.18 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

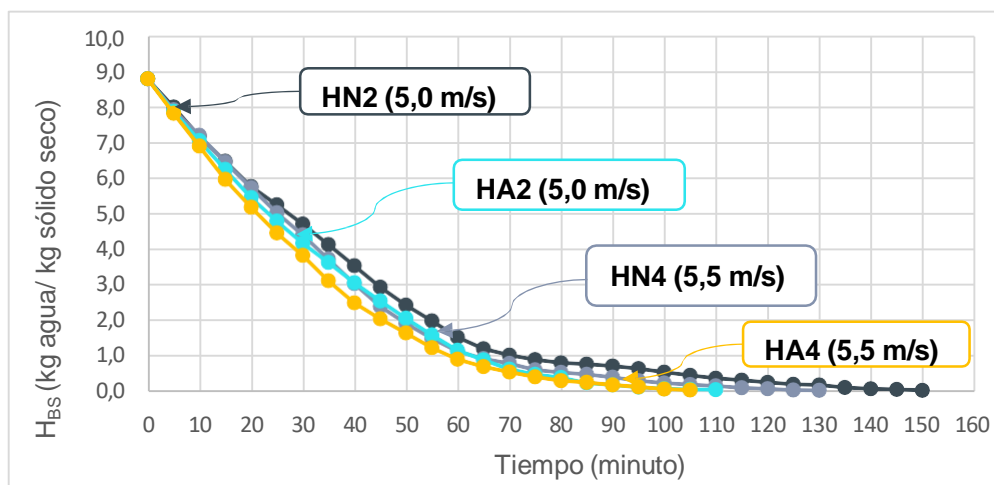
**Figura 4.21:** Variación del contenido de humedad en función de la temperatura B<sub>12</sub> (50,0 – 60,0) °C: A<sub>1</sub> (0,2 cm) C<sub>2</sub> (5,5 m/s)

En la figura 4.21 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN1 y HA1 con velocidad de aire 5,0 m/s, corte 0,3 cm y temperatura 50,0 °C; la muestra HN1 con mayor tiempo de secado de 170 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (65 – 140) minutos a (1,812 – 0,171) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA1 para un tiempo de 120 minutos presenta 0,006 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN3 y HA3 con velocidad

de aire 5,5 m/s, corte 0,3 cm y temperatura 50,0 °C; la muestra HN3 para un tiempo de 140 minutos presenta 0,013 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA3 con menor tiempo de secado de 115 minutos presenta 0,028 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (35 – 95) minutos a (3,471 – 0,220) kg agua/kg sólido seco

#### 4.6.10 Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire $C_{12}$ (5,0 – 5,5) m/s: $A_2$ (0,3 cm) versus $B_2$ (60 °C)

En la figura 4.22, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA2 y HA4) y sin tratamiento (HN2 y HN4). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la velocidad de aire entre (5,0 – 5,5) m/s; manteniendo constantes el corte (0,3 cm) temperatura (60 °C), los resultados se detallan en la tabla E.19 y tabla E.20 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

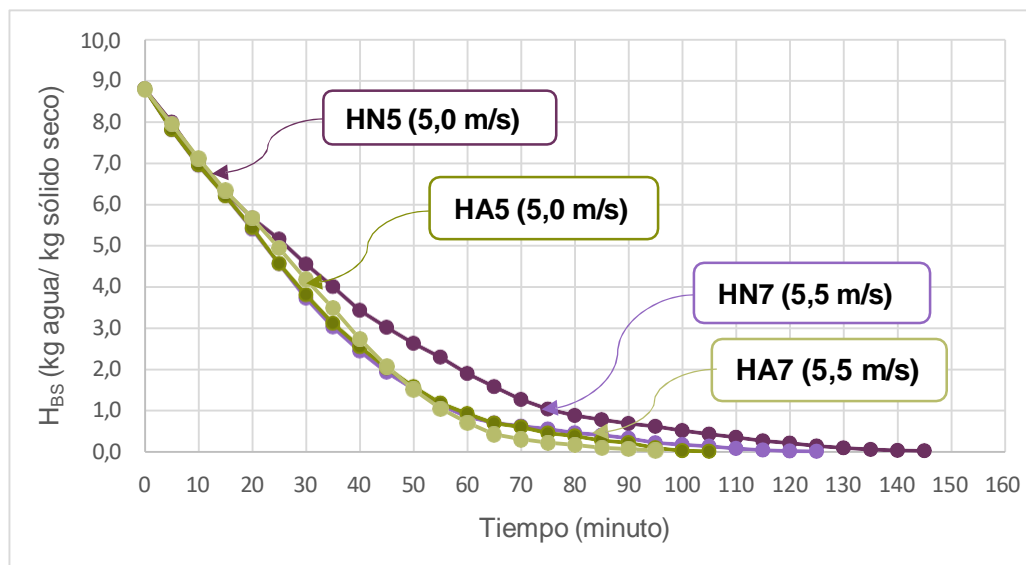
**Figura 4.22:** Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire  $C_{12}$  (5,0 – 5,5) m/s:  $A_2$  (0,3 cm)  $B_2$  (60 °C)

En la figura 4.22 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN2 y HA2 con velocidad de aire 5,0 m/s, corte 0,3 cm, temperatura 60,0 °C; la muestra HN2 con mayor tiempo de secado de 150 minutos presenta 0,007 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (30 – 110) minutos a (4,690 – 0,350) kg agua/kg sólido

seco; la muestra HA2 para un tiempo de 110 minutos presenta 0,025 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN4 y HA4 con velocidad de aire 5,5 m/s, corte 0,3 cm y temperatura 60,0 °C; la muestra HN4 para un tiempo de 130 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA4 con menor tiempo de secado de 105 minutos presenta 0,012 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (25 – 75) minutos a (4,443 – 0,383) kg agua/kg sólido seco.

#### 4.6.11 Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire C<sub>12</sub> (5,0 – 5,5) m/s: A<sub>1</sub> (0,2 cm) versus B<sub>1</sub> (50 °C)

En la figura 4.23, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA5 y HA7) y sin tratamiento (HN5 y HN7). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la velocidad de aire entre (5,0 – 5,5) m/s; manteniendo constantes el corte (0,2 cm) temperatura (50 °C), los resultados se detallan en la tabla E.21 y tabla E.22 (Anexo E).



**Fuente:** Elaboración propia

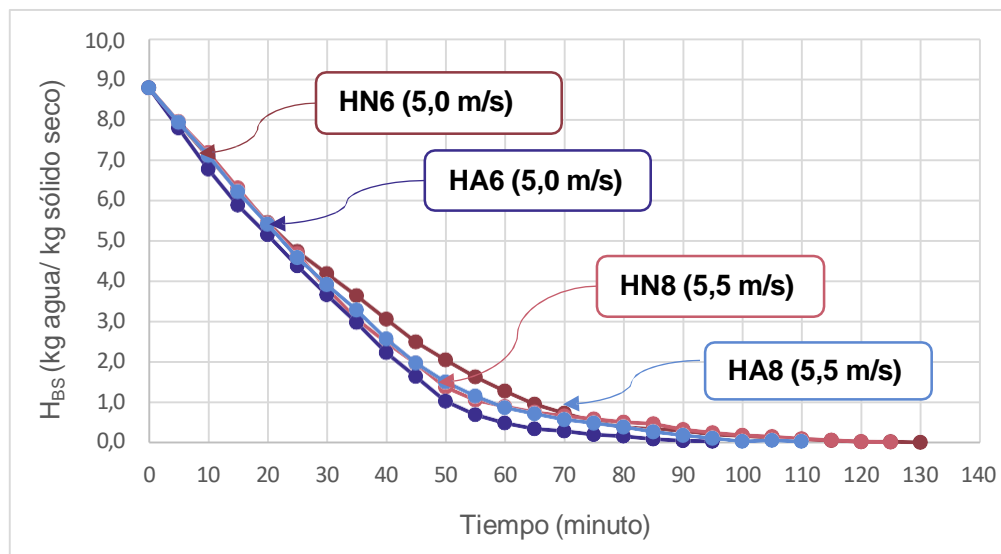
**Figura 4.23:** Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire C<sub>12</sub> (5,0 – 5,5) m/s: A<sub>1</sub> (0,2 cm) B<sub>1</sub> (50 °C)

En la figura 4.23 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN5 y HA5 con velocidad de aire 5,0 m/s, corte 0,2 cm y temperatura 50,0 °C; la muestra HN5 con mayor tiempo de secado de 145 minutos presenta 0,014 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (45 – 115) minutos a (3,010 – 0,254) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA5 para un tiempo de 105 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Para las muestras HN7 y HA7 con velocidad de aire 5,5 m/s, corte 0,2 cm y temperatura 50,0 °C; la muestra HN7 para un tiempo de 125 minutos presenta 0,002 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA7 con menor tiempo de secado de 95 minutos presenta 0,016 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (15 – 75) minutos a (6,323 – 0,201) kg agua/kg sólido seco.

#### **4.6.12 Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire $C_{12}$ (5,0 – 5,5) m/s: $A_1$ (0,2 cm) versus $B_2$ (60 °C)**

En la figura 4.24, se muestra la influencia del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras con ácido cítrico (HA6 y HA8) y sin tratamiento (HN6 y HN8). Se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos variando la velocidad de aire entre (5,0 – 5,5) m/s; manteniendo constantes el corte (0,2 cm) temperatura (60 °C), los resultados se detallan en la tabla E.23 y tabla E.24 (Anexo E).





**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.24:** Variación del contenido de humedad en función de la velocidad de aire  $C_{12}$  (5,0 – 5,5) m/s:  $A_1$  (0,2 cm) versus  $B_2$  (60 °C)

En la figura 4.24 se observa el comportamiento del contenido de humedad en base seca de las muestras HN6 y HA6 con velocidad de aire 5,0 m/s, corte 0,2 cm y temperatura 60,0 °C; la muestra HN6 con mayor tiempo de secado de 130 minutos presenta 0,004 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (25 – 105) minutos a (4,732 – 0,121) kg agua/kg sólido seco; la muestra HA6 con menor tiempo de 95 minutos presenta 0,045 (kg agua/kg sólido seco). Además, se puede observar la pérdida de agua entre (25 – 75) minutos a (4,377 – 0,209) kg agua/kg sólido seco. Para las muestras HN8 y HA8 con velocidad de aire 5,5 m/s, corte 0,2 cm y temperatura 60,0 °C; la muestra HN8 para un tiempo de 125 minutos presenta 0,008 (kg agua/kg sólido seco); la muestra HA8 para un tiempo de secado de 110 minutos presenta 0,041 (kg agua/kg sólido seco).

#### 4.7 Cinética de secado para el proceso de secado en la obtención de harina de nabo

En la tabla 4.20, se muestran los resultados obtenidos de la cinética de secado de las muestras de nabo en solución de ácido cítrico (HA2); corte 0,3 cm,

temperatura 50,0°C y velocidad del aire 5,0 m/s. Los resultados experimentales fueron obtenidos mediante regresión lineal por Excel. Tomando en cuenta los siguientes datos: cantidad de materia: 100,65 g; contenido de humedad: 89,78 %; masa de sólido seco: 0,0103 kg agua/kg sólido seco; tiempo de secado: 2,0 horas; área de bandeja: 0,035 m<sup>2</sup>.

**Tabla 4.20**

***Variación del contenido de humedad y velocidad de secado para la obtención de harina de nabo con solución de ácido cítrico***

Tiempo (min)	Peso (g)	Hbs (kg/kg)	Hbs media (kg/kg)	$\Delta\theta$ (h)	$\Delta Hbs$ (kg/kg)	$\Delta Hbs/\Delta\theta$ (kg/kg *h)	N (kg/m <sup>2</sup> h)
0	100,65	8,785					
5	94,29	8,166	8,476	0,083	0,618	7,449	2,192
10	86,85	7,443	7,805	0,083	0,723	8,714	2,564
15	79,51	6,730	7,086	0,083	0,714	8,597	2,530
20	72,35	6,034	6,382	0,083	0,696	8,386	2,468
25	64,08	5,230	5,632	0,083	0,804	9,686	2,851
30	56,69	4,511	4,870	0,083	0,718	8,656	2,547
35	50,82	3,941	4,226	0,083	0,571	6,875	2,023
40	43,14	3,194	3,567	0,083	0,747	8,995	2,647
45	38,08	2,702	2,948	0,083	0,492	5,927	1,744
50	31,54	2,066	2,384	0,083	0,636	7,660	2,254
55	27,78	1,701	1,883	0,083	0,366	4,404	1,296
60	23,85	1,319	1,510	0,083	0,382	4,603	1,355
65	19,91	0,936	1,127	0,083	0,383	4,615	1,358
70	17,86	0,736	0,836	0,083	0,199	2,401	0,707
75	17,13	0,665	0,701	0,083	0,071	0,855	0,252
80	16,28	0,583	0,624	0,083	0,083	0,996	0,293
85	15,57	0,514	0,548	0,083	0,069	0,832	0,245
90	14,66	0,425	0,469	0,083	0,088	1,066	0,314
95	13,68	0,330	0,378	0,083	0,095	1,148	0,338
100	12,31	0,197	0,263	0,083	0,133	1,605	0,472
105	11,25	0,094	0,145	0,083	0,103	1,242	0,365
110	10,83	0,053	0,073	0,083	0,041	0,492	0,145
115	10,54	0,025	0,039	0,083	0,028	0,340	0,100
120	10,29	0,000	0,013	0,083	0,024	0,293	0,086

**Fuente:** Elaboración propia

Donde:

$H_{BS}$  = Humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

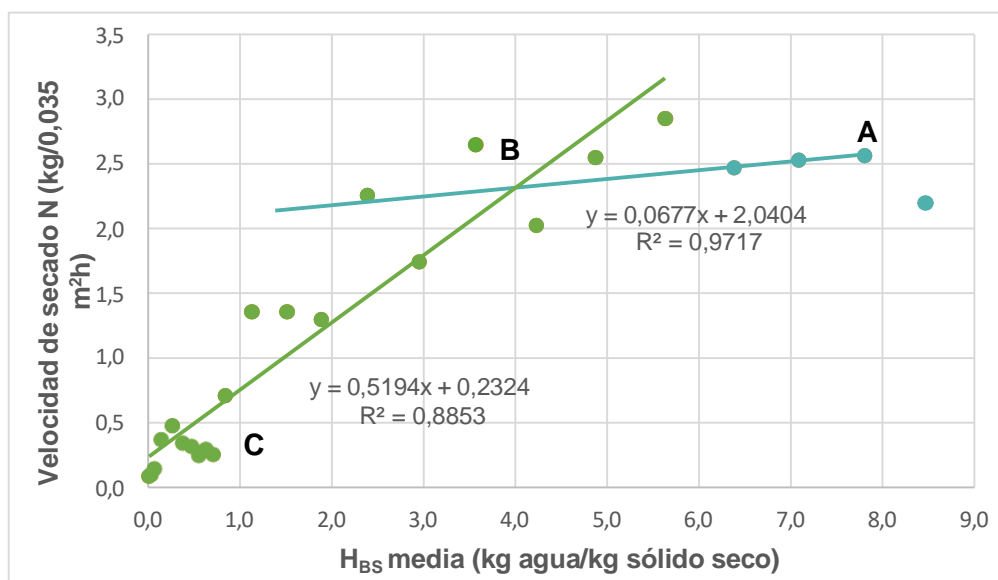
$H_{BS}$  media = Contenido de humedad media (kg agua/kg sólido seco)

$\Delta H_{BS}$  = Gradiente de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

$\Delta H_{BS}/\Delta \theta$  = Gradiente de humedad en base seca sobre el gradiente de tiempo  
(kg agua/ kg sólido seco \* h)

$N$  = Velocidad de secado (kg sólido seco/m<sup>2</sup> \* h)

En la figura 4.25, se muestra la cinética del proceso de secado de la muestra de nabo en solución de ácido cítrico (HA2) en función al contenido de humedad media en base a los datos de la tabla 4.20.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.25:** Cinética en el proceso de secado para las muestras de nabo en solución de ácido cítrico

En la figura 4.25 se observa el comportamiento de humedad media en relación con la velocidad de secado, donde se puede concluir que existen dos tramos distintos:

El tramo A – B representa el periodo ante-crítico donde el contenido de humedad de las muestras de nabo migra desde el interior hasta su superficie con una velocidad de secado constante hasta alcanzar la humedad crítica, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión  $R^2$  (0,9717) se describe en la ecuación 4.5.

$$y = 0,0677x + 2,0404 \quad \textbf{Ecuación 4.5}$$

El tramo B – C representa el periodo post-crítico donde la velocidad de secado decrece hasta que el contenido de humedad de las muestras de nabo alcanza el equilibrio, logrando un secado total en la superficie, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión  $R^2$  (0,8853) se describe en la ecuación 4.6.

$$y = 0,5194x + 0,2324 \quad \textbf{Ecuación 4.6}$$

En la tabla 4.21, se muestran los resultados obtenidos de la cinética de secado de las muestras de nabo sin tratamiento (HN2); a corte 0,3 cm, temperatura 50,0°C y velocidad del aire 5,0 m/s. Los resultados experimentales fueron obtenidos mediante regresión lineal por Excel. Tomando en cuenta los siguientes datos:

- Cantidad de materia: 100,77 g
- Contenido de humedad: 89,78 %
- Masa de sólido seco: 0,0103 kg agua/kg sólido seco
- Tiempo de secado: 2,66 horas
- Área de bandeja: 0,035 m<sup>2</sup>

Tabla 4.21

***Variación del contenido de humedad y velocidad de secado para la obtención de harina de nabo sin tratamiento***

Tiempo (min)	Peso (g)	Hbs (kg/kg)	Hbs media (kg/kg)	$\Delta\theta$ (h)	$\Delta Hbs$ (kg/kg)	$\Delta Hbs/\Delta\theta$ (kg/kg *h)	N (kg/m <sup>2</sup> h)
0	100,77	8,785					
5	91,84	7,918	8,351	0,083	0,867	10,447	3,0744
10	83,99	7,155	7,537	0,083	0,762	9,184	2,7026
15	77,98	6,572	6,864	0,083	0,584	7,031	2,0691
20	72,25	6,016	6,294	0,083	0,556	6,703	1,9727
25	66,22	5,430	5,723	0,083	0,586	7,054	2,0760
30	60,77	4,901	5,165	0,083	0,529	6,376	1,8763
35	54,92	4,333	4,617	0,083	0,568	6,844	2,0140
40	48,71	3,730	4,031	0,083	0,603	7,265	2,1380
45	44,47	3,318	3,524	0,083	0,412	4,960	1,4598
50	39,87	2,871	3,095	0,083	0,447	5,381	1,5837
55	35,48	2,445	2,658	0,083	0,426	5,136	1,5114
60	32,05	2,112	2,279	0,083	0,333	4,013	1,1809
65	28,93	1,809	1,961	0,083	0,303	3,650	1,0742
70	25,21	1,448	1,629	0,083	0,361	4,352	1,2807
75	22,42	1,177	1,312	0,083	0,271	3,264	0,9605
80	19,73	0,916	1,046	0,083	0,261	3,147	0,9261
85	18,65	0,811	0,863	0,083	0,105	1,263	0,3718
90	17,86	0,734	0,773	0,083	0,077	0,924	0,2720
95	16,91	0,642	0,688	0,083	0,092	1,111	0,3271
100	16,23	0,576	0,609	0,083	0,066	0,796	0,2341
105	15,01	0,457	0,517	0,083	0,118	1,427	0,4200
110	14,47	0,405	0,431	0,083	0,052	0,632	0,1859
115	13,85	0,345	0,375	0,083	0,060	0,725	0,2135
120	13,49	0,310	0,327	0,083	0,035	0,421	0,1239
125	12,72	0,235	0,273	0,083	0,075	0,901	0,2651
130	12,13	0,178	0,206	0,083	0,057	0,690	0,2031
135	11,86	0,152	0,165	0,083	0,026	0,316	0,0930
140	11,34	0,101	0,126	0,083	0,050	0,608	0,1790
145	11,05	0,073	0,087	0,083	0,028	0,339	0,0998
150	10,97	0,065	0,069	0,083	0,008	0,094	0,0275
155	10,52	0,021	0,043	0,083	0,044	0,526	0,1549
160	10,36	0,006	0,014	0,083	0,016	0,187	0,0551

**Fuente:** Elaboración propia

Donde:

$H_{BS}$  = Humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

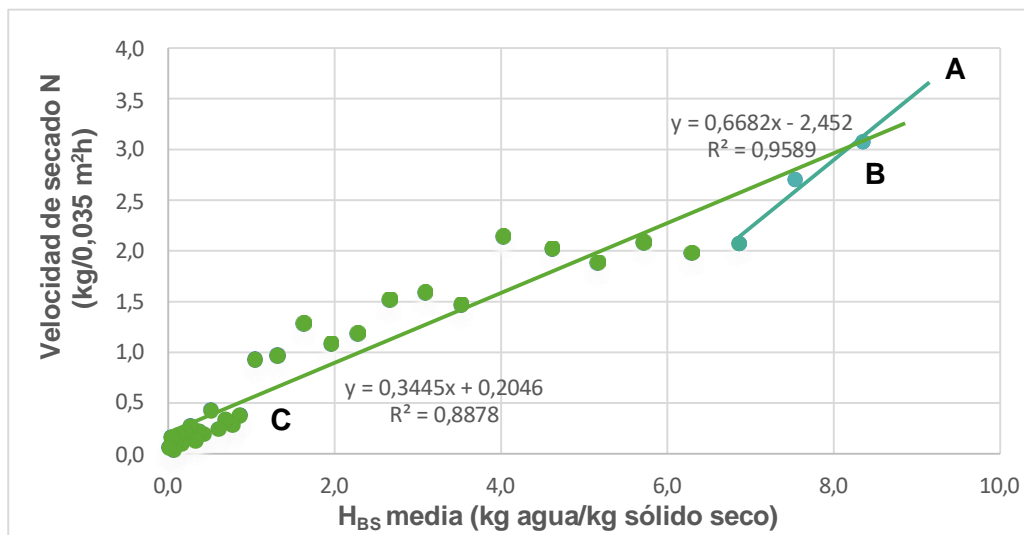
$H_{BS}$  media = Contenido de humedad media (kg agua/kg sólido seco)

$\Delta H_{BS}$  = Gradiente de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

$\Delta H_{BS}/\Delta \theta$  = Gradiente de humedad en base seca sobre el gradiente de tiempo  
(kg agua/ kg sólido seco \* h)

$N$  = Velocidad de secado (kg sólido seco/m<sup>2</sup> \* h)

En la figura 4.26, se muestra la cinética del proceso de secado de la muestra de nabo sin tratamiento (HN2) en función al contenido de humedad media en base a los datos de la tabla 4.21.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.26:** Cinética en el proceso de secado para las muestras de nabo sin tratamiento

En la figura 4.26 se observa el comportamiento de humedad media en relación con la velocidad de secado, donde se puede concluir que existen dos tramos distintos:

El tramo A – B representa el periodo ante-crítico donde el contenido de humedad de las muestras de nabo migra desde el interior hasta su superficie

con una velocidad de secado constante hasta alcanzar la humedad crítica, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión  $R^2$  (0,9589) se describe en la ecuación 4.7.

$$y = 0,6682x - 2,452 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

El tramo B – C representa el periodo post-crítico donde la velocidad de secado decrece hasta que el contenido de humedad de las muestras de nabo alcanza el equilibrio, logrando un secado total en la superficie, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión  $R^2$  (0,8878) se describe en la ecuación 4.8.

$$y = 0,3445x + 0,2046 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

#### 4.8 Caracterización de harina de nabo

Para la caracterización de la harina de nabo se tomaron en cuenta los siguientes análisis: fisicoquímicos, microbiológicos y micronutrientes los cuales se detallan a continuación:

##### 4.8.1 Análisis fisicoquímicos de harina de nabo

En la tabla 4.22 se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de harina de nabo de datos extraídos del Anexo A.2 (Anexo A).

**Tabla 4.22**

#### *Análisis fisicoquímicos de harina de nabo*

Parámetros	Unidad	Resultado
Humedad	%	13,40
Fibra	%	9,10
Ceniza	%	5,18
Grasa	%	1,17
Proteína (Nx6,25)	%	7,82
Hidratos de carbono	%	72,43
Valor energético	Kcal/100 g	332,00

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.22, se observan los valores fisicoquímicos de harina de nabo que contiene: humedad 13,40 %; fibra 9,10 %; ceniza 5,18 %; grasa 1,17 %; proteína 7,82 %; hidratos de carbono 72,43 % y valor energético 332,00 kcal/100g.

#### 4.8.2 Análisis microbiológicos de harina de nabo

En la tabla 4.23 se muestran los resultados obtenidos de los análisis microbiológicos de harina de nabo de datos extraídos del Anexo A.2 (Anexo A).

**Tabla 4.23**

##### *Análisis microbiológicos de harina de nabo*

Microorganismos	Unidad	Resultado
Coliformes totales	UFC/g	$<1,0 \times 10^1$ (*)
Escherichia coli	UFC/g	$<1,0 \times 10^1$ (*)
Mohos y levaduras	P/A en 25 g	$<1,0 \times 10^1$ (*)
(*) no se observa desarrollo de colonias		

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 4.23, se observan los valores microbiológicos de harina de nabo que contiene: Coliformes totales  $<1,0 \times 10^1$  (\*) UFC/g; Escherichia coli  $<1,0 \times 10^1$  (\*) UFC/g; Mohos y levaduras  $<1,0 \times 10^1$  (\*) P/A en 25 g. En donde (\*) = No se observa desarrollo de colonias.

#### 4.8.3 Análisis de minerales de harina de nabo

En la tabla 4.24 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de minerales de harina de nabo de datos extraídos del Anexo A.2 (Anexo A).

**Tabla 4.24**

##### *Análisis de minerales de harina de nabo*

Minerales	Unidad	Resultado
Fósforo	mg/100g	194
Potasio	g/100g	2,1

**Fuente:** Elaboración propia



En la tabla 4.24, se observan los valores de minerales de harina de nabo que contiene: fósforo 194 mg/100g y potasio 2,1 g/100g.

#### 4.9 Control de harina de nabo en el almacenamiento

En la tabla 4.25, se muestran los resultados del almacenamiento de harina de nabo. Por lo tanto, se tomó la muestra HA2 en dos tipos de envases polipropileno: plástico transparente y papel kraft café para observar la variación del contenido de humedad.

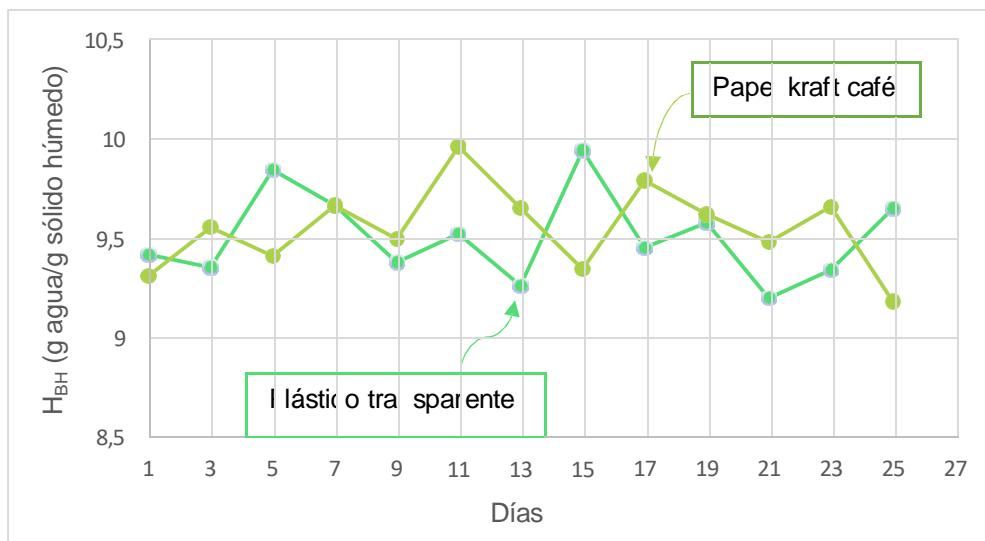
**Tabla 4.25**

**Control de harina de nabo en el almacenamiento**

Envase de polipropileno (Plástico transparente)		Envase de polipropileno (Papel kraft café)	
Días	HA2(H <sub>BH</sub> )	Días	HA2 (H <sub>BH</sub> )
1	9,4168	1	9,3127
3	9,3531	3	9,5564
5	9,8437	5	9,4123
7	9,6645	7	9,6648
9	9,3776	9	9,4971
11	9,5221	11	9,9614
13	9,2607	13	9,6521
15	9,9419	15	9,3457
17	9,4522	17	9,7904
19	9,5782	19	9,6212
21	9,1978	21	9,4816
23	9,3395	23	9,6607
25	9,6486	25	9,1841

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 4.27, se muestra el control de la harina de nabo en el almacenamiento en dos tipos de envases de polipropileno: plástico transparente y papel kraft café para observar la variación del contenido de humedad en base a los datos de la tabla 4.22.



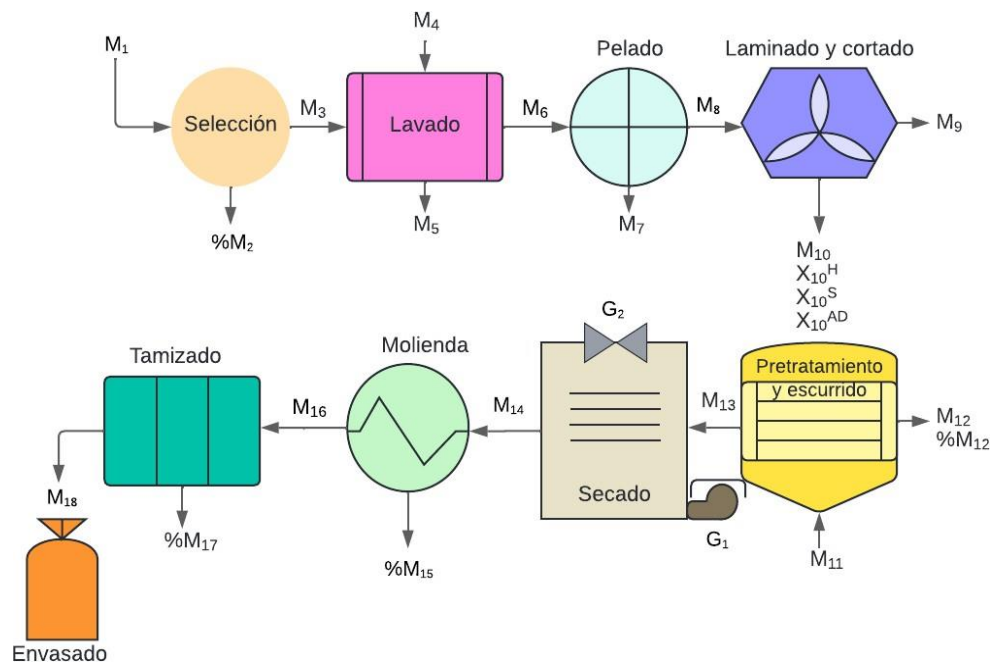
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.27:** Control de harina de nabo en el almacenamiento en dos tipos de envases de polipropileno

En la figura 4.27, se observa la variación del contenido de humedad en los envases de polipropileno de Papel kraft café y envase de polipropileno de plástico transparente no es muy significativa ya que presentan un contenido de humedad en base húmeda para los 25 días de 9,6486 (g agua/g sólido húmedo) (plástico transparente) y 9,1841 (g agua/g sólido húmedo) (papel kraft café). El envase de papel kraft café conserva su contenido de humedad estable, por lo tanto, se tomó como el envase elegido para conservar la harina de nabo.

#### 4.10 Balance de materia en el proceso de obtención de harina de nabo

El balance de materia del proceso de obtención de harina de nabo se realizó para una base de cálculo de 1252,21 g de nabo y para su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la (figura 4.28).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.28:** Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de harina de nabo

Donde:

$M_1$  = Nabo (g)

$\% M_1$  = Porcentaje de nabo (%)

$M_2$  = Pérdidas en la etapa de selección (g)

$\% M_2$  = Porcentaje de pérdidas en la etapa de selección (%)

$M_3$  = Nabo seleccionado (g)

$\% M_3$  = Porcentaje de nabo seleccionado (%)

$X_3^H$  = Fracción en humedad de nabo seleccionado

$X_3^S$  = Fracción en sólidos solubles de nabo seleccionado

$M_4$  = Cantidad de agua para el lavado (g)

$\% M_4$  = Porcentaje de agua para el lavado (%)

$M_5$  = Cantidad de agua residual con tierra (g)

$X_5^A$  = Fracción de agua en el agua residual

$X_5^I$  = Fracción de impurezas en el agua residual

$M_6$  = Nabo lavado (g)

$X_6^H$  = Fracción en humedad de nabo lavado

$X_6^S$  = Fracción en sólidos de nabo lavado

$X_6^{AD}$  = Fracción de agua adherida del nabo lavado

$X_6^{PC}$  = Porción comestible del nabo lavado (%)

$X_6^{PNC}$  = Porción no comestible del nabo lavado (%)

$M_7$  = Cáscaras (g)

$X_7^{PC}$  = Porción comestible de la cáscara (%)

$X_7^{PNC}$  = Porción no comestible de la cáscara (%)

$M_8$  = Nabo pelado (g)

$X_8^{PC}$  = Porción comestible de nabo pelado (%)

$X_8^{PNC}$  = Porción no comestible de nabo pelado (%)

$X_8^{RU}$  = Rodajas útiles de nabo pelado (%)

$X_8^{RNU}$  = Rodajas no útiles de nabo pelado (%)

$M_9$  = Pérdidas en la etapa de laminado (g)

$X_9^{RU}$  = Rodajas útiles en la etapa de laminado (%)

$X_9^{RNU}$  = Rodajas no útiles en la etapa de laminado (%)

$M_{10}$  = Nabo laminado (g)

$X_{10}^{RU}$  = Rodajas útiles de nabo laminado (%)

$X_{10}^{RNU}$  = Rodajas no útiles de nabo laminado (%)

$X_{10}^H$  = Fracción en humedad de nabo laminado

$X_{10}^S$  = Fracción en sólidos de nabo laminado

$X_{10}^{AD}$  = Fracción de agua adherida de nabo laminado

$M_{11}$  = Solución de ácido cítrico (g)

%  $M_{11}$  = Porcentaje de solución de ácido cítrico (%)

$M_{12}$  = Cantidad de solución de ácido cítrico residual (g)

%  $M_{12}$  = Porcentaje de solución de ácido cítrico residual (%)

$M_{13}$  = Nabo escurrido (g)

$X_{13}^H$  = Fracción en humedad de nabo escurrido

$X_{13}^S$  = Fracción en sólidos de nabo escurrido

$X_{13}^{AD}$  = Fracción de agua adherida de nabo escurrido

$X_T$  = Fracción de humedad total

$M_{14}$  = Nabo seco (g)

$X_{14}^H$  = Fracción en humedad de nabo seco

$X_{14}^S$  = Fracción en sólidos de nabo seco

$m_{SSM13}$  = Masa de sólido seco de nabo escurrido (g)

$X_{M13}$  = Humedad inicial en base seca del nabo en el proceso de secado (g agua/g sólido seco)

$X_{M14}$  = Humedad final en base seca del nabo en el proceso de secado (g agua/g sólido seco)

$m_{AE}$  = Cantidad de masa de agua evaporada (g)

$\% M_{14}$  = Porcentaje de nabo seco (%)

$M_{15}$  = Pérdidas en la etapa de molienda (g)

$M_{15}$  = Porcentaje de pérdidas en la etapa de molienda (%)

$M_{16}$  = Nabo molido (g)

$\% M_{16}$  = Porcentaje de nabo molido (%)

$M_{17}$  = Pérdidas en la etapa de tamizado (g)

$\% M_{17}$  = Porcentaje de pérdidas en la etapa de tamizado (%)

$M_{18}$  = Harina de nabo (g)

$\% M_{18}$  = Porcentaje de harina de nabo (%)

$X$  = Concentración fase sólida (g agua/g sólido seco)

$Y$  = Concentración fase gaseosa (kg aire seco/h)

$G_1$  = Cantidad de masa de aire seco de entrada (kg aire seco/h)

$G_2$  = Cantidad de masa de agua evaporada

$H_{M13}$  = Entalpia del nabo en la entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

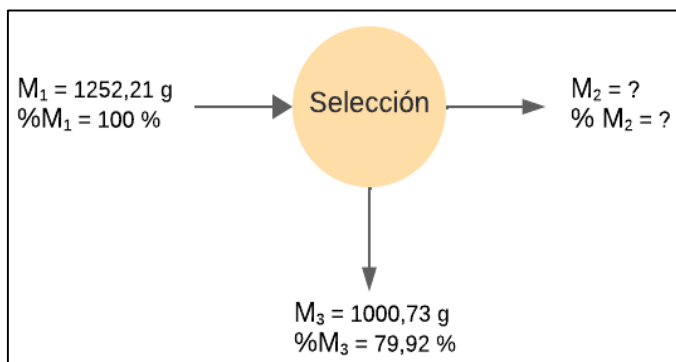
$H_{M14}$  = Entalpia del nabo en la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

$H_{G1}$  = Entalpia del aire seco de entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

$H_{G2}$  = Entalpia del agua evaporada en la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

#### **4.10.1 Balance general de materia en la etapa de selección**

En la figura 4.29, se muestra el balance de materia en la etapa de selección de nabo con una cantidad de 1252,21 g obteniendo 1000,73 g de nabos seleccionados.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.29:** Etapa de selección

Balance general de materia en la etapa de selección

$$M_1 = M_2 + M_3$$

Ecuación 4.9

Despejando  $M_2$  de la ecuación 4.9

$$M_2 = M_1 - M_3$$

$$M_2 = 1252,21 - 1000,73$$

$$M_2 = 251,48 \text{ g pérdida en la etapa de selección}$$

Cantidad de porcentaje de pérdida en la etapa de selección

$$\frac{M_1}{\%M_1} = \frac{M_2}{\%M_2}$$

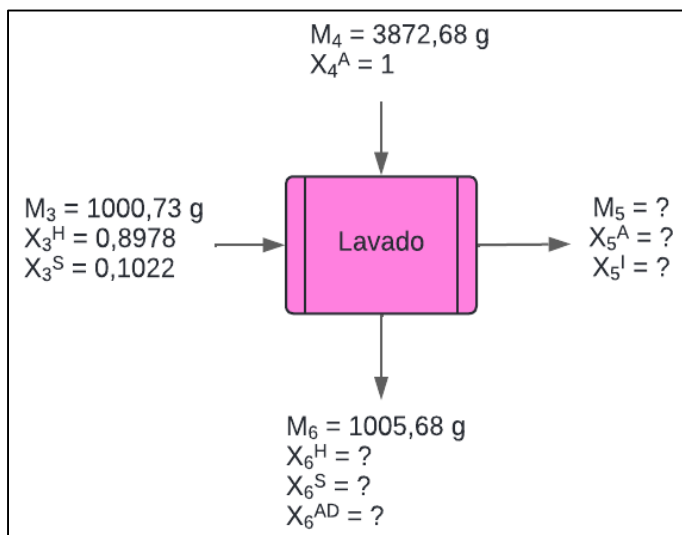
$$\%M_2 = \frac{M_2 * \%M_1}{M_1}$$

$$\%M_2 = \frac{251.48 \text{ g} * 100\%}{1252.21 \text{ g}}$$

$$\%M_2 = 20,08 \% \text{ pérdida en la etapa de selección}$$

#### 4.10.2 Balance general de materia en la etapa de lavado

En la figura 4.30, se muestra la etapa de lavado para lo cual se realizó con 1000,73 g de nabo.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.30:** Etapa de lavado

**Balance general de materia en la etapa de lavado**

$$M_3 + M_4 = M_5 + M_6$$

Ecuación 4.10

Despejando  $M_5$  de la ecuación 4.10

$$M_5 = M_3 + M_4 - M_6$$

$$M_5 = 1000,73 \text{ g} + 3872,68 \text{ g} - 1005,68 \text{ g}$$

$$M_5 = 3867,73 \text{ g agua residual con tierra}$$

Balance parcial de materia para fracción sólido en la etapa de lavado

$$M_3 * X_{3S} + M_4 * X_{4S} = M_5 * X_{5S} + M_6 * X_{6S}$$

$$X_{6S} = \frac{M_3 * X_{3S}}{M_6}$$

$$X_{6S} = \frac{1000,73 \text{ g} * 0,1022}{1005,68 \text{ g}}$$

$$X_{6S} = 0,1017 \text{ fracción en sólido de nabo limpio}$$

Balance parcial de materia de fracción humedad en la etapa de lavado



$$M_3 * X_3^H + M_4 * X_4^H = M_5 * X_5^H + M_6 * X_6^H$$

$$X_6^H = \frac{M_3 * X_3^H}{M_6}$$

$$X_6^H = \frac{1000,73 \text{ g} * 0,8978}{1005,68 \text{ g}}$$

$$X_6^H = 0,8934 \text{ fracción en humedad de nabo limpio}$$

Cálculo para la fracción  $X_6^{AD}$  de agua adherida en el nabo limpio

$$X_6^{AD} = 1 - X_6^S - X_6^H$$

$$X_6^{AD} = 1 - 0,1017 - 0,8934$$

$$X_6^{AD} = 0,005 \text{ fracción de agua adherida de nabo limpio}$$

Balance parcial de materia en fracción de agua en la etapa de lavado

$$M_3 * X_3^A + M_4 * X_4^A = M_5 * X_5^A + M_6 * X_6^{AD}$$

$$X_5^A = \frac{M_4 * X_4^A - M_6 * X_6^A}{M_5}$$

$$X_5^A = \frac{(3872,68 \text{ g} * 1) - (1005,68 \text{ g} * 0,005)}{3867,73 \text{ g}}$$

$$X_5^A = 0,9999 \text{ fracción de agua en el agua residual}$$

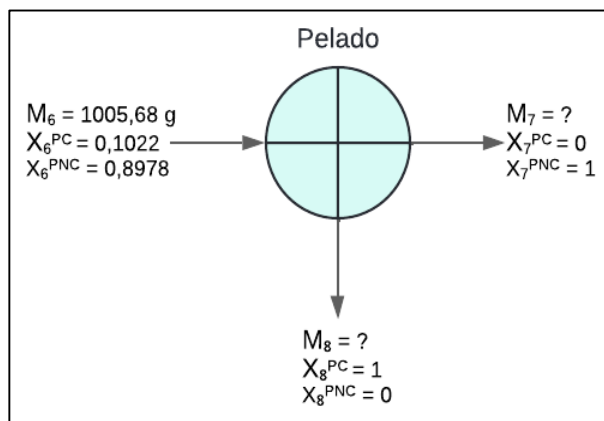
Cálculo para la fracción  $X_5^I$  de impureza en el agua residual

$$X_5^I = 1 - X_5^A$$

$$X_5^I = 0,0001 \text{ fracción de impurezas en el agua residual}$$

#### 4.10.3 Balance general de materia en la etapa de pelado

En la figura 4.31, se muestra la etapa de pelado el cual se realizó con 1005,68 g de nabo, tomando en cuenta los datos de la tabla 4.1, donde: porción comestible de 70,68% (PC) y porción no comestible de 29,32% (PNC).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.31:** Etapa de pelado

***Balance general de materia en la etapa de pelado***

$$M_6 = M_7 + M_8$$

Ecuación 4.11

Balance parcial de materia para la porción comestible en la etapa de pelado

$$M_6 * X_6^{PC} = M_7 * X_7^{PC} + M_8 * X_8^{PC}$$

$$M_8 = \frac{M_6 * X_6^{PC}}{X_8^{PC}}$$

$$M_8 = \frac{1005,68 \text{ g} * 0,7068}{1}$$

$M_8 = 710,81 \text{ g}$  porción comestible de nabo pelado

Balance parcial de materia para la porción no comestible en la etapa de pelado

$$M_6 * X_6^{PNC} = M_7 * X_7^{PNC} + M_8 * X_8^{PNC}$$

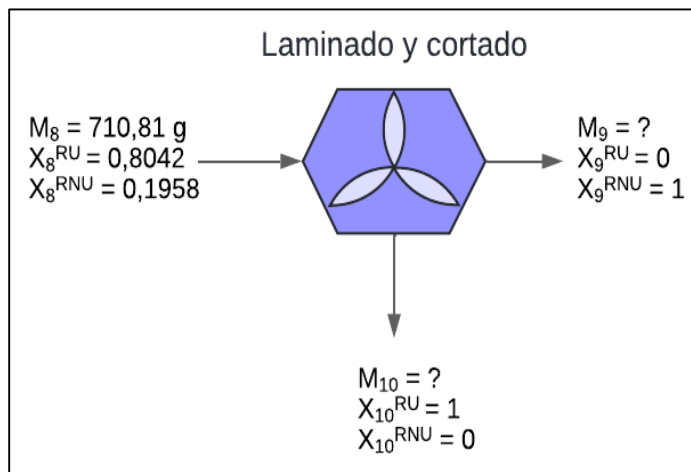
$$M_7 = \frac{M_6 * X_6^{PNC}}{X_7^{PNC}}$$

$$M_7 = \frac{1005,68 \text{ g} * 0,2932}{1}$$

$M_7 = 294,87 \text{ g}$  cáscaras

#### 4.10.4 Balance de materia en la etapa de laminado y cortado

En la figura 4.32, se muestra la etapa de laminado y cortado el cual se realizó con 710,81 g de nabo comestible, tomando en cuenta los datos de la tabla 4.1, donde: rodajas útiles de 80,42% (RU) y rodajas no útiles de 19,58% (RNU).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.32:** Etapa de laminado y cortado

#### **Balance general de materia en la etapa de laminado y cortado**

$$M_8 = M_9 + M_{10} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Balance parcial de materia para rodajas útiles de nabo en la etapa de laminado y cortado

$$M_8 * X_8^{RU} = M_9 * X_9^{RU} + M_{10} * X_{10}^{RU}$$

$$M_{10} = \frac{M_8 * X_8^{RU}}{X_{10}^{RU}}$$

$$M_{10} = \frac{710,81 \text{ g} * 0,8042}{1}$$

$$M_{10} = 571,64 \text{ g rodajas útiles de nabo laminado}$$

Balance parcial de materia para rodajas no útiles de nabo en la etapa de laminado y cortado

$$M_8 * X_8^{RNU} = M_9 * X_9^{RNU} + M_{10} * X_{10}^{RNU}$$

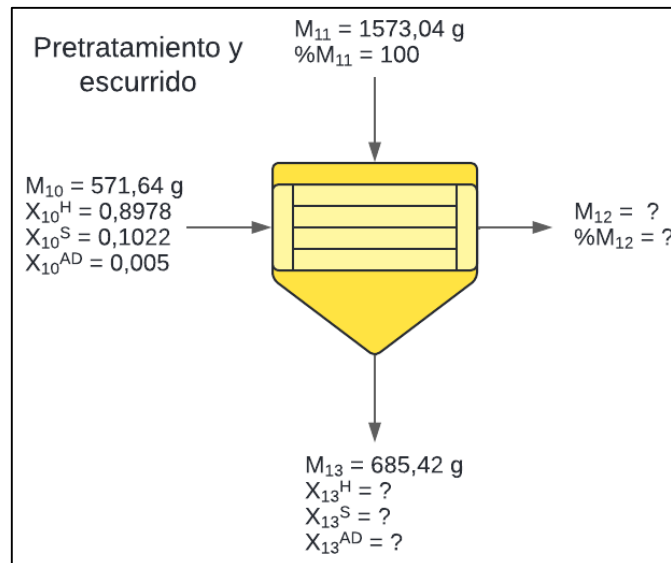
$$M_9 = \frac{M_8 * X_8^{RNU}}{X_9^{RNU}}$$

$$M_9 = \frac{710,81 \text{ g} * 0,1958}{1}$$

$M_9 = 139,18 \text{ g}$  pérdidas en la etapa de laminado

#### 4.10.5 Balance general de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido

En la figura 4.33, se muestra la etapa de pretratamiento que se realizó con 1573,04 g de solución de ácido cítrico y 571,64 g de nabo cortado con un contenido de humedad inicial en base húmeda 89,78 % (CEANID, 2023).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.33:** Etapa de pretratamiento y escurrido

#### **Balance general de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido**

$$M_{10} + M_{11} = M_{12} + M_{13}$$

Ecuación 4.13

Despejando  $M_{12}$  de la ecuación 4.13

$$M_{12} = M_{10} + M_{11} - M_{13}$$

$$M_{12} = 571,24 + 1573,04 - 685,42$$

$$M_{12} = 1459,26 \text{ g solución de ácido cítrico residual}$$

Cantidad de porcentaje de pérdida en la etapa de pretratamiento

$$\frac{M_{11}}{\%M_{11}} = \frac{M_{12}}{\%M_{12}}$$

$$\%M_{12} = \frac{M_{12} * \%M_{11}}{M_{11}}$$

$$\%M_{12} = \frac{1459,26 \text{ g} * 100\%}{1573,04 \text{ g}}$$

$$\%M_{12} = 92,77 \% \text{ solución de ácido cítrico residual}$$

Balance parcial de materia de fracción humedad en la etapa de pretratamiento

$$M_{10} * X_{10}^H + \cancel{M_{11} * X_{11}^H} = \cancel{M_{12} * X_{12}^H} + M_{13} * X_{13}^H$$

$$X_{13}^H = \frac{M_{10} * X_{10}^H}{M_{13}}$$

$$X_{13}^H = \frac{571,64 \text{ g} * 0,8978}{685,42 \text{ g}}$$

$$X_{13}^H = 0,7488 \text{ fracción en humedad de nabo escurrido}$$

Balance parcial de materia para fracción sólido en la etapa de pretratamiento

$$M_{10} * X_{10}^S + \cancel{M_{11} * X_{11}^S} = \cancel{M_{12} * X_{12}^S} + M_{13} * X_{13}^S$$

$$X_{13}^S = \frac{M_{10} * X_{10}^S}{M_{13}}$$

$$X_{13}^S = \frac{571,64 \text{ g} * 0,1022}{685,42 \text{ g}}$$

$$X_{13}^S = 0,0852 \text{ fracción en sólidos de nabo escurrido}$$

Cálculo para la fracción  $X_{13}^{AD}$  de agua adherida en el nabo escurrido

$$X_{13}^{AD} = 1 - X_{13}^H - X_{13}^S$$

$$X_{13}^{AD} = 1 - 0,7488 - 0,0852$$

$$X_{13}^{AD} = 0,166 \text{ fracción de agua adherida de nabo escurrido}$$

Cálculo para la fracción  $X_T$  de humedad total

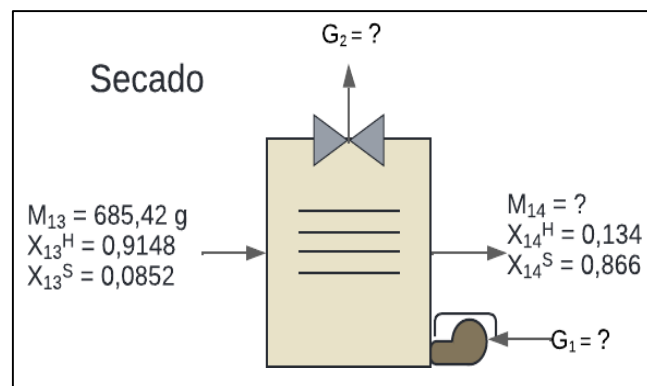
$$X_T = X^H + X^{AD}$$

$$X_T = 0,7488 + 0,166$$

$$X_T = 0,9148 \text{ fracción de humedad total}$$

#### 4.10.6 Balance general de materia en la etapa de secado

En la figura 4.34, se muestra la etapa de secado que se realizó con 685,42 g de nabo con contenido de humedad en base húmeda 89,78 % y al finalizar el proceso de secado el nabo seco presentó 13,40 % (CEANID, 2023).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.34:** Etapa de secado

Balance de materia global en la etapa de secado, se tomó en cuenta la ecuación 4.13 citada por (Valiente, 2002).

$$M_{13} + G_1 = M_{14} + G_2 \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Para determinar la masa de sólido seco del nabo se utilizó la ecuación 4.14 citada por (Valiente, 2002).

$$m_{SS} = M_{13} (1 - X_{13}^H) \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Reemplazando variables en la ecuación 4.14 se obtiene:

$$m_{SSM13} = 685,42 (1 - 0,9148)$$

$$m_{SSM13} = 58,40 \text{ g sólido seco}$$

El contenido de humedad inicial en base seca del nabo en la etapa de secado se determinó según la ecuación 4.15 (Valiente, 2002).

$$X_{BS} = \frac{X_{BH}}{1 - X_{BH}} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Reemplazando variables en la ecuación 4.15

$$X_{M13} = \frac{0,9148}{1 - 0,9148} \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

$$X_{M13} = 10,74 \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

Para calcular el contenido de humedad en base seca al final del proceso de secado se tomó en cuenta la ecuación 4.15

$$X_{M13} = \frac{0,134}{1 - 0,134} \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

$$X_{M13} = 0,155 \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

Para determinar la cantidad de masa de agua evaporada en el proceso de secado se utilizó la ecuación 4.16

$$m_{AE} = m_{SSM13}(X_{M13} - X_{M14}) \quad \text{Ecuación 4.16}$$

Reemplazando las variables en la ecuación 4.16

$$m_{AE} = 58,40 \text{ g sólido seco } (10,74 - 0,155) \text{ g agua/g sólido seco}$$

$$m_{AE} = 618,16 \text{ g agua evaporada de nabo}$$

Para determinar la cantidad de masa total de nabo seco obtenido después del proceso de secado se utilizó la ecuación 4.17

$$M_{14} = M_{13} - m_{AE} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

Reemplazando variables en la ecuación 4.17

$$M_{14} = 685,42 \text{ g} - 618,16 \text{ g}$$

$$M_{14} = 67,26 \text{ g de nabo seco}$$

Para determinar la cantidad de masa de aire seco en la etapa de secado, se tomó en cuenta la ecuación 4.18 citada por (Valiente, 2002).

$$M_{13} * X_{M13} + G_1 * Y_{G1} = M_{14} * X_{M14} + G_2 * Y_{G2} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde las variables:

$G$  = Caudal másico del aire (kg aire seco/h)

$G_1$  = Cantidad de masa del aire seco de entrada (kg aire seco/h)

$G_2$  = Cantidad de masa de agua evaporada (g)

$M$  = Caudal másico del producto (g sólido seco/h)

$X$  = Humedad del producto en base seca (g agua/g sólido seco)

$Y$  = Humedad del aire (g agua/ kg aire seco)

Reemplazando variables en la ecuación 4.18 se obtiene:

$$M * X_{M13} + G * Y_{G1} = M * X_{M14} + G * Y_{G2} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Agrupando términos semejantes de la ecuación 4.19 se obtiene:

$$M * X_{M13} - M * X_{M14} = G * Y_{G2} - G * Y_{G1} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

Factorizando la ecuación 4.20 se obtiene:

$$M(X_{M13} - X_{M14}) = G(Y_{G2} - Y_{G1}) \quad \text{Ecuación 4.21}$$



Despejando la ecuación G de la ecuación 4.21 se obtiene:

$$G = \frac{M(X_{13} - X_{14})}{Y_{G2} - Y_{G1}} \quad \text{Ecuación 4.22}$$

Según (SENAMHI, 2024) la altura de la ciudad de Tarija es de 1859 mnsn; por tanto, los datos fueron introducidos al software Psicrom 1.0 de psicrometría y los resultados se muestran en la tabla 4.26 en base a la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo medidos a la entrada y salida del secador de bandejas.

**Tabla 4.26**

***Propiedades Psicométricas del aire***

Propiedades	Aire frío	Aire saturado
T <sub>BS</sub> (°C)	19,10	37,30
T <sub>BH</sub> (°C)	17,33	29,46
H <sub>R</sub> (%)	85,28	58,16
Y (g agua/kg aire seco)	14,90	30,00
PVP (kpa)	1,886	3,713

**Fuente:** Elaboración propia

Donde:

PVP = Presión parcial de vapor de agua (kpa)

Y = Humedad absoluta (g agua/kg aire seco)

T<sub>BS</sub> = Temperatura de bulbo seco (°C)

T<sub>BH</sub> = Temperatura de bulbo húmedo (°C)

Para una cantidad de nabo de 685,42 g la relación de cantidad de nabo seco (M<sub>14</sub>) es 67,26 g.

Por lo tanto, para calcular la cantidad de masa de aire seco se utilizó la ecuación 4.22.

$$G_1 = \frac{67,26 \text{ g sólido seco } (10,74 - 0,155) \text{ (g agua/g sólido seco)}}{(30,00 - 14,90) \text{ g agua/kg aire seco}}$$

$$G_1 = 47,15 \text{ kg aire seco}$$

Para calcular la masa de agua evaporada, se tomó en cuenta la ecuación 4.23 citada por (Valiente, 2002).

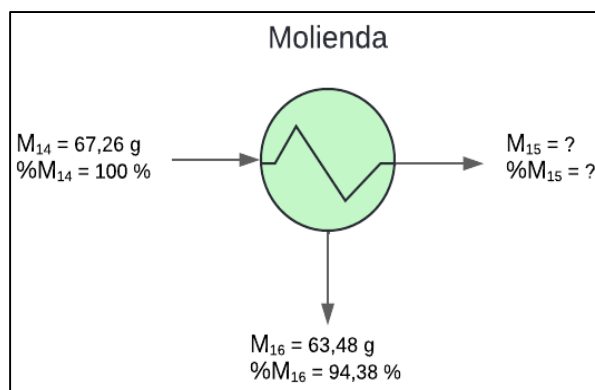
$$G_2 = (X_{M13} - X_{M14}) * m_{ss} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

$$G_2 = (10,74 - 0155) \text{ g agua/g sólido seco} * 58,40 \text{ g sólido seco}$$

$$G_2 = 10,59 \text{ g agua evaporada}$$

#### 4.10.7 Balance general de materia en la etapa de molienda

En la figura 4.35, se muestra el balance de materia en la etapa de molienda el cual se realizó con 67,26 g de nabo seco y terminado el proceso se obtuvo 63,48 g.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.35:** Etapa de molienda

#### ***Balance general de materia en la etapa de molienda***

$$M_{14} = M_{15} + M_{16} \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Despejando  $M_{15}$  de la ecuación 4.24:

$$M_{15} = M_{14} - M_{16}$$

$$M_{15} = 67,26 \text{ g} - 63,48 \text{ g}$$

$$M_{15} = 3,78 \text{ g pérdida en la etapa de molienda}$$

Cantidad de porcentaje de pérdida en la etapa de molienda

$$\frac{M_{14}}{\%M_{14}} = \frac{M_{15}}{\%M_{15}}$$

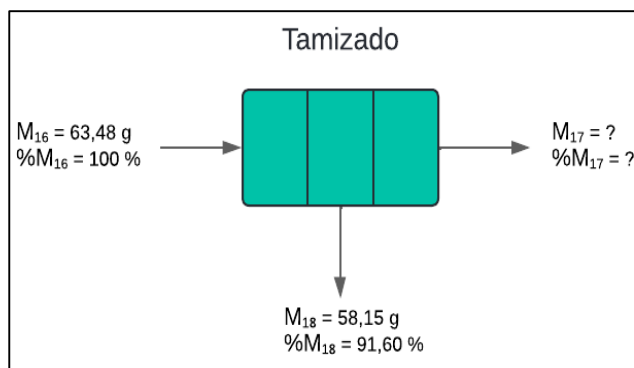
$$\%M_{15} = \frac{M_{15} * \%M_{14}}{M_{14}}$$

$$\%M_{15} = \frac{3,78 \text{ g} * 100\%}{67,26 \text{ g}}$$

$\%M_{15} = 5,62 \%$  pérdida en la etapa de molienda

#### 4.10.8 Balance general de materia en la etapa de tamizado

En la figura 4.36, se muestra el balance de materia en la etapa de tamizado el cual se realizó con 63,48 g de nabo molido. Utilizando el tamizador (0,25 mm), una vez terminado el proceso se obtuvo 58,15 g de harina de nabo.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.36:** Etapa de tamizado

#### **Balance general de materia en la etapa de tamizado**

$$M_{16} = M_{17} + M_{18}$$

Ecuación 4.25

Despejando  $M_{17}$  de la ecuación 4.25:

$$M_{17} = M_{16} - M_{18}$$

$$M_{17} = 63,48 \text{ g} - 58,15 \text{ g}$$

$M_{17} = 5,33 \text{ g}$  pérdida en la etapa de tamizado

Cantidad de porcentaje de pérdida en la etapa de tamizado

$$\frac{M_{16}}{\%M_{16}} = \frac{M_{17}}{\%M_{17}}$$

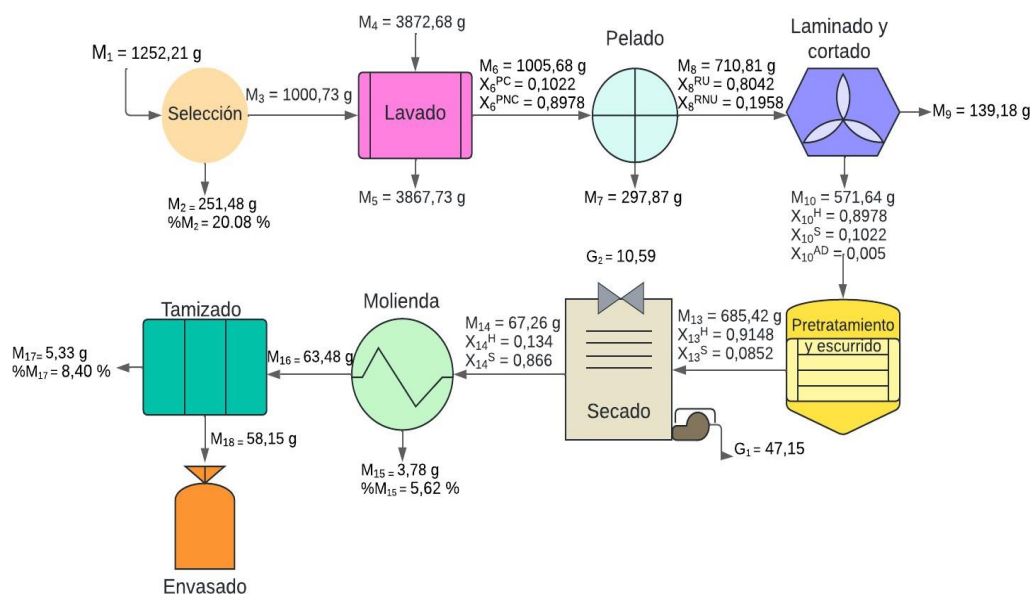
$$\%M_{17} = \frac{M_{17} * \%M_{16}}{M_{16}}$$

$$\%M_{17} = \frac{5,33 \text{ g} * 100\%}{63,48 \text{ g}}$$

$\%M_{17} = 8,40 \%$  pérdida en la etapa de tamizado

#### 4.11 Resumen general del balance de materia en el proceso de obtención de harina de nabo

En la figura 4.37, se muestra el resumen general del balance de materia para la obtención de harina de nabo.



Fuente: Elaboración propia

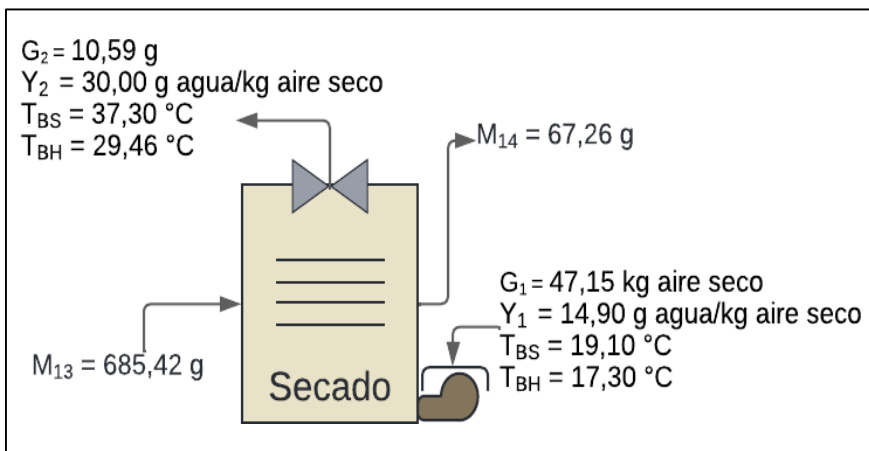
**Figura 4.37:** Resumen general del balance de materia para la obtención de harina de nabo

#### 4.12 Balance de energía para la obtención de harina de nabo

El balance de energía para la obtención de harina de nabo se realizó en el proceso de secado, molienda y tamizado.

#### 4.12.1 Balance de energía en la etapa de secado

En la figura 4.38, se muestra el balance de energía en la etapa de secado de las muestras de nabo en solución de ácido cítrico (1%) tomando en cuenta los factores: Temperatura (50°C), corte (0.3cm), velocidad de aire (5.0m/s).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.38:** Balance de energía en la etapa de secado

Balance combinado de materia y energía en el proceso de secado, se describe en la ecuación 4.26, según (Valiente, 2002):

$$M_{13} \cdot H_{13} + G_1 \cdot H_{G1} + Q_p = M_{14} \cdot H_{14} + G_2 \cdot H_{G2} \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Donde las variables:

$G_1$  = Cantidad de aire seco de entrada (kg aire seco/h)

$G_2$  = Cantidad de masa de agua evaporada (g)

$H_{13}$  = Entalpía del nabo a la entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

$H_{14}$  = Entalpía del nabo en la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

$H_{G1}$  = Entalpía del aire seco de entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

$H_{G2}$  = Entalpía del agua evaporada en la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

$Q_p$  = Calor aportado al sistema (kJ)

$M_{13}$  = Cantidad de nabo a la entrada del secador (g)

$M_{14}$  = cantidad de nabo seco a la salida del secador (g)

Reemplazando variables en la ecuación 4.26, se obtiene la ecuación 4.27:

$$M * H_{13} + G * H_{G1} + Q_p = M * H_{14} + G * H_{G2} \quad \text{Ecuación 4.27}$$

Despejando  $Q_p$  de la ecuación 4.27 se obtiene la ecuación 4.28:

$$Q_p = M * H_{14} + G * H_{G2} - M * H_{13} - G * H_{G1} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Ordenando las variables de la ecuación 4.28 se obtiene la ecuación 4.29:

$$Q_p = G(H_{G2} - H_{G1}) + M(H_{14} - H_{13}) \quad \text{Ecuación 4.29}$$

Para calcular la entalpía del aire a la entrada y salida del secador se toma en cuenta la ecuación 4.30 citada por (Sing & Heldman, 2009).

$$H_a = C_s(T_a - T_0) + Y * L \quad \text{Ecuación 4.30}$$

Donde:

$C_s$  = Calor húmedo (kJ/kg aire seco °C)

$T_a$  = Temperatura del aire (°C)

$T_0$  = Temperatura de referencia (°C)

$Y$  = Humedad absoluta (g agua/ kg aire seco)

$L$  = Calor latente de evaporación del agua (kJ/kg de agua)

Para calcular el calor húmedo del aire, se tomó en cuenta la ecuación 4.31 citada por (Sing & Heldman, 2009). Donde el calor específico del aire seco es 1,005 (kJ/kg aire seco °C) y el calor específico para el agua 1,88 (kJ/kg aire seco °C).

$$C_s = (1,005 + 1,88 * Y) \quad \text{Ecuación 4.31}$$

Reemplazando datos de la ecuación 4.31 en la ecuación 4.30 se obtiene la ecuación 4.32:

$$H_a = (1,005 + 1,88 * Y) (T_a - T_0) + Y * L \quad \text{Ecuación 4.32}$$

Según (Senamhi, 2018) la altitud de la ciudad de Tarija es de 1859 msnm. Entonces, para determinar la presión atmosférica en función de la altura utilizando la ecuación 4.33:

$$P_{atm} = 10,3297 \left( \frac{293 - 0,0065 * \text{altitud}}{293} \right)^{5,26} \quad \text{Ecuación 4.33}$$

$$P_{atm} = 10,3297 \left( \frac{293 - 0,0065 * 1859}{293} \right)^{5,26}$$

$$P_{atm} = 8,28 \text{ mH}_2\text{O} = \frac{73,55 \text{ mm Hg}}{1 \text{ mH}_2\text{O}} = 608,99 \text{ mmHg presión de Tarija}$$

Ajustando los datos de la ecuación 4.32 a presión de la ciudad de Tarija (608,99 mmHg), se obtiene que el calor específico del aire seco es 0,81 (kJ/kg aire seco °C) y el calor específico del agua es 1,51 (kJ/kg de agua °C) y por tanto se obtiene la ecuación 4.34:

$$H_a = (0,81 + 1,51 * Y) (T_a - T_0) + Y * L \quad \text{Ecuación 4.34}$$

Para determinar la entalpía del aire (L) a la entrada del secador se utilizó el (Anexo F) propiedades del agua saturada. Para lo cual, en base a la temperatura de bulbo seco 19,10 °C se determinó la entalpía (L) 2456,26 (kJ/kg de agua °C) a la entrada del secador de bandejas. Reemplazando en la ecuación 4.34:

Donde:

$$L = 2456,26 \text{ kJ/kg agua } ^\circ\text{C a } 19,10 ^\circ\text{C del Anexo F}$$

$$Y_{G1} = 0,0149 \text{ kg agua/kg aire seco}$$

$$T = 19,10 ^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0$$

Ajustando el valor L (2456,26 kJ/kg) a presión atmosférica de la ciudad de Tarija (608,99 mmHg), se obtiene el valor ajustado de 1968,21 kJ/kg de agua a 19,10 °C.

$$H_{G1} = (0,81 \text{ kJ/kg} + (1,51 \text{ kJ/kg} * 0,015 \text{ kg/kg}))(19,10 - 0) + (0,015 \text{ kg/kg} * 1968,21 \text{ kJ/kg})$$

$$H_{G1} = 45,43 \text{ kJ/kg aire seco}$$

Para determinar la entalpía del aire (L) a la salida del secador se utilizó el (Anexo F) propiedades del agua saturada. Para lo cual, en base a la temperatura de bulbo seco 37,30 °C se determinó la entalpía (L) 2413,15 (kJ/kg de agua °C) a la salida del secador de bandejas. Reemplazando L en la ecuación 4.34:

Donde:

$$L = 2413,15 \text{ kJ/kg agua } ^\circ\text{C a } 37,30 \text{ } ^\circ\text{C del Anexo F}$$

$$Y_{G2} = 0,03 \text{ kg agua/kg aire seco}$$

$$T = 37,30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0$$

Ajustando el valor L (2413,15 kJ/kg) a presión atmosférica de la ciudad de Tarija (608,99 mmHg), se obtiene el valor ajustado de 1933,66 kJ/kg de agua a 37,30 °C.

$$H_{G2} = (0,81 \text{ kJ/kg} + (1,51 \text{ kJ/kg} * 0,03 \text{ kg/kg}))(37,30 - 0) + (0,03 \text{ kg/kg} * 1933,66 \text{ kJ/kg})$$

$$H_{G2} = 89,91 \text{ kJ/kg aire seco}$$

Para calcular la entalpía del nabo, se tiene la ecuación 4.35:

$$H_P = C_P(T_P - T_0) + X_P C_{PX}(T_P - T_0) \quad \text{Ecuación 4.35}$$

Donde:



$C_P$  = Calor específico del producto (kJ/kg °C)

$T_P$  = Temperatura del producto (kg agua/kg sólido seco)

$X_P$  = Humedad del producto (kg agua/kg sólido seco)

$C_{PX}$  = Calor específico del agua (kJ/kg sólido seco)

Para calcular el calor específico de cualquier tipo de alimento, se tiene la ecuación 4.36 citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$C_{Pp} = (X_C * C_{Pc} + X_P * C_{Pp} + X_f * C_{Pf} + X_a * C_{Pa} + X_W * C_{Pw}) \quad \text{Ecuación 4.36}$$

Donde:

$C_{Pc} = 1,424$  (kJ/kg °C) = calor específico de los carbohidratos

$C_{Pp} = 1,549$  (kJ/kg °C) = calor específico de las proteínas

$C_{Pf} = 1,675$  (kJ/kg °C) = calor específico de las grasas

$C_{Pa} = 0,837$  (kJ/kg °C) = calor específico de las cenizas

$C_{Pw} = 4,187$  (kJ/kg °C) = calor específico del agua

$X_C$  = Fracción másica de los carbohidratos

$X_p$  = Fracción másica de la proteína

$X_f$  = Fracción másica de las grasas

$X_a$  = Fracción másica de las cenizas

$X_w$  = Fracción másica del agua

Reemplazando valores en la ecuación 4.36 se obtiene la ecuación 4.37:

$$C_{Pp} = (X_C * 1,424 + X_P * 1,549 + X_f * 1,675 + X_a * 0,837 + X_W * 4,187) \quad \text{Ecuación 4.37}$$

Para calcular el calor específico del nabo se tomó en cuenta los datos de la tabla 4.27 de datos extraídos del Anexo A.

**Tabla 4.27*****Datos de la composición fisicoquímica del nabo***

Componentes	Símbolo	Fracción másica
Carbohidratos	$X_c$	0,0824
Proteínas	$X_p$	0,0114
Grasa	$X_f$	0,001
Ceniza	$X_a$	0,0074
Humedad	$X_w$	0,8978

**Fuente:** Singh & Heldman, 2009

Por lo tanto, reemplazando datos de la tabla 4.27 en la ecuación 4.37 se obtiene:

$$C_{PM13} = (0,0824 \cdot 1,424 + 0,0114 \cdot 1,549 + 0,001 \cdot 1,675 + 0,0074 \cdot 0,837 + 0,8978 \cdot 4,187)$$

$$C_{PM13} = 3,9487 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.35 y reemplazando datos se obtiene la entalpía del nabo a la entrada del secador de bandejas:

$$H_{M13} = C_{PM13} (T_{M13} - T_0) + X_{M13} C_{PW} (T_{M13} - T_0)$$

$$H_{M13} = 3,9487 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} (19,10 - 0)^\circ\text{C} + 10,74 \text{ kg/kg} \cdot 4,187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (19,10 - 0)^\circ\text{C}$$

$$H_{M13} = 934,34 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Para calcular el calor específico de la harina de nabo, se tomó en cuenta los datos de la tabla 4.28 de datos extraídos de la composición fisicoquímica de la harina de nabo (Anexo A).

**Tabla 4.28*****Datos de la composición fisicoquímica de la harina de nabo***

Componentes	Símbolo	Fracción másica
Carbohidratos	$X_c$	0,7243
Proteínas	$X_p$	0,0782
Grasa	$X_f$	0,0117
Ceniza	$X_a$	0,0518
Humedad	$X_w$	0,134

**Fuente:** Singh & Heldman, 2009

Por lo tanto, reemplazando datos de la tabla 4.38 en la ecuación 4.37 se obtiene:

$$C_{PM14} = (0,7243 \cdot 1,424 + 0,0782 \cdot 1,549 + 0,0117 \cdot 1,675 + 0,0518 \cdot 0,837 + 0,134 \cdot 4,187)$$

$$C_{PM14} = 1,7765 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.35 y reemplazando datos se obtiene la entalpía del nabo a la entrada del secador de bandejas:

$$H_{M14} = C_{PM14} (T_{M14} - T_0) + X_{M14} C_{PW} (T_{M14} - T_0)$$

$$H_{M14} = 1,7765 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} (37,30 - 0)^\circ\text{C} + 0,155 \text{ kg/kg} \cdot 4,187 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} (37,30 - 0)^\circ\text{C}$$

$$H_{M14} = 90,47 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Tenemos los siguientes datos:

$$H_{M14} = 90,47 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$H_{M13} = 934,32 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$H_{G1} = 45,43 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$H_{G2} = 89,91 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$G = 47,15 \text{ kg aire seco}$$

$$M = 67,26 \text{ g} = 0,06726 \text{ kg sólido seco}$$

Reemplazando datos en la ecuación 4.29 se obtiene:

$$Q_P = 47,15 \text{ kg} (89,91 \text{ kJ/kg} - 45,43 \text{ kJ/kg}) + 0,06726 \text{ kg} (90,47 \text{ kJ/kg} - 934,32 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_P = 2040,47 \text{ kJ}$$

$$Q_P = 489,71 \text{ kcal}$$

El calor necesario para el proceso de secado de las muestras de nabo es de 489,71 kcal para obtener una cantidad de 67,26 g de nabo seco.

#### 4.12.2 Balance de energía en la etapa de molienda

Para el balance de energía en la etapa de molienda se utilizó el molino eléctrico con una potencia de 200 W durante 0,204 horas.

Para determinar la energía eléctrica necesaria se utilizó la ecuación 4.38 (Rodríguez, 2016)

$$E = P * \theta \quad \text{Ecuación 4.38}$$

Donde:

E = Energía eléctrica (W/h)

P = Potencia

$\theta$  = Tiempo (horas)

Así mismo  $1 \text{ kcal/h} = 1,163 \text{ W}$

Reemplazando valores en la ecuación 4.38 se obtiene:

$$E = 200 \text{ W} * \frac{1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{1,163 \text{ W}} * 0,204 \text{ h}$$

E = 35,08 kcal energía eléctrica necesaria para la etapa de molienda del nabo seco

#### 4.12.3 Balance de energía en la etapa de tamizado

Para el balance de energía en la etapa de tamizado, se utilizó el tamiz vibratorio con una potencia de 80 W durante 0,17 horas.

Reemplazando valores en la ecuación 4.38 se obtiene:

$$E = 80 \text{ W} * \frac{1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{1,163 \text{ W}} * 0,17 \text{ h}$$

E = 11,69 kcal energía eléctrica necesaria para la etapa de tamizado

**CAPÍTULO V**

**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**

## 5.1 Conclusiones

- En base a los resultados de las propiedades físicas del nabo presenta un promedio: peso 143,94 g; porción comestible 70,68 %; porción no comestible 29,32 %; diámetro longitudinal 56,19 mm; diámetro ecuatorial 69,24 mm; rodajas útiles 80,42 %; rodajas no útiles 19,58 %.
- En base a los resultados de los análisis fisicoquímicos del nabo contiene: humedad 89,78 %; fibra 1,09 %; ceniza 0,74 %; grasa 0,10 %; proteína 1,14%; hidratos de carbono 8,24 % y valor energético 38,42 kcal/100g.
- En base a los resultados de los análisis microbiológicos del nabo contiene: Coliformes totales  $6,2 \times 10^2$  UFC/g; Escherichia coli  $<1,0 \times 10^1$  (\*) UFC/g; mohos y levaduras  $2,7 \times 10^2$  UFC/g. En donde (\*) = No se observa desarrollo de colonias.
- Realizada la evaluación sensorial y las curvas de variación del contenido de humedad en función del tipo de corte y de los tratamientos, se eligió la muestra (N01) tratada en solución con ácido cítrico con tipo de corte laminado. Así mismo, se eligió la muestra sin tratamiento (N05) con la finalidad de determinar si existen diferencias durante el proceso de secado.
- Aplicado el diseño factorial  $2^3$  en la etapa de secado para las muestras de nabo en solución con ácido cítrico y sin tratamiento se pudo establecer que entre las variables: tipo de corte (A), temperatura (B) y velocidad del aire (C), tras realizar en el programa Statgraphics.

- En base a la influencia de las variables: corte laminado A<sub>1</sub> (0,2 cm) a A<sub>2</sub> (0,3 cm), temperatura B<sub>1</sub> (50 °C) a B<sub>2</sub> (60 °C) y velocidad del aire C<sub>1</sub> (5,0 m/s) a C<sub>2</sub> (5,5 m/s), las muestras tratadas en solución con ácido cítricos muestran una reducción en el tiempo de secado y en el contenido de humedad en base seca, donde se observó que la muestra HA2 a tipo corte 0,3 cm, temperatura 50,0°C y velocidad del aire 5,0 m/s a tiempo de 105 minutos presenta 0,04 (kg agua/kg sólido seco). Así mismo, la variación de los factores tipo de corte, temperatura y velocidad del aire en las muestras sin tratamiento nos es muy significativa ya que no afecta en el tiempo de secado ni en el contenido de humedad en base seca.
- Realizado el análisis fisicoquímico de la harina de nabo presenta: humedad 13,40 %; fibra 9,10 %; ceniza 5,18 %; grasa 1,17 %; proteína 7,82 %; hidratos de carbono 72,43 % y valor energético 332,00 kcal/100g.
- Realizado el análisis microbiológico de la harina de nabo presenta: Coliformes totales  $<1,0 \times 10^1$  (\*) UFC/g; Escherichia coli  $<1,0 \times 10^1$  (\*) UFC/g; Mohos y levaduras  $<1,0 \times 10^1$  (\*) P/A en 25 g. En donde (\*) = No se observa desarrollo de colonias.
- Realizado el balance de materia se determinó que a partir de 1000,73 g de nabo se obtiene 58,15 g de harina de nabo. Así mismo, en base al balance de energía se determinó que la cantidad de calor necesario para el proceso de obtención de harina de nabo es de 489,71 kcal para obtener una cantidad de 58,15 g de harina de nabo.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda incorporar la harina de nabo como materia prima en el mercado local, para que sea empleada en la elaboración de nuevos productos alimenticios y se puedan aprovechar sus propiedades nutricionales.
- Se recomienda incentivar a industrias alimentarias para la creación de productos innovadores que utilicen harina de nabo, considerando una aceptación sensorial y comercial.
- Se recomienda sugerir a los gobiernos locales la implementación de programas educativos que promuevan el consumo de productos a base de nabo debido a sus beneficios, fomentando así la innovación en este sector