

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A lo largo de los años, el cultivo del brócoli para el mercado y consumo humano fue creciendo y mejorando, en la actualidad su consumo está muy difundido por todos los países de clima templado, en especial este cultivo es muy apreciado en Europa, Francia, Italia, Inglaterra y Holanda como también es muy apreciada en Europa occidental. El introducir una o varias especies Híbridas de crucíferas (Brócoli) resultan desde cualquier punto de vista una buena alternativa, no solo para el productor, sino también para el consumidor donde se puede aprovechar las condiciones climáticas, para establecer áreas experimentales; estudiando el comportamiento, tolerancia a insectos, rendimiento y mercado (FAO, 2013).

El brócoli es una de las hortalizas producida en todo el mundo, está entre las consumidas como la papa, tomate, lechuga, cebolla y otras hortalizas, en su rendimiento por hectárea se logra una producción de medio a alto. Sin embargo en los últimos años ha tomado gran importancia a nivel mundial en la industria como también en el mercado internacional, a través de varias investigaciones las personas lo vieron muy importante para el consumo humano por sus propiedades nutritivas que aportan a la salud de la persona, en el campo la diversidad de los ambientes permite que el cultivo se desarrolle con excelencia con temperaturas altas y bajas existen varias investigaciones que se logró Hibridar variedades de excelencia y resistentes a las épocas del año (Zenteno, 2020).

Según (Condori, 2016) “el consumo bajo de hortalizas se debe a muchos factores, por ejemplo, a la falta de información de las propiedades nutritivas. Por lo tanto, urge la necesidad de nuevas estrategias para incrementar su consumo” (Pág. 1).

Por las condiciones agroecológicas del valle central de Tarija, el brócoli se desarrolla bien en ciertas partes, en donde realizaron pocas investigaciones

en lo referido al desarrollo del cultivo del brócoli con aplicaciones de fertilizantes inorgánicos y orgánicos estos estudios contribuirán para mejorar la producción del agricultor y mantener una fertilización equilibrada y evitar que las áreas de suelos sean degradadas (Cámara Forestal de Bolivia, 2015).

Según la AOPEB, (2016) manifiesta que “ecológicamente y con respaldo de los sistemas participativos de garantía, se producen brócoli en los municipios de: Achocalla Calamarca, Patacamaya, Bustillos y Sica sica (La Paz); Chayanta (Norte de Potosí); Samaipata (Santa Cruz); Uriondo y Padcaya (Tarija)” (Pág. 62).

En el valle central de Tarija, se ha ido cultivando hortalizas desde siempre, constituyéndose en una fuente alimenticia de mucha importancia, por tanto, el agricultor viene cultivando tradicionalmente diversidad de hortalizas, siendo las más importantes las hortalizas de hoja como repollo, lechuga, acelga; hortaliza de flores, brócoli, coliflor y alcachofa; hortalizas como tomate, cebolla, pimentón de fruto como arveja, garbanzo, haba, zapallito (Aguanta, 2017).

1.2 Justificación

- Por medio de este trabajo se pretende transformar el brócoli en harina como una alternativa de un nuevo producto alimenticio por su alto contenido de fibra dietaría y antioxidantes, logrando efectos beneficiosos para la salud previendo el estreñimiento, ayuda en el proceso de limpieza del organismo.
- En la actualidad el brócoli es una hortaliza muy importante por su valor nutritivo, las personas la consumen de forma natural en jugos y ensaladas, pero tiene la limitante de ser utilizada para consumo, debido al olor y sabor característico a hortaliza. Por lo tanto, su transformación de esta hortaliza en harina será una alternativa para la aplicación en panadería, gastronomía, etc. con la finalidad de aumentar la demanda del brócoli y

disminución de pérdidas de brócoli en el mercado en la provincia Cercado departamento de Tarija.

- La importancia de incorporar harina de brócoli en programas nutricionales locales, como la canasta alimentaria o los desayunos escolares, puede tener un impacto positivo en la salud pública. Al proporcionar alimentos más nutritivos, se pueda promover hábitos alimenticios más saludables desde temprana edad.
- Este trabajo busca potenciar el valor del brócoli, no solo como un alimento saludable, sino también como un recurso natural que puede mejorar la economía de las familias productoras y de la economía de la provincia Cercado.

1.3 Objetivos

En el presente trabajo de investigación, se tienen los siguientes objetivos:

1.3.1 Objetivo general

Plantear una metodología experimental para la obtención de harina de brócoli mediante el proceso de secado por aire caliente; con el fin de obtener un producto de calidad nutricional en la provincia Cercado del departamento de Tarija.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y minerales del brócoli con el fin de conocer su composición nutricional.
- Determinar el pretratamiento que debe aplicarse para preservar las características del brócoli al transformarlo en harina.

- Identificar las variables de control del proceso de secado por aire caliente para tener las condiciones a nivel experimental.
- Aplicar el diseño experimental en el proceso de secado, con la finalidad de establecer los factores que tienen mayor influencia en las muestras de brócoli para obtener harina.
- Establecer la influencia de las variables temperatura, velocidad de aire, corte en el proceso de secado de las muestras de brócoli.
- Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y minerales del producto terminado para conocer su composición nutricional.
- Realizar el balance de materia y energía en el proceso con la finalidad de obtener el rendimiento del proceso.

1.4 Planteamiento del problema

Hoy en día se puede observar que, durante las temporadas de cosecha en la provincia Cercado del departamento de Tarija, existe una gran oferta de brócoli que reduce los precios y ganancias para las familias productoras de brócoli. Así mismo, enfrenta desafíos en términos de demanda y pérdidas en el mercado ya que el consumo por parte de la población es escaso, debido al sabor característico y la falta de información sobre sus propiedades nutricionales del brócoli. En el mercado local se observa que no existe harina de brócoli como una manera de aprovechar este vegetal aplicándolo en panadería, repostería y gastronomía logrando así, promover hábitos alimenticios que contribuya en la salud de las personas además formar parte de programas nutricionales de la provincia cercado como ser; canasta

alimentaria, desayuno escolar y otros, mejorando las ganancias de los productores de brócoli y preservar la vida útil del brócoli.

1.5 Formulación del problema

¿Cuál será la metodología experimental a ser aplicada, que permita obtener harina de brócoli, aplicando el proceso de secado con aire caliente con la finalidad de obtener un producto de calidad nutricional para la población de la provincia Cercado del departamento de Tarija?

1.6 Objeto de estudio

Obtención de harina de brócoli mediante el proceso de secado por aire caliente.

1.7 Campo de acción

El campo de acción propuesto para el presente trabajo se presenta 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 que se ejecutó el trabajo de investigación fue en las gestiones 2023 - 2024.
- **Institución:** Las instituciones donde se desarrolló el trabajo de investigación son las siguientes: Laboratorio de Taller de Alimentos (LTA), Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA).

1.8 Hipótesis

Mediante la aplicación del proceso de secado por aire caliente se logrará obtener harina de brócoli, con calidad nutricional en la provincia Cercado del departamento de Tarija.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Historia de harina vegetal

Según (Sifre et al, 2018) menciona los molinos de mano más antiguos se remontan al Neolítico, una fase económica caracterizada por la extensión de la agricultura. Aunque siguieron moliéndose las semillas de recolección, el producto principal paso a ser los cereales. Es muy probable que la molienda del trigo para producir harina se hiciera primitivamente, por medio de majaderos y de morteros, o machacándolo entre dos piedras planas.

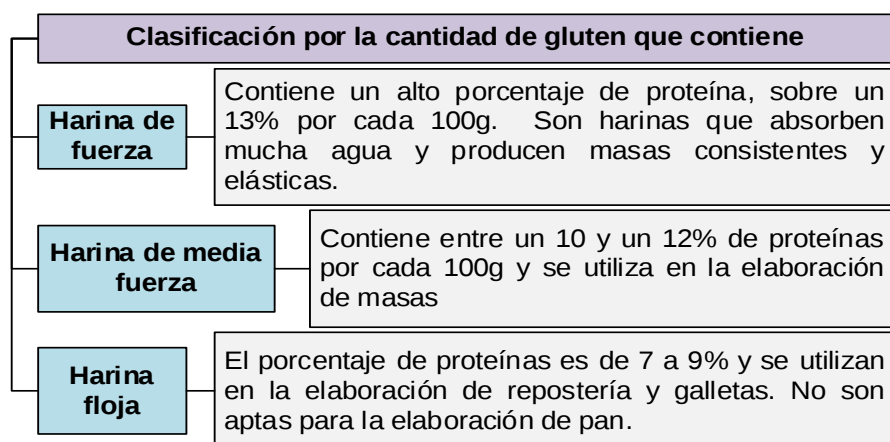
La utilización y el consumo de harinas de vegetales en la industria alimentaria se ha expandido debido al aumento de población que requiere seguir una dieta estricta por temas de salud o que buscan dieta más sana, se espera que esta tendencia continúe en el futuro (Woomer y Adedeeji, 2020).

2.2 Definición de harina de vegetales

Según (Requena, 2013), “se define como harina, al producto finalmente triturado, obtenido del grano o de la mezcla de granos como (cebada, trigo, centeno, maíz) y de otros alimentos ricos en almidón como arroz, tubérculos y legumbres” (Pág. 2). De acuerdo (Andrade, 2021) “la harina de vegetal es aquella que se obtiene de la molienda de tubérculos secos, frutas y leguminosas; limpias, deshidratadas o a la remoción total o parcial del aceite y cuya granulometría es ajustable” (Pág. 9).

2.3 Clasificación de las harinas de vegetales

Según (Borges et al, 2003) “la harina con alta uniformidad de granulometría promueve una mejor calidad sensorial de textura, sabor y apariencia visual al producto final, ya que absorbe el agua homogéneamente, promueve una cocción uniforme” (Pág. 311). En la figura 2.1, se muestra la clasificación de las harinas según la cantidad de contenido de gluten.

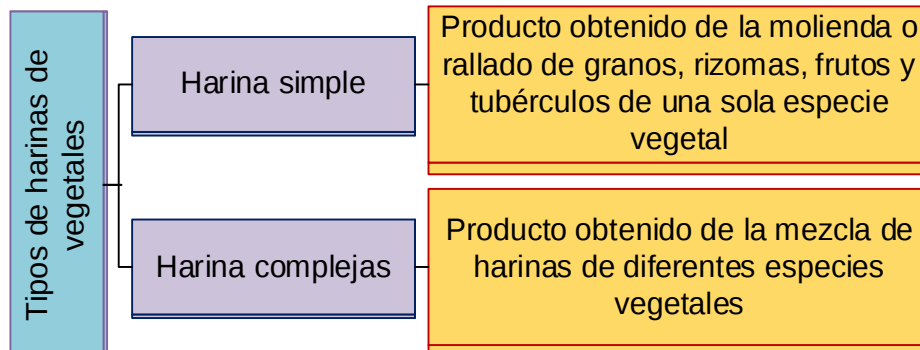


Fuente: Vicente, 2020

Figura 2.1: Clasificación de harina por la cantidad de gluten que contiene

2.3.1 Tipos de harina de vegetal

En la figura 2.2, se muestra la clasificación de las harinas vegetales según sus características en dos tipos de harinas:



Fuente: CNNPA, 1978

Figura 2.2: Tipos de harinas de vegetales

2.4 Composición fisicoquímica de harina de brócoli

La harina de brócoli tiene una composición química y propiedades fisicoquímicas. Además, contienen una importante cantidad de aminoácidos y ácidos grasos. Así, estas harinas tienen potencial para ser utilizadas como complementos alimenticios (Campas et al, 2009. Pág. 9). En la tabla 2.1, se

indica los datos en porcentaje sobre las características fisicoquímicas de la harina de brócoli.

Tabla 2.1

Características fisicoquímicas de harina de brócoli

Parámetros	Unidad	Resultados
Humedad total	(%)	5,64
Materia seca	(%)	94,36
Proteína	(%)	20,67
Fibra	(%)	15,29
Grasa	(%)	2,03
Ceniza	(%)	8,57
Materia orgánica	(%)	91,43

Fuente: SETLAB, 2022

2.5 Propiedades nutricionales de harina de brócoli

Según (Delgado, 2020) menciona que “la sustitución parcial de harina de brócoli en una pasta alimenticia influye significativamente en las propiedades y genera un mayor aporte en minerales como: fibra, cenizas, y en menor cantidad grasa” (Pág. 34). Por otro lado, la harina de brócoli tiene una dieta rica en fibra nos protege contra la ECC (Enfermedades Cardiovasculares y Diabetes), también da un efecto de saciedad, lo cual nos ayuda a controlar el peso). Además, una dieta baja en grasa puede contribuir a prevenir el aumento de peso y reducir el riesgo de obesidad, un factor importante e independiente de las enfermedades no transmisibles (Delgado, 2020).

2.6 Propiedades microbiológicas de harina de brócoli

En la tabla 2.2, se indica los datos en porcentaje sobre las características microbiológicas de harina de brócoli.

Tabla 2.2

Características microbiológicas del brócoli

Microrganismos	Unidad	Resultado
Coliformes totales	UFC/g	1428
Coliformes fecales	UFC/g	298
Echerichia coli	UFC/g	Ausencia
Aerobios mesófilos	UFC/g	805x102
Estafilococos P	UFC/g	Ausencia
Mohos y Levaduras	UFC/g	Ausencia

Fuente: SETLAB, 2022

2.7 Aplicaciones culinarias de harina de brócoli

Según (Domínguez et al, 2010) menciona que” los subproductos o coproductos del brócoli son una buena fuente de ingredientes bioactivos para la industria alimentaria, con la ventaja añadida de la reducción de problemas ambientales” (Pág. 383). Se empezó utilizando la tecnología de harinas compuestas para demostrar el procedimiento de mezclar harina de trigo con harinas de cereales y leguminosas para hacer panes y galletas. Sin embargo, la mezcla de harinas de harinas de otros cereales, de raíces y tubérculos, de leguminosas u otras materias primas, puede también considerarse como una tecnología de harinas compuestas (FAO, 1995).

2.8 Generalidades biológicas del brócoli

A continuación, se detalla las características biológicas del brócoli:

2.8.1 Características físicas del brócoli

Las cabezas son de color verde de varias tonalidades. Existen también variedades de brócoli cuyas cabezas son de color púrpura y de distintas formas. La cabeza principal o pella se forma en la parte central asentada en el tallo de la planta y al ser cosechada surgen pellas secundarias laterales de diámetros más chicos e irregulares (Zamora, 2016).

El brócoli tiene un tallo principal cuyo diámetro varía entre dos y seis cm y su longitud entre 20 y 60 cm. El tallo principal presenta entrenudos cortos con un hábito de desarrollo intermedio entre la forma roseta (coliflor) y caulinar (col de brúcelas) (Chiluisa, 2014).

2.8.2 Clasificación taxonómica del brócoli

Su categoría taxonómica de reino corresponde al reino plantae. Debido a que el brócoli es una planta que se propaga por medio de semillas, las cuales están cubiertas por una hoja fértil, pertenecen a la división fanerógama magnaliophyta. clasificadas en el orden de las brassicales y la familia de brassicaceae del género brassica (Pérez, 2013). En la tabla 2.3, se presenta la clasificación taxonómica del brócoli en estado natural.

Tabla 2.3

Clasificación taxonómica del brócoli

Reino	Plantae
División	Fanerógama magnoliophyta
Clase	Dicotiledonea magnoliopsida
Orden	Brassicales
Familia	Brassicaceae (Crucíferas)
Genero	Brassica
Especie	Brassica oleracea
Nombre científico	Brassica oleracea variedad Italica

Fuente: Acosta et al, 2018

2.8.3 Morfología botánica de la flor de brócoli

Es una planta de la familia de las Brasicáceas, a la que pertenecen otras plantas comestibles como el repollo o coliflor. Su nombre botánico es Brassica oleracea, variedad itálica. Es cultivado por sus yemas florares de color verde,

que forman una cabeza que constituye la parte comestible (González, 2013). En la figura 2.2, se muestra la morfología botánica del brócoli.

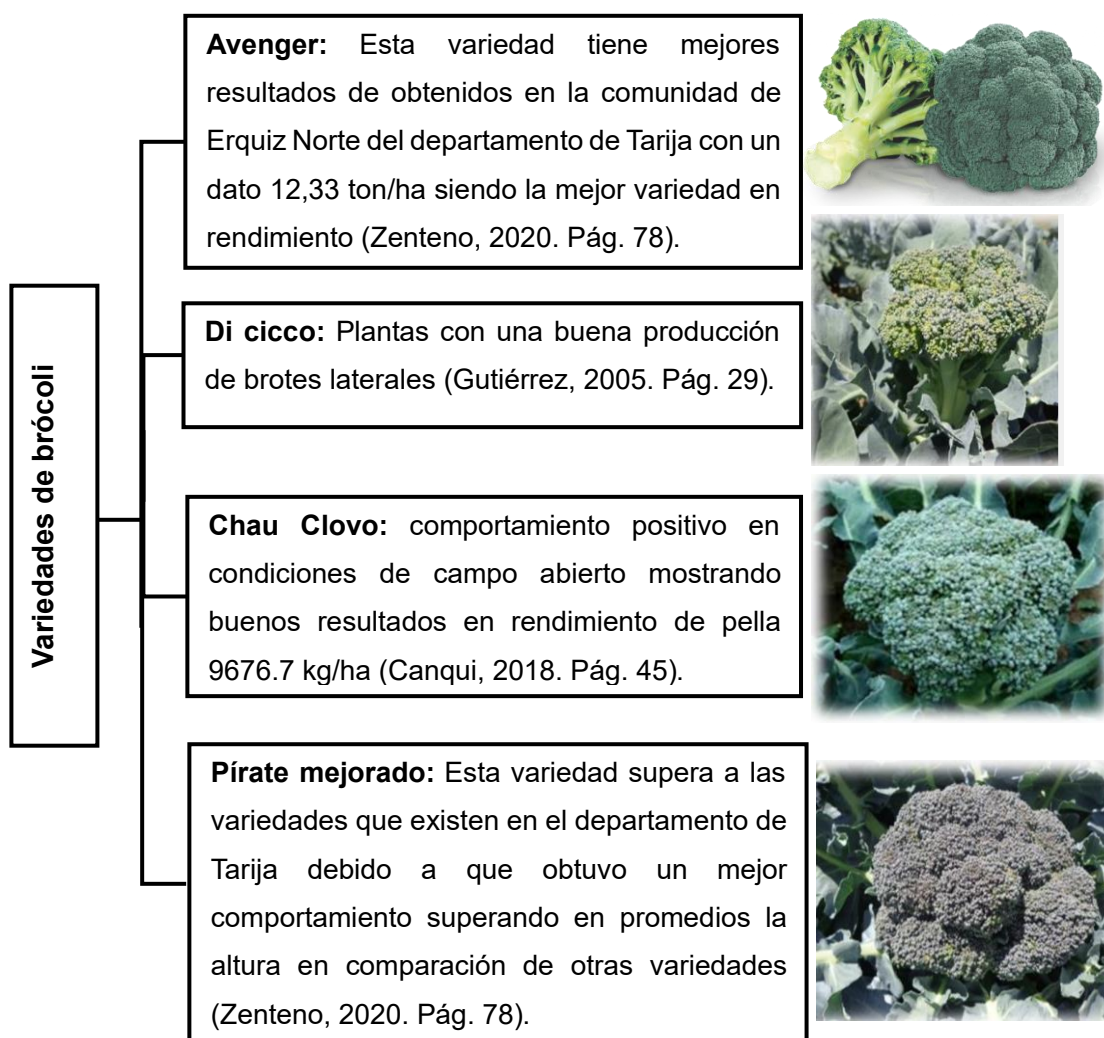


Fuente: Vázquez et al, 2020

Figura 2.3: Morfología botánica del brócoli

2.8.4 Variedades de brócoli

En la figura 2.3, se exponen las diferentes variedades de brócoli producidas en el departamento de Tarija.



Fuente: Zenteno, 2020

Figura 2.4: Variedades de brócoli

2.8.5 Composición fisicoquímica del brócoli

El brócoli es un vegetal importante y valioso debido a su abundante fuente de vitaminas, minerales y beneficios fitoquímicos, así como su particular función anticancerígena (Wang et al, 2012. Pág. 735). En la tabla 2.4, se presentan la composición fisicoquímicos que contiene el brócoli fresco.

Tabla 2.4

Composición fisicoquímica del brócoli

Parámetros	Unidad	Valores
Porción comestible	g	100,0
Agua	g	90,3
Energía	Kcal	38,0
Proteína	g	4,4
Grasas	g	0,9
Carbohidratos	g	1,8
Almidón	g	0,0
Azúcares	g	1,8
Fibra	g	2,6

Fuente: FEN, 2018

2.8.6 Propiedades nutricionales del brócoli

En la tabla 2.5, se presenta la composición nutricional del brócoli fresco.

Tabla 2.5

Composición nutricional del brócoli fresco

Nutriente	Unidad	Valor
Proteína	g	5,45
Lípidos	g	0,30
Glúcidos	g	4,86
Vitamina A	UI	3,50
Vitamina B1	mg	100,00
Vitamina B2	mg	210,00
Vitamina C	mg	118,00
Calcio	mg	130,00
Fosforo	mg	76,00
Hierro	mg	1,30
Calorías	Cal	42-32

Fuente: Zamora, 2014

2.8.7 Importancia y beneficios del brócoli para la salud alimentaria

Se recomienda el consumo de vegetales del género de Brassica para disminuir la incidencia de cáncer humano. Estudios epidemiológicos y experimentos con

animales demuestran que estos vegetales contienen propiedades anticancerígenas debido a presencia de compuestos nutritivos y no nutritivos que inhiben el cáncer (Salunkhe & Kadam 1995).

2.9 Secado de los alimentos

El secado es una operación que se encuentra en casi todos los sectores industriales, desde los agrícolas a los farmacéuticos. Es seguramente la operación unitaria más antigua, común, diversa e intensiva energéticamente (Espinoza et al, 2011). El secado es un proceso de conservación de alimentos que impide cualquier actividad microbiana o enzimática al eliminar una gran cantidad de agua en ellos. Surgió a partir de la necesidad de consumir, fuera de su época de cosecha o producción, alimentos susceptibles a pudrirse debido a su composición química (Pájaro et al, 2017).

2.10 Factores que intervienen en el proceso de secado

Los factores que intervienen en el proceso de secado se presentan a continuación:

2.10.1 Temperatura del aire

Para elegir la temperatura considera la especie que se va a someter al secado. Estos niveles diversos de temperatura se mantienen durante el proceso técnico de secado. Durante el secado se forma un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, mismo que va reduciéndose conforme disminuye el contenido de humedad (Ruiz, 2016).

2.10.2 Humedad relativa del aire

La humedad del aire se define como, a razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Se expresa en porcentaje (%) y a medida que

se incrementa la temperatura aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa (Ruiz, 2016).

2.10.3 Velocidad del aire

Tiene dos funciones importantes, la primera transmitir la energía necesaria para calentar el agua contenida en el material facilitándose su evaporación, y la segunda, transportar la humedad saliente del material. Para obtener un secado rápido y uniforme es recomendable una circulación de aire regular (Ruiz, 2016)

2.10.4 Contenido de humedad de alimentos

El contenido de humedad en un alimento es un índice de estabilidad del producto, puesto que existe una relación entre el contenido de agua en los alimentos y su capacidad de deterioro (Luna, 2014. Pág. 1). El contenido de humedad se puede expresar de la siguiente manera:

- **Humedad en base húmeda:** Según (Martines & Lira, 2010. Pág. 2), “es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total”.

$$H_{BH} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} \times 100 = \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido humedad}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

- **Humedad en base seca:** Según (Martines & Lira, 2010. Pág. 2), afirma que “el contenido de humedad en base seca es el cociente entre la masa de agua en el material y su masa seca”.

$$H_{BS} = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_{ss}} = \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

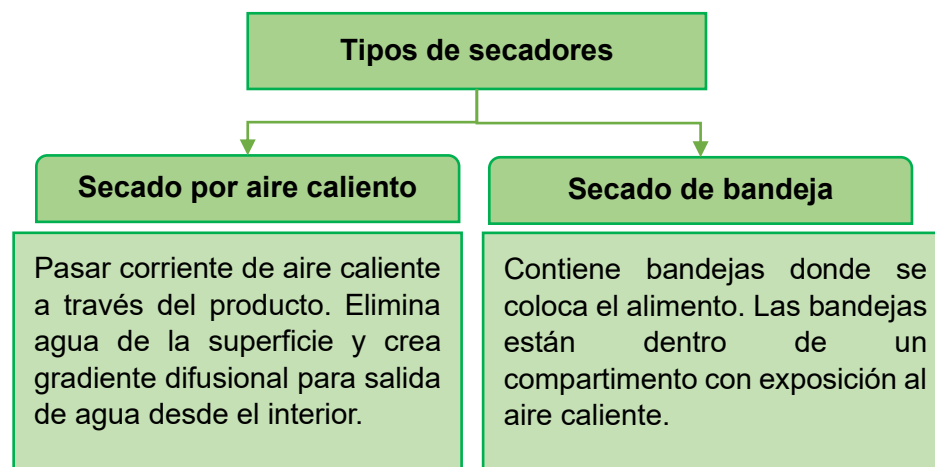
$$m_{ss} = m_i(1 - H_{BH}) = \text{kg sólido seco} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

2.10.5 Área de superficie del alimento

Es preferible subdividir el alimento en piezas pequeñas para acelerar la transmisión de calor y reducir el tiempo de secado ya que es más fácil transmitir calor a un cuerpo pequeño (Rodiles & Zamora, 2020. Pág.2). Según (Vega et al, 2009), menciona que “al exponer mayor área superficial facilita la transferencia de masa y calor, además de que las partículas pequeñas reducen la distancia que el calor recorre a fin de llegar a la superficie y escaparse” (Pág. 97).

2.11 Tipos de secadores

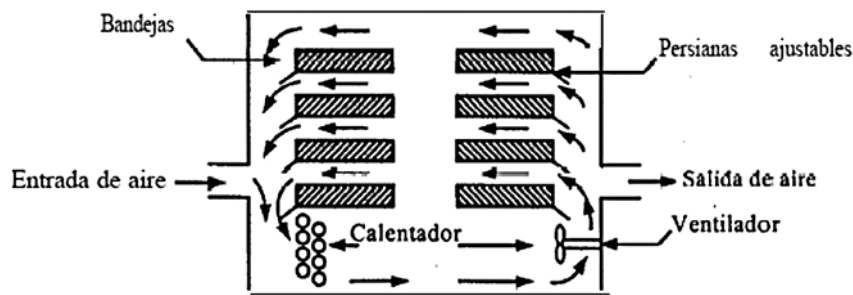
De acuerdo con este segundo criterio se distinguen los secadores directos que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado, los secadores indirectos en los que el calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor, secadores dieléctricos y secadores por radiación (Maupoey et al, 2016). En la figura 2.5, se presenta los tipos de secadores.



Fuente: Contreras & Martins, 2008

Figura 2.5: Tipos de secadores

En la figura 2.6, se muestra detalladamente un secador de bandejas:



Fuente: Condori, 2016

Figura 2.6: Secador de bandejas

2.12 Cinética de secado

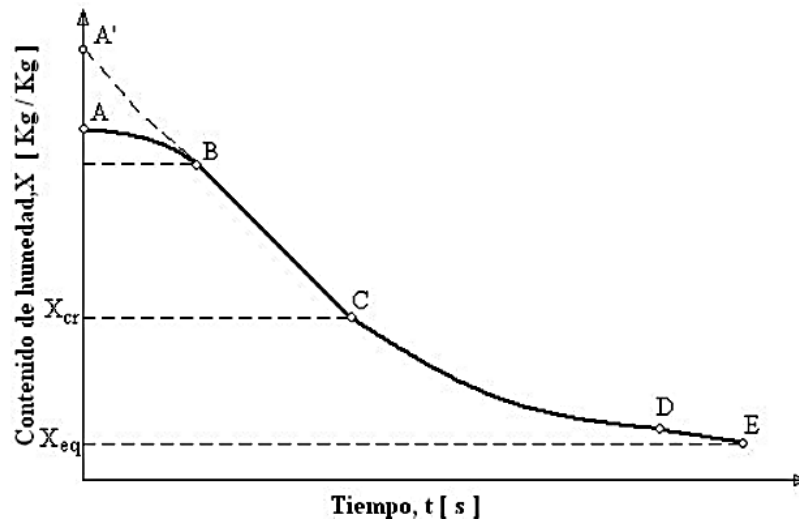
La cinética de secado de un material relaciona la variación del contenido de agua del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo. Son varios los factores que influyen sobre la cinética, entre los cuales se encuentran; la humedad del aire de secado, el mismo contenido de agua del producto por secar, como también las dimensiones y diseño del equipo de secado (Velázquez, 2007).

La cinética de secado muestra la variación de la humedad del material con el tiempo. Las curvas de cinética de secado dan idea del tiempo necesario de secado, del consumo de energía, del mecanismo de transferencia de agua, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa, y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables de proceso tales como: la temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc. Esto permite realizar un diseño o una selección más eficiente de secaderos, así como de las variables de proceso (García et al, 2007).

2.12.1 Curva de secado

Según (Suárez, 2009), menciona que “la curva de secado se puede observar la disminución de cantidad de agua en la muestra a medida que transcurre el tiempo” (Pág. 16). Así mismo según (López, 2016), “Las curvas de secado se calcula en base al registro de pérdida de peso de las muestras durante el

tiempo que tomó el proceso” (Pág. 20). En la figura 2.7, se muestra la curva de secado.



Fuente: Nava, 2004

Figura 2.7: Curva de secado

En la figura 2.7, se aprecian puntos importantes. El punto de A-B nos indica el inicio del proceso de secado, aún en esta parte el proceso no se puede considerar como un proceso en estado estacionario, la recta de B a C es conocido como el periodo de secado constante, en este punto, el sólido pierde humedad de manera constante, posteriormente aparece el punto crítico es donde el sólido pierde humedad, pero no de forma constante, la velocidad de secado empieza a disminuir en este punto. Finalmente se llega a los puntos D y E donde la curva empieza a mostrar un comportamiento asintótico respecto al eje X que es el tiempo de secado, en este punto la pérdida de humedad es ya casi nula. El sólido ha perdido la mayor parte de la humedad que inicialmente contenía (Nava, 2004).

2.12.2 Curva de velocidad de secado

La velocidad de secado de una muestra puede determinarse colocándola en un secador de bandeja donde circula una corriente de aire caliente, luego el peso de la muestra seca puede medirse en función del tiempo. El proceso de

secado de un material puede describirse por una serie de etapas en las que la velocidad de secado juega un papel determinante (Silva, 2013). Según (Barbosa et al, 2000), los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes generalmente se expresan como peso total de sólidos húmedos a diferentes tiempos de "t" horas en el período de secado. La velocidad de secado se calcula de la siguiente manera (ecuación 2.4):

$$N = \frac{m_{ss}}{A} \times \frac{\Delta X}{\Delta \theta} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

mss: Kg. de sólido seco

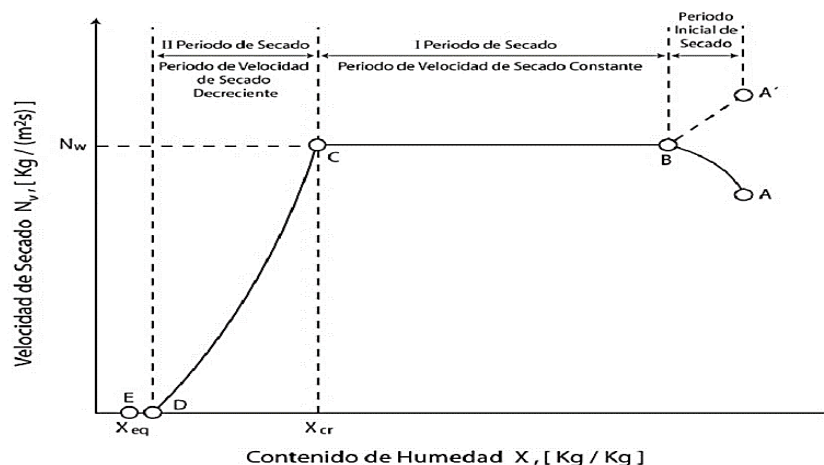
A: Área en m²

N: velocidad de secado.

ΔX : Variación de humedad.

$\Delta \theta$: Variación de tiempo

En la figura 2.8, se presenta la curva de velocidad de secado de alimentos.



Fuente: Mendieta, 2002

Figura 2.8: Curva de velocidad de secado

2.12.3 Periodos de secado

A continuación, se describen los periodos de secado como se observa en la figura 2.8.

2.12.3.1 Período de estabilización

En la figura 2.8, se muestra una típica curva de velocidad de secado, en la que los puntos A y A' representan el inicio de secado para un material frío y caliente, respectivamente. El punto B representa la condición de temperatura de equilibrio de la superficie del producto. El tiempo transcurrido para pasar de A ó A' a B suele ser bajo y a menudo se desprecia en los cálculos de tiempo de secado (Geankoplis, 1998).

2.12.4 Período de velocidad constante

El tramo de la curva B- C es conocido como período de velocidad constante de secado y está asociado a la eliminación de agua no ligada del producto, en el que el agua se comporta como si el sólido no estuviese presente. Al inicio la superficie del producto se encuentra muy húmeda, presentando una actividad de agua cercana a la unidad (Geankoplis, 1998).

2.12.5 Período de velocidad decreciente

El punto C de la figura 2.8, representa el inicio del periodo de velocidad decreciente. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener el valor uno de actividad de agua. El periodo de velocidad decreciente se puede dividir en dos etapas (Geankoplis, 1998).

2.13 Tratamientos para prevenir el pardeamiento en el proceso de secado de las muestras de brócoli

Los tratamientos químicos permiten obtener frutas y hortalizas procesadas con estabilidad microbiológica, conserva sus características fisiológicas, fisicoquímicas y mejorar la calidad sensorial (Esqueti, 2022. Pág. 20).

2.13.1 Ácido ascórbico

El ácido ascórbico o vitamina C es un agente antioxidante necesario para la formación y mantenimiento adecuado del material intercelular; puede reducir la acción perjudicial de los radicales libres y se encuentra casi exclusivamente en vegetales y frutas frescos (Bastías et al, 2016. Pág. 81).

2.13.2 Ácido cítrico

Previene la oxidación de verduras procesadas, detiene el proceso de deterioro del sabor y el color debido a su acción antioxidante natural, presente en la mayoría de las frutas cítricas (Infantes, 2015. Pág. 7).

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Desarrollo de la parte experimental

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

3.2 Tipos de intervención en el desarrollo experimental

La metodología que se utilizó para la obtención de resultados experimentales del presente trabajo de investigación, se presenta a continuación:

- Análisis fisicoquímicos, microbiológico y minerales del brócoli.
- Análisis organoléptico en el proceso de secado de brócoli.
- Análisis factorial 2^3 en el proceso de secado por aire caliente de brócoli.
- Análisis fisicoquímico, microbiológico y minerales de harina de brócoli.
- Operacionalización de las variables en el proceso de secado por aire caliente para la obtención de harina de brócoli.

3.3 Paradigma investigativo

Para (Palella & Martins, 2012), “la investigación paradigmática es un procedimiento ordenado, controlado y riguroso, mediante el cual manejamos objetos, hechos o ideas, con el fin de extender corregir o verificar el conocimiento sobre el objeto” (Pág. 38). También (Ricoy, 2006), indica que “paradigma positivista se califica de cuantitativo, empírico-analítico, racionalista, sistemático gerencial y científico tecnológico” (Pág. 14).

Por lo tanto, este tipo de paradigma sustentó el presente trabajo de investigación con el objetivo de comprobar la hipótesis.

3.4 Enfoque de la investigación

Según (Palella & Martins, 2012), “el enfoque cuantitativo se fundamenta en el positivismo, el cual percibe la uniformidad de los fenómenos, aplica la concepción hipotética-deductiva” (Pág. 40). Para (Hernández et al, 2010), “el enfoque cuantitativo utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, y confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística” (Pág. 10).

3.5 Métodos, técnicas e instrumentos

Método científico según (Palella & Martins, 2012), “es objetivo y tiene capacidad de predicción, control y generalización. Su misión principal es la de contribuir al desarrollo y validación de los conocimientos” (Pág. 26). Según (Ñaupas et al, 2014), “las técnicas e instrumentos de investigación se refieren a los procedimientos y herramientas mediante los cuales vamos a recoger los datos e informaciones necesarias para probar o contrastar nuestras hipótesis de investigación” (Pág. 201).

Para (Palella & Martins, 2012), “técnica es el procedimiento particular, reflexivo y confiable aplicado al empleo de un instrumento, al uso de material, al manejo de una determinada situación. El método es una estrategia; la técnica es la táctica” (Pág. 82).

3.5.1 Análisis de fisicoquímicos, microbiológicos y minerales del brócoli

Los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales del brócoli se realizó en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología dependiente de la Universidad Autónoma

“Juan Misael Saracho” Tarija - Bolivia. En la figura 3.1, se muestra los métodos, técnicas y normas que se utilizó para la determinación de análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales del brócoli.

Microbiológicos		Fisicoquímicos	
Placa fluida		Gravimetría	Cálculo
Recuento de placa (UFC/g)		Calcinación en mufla	Cálculo indirecto
Escherichia coli NB 32005:02		Cenizas (%) NB 39034:10	Hidratos de carbono Cálculo (%)
Salmonella NB/ISO 6579:08		Digestión Ácida-Base	Cálculo indirecto
Coliformes totales NB 32005:02		Fibra (%) Gravimétrico	Valor energético Cálculo (Kcal/100 g)
Minerales		Secado en estufa	Kjeldahl
		Humedad (%) NB 313010:05	Digestión Destilación Valoración
		Soxhlet	
		Grasa (%) NB 313019:06	
Espectro fotometría de Absorción atómica			Proteína (%) NB/ISO 8968-1:08
Potasio (mg/100g)			
Calcio (mg/100 g)			

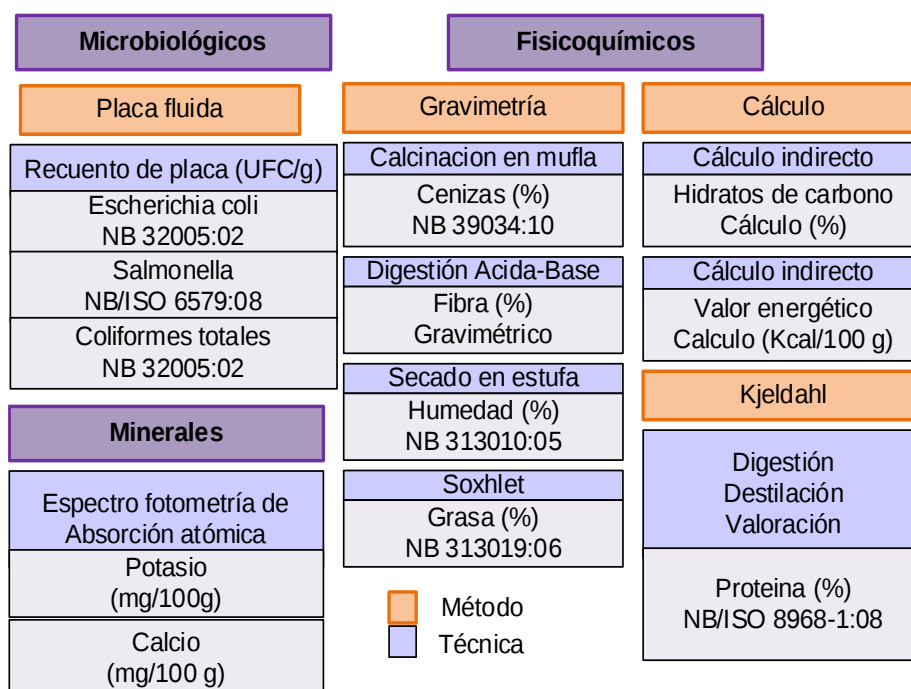
 Método
 Técnica

Fuente: CEANID, 2023

Figura 3.1: Métodos y técnicas de análisis fisicoquímicos microbiológicos y minerales del brócoli

3.5.2 Análisis de fisicoquímicos, microbiológicos y minerales de harina de brócoli

Los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y minerales de la harina de brócoli se realizarán en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” Tarija - Bolivia. En la figura 3.2, se muestra las normas, métodos y técnicas que se utilizó para determinar los análisis fisicoquímicos microbiológicos y minerales en la harina de brócoli.



Fuente: CEANID, 2023

Figura 3.2: Métodos y técnicas de análisis fisicoquímicos microbiológicos y minerales de harina de brócoli

3.6 Equipos, instrumentos de laboratorio, material de laboratorio y utensilios utilizados en el proceso de secado

Para el desarrollo de toda la parte experimental del presente trabajo de investigación, se utilizó equipos, instrumentos de laboratorio, material de laboratorio utensilios de cocina que se detallan a continuación:

3.6.1 Equipos

Los equipos utilizados en el presente trabajo de investigación, están ubicados en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA). En la figura 3.3, se detallan las especificaciones técnicas de los equipos que se utilizó en la obtención de harina de brócoli y los cuales son detallados en el (Anexo H).

Secador de bandejas Marca: ESZTERGOM Dimensiones internas: 1,17 m de alto – 67,5 de largo - 70 cm de profundidad Capacidad de bandejas: 5(66 x 66) cm Tensión: 220 V Potencia total : 2200 W	Secador de bandejas Marca: IKE Industria: China Dimensiones: 1180 mm ancho, 690 mm alto X1800 mm fondo Tensión: 220 V Potencia total: 1,0 KW Frecuencia: 50 Hz
Generador de aire Marca: INTERMED Industria: Boliviana Capacidad máxima: 6 m/s Tensión: 220 V Potencia total: 250 W Frecuencia: 50 – 60 Hz	Tamiz vibratorio Marca: Orto Alresa Industria: Argentina Año: 2005 Tensión: 220 V Potencia total: 80 W Frecuencia: 50 Hz

Fuente: LACIA, 2024

Figura 3.3: Equipos de laboratorio para el proceso de obtención de harina de brócoli

3.6.2 Instrumentos de laboratorio

Los instrumentos que se utilizó en el trabajo de investigación, se encuentran en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA) y Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Carrera de Ingeniería Química. La figura 3.4, detalla las especificaciones técnicas de los instrumentos de laboratorio utilizados para la obtención de harina de brócoli y los cuales son detallados en el (Anexo H).

Molino eléctrico	Termo balanza
• Marca: Oster • Tensión: 220 V • Potencia total: 150 W • Frecuencia: 60 Hz	• Marca: RADWAG • Modelo: PM 60.3Y. WH • Temperatura máxima: 250°C • Capacidad máxima de pesado: 60 g
Balanza digital	Tamiz vibratorio
• Capacidad máxima: 450g • Capacidad mínima: 0,5 g • Temperatura permitida: 10 – 40°C	• Capacidad de 7 tamices. • Capacidad de agitación: 0 – 3.500 rpm. • Capacidad máxima de pesado: 2 kg
Termo – hidrómetro digital	
• Marca: Ehdís • Tensión: 9 V • Rango de humedad: 0% - 100% HR. • Rango de temperatura: - 40°C – 105°C. • Punto de rocío: - 40°C – 105°C • Bulbo húmedo: 0°C – 80°C	

Fuente: LACIA, 2024

Figura 3.4: Instrumentos de laboratorio utilizados para la obtención de harina de brócoli

3.6.3 Material de laboratorio

En la figura 3.5, se presenta los materiales de laboratorios que se utilizaron en la realización del presente trabajo de investigación y se detallan a continuación:

✓ Espátula: Tamaño mediano de acero inoxidable.
✓ Cronómetro: Tamaño pequeño de plástico.
✓ Vaso de precipitación: material de vidrio, volumen de 100 ml.
✓ Espátula: Material de acero inoxidable, tamaño mediano.
✓ Tamices: Material acero inoxidable, luz 0,5 mm y 0,25 mm N°10.

Fuente: LACIA, 2024

Figura 3.5: Materiales de laboratorio

3.6.4 Utensilios

En la figura 3.6, se presentan los utensilios que fueron utilizados para la realización del presente trabajo de investigación y se detallan a continuación:

- ✓ **Cuchillo:** Material de acero inoxidable, tamaño mediano.
- ✓ **Cuchara:** Material de acero inoxidable, tamaño mediano.
- ✓ **Recipiente:** Material acero inoxidable, tamaño mediano
- ✓ **Jarras:** Material plástico, volumen 1L.
- ✓ **Colador:** Material acero inoxidable, tamaño mediano y pequeño.
- ✓ **Bandeja:** Material acero inoxidable, tamaño mediano y grande
- ✓ **Mandolina:** Material acero inoxidable.
- ✓ **Tabla de picar:** Tamaño mediano de plástico.
- ✓ **Cucharilla:** Tamaño pequeño de acero inoxidable.

Fuente: LACIA, 2024

Figura 3.6: Utensilios de cocina

3.7 Insumos alimentarios

Los insumos de uso alimentario utilizados para la realización del presente trabajo de investigación y se detallan en la tabla 3.1:

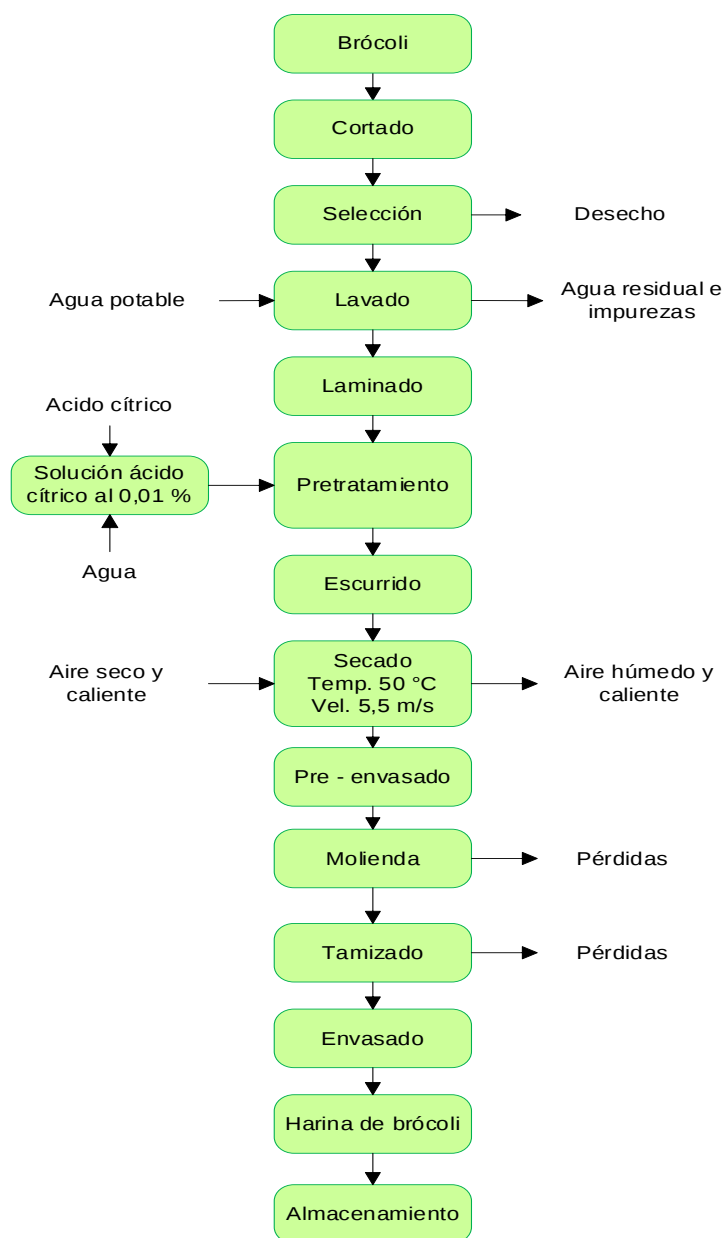
Tabla 3.1

<i>Insumos alimentarios</i>		
Detalle	Ácido ascórbico	Ácido cítrico
Marca	Solquifar	Biopak
Procedencia	Boliviana	Argentina
Estado	Sólido	Sólido
Cantidad	5 g	5 g

Fuente: Elaboración propia

3.8 Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de brócoli

En la figura 3.5, se muestra el diagrama de flujo del proceso de secado por aire caliente, para la obtención de harina de brócoli.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7: Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de brócoli

3.8.1 Descripción del diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de brócoli

Las operaciones del proceso de secado por aire caliente a nivel experimental para la obtención de harina de brócoli se detallan a continuación:



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.8: Brócoli

Brócoli: En la figura 3.8, se muestra el brócoli que se utilizó en la parte experimental del presente trabajo de investigación, que fue obtenido en el Mercado Campesino de la provincia Cercado del departamento de Tarija, procedente de la comunidad Sella Méndez.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.9: Cortado

Cortado: En la figura 3.9, se muestra el proceso de cortado, en el cual se utilizó un cuchillo de acero inoxidable con la finalidad de separar los floretes del tallo del brócoli para facilitar el proceso de lavado.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.10: Selección

Selección: En la figura 3.10, se muestra la selección manual de los floretes de brócoli, en donde se clasifican; dependiendo de la coloración separa de los que no son aptas para el proceso de secado. como ser (pellas amarillas)



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.11: Lavado

Lavado: En la figura 3.11, se muestra el proceso de lavado del brócoli donde se realizó utilizando DG6 y agua potable en relación 0,1:1, con la finalidad de eliminar los residuos adheridos en la superficie del brócoli como ser insectos.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.12: Escurrido

Escurrido: En la figura 3.12, se presenta el proceso de escurrido, donde se coloca los floretes de brócoli en el colador de acero inoxidable por un tiempo de 8 minutos; con la finalidad de eliminar toda el agua excedente adquirida en el proceso de lavado.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.13: Laminado

Laminado: Para realizar el laminado, se utilizó la mandolina y se realizó los cortes laminares 0,1 cm a la inflorescencia, para obtener cortes uniformes se realizó el laminado con parte de tallo como se muestra en la figura 3.13, para facilitar el proceso de secado.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.14: Pretratamiento

Pretratamiento: El proceso consiste en preparar una solución de ácido cítrico 0,01% se pasa a sumergir las láminas de brócoli por tiempo de 1 min. como se muestra en la figura 3.14.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.15: Escurrido

Escurrido: En la figura 3.15, se muestra el proceso de escurrido, donde son depositadas las láminas de brócoli en un colador de acero inoxidable con el fin de eliminar el exceso de solución ácido cítrico residual.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.16: Secado

Secado: La figura 3.16, muestra el proceso de secado en donde inicialmente, se hizo los ajustes del secador, que consiste en poner en funcionamiento el secador, con la finalidad de calentar hasta lograr una temperatura 50°C durante un tiempo de 20 min. Después de dar los respectivos ajustes de temperatura al equipo se pone en funcionamiento el generador de aire con condiciones de velocidad de aire de $5,5\text{ m/s}$, para introducir aire seco caliente y eliminar aire húmedo caliente del equipo. Posteriormente, se procedió a introducir al secador las bandejas con las muestras de láminas de brócoli, durante todo el proceso de secado y se controla la pérdida de peso cada 10 min hasta alcanzar peso constante por tiempo 190 minutos.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.17: Preenvasado

Preenvasado: En la figura 3.17, después del proceso de secado, se sacan la bandeja del secador seguido de un respectivo enfriamiento para evitar la condensación, luego las muestras secas son colocadas en bolsas de polipropileno con el propósito de que las láminas de brócoli seco no entren en contacto con la humedad del ambiente.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.18: Molienda

Molienda: La figura 3.18, muestra el proceso de molienda, en la cual consistió en introducir las muestras secas al molino eléctrico analítico con la finalidad de reducir el tamaño de las muestras secas de brócoli.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.19: Tamizado

Tamizado: Terminado la molienda, se procedió al tamizado de la muestra con un tamaño de malla entre los números 4-5 (3 mm), el cual se realizó con un tamizador vibratorio eléctrico con aberturas de malla 0,25 m/m para conseguir la granulometría del producto. En la figura 3.19, se muestra el proceso de molienda.

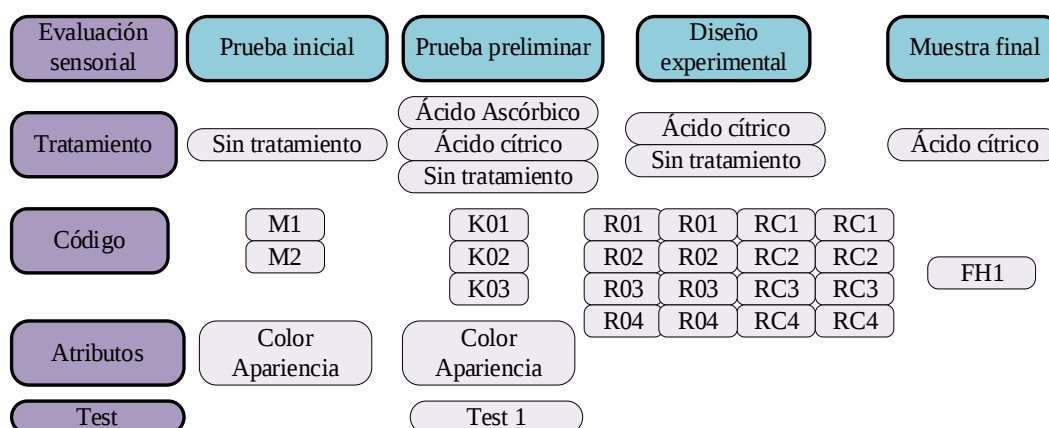


Fuente: Elaboración propia
Figura 3.20: Almacenamiento

Almacenamiento: En la figura 3.20, se muestra el almacenamiento de harina de brócoli. Una vez finalizado todo el proceso se procede al almacenado de harina de brócoli para preservar su calidad nutricional, prolongar su vida útil, garantizar su disponibilidad.

3.9 Evaluación sensorial

según (Lawless & Heyman, 2010), define “la disciplina científica utilizada para evocar, medir analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de alimentos y otras sustancias, que son percibidas por los sentidos de la vista, olfato, gusto, tacto y oído (Pág. 596). Para (Ramírez, 2012), esta disciplina “comprende un conjunto de técnicas para la medida de las respuestas humanas a los alimentos y aislar las propiedades sensoriales y aportar información útil para el desarrollo de productos, control durante la elaboración y almacenamiento, entre otras” (Pág. 87). En la figura 3.21, se detallan la evaluación sensorial de las muestras para la obtención de harina de brócoli.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21: Evaluación sensorial de las muestras de harina de brócoli

3.10 Diseño experimental

Según (Arias, 1997), menciona que diseño experimental es el "proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones o estímulos (variable independiente), para observar los efectos que se producen (variable dependiente)" (Pág. 34). De la misma manera (Palella & Martins, 2012), confirma que diseño experimental "busca predecir el futuro, elaborar pronósticos que, una vez confirmados, se conviertan en leyes y generalizaciones tendentes a incrementar el cúmulo de conocimientos pedagógicos y el mejoramiento de la acción educativa" (Pág. 86).

3.10.1 Diseño factorial 2^3

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, los cuales pueden identificarse con las mismas notaciones introducidas con el diseño 2^3 " (Pág. 184).

Supongamos que tres factores, A, B y C, cada uno con dos niveles, son de interés. Al diseño se le llama diseño factorial 2^3 , y en este caso la representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse con un cubo. Utilizando la notación "+" y "-" para representar los niveles alto y bajo de los factores, las ocho corridas del diseño 2^3 pueden enlistarse. Las combinaciones de los tratamientos en el orden estándar se escriben como (1), A, B, AB, C, AC, BC y ABC (Montgomery, 2004).

Según (Gutiérrez & De la vera, 2028), el análisis de regresión tiene como objetivo modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes (factores). En la ecuación 3.1, se describe el modelo de regresión a ser aplicado:

$$y = \beta_0 + \beta_A X_A + \beta_B X_B + \beta_C X_C - \beta_{AB} X_A X_B - \beta_{AC} X_A X_C - \beta_{BC} X_B X_C + \beta_{ABC} X_A X_B X_C$$

(Ecuación 3.1)

Dónde

β = coeficiente variación

X_A , X_B y X_C = Valor codificado del factor de diseño

3.10.2 Diseño experimental 2^3 en el proceso de secado de las muestras de brócoli

El diseño experimental que se tomó en cuenta en el presente trabajo de investigación para el proceso de secado, se aplicó de acuerdo a la ecuación (3.2).

$$2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8 \text{ Tratamientos} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

Para el presente trabajo los factores estarán conformados por tres variables:

- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (A) = 2 Niveles
- Corte (cm) (B) = 2 Niveles
- Velocidad de aire (m/s) (C) = 2 Niveles

En la tabla 3.3, se muestran los niveles de variación de los factores (nivel alto y nivel bajo) a ser aplicado en el proceso de secado por aire caliente conformado por tres variables: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), velocidad del aire (B) y corte (cm).

Tabla 3.2

Niveles de variación aplicado en el proceso de secado por aire caliente

Variables	Unidad	Nivel inferior	Nivel superior
Temperatura (A)	$^{\circ}\text{C}$	50,0	60,0
Velocidad del aire (B)	m/s	5,0	5,5
Corte (C)	cm	0,1	0,2

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.4, se muestra la matriz de diseño factorial aplicado en el proceso de secado por aire caliente a tres variables temperatura (A), velocidad del aire (B) y corte (C).

Tabla 3.3

Matriz de diseño factorial aplicado al proceso de secado por aire caliente

Combinación	variables			Interacciones de efecto				Respuesta	
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	H _{BS}	H _{BS}
(1)	-	-	-	+	+	+	-	H _{BS}	H _{BS}
A	+	-	-	-	-	+	+	H _{BS}	H _{BS}
B	-	+	-	-	+	-	+	H _{BS}	H _{BS}
AB	+	+	-	+	-	-	-	H _{BS}	H _{BS}
C	-	-	+	+	-	-	+	H _{BS}	H _{BS}
AC	+	-	+	-	+	-	-	H _{BS}	H _{BS}
BC	-	+	+	-	-	+	-	H _{BS}	H _{BS}
ABC	+	-	+	-	+	+	+	H _{BS}	H _{BS}

Fuente: Elaboración propia

Donde:

H_{BS}: Contenido de humedad en base seca (Kg agua/Kg sólido seco) de las muestras de brócoli.

3.11 Operacionalización de las variables para el proceso de obtención de harina de brócoli

La operacionalización de variables es una operación que forma parte de la investigación, es un recurso analítico que ayuda en distintas etapas de la investigación. En la etapa de elaboración del proyecto de investigación, ayuda a definir las líneas generales de la investigación, específicamente a establecer las dimensiones y los indicadores que se deben reconocer según la orientación teórica (Tintaya, 2015). En el cuadro 3.1, se muestra la operacionalización de las variables independiente y dependiente para la obtención de harina de brócoli.

Cuadro 3.1

Operacionalización de variables para el proceso de obtención de harina de brócoli

Hipótesis	Variable	Descripción variable	Indicadores
Mediante la aplicación del proceso de secado por aire caliente se logrará obtener harina de brócoli, con calidad nutricional en la provincia Cercado del departamento de Tarija	VD: Harina de brócoli	“Harina es el polvo más o menos fino que se obtiene de la molienda de un cereal o leguminosa seca”. (Sifre et al, 2018. Pág.3)	Humedad (%)
			Proteína (%)
			Fibra (%)
			Grasa (%)
			Carbohidratos (%)
			Valor energético (kcal/g)
			Mohos y levaduras (UFC/g)
			<i>Escherichia coli</i> (UFC/g)
			Coliformes totales (UFC/g)
			Potasio (mg/100g)
			Hierro (mg/100g)
			Calcio (mg/100g)
			Análisis organoléptico (color y apariencia)
	VI: Proceso de secado por aire	El secado por aire caliente es una técnica por medio del calor se elimina agua que contienen los alimentos mediante la evaporación, lo que impide el crecimiento de algunas bacterias que no pueden vivir en medios secos. (Vega & Fito, 2005. Pág. 2)	Peso (g)
			Propiedades físicas
			Porción comestible y no comestible
			Temperatura (50,0 – 60,0) °C
			Tipo de corte cm
			Control de acidez %
			Contenido de humedad (Kg agua / Kg sólido seco)
			Tiempo de secado min
			Cinética de secado Kg sólido seco/m ² h

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

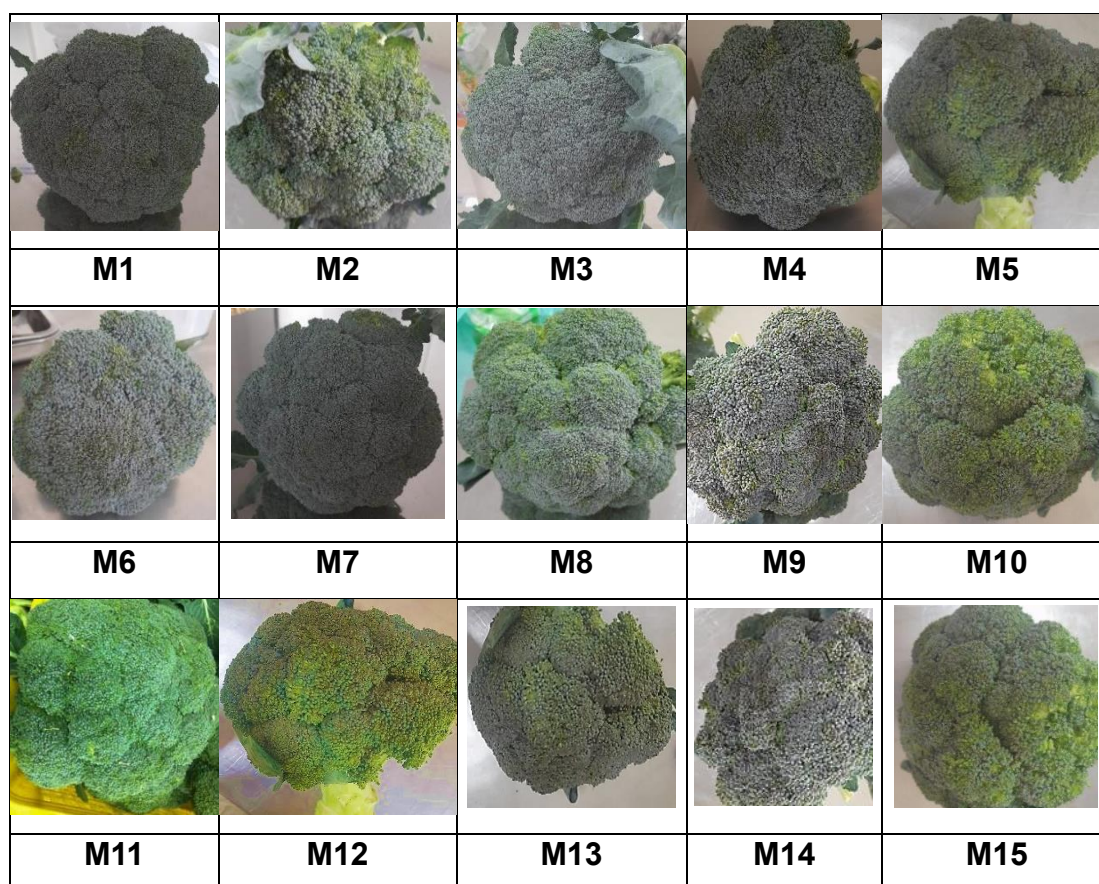
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización del brócoli

Para caracterizar el brócoli, se tomó en cuenta los propiedades físicas, parámetros fisicoquímicos, minerales y microbiológicos que se detallan a continuación:

4.1.1 Propiedades físicas del brócoli

En la figura 4.1, se observan las quince muestras de brócoli obtenidas de manera aleatoria en los cuales se determinó el peso total (PT), diámetro ecuatorial (DE), diámetro longitudinal (DL), porción comestible (PC), porción no comestible (PNC), laminas útiles (LU) y laminas no útiles (LNU).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1: Muestras de brócoli

En la tabla 4.1, se muestran los resultados obtenidos de las propiedades físicas del brócoli.

Tabla 4.1

Propiedades físicas de brócoli

Muestra	PT (g)	DE (cm)	DL (cm)	PC (%)	PNC (%)	LU (%)	LNU (%)
M1	588,51	17,42	24,38	35,61	64,39	91,83	8,17
M2	663,24	19,72	19,86	42,06	57,94	92,72	7,28
M3	925,81	26,86	18,50	49,64	50,36	93,40	6,60
M4	612,85	15,56	18,63	42,54	57,46	84,36	15,64
M5	791,09	19,31	20,42	40,55	59,45	90,79	9,21
M6	588,91	14,89	20,81	34,19	65,81	93,71	6,29
M7	663,49	15,93	20,53	44,64	55,36	92,11	7,89
M8	819,89	25,53	17,03	50,62	49,38	92,81	7,19
M9	646,58	20,64	19,83	50,55	49,45	90,80	9,20
M10	654,57	19,27	20,23	49,06	50,94	91,61	8,39
M11	637,03	19,54	20,48	52,03	47,97	88,37	11,63
M12	454,57	14,35	19,92	44,77	55,23	94,11	5,89
M13	512,32	15,20	20,93	45,05	54,95	89,44	10,56
M14	681,16	19,6	20,62	49,04	50,96	89,31	10,69
M15	794,24	18,34	20,84	42,76	57,24	91,01	8,99
Promedio	668,95	18,81	20,20	44,87	55,13	91,09	8,91

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 4.1, se muestran los resultados promedio de las características físicas del brócoli con peso total (PT) 668,95 g, diámetro ecuatorial (DE) 18,81 cm, diámetro longitudinal (DL) 20,20 cm, porción comestible (PC) 44,87%, porción no comestible (PNC) 55,13%, laminas útiles (LU) 91,09 % y laminas no útiles (LNU) 8,91%.

4.1.2 Análisis fisicoquímico del brócoli

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

Tabla 4.2

Análisis fisicoquímicos del brócoli

Parámetros	Unidad	Resultado
Cenizas	%	1,29
Fibra	%	1,35
Grasa	%	0,13
Hidratos de carbono	%	7,61
Proteína total (N*6,25)	%	3,02
Humedad	%	87,95
Valor energético	Kcal/100 g	43,64

Fuente: CEANID, 2023

Como se observa en la tabla 4.2, se expresan los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico del brócoli que contiene: Cenizas 1,29%; Fibra 1,35%; Grasa 0,13%; Hidratos de carbono 7,61%; Proteína total 3,02%; Humedad 87,95%; y Valor energético 43,64 Kcal/100 g.

4.1.3 Análisis de minerales del brócoli

En la tabla 4.3, se presentan los resultados de análisis de minerales del brócoli de datos extraídos del anexo A.1 (Anexo A).

Tabla 4.3

Análisis de minerales del brócoli

Minerales	Unidad	Resultado
Calcio	mg/100 g	32,0
Potasio	mg/100 g	290,0

Fuente: CEANID, 2023

Como se puede observar en la tabla 4.3, se muestran los resultados obtenidos del análisis de minerales del brócoli que contiene: Calcio 32,0 mg/100 g y Potasio 290 mg/100 g.

4.1.4 Análisis microbiológico del brócoli

En la tabla 4.4, se muestran los resultados de análisis microbiológicos del brócoli de datos extraídos del anexo A.1 (Anexo A).

Tabla 4.4

Análisis microbiológicos del brócoli

Microorganismos	Unidad	Resultado
Coliformes totales	UFC/g	$9,0 \times 10^1$
Escherichia coli	UFC/g	$<1,0 \times 10^1$ (*)
Salmonella	P/A/25 g	Ausencia
(*) no se observa desarrollo de colonias		

Fuente: CEANID, 2023

En la tabla 4.4, se observan los resultados obtenidos del análisis microbiológico del brócoli: Coliformes totales $9,0 \times 10^1$ UFC/g; Escherichia coli $<1,0 \times 10^1$ UFC/g (*) y Salmonella, Ausencia P/A/25 g.

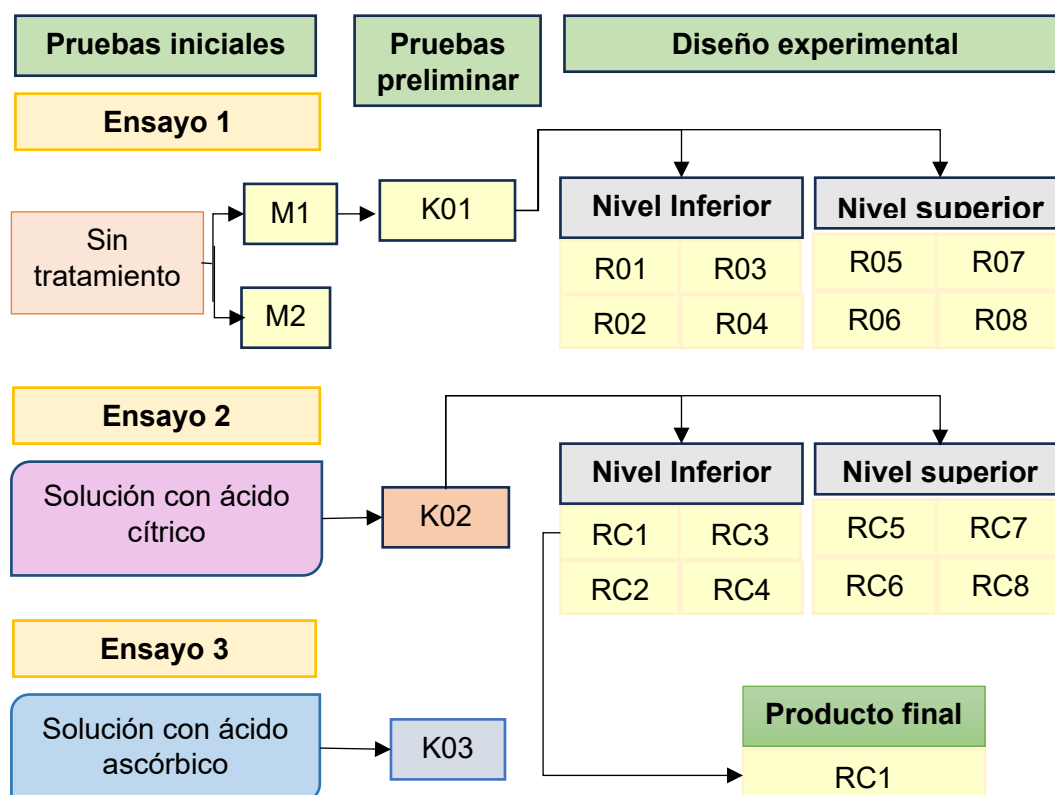
4.2 Caracterización de las variables del proceso de secado para la obtención de harina de brócoli

Para la caracterización de las variables del proceso de secado con aire caliente para la obtención de harina de brócoli, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

4.2.1 Pruebas iniciales para el proceso de secado para la obtención de harina de brócoli

En la figura 4.2, se muestra el desarrollo del presente trabajo de investigación obtención de harina de brócoli, donde se procedió a realizar pruebas iniciales: ensayo 1 (sin tratamiento), ensayo 2 (ácido cítrico) y ensayo 3 (ácido ascórbico). Para tal efecto, se procedió a realizar el ensayo 1 sin tratamiento (M1 y M2) para determinar el tipo de corte adecuado para el proceso de secado. El ensayo 2 se utilizó el método de (Maldonado & Pacheco, 2003) que consiste en secar el brócoli con pretratamiento ácido cítrico 0,01 % por un minuto. Así mismo, para el

ensayo 3 se utilizó el método (Pérez, 2013), que consiste en secar la muestra de brócoli con pretratamiento ácido ascórbico 0,01% sumergido por un tiempo de un minuto.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Proceso de secado para la obtención de harina de brócoli

Para el desarrollar la parte experimental, se tomó en base la ecuación (2.2) para determinar el contenido de humedad en base seca (H_{BS}) en laboratorio en función de los datos de prueba experimentales, tomando en cuenta la variación del peso en función del tiempo de secado para determinar el tipo de pretratamiento a aplicar. Para tal efecto, se tomó como dato el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 87,95 % (CEANID, 2023) y ecuación (2.3) para el cálculo de masa del sólido seco (m_{ss}). Tomando en cuenta las condiciones de secado de temperatura 60°C, velocidad del aire 5 m/s, tipo de corte de 0,1 cm y tiempo de inmersión de 1 min.

$$H_{BS} = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_{ss}} = \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de solido seco}} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

$$m_{ss} = m_i(1 - H_{BH}) = \text{kg sólido seco} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde:

m_{ss} = Masa de sólido seco (kg)

m_i = Masa inicial (kg)

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

H_{BS} = contenido de humedad en base seca (kg agua/kg solido seco)

4.2.2 Secado de brócoli sin tratamiento para el tipo de corte del ensayo 1

En la tabla 4.5, se muestran la variación de contenido de humedad en base seca del ensayo 1 sin tratamiento variando el tipo de corte: laminas (N01) tiempo de secado de 140 min y picado (N02) tiempo de secado de 170 min; tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 87,95 % (CEANID, 2023) y la ecuación (2.2).

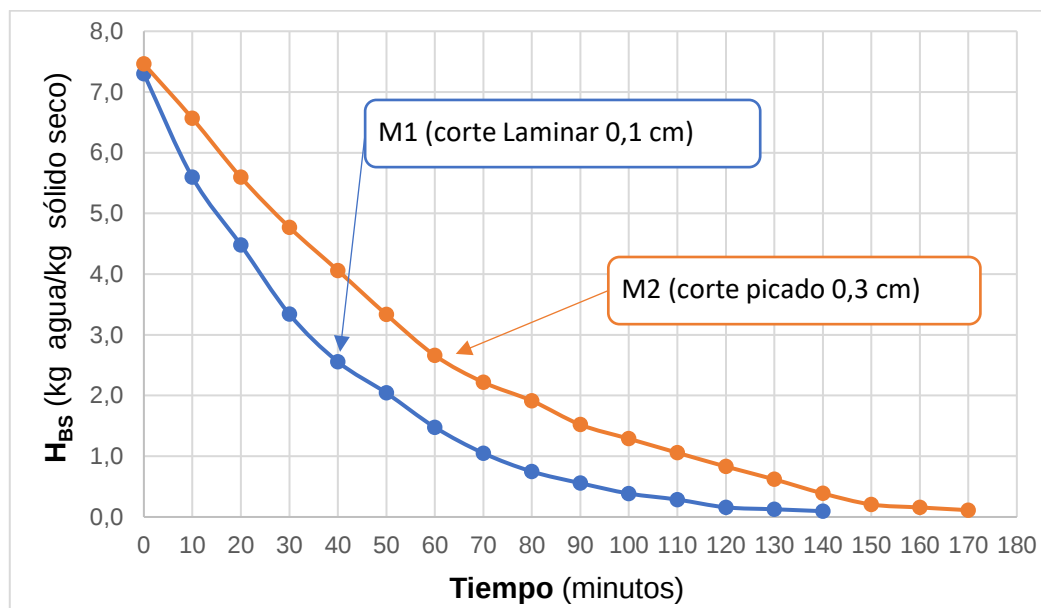
Tabla 4.5

Variación del contenido de humedad en base seca para ensayo 1

Tiempo (min)	Corte laminar (N01)		Corte picado (N02)		Tiempo (min)	Corte laminar (N01)		Corte picado (N02)	
	Peso (g)	H_{BS}	Peso (g)	H_{BS}		Peso (g)	H_{BS}	Peso (g)	H_{BS}
0	20,84	7,299	20,85	7,461	110	3,23	0,286	5,07	1,057
10	16,56	5,594	18,64	6,564	120	2,91	0,159	4,51	0,830
20	13,76	4,479	16,25	5,594	130	2,83	0,127	3,99	0,619
30	10,90	3,341	14,22	4,771	140	2,75	0,095	3,42	0,388
40	8,93	2,556	12,47	4,060	150	-	-	2,97	0,205
50	7,64	2,042	10,68	3,334	160	-	-	2,85	0,157
60	6,22	1,477	9,02	2,660	170	-	-	2,74	0,112
70	5,15	1,051	7,93	2,218	-	-	-	-	-
80	4,39	0,748	7,18	1,914	-	-	-	-	-
90	3,91	0,557	6,21	1,520	-	-	-	-	-
100	3,48	0,386	5,64	1,289	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.3, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el tipo corte del ensayo 1 sin tratamiento en base a datos de la tabla 4.5



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3: Variación del contenido de humedad en base seca para el tipo de corte del ensayo 1

Según la figura 4.3, se observa que para la muestra M1 a 40 minutos contiene 2,556 kg agua/kg sólido seco, para M2 a 80 minutos contiene 1,914 kg agua/kg sólido seco. Así mismo, se observa que la muestra M1 finaliza su secado a 140 minutos con 0,095 kg agua/kg sólido seco y M2 finaliza el secado a 170 minutos con 0,112 kg agua/kg sólido seco.

Por tal motivo, se procedió a elegir la muestra M01 con tipo de corte laminar; ya que presentó menor contenido de humedad en base seca de 0,095 kg agua/kg sólido seco menor tiempo de secado 140 minutos.

4.2.3 Pruebas preliminares para determinar pretratamiento a ser aplicado en la muestra de brócoli

En la tabla 4.6, se muestra la variación de contenido de humedad en base seca los resultados de las pruebas preliminares realizadas sin tratamiento, con

solución ácido cítrico 0,01% y ácido ascórbico 0,01% por un tiempo de inmersión de 1min, grosor de corte 0,1 cm, temperatura de secado 60 °C y velocidad de aire de 5 m/s; con el fin de observar la diferencia en el atributo color, apariencia y tiempo de secado para obtener harina de brócoli. Tomando en cuenta el contenido de humedad en base humedad (H_{BH}) 87,95% (CEANID, 2023) y la ecuación (2.2).

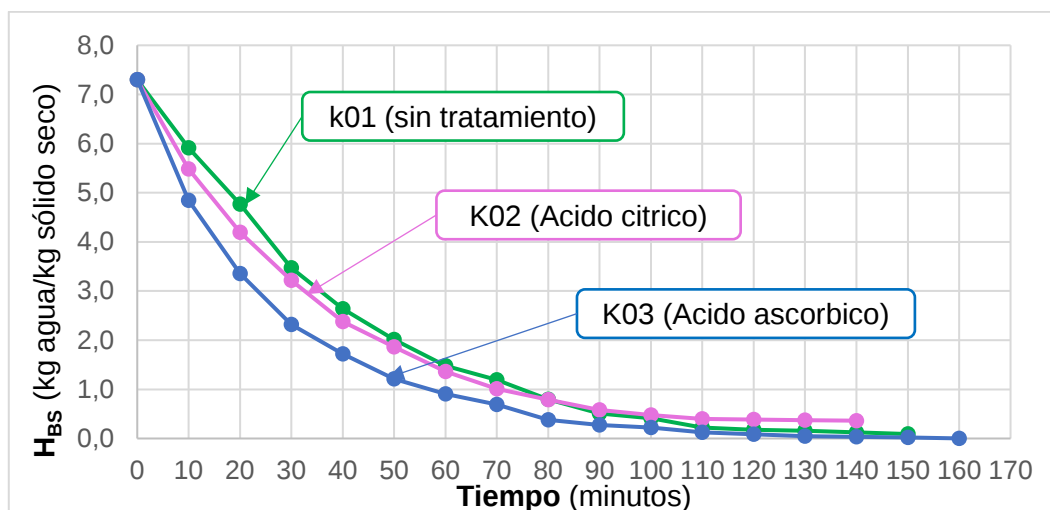
Tabla 4.6

Variación del contenido de humedad en base seca del brócoli

Tiempo (min)	(sin tratamiento) K01		(Ácido cítrico) K02		(Ácido ascórbico) K03	
	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}
0	20,24	7,299	20,04	7,299	20,71	7,299
10	16,86	5,913	15,66	5,485	14,58	4,842
20	14,06	4,765	12,54	4,193	10,86	3,352
30	10,9	3,469	10,19	3,220	8,28	2,318
40	8,87	2,637	8,16	2,379	6,78	1,717
50	7,35	2,014	6,91	1,861	5,52	1,212
60	6,04	1,477	5,70	1,360	4,75	0,903
70	5,35	1,194	4,86	1,013	4,22	0,691
80	4,38	0,796	4,32	0,789	3,44	0,378
90	3,68	0,509	3,81	0,578	3,18	0,274
100	3,44	0,410	3,57	0,478	3,05	0,222
110	2,98	0,222	3,37	0,396	2,81	0,126
120	2,87	0,177	3,35	0,387	2,71	0,086
130	2,83	0,160	3,32	0,375	2,62	0,050
140	2,75	0,128	3,29	0,362	2,58	0,034
150	2,66	0,091	-	-	2,54	0,018
160	-	-	-	-	2,50	0,002

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.4, se muestra la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo de las muestras para elegir el tipo de pretratamiento; (K01) sin tratamiento, (K02) ácido cítrico, (K03) ácido ascórbico. Por lo cual, se tomaron datos en determinado de 10 minutos, en condiciones de temperatura 60 °C, velocidad de aire 5 m/s y corte 0,1 cm; en base a datos de la tabla 4.6.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4: Variación del contenido de humedad en función del tiempo de secado

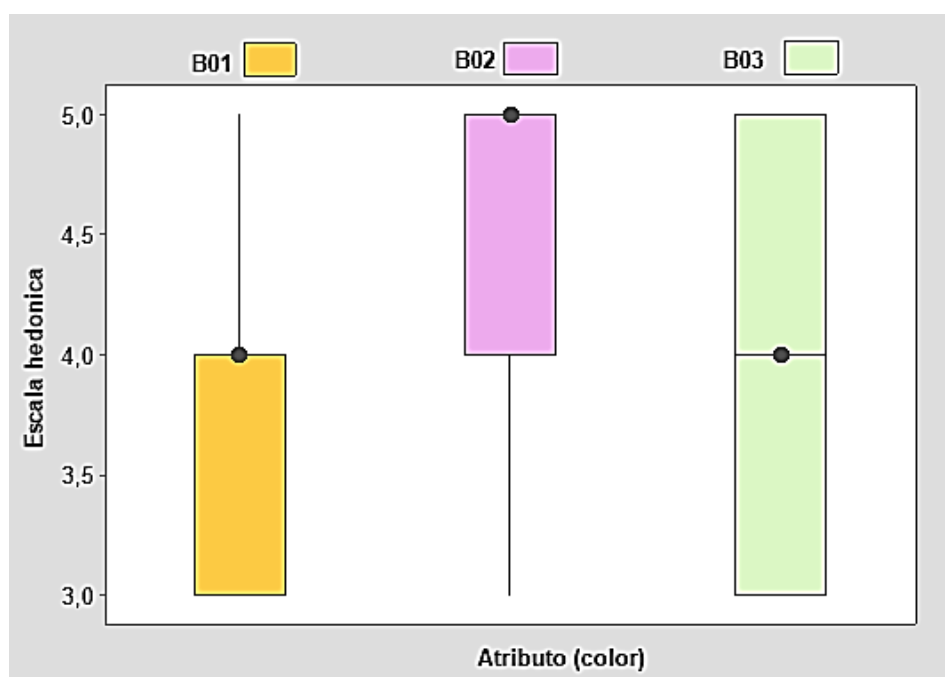
En la figura 4.4, se observa que la variación de contenido de humedad en base seca en función del tiempo de las muestras preliminares. En tal sentido, la muestra K01 (tiempo 20 minutos) contiene (4,765 kg agua/kg sólido seco), para la muestra K02 (tiempo 40 minutos) contiene (2,379 kg agua/kg sólido seco), para la muestra K03 (tiempo 30 minutos) contiene (2,318 kg agua/kg sólido seco). Así mismo, se puede observar que las muestras finalizan su secado K01 (150 minutos), K02 (140 minutos) y K03 (160 minutos). La muestra elegida es K02 ya que se destaca por haber alcanzado un contenido de humedad en base seca de 0,362 kg agua/kg sólido seco en 140 minutos de secado con menor tiempo de secado en comparación con K01 y K03.

4.2.3.1 Evaluación sensorial de muestras preliminares para elegir el pretratamiento

En base a las muestras (K01, K02 y K03), se procedió a la molienda y la evaluación sensorial de las muestras de harina de brócoli para los atributos: color, apariencia. utilizando 20 jueces no entrenados en la escala hedónica de cinco puntos. Con la finalidad de seleccionar el tipo de pretratamiento a aplicar para la obtención de harina de brócoli con mayor preferencia.

4.2.3.2 Estadístico caja y bigote del atributo color de muestras preliminares

En la figura 4.5, se muestran los resultados de caja y bigote del atributo color de las muestras preliminares para elegir el pretratamiento para la obtención de harina de brócoli.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5: Caja y bigote del atributo color de las muestras preliminares para elegir el pretratamiento

En la figura 4.5, se observa que la muestra B02 del atributo color tiene una mediana de puntuaciones mayor (5,0) en la relación a las demás muestras; por lo tanto, indica que el 50% de los jueces que evaluaron dieron una puntuación mayor a (4,0) datos sesgados, seguida por la muestra B03 (4,0) con una puntuación asimétrica y B01 la mitad de los datos están por debajo de la mediana (4,0).

4.2.3.2.1 Estadístico de Tukey del atributo color de muestras preliminares

En la tabla 4.7, se muestra los resultados de análisis estadístico de Tukey para el atributo color de datos extraídos del Anexo C (Tabla C.3.4).

Tabla 4.7

Estadístico de Tukey para el atributo color

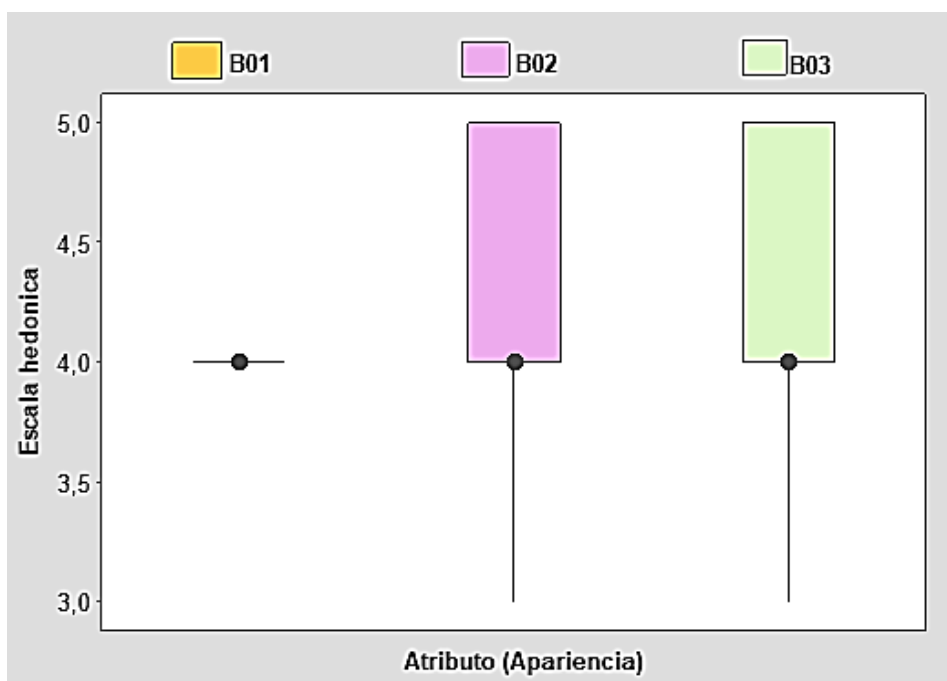
Tratamiento	N	Media	Agrupación
K01	20	3,850	A
K02	20	4,350	A
K03	20	3,900	A

Fuente: Elaboración propia

Según la evaluación sensorial realizada para el atributo color en la tabla 4.6, se puede observar que existe diferencia significativa estadística entre las muestras K01, K02 y K03 para un nivel de significancia del $\alpha=0,05$.

4.2.3.3 Estadístico caja y bigote del atributo apariencia de muestras preliminares

En la figura 4.6, se muestra los resultados de caja y bigote del atributo apariencia de las muestras preliminares para elegir el pretratamiento.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6: Caja y bigote del del atributo apariencia de la muestra preliminares para elegir el pretratamiento

En la figura 4.6, se puede observar que el atributo apariencia para las muestras BO1 distribución uniforme con una mediana de (4,0), B02 tiene datos por encima de la mediana (4,0) datos sesgados y B03 tienen datos por encima de la mediana (4,0) datos sesgados.

4.2.3.3.1 Estadístico de Tukey para el atributo apariencia de las muestras preliminares para elegir el pretratamiento

En la tabla 4.8, se muestra los resultados de análisis estadístico de Tukey para el atributo apariencia de datos extraídos del Anexo C (Tabla C.2.4).

Tabla 4.8

Estadístico de Tukey para el atributo apariencia

Tratamiento	N	Media	Agrupación
K01	20	4,000	A
K02	20	4,250	A
K03	20	4,150	A

Fuente: Elaboración propia

Según la evaluación sensorial realizada del atributo apariencia, en la tabla 4.8, se puede observar que existe diferencia significativa estadística entre las muestras K01, K02 y K03 para un nivel de significancia del $\alpha=0,05$.

En base al tiempo de secado y según la evaluación sensorial del atributo color y apariencia, se procedió a elegir a las muestras K02 tratada con solución ácido cítrico como pretratamiento previo para las muestras de brócoli para la obtención de harina; ya que presenta menor tiempo de secado en comparación con las otras muestras y mayor aceptación por los jueces debido a que realza el color en comparación con las demás muestras, Así mismo, se procedió a tomar en cuenta la muestra K01 sin tratamiento con la finalidad de determinar si existe diferencias durante el proceso de secado.

4.3 Diseño experimental en el proceso de secado de brócoli para la obtención de harina de brócoli

En base a las muestras (K01) y (K02), se procedió a aplicar el diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de brócoli sin tratamiento y en solución de ácido cítrico.

4.3.1 Diseño experimental en el proceso de secado sin tratamiento

En base a la muestra (K01) sin tratamiento, se procedió a aplicar el diseño factorial 2^3 en el proceso de secado, donde se tomaron en cuenta las variables: Temperatura entre (50 – 60) °C, velocidad del aire entre (5,0 – 5,5) m/s y corte (0,1 – 0,2) cm. Así mismo, se tomó como variable respuesta al contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco) empleando la termobalanza y su metodología aplicada se detalla en el (Anexo D).

4.3.2 Diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de muestras en brócoli sin tratamiento

En la tabla 4.9, se observa las variables controladas durante el proceso de secado por aire caliente de muestras en brócoli sin tratamiento y los resultados de las variables respuesta del contenido de humedad en base seca.

Tabla 4.9

Contenido de humedad en base seca de muestras de brócoli sin tratamiento

Combinación de tratamiento	Variables			Réplica I	Réplica II	Total (Yi)
	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Corte (cm)			
	A	B	C			
(1)	50	5,0	0,1	0,057	0,061	0,118
a	60	5,0	0,1	0,077	0,071	0,148
b	50	5,5	0,1	0,090	0,088	0,178
c	50	5,0	0,2	0,076	0,082	0,158
ab	60	5,5	0,1	0,056	0,073	0,129
ac	60	5,0	0,2	0,076	0,092	0,168
bc	50	5,5	0,2	0,076	0,068	0,144
abc	60	5,5	0,2	0,077	0,097	0,174

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.1 Análisis de varianza del diseño factorial de las muestras en brócoli sin tratamiento

La tabla 4.10, muestra los resultados obtenidos del análisis de varianza del diseño factorial 2^3 aplicado en el proceso de secado en función de la variable respuesta del contenido de humedad en base seca. Los cuales fueron introducidos en el programa estadístico Statgraphics (Centurion XVI) por Windows y los resultados son detallados en el (Anexo D.1).

Tabla 4.10

Análisis de varianza para la variable respuesta contenido de humedad en base seca

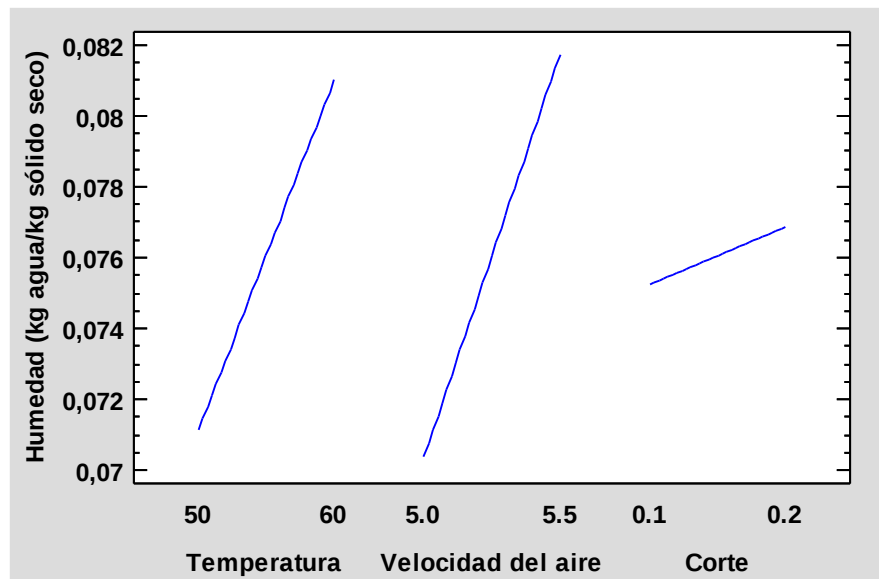
Fuente de varianza	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrado Medio (CM)	Fcal	Ftab
Factor A	0,00039	1	0,00039	5,67*	5,32
Factor B	0,00052	1	0,00052	7,52*	5,32
Factor C	0,00001	1	0,00001	0,15	5,32
Interacción AB	0,00022	1	0,00022	3,16	5,32
Interacción AC	0,00022	1	0,00022	3,16	5,32
Interacción BC	0,00015	1	0,00015	2,18	5,32
Interacción ABC	0,00011	1	0,00011	1,53	5,32
Error total	0,00055	8	0,00007	-	-
Total	0,00216	15	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

* Significativo

Según el análisis de varianza en la tabla 4.9, se observa que el factor C e interacciones (AB, AC, BC y ABC) no son estadísticamente significativas debido que $F_{cal} < F_{tab}$, por tanto, se acepta la hipótesis planteada. Sin embargo, en los factores A y B si existe diferencia significativa en el proceso de secado; ya que $F_{cal} > F_{tab}$, por tanto, se rechaza la hipótesis planteada para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

En la figura 4.7, se muestra los efectos principales para los factores: A (temperatura), B (velocidad del aire) y C (corte) en relación con la variable respuesta contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco)

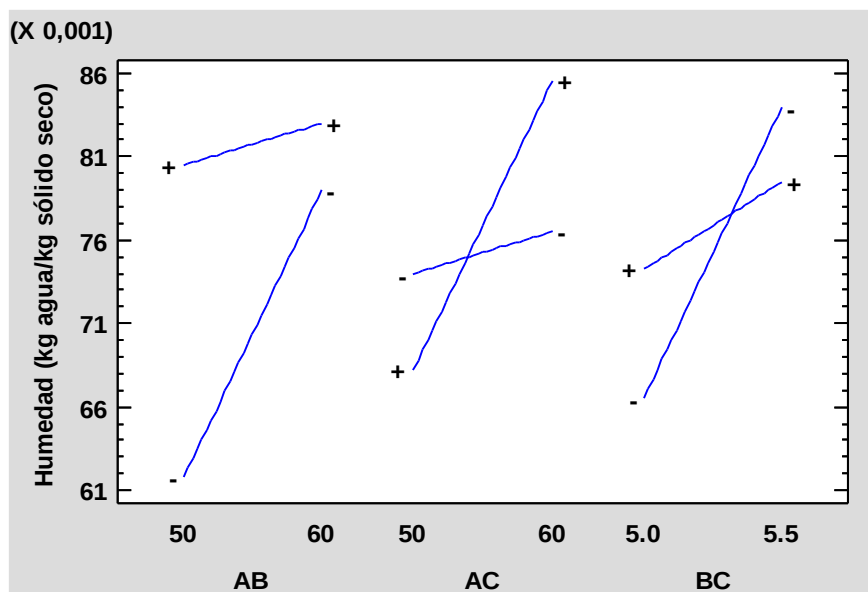


Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7: Efectos principales para el contenido de humedad en base seca

En la figura 4.7, se observa que los factores B (velocidad del aire) entre valores (5,0 – 5,5) m/s y factor A (temperatura) entre (50 – 60) °C; influyen significativamente en la variable respuesta del contenido de humedad en base seca cuando se encuentran en niveles altos y bajos. Sin embargo, el factor B (corte) entre (0,1 – 0,2) cm no influye significativamente en su nivel alto y bajo; debido que la variación del contenido de humedad en base seca es mínima.

En la figura 4.8, se muestran las interacciones para los factores AB (temperatura – velocidad de aire), AC (temperatura - corte) y BC (velocidad del aire - corte), en función de la variable respuesta contenido de humedad en base seca.



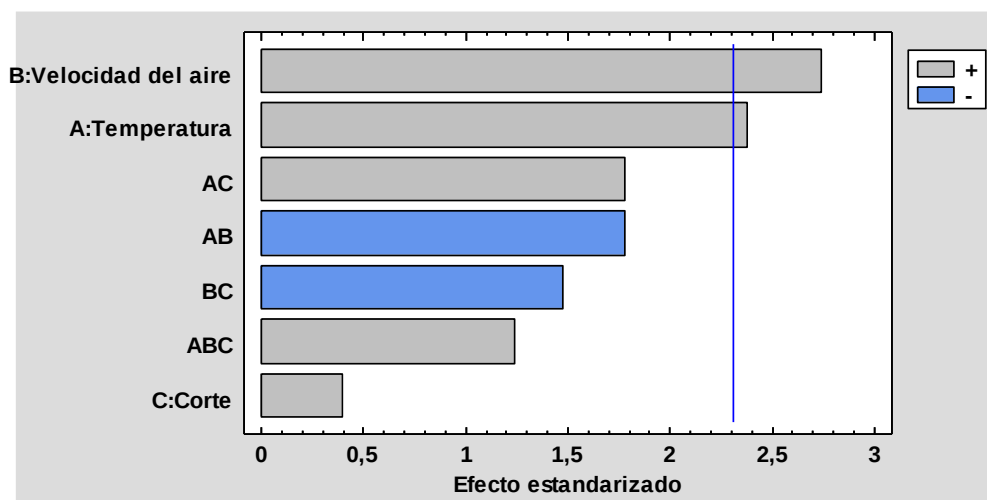
Fuente: Elaboración propia

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

En la figura 4.8, se puede observar que la interacción AB (temperatura – velocidad del aire) a temperatura de 50°C el contenido de humedad se ve afectado por el factor B (velocidad del aire) ya que se encuentra su nivel alto y bajo (5,0 – 5,5) m/s; sin embargo, para una temperatura de 60 °C el contenido de humedad es mínimo cuando el factor B se encuentra en su nivel alto y bajo. Así mismo, en la interacción AC (temperatura – corte) es significativo debido a que existe intersección de las variables entre sí, para el nivel alto de temperatura de 60 °C el contenido de húmeda en base seca se ve afectada cuando el factor C (corte) se encuentra en su nivel alto y bajo entre (0,1 – 0,2) cm; Así mismo, para la interacción BC (velocidad del aire - corte) es significativo ya que existe intersección entre sí, para una velocidad de 5,0 m/s, el contenido de humedad es afectado cuando el factor B (velocidad del aire) se encuentra en su nivel alto y bajo (5,0 – 5,5) m/s.

En la figura 4.9, se muestra el diagrama Pareto estandarizado de los factores tomado en cuenta para el diseño factorial. Para tal efecto, el nivel de significancia estadística lo determina la línea vertical de referencia con valor

de (2,30), por lo tanto, los factores que exceden la línea de referencia 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 base seca

Según la figura 4.9, se puede observar que los factores B (velocidad del aire) y A (temperatura) exceden la línea de referencia, por lo tanto, es estadísticamente significativo en comparación con el factor C (corte) e interacciones AB (temperatura – velocidad del aire), AC (temperatura del aire), BC (velocidad del aire - corte); ya que no son estadísticamente significativos un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

4.3.2.2 Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca de las muestras de brócoli sin tratamiento

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 muestras de brócoli sin tratamiento y datos extraídos de la tabla D.1.3 (Anexo D).

$$\text{Humedad} = -2,799 + 0,04655*A + 0,56*B + 12,33*C - 0,0091*A*B - 0,2005*A*C - 2,5*B*C + 0,041*A*B*C$$

(Ecuación 4.1)

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

4.3.2.3 Optimización de respuesta del diseño factorial de las muestras de brócoli sin tratamiento

En la etapa de secado de las muestras de brócoli a nivel experimental se elaboraron ocho muestras sin tratamiento, donde las variables tomadas en cuenta se escriben en la tabla 4.11.

Tabla 4.11

Muestras de brócoli sin tratamiento

Muestras	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Corte (cm)
R01	50	5,0	0,1
R02	60	5,0	0,1
R03	50	5,5	0,1
R04	60	5,5	0,1
R05	50	5,0	0,2
R06	60	5,0	0,2
R07	50	5,5	0,2
R08	60	5,5	0,2

Fuente: Elaboración propia

La optimización de la variable respuesta se realizó de acuerdo al contenido de humedad en base seca de las ocho muestras de brócoli sin tratamiento, donde los datos fueron introducidos en el software “Statgraphics Centurion XVI” por Windows con la finalidad de optimizar las variables de la etapa de secado.

En la tabla 4.12, se observa los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de brócoli sin tratamiento de datos extraídos de la tabla D.2.7 (Anexo D).

Tabla 4.12**Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad**

Factores		Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	(A)	50	60	50
Velocidad del aire	(B)	5,0	5,5	5,5
Corte	(C)	0,1	0,2	0,1

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 4.12, se observa que los valores óptimos de los factores para minimizar el contenido de humedad en las muestras de brócoli son: temperatura (50°C), velocidad del aire (5,5 m/s) y corte (0,1 cm). Por lo tanto, se tomó en cuenta la muestra R03 con la finalidad de minimizar el contenido de humedad en base seca.

En base al valor óptimo del contenido de humedad en base seca de 0,089 (kg agua/kg sólido seco) entre los factores para minimizar el contenido de humedad en base seca se optó por elegir R03, la misma fue obtenida con una temperatura (50°C), velocidad del aire (5,5 m/s), corte (0,1cm) y un contenido de humedad en base seca en la variable respuesta de 0,022 (kg agua/kg sólido seco).

4.3.3 Diseño experimental en el proceso de secado en solución de ácido cítrico

En base a la muestra ideal (K02), se procedió a aplicar el diseño factorial 2^3 en el proceso de secado, donde se tomaron en cuenta las variables: Temperatura entre (50 – 60) °C, velocidad del aire entre (5,0 – 5,5) m/s y corte (0,1 – 0,2) cm. Así mismo, se tomó como variable respuesta al contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco) empleando la termobalanza y su metodología aplicada se detalla en el (Anexo D.2)

4.3.4 Diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de muestras en brócoli con solución de ácido cítrico

En la tabla 4.13, se observa las variables controladas durante el proceso de secado por aire caliente de las muestras de brócoli en solución de ácido cítrico y los resultados de las variables respuesta del contenido de humedad en base seca.

Tabla 4.13

Contenido de humedad en base seca de muestras de brócoli con solución de ácido cítrico

Combinación de tratamiento	Variables			Réplica I	Réplica II	Total (Yi)
	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Corte (cm)			
	A	B	C			
(1)	50	5,0	0,1	0,104	0,094	0,198
a	60	5,0	0,1	0,100	0,083	0,183
b	50	5,5	0,1	0,103	0,087	0,191
c	50	5,0	0,2	0,108	0,103	0,211
ab	60	5,5	0,1	0,082	0,069	0,151
ac	60	5,0	0,2	0,107	0,087	0,194
bc	50	5,5	0,2	0,096	0,095	0,191
abc	60	5,5	0,2	0,108	0,088	0,196

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.1 Análisis de varianza del diseño factorial de las muestras en brócoli con solución de ácido cítrico

En la tabla 4.14, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza del diseño factorial 2^3 aplicado en el proceso de secado en función de la variable del contenido de humedad en base seca. Los cuales fueron introducidos en el programa estadístico Statgraphics (Centurión XVI) por Windows y los resultados son detallados en el (Anexo D.2).

Tabla 4.14

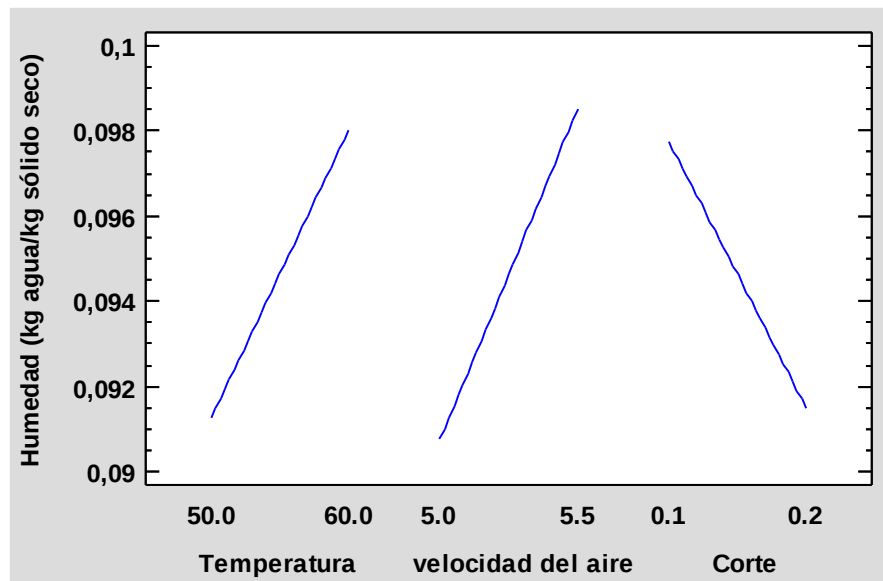
Análisis de varianza para la variable respuesta contenido de humedad en base seca

Fuente de varianza	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrado Medio (CM)	Fcal	Ftab
Factor A	0,00018	1	0,00018	1,78	5,32
Factor B	0,00024	1	0,00024	2,34	5,32
Factor C	0,00016	1	0,00016	1,52	5,32
Interacción AB	0,00000	1	0,00000	0,00	5,32
Interacción AC	0,00011	1	0,00011	1,08	5,32
Interacción BC	0,00003	1	0,00003	0,30	5,32
Interacción ABC	0,00034	1	0,00034	3,34	5,32
Error total	0,00082	8	0,00010	-	-
Total	0,00188	15	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis de varianza en la tabla 4.14, se observa que los factores (A, B y C) e interacciones (AB, AC, BC y ABC) no existe diferencia significativa; debido que $F_{cal} < F_{tab}$, por tanto, se acepta la hipótesis planteada para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

En la figura 4.10, se muestra los efectos principales para los factores: A (temperatura), B (velocidad del aire) y C (corte) en relación con la variable respuesta contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco).

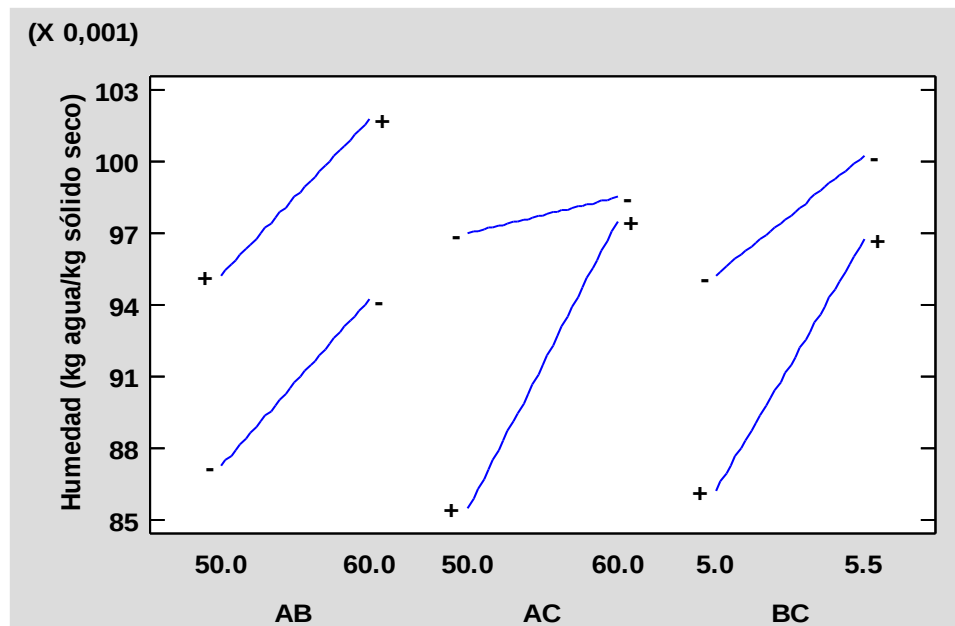


Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10: Efectos principales para el contenido de humedad en base seca

En la figura 4.10, se puede observar que el factor A (temperatura) entre valores (50 – 60) °C y el factor B (velocidad del aire) entre (5,0 – 5,5) m/s y el factor C (corte) entre (0,1 – 0,2) cm, no incide significativamente en sus niveles alto y bajo; Debido a que el efecto de los factores en la variación del contenido de humedad en base seca es mínimo.

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



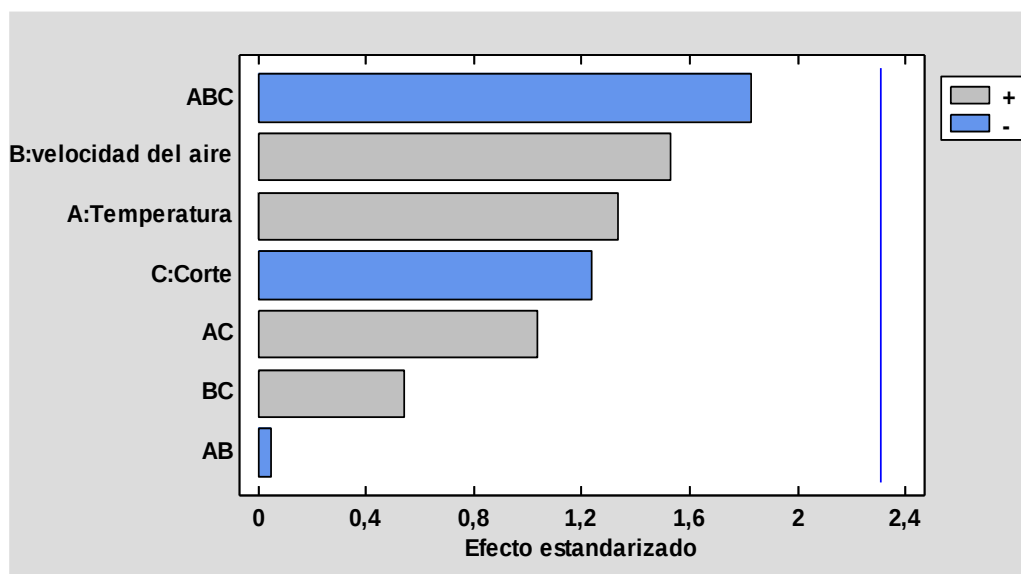
Fuente: Elaboración propia

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

Según la figura 4.11, se puede observar que la interacción AB (temperatura – velocidad del aire) no afecta significativamente debido a que existe intersección y que la humedad no se ve afectado cuando la temperatura se encuentre en su nivel alto y bajo. Para la interacción AC (temperatura - corte) para una temperatura de 60°C el contenido de humedad se ve afectado por el factor C(corte) cuando se encuentra en su nivel alto y bajo (0,1 – 0,2) cm; sin embargo, para una temperatura de 50°C el contenido de humedad es mínimo cuando el factor C(corte) se encuentra en su nivel alto y bajo. Para la interacción BC (velocidad del aire - corte) es significativa debido a que los factores de las variables interaccionan entre sí, para una 60 °C el contenido de humedad se ve afectada cuando el factor C se encuentra en su nivel alto y bajo.

En la figura 4.12, se puede observar el diagrama de Pareto estandarizado para los factores tomando en cuenta para el diseño factorial. Por tal efecto, el nivel de significancia estadística lo determina la línea vertical de referencia con valor

de (2,30), por lo tanto, los factores que exceden la línea de referencia 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 base seca

De acuerdo a la figura 4.12, se puede observar los valores absolutos de los efectos estandarizados en forma decreciente; donde los factores: A (temperatura), B (velocidad del aire), C (corte) e interacciones AB (temperatura – velocidad del aire), AC (temperatura - corte), ABC (temperatura – velocidad del aire - corte), BC (velocidad del aire - corte); no son estadísticamente significativos para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

4.3.4.2 Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca de las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico

Según la ecuación (3.1) del modelo de regresión para un diseño 2^k ; en la ecuación (4.2), se observa el modelo de regresión que se ajustó a los datos experimentales para el contenido de humedad en base seca de muestras de brócoli con solución ácido cítrico y datos extraídos de la tabla D.2.3 (Anexo D).

$$\text{Humedad} = 3,335 - 0,05865*A - 0,606*B - 22,585*C + 0,011*A*B + 0,399*A*C + 4,18*B*C - 0,074*A*B*C \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

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

4.3.4.3 Optimización de respuesta del diseño factorial de las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico

En la etapa de secado de las muestras de brócoli a nivel experimental se elaboraron ocho muestras con solución de ácido cítrico, donde las variables tomadas en cuenta se escriben en la tabla 4.15.

Tabla 4.15

Muestras de brócoli con solución de ácido cítrico

Muestras	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Corte (cm)
RC1	50	5,0	0,1
RC2	60	5,0	0,1
RC3	50	5,5	0,1
RC4	60	5,5	0,1
RC5	50	5,0	0,2
RC6	60	5,0	0,2
RC7	50	5,5	0,2
RC8	60	5,5	0,2

Fuente: Elaboración propia

La optimización de la variable respuesta se realizó de acuerdo al contenido de humedad en base seca de las ocho muestras de brócoli con solución de ácido cítrico, donde los datos fueron introducidos en el software “Statgraphics Centurión XVI” por Windows, con la finalidad de optimizar las variables de la etapa de secado.

En la tabla 4.16, se observa los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico de datos extraídos de la tabla D.2.7 (Anexo D).

Tabla 4.16**Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad**

Factores		Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	(A)	50	60	60
Velocidad del aire	(B)	5,0	5,5	5,5
Corte	(C)	0,1	0,2	0,1

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 4.16, se observa que los valores óptimos de los factores para minimizar el contenido de humedad en las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico son: temperatura (60°C), velocidad del aire (5,5 m/s) y corte (0,1 cm), Por tanto, se tomó en cuenta la muestra RC5 con la finalidad de minimizar el contenido de humedad en base seca.

En conclusión, en base al valor óptimo 0,1055 (kg agua/kg sólido seco). Entre los factores para minimizar el contenido de humedad en base seca se optó por elegir la muestra RC1 la misma obtenida a temperatura (50°C), velocidad del aire (5,0 m/s), corte (0,1cm) y un contenido de humedad en base seca en variable respuesta de 0,005 (kg agua/kg sólido seco).

4.4 Influencia de las variables sobre el contenido de humedad en el proceso de secado por aire caliente de las muestras de brócoli

La influencia de variables sobre el contenido de humedad final de brócoli en base seca (H_{BS}), se determinó de la pérdida de peso que se registró durante el proceso de secado de muestras sin tratamiento y con solución de ácido cítrico, iniciando de peso inicial (100 – 101) g de brócoli, tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) 87,95% (CEANID, 2023) y la ecuación (2.2) para el cálculo de la masa de sólido seco.

En la tabla 4.17, se observa las variables temperatura (A), velocidad del aire (B) y corte (C), en función de estas variables se analizó el contenido de humedad en base seca.

Tabla 4.17

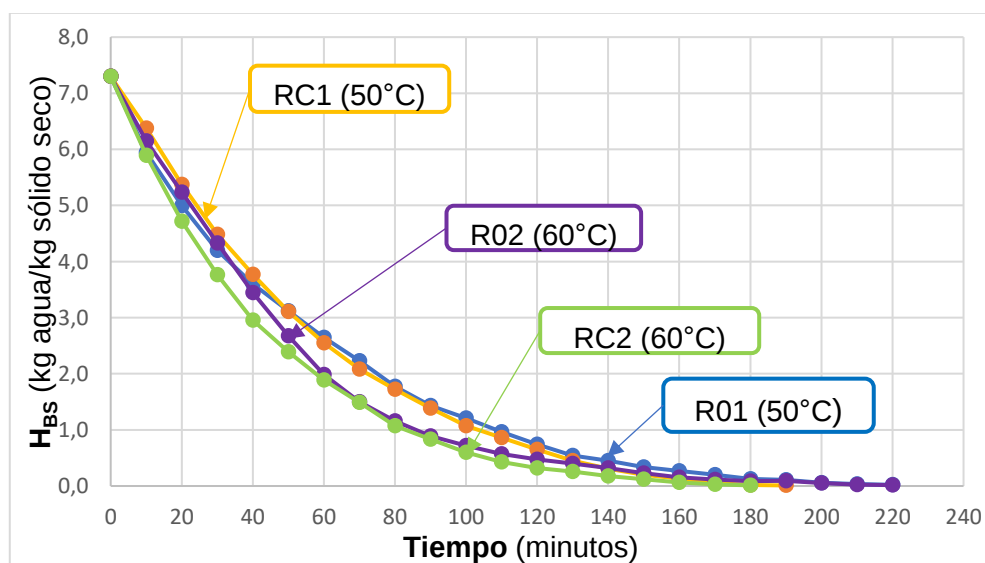
Variables para el análisis del contenido de humedad en base seca

Características	
Temperatura	$A_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$A_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
Velocidad del aire	$B_1 = 5,0\text{ m/s}$
	$B_2 = 5,5\text{ m/s}$
Corte	$C_1 = 0,1\text{ cm}$
	$C_2 = 0,2\text{ cm}$

Fuente: Elaboración propia

4.4.1 Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) $^{\circ}\text{C}$: B_1 (5,0) m/s versus C_1 (0,1) cm

En la figura 4.13, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R01- R02) y solución de ácido cítrico (RC1 - RC2). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando la temperatura entre (50 – 60) $^{\circ}\text{C}$; manteniendo constante la velocidad de aire (5 m/s) y corte (0,1 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



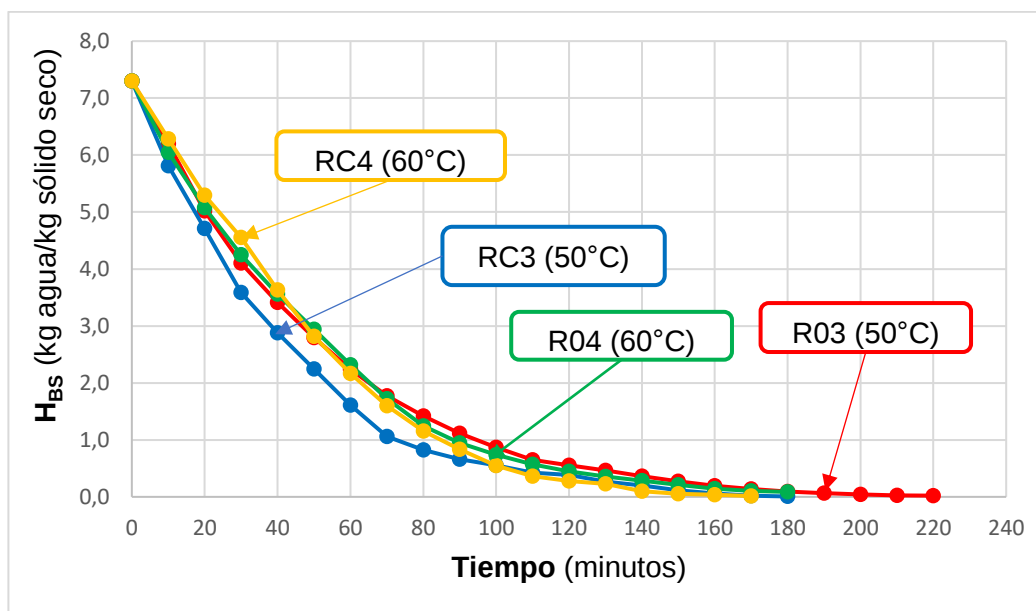
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13: Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) $^{\circ}\text{C}$: B_1 (5,0) m/s versus C_1 (0,1) cm

En la figura 4.13, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R01, RC1, R02 y RC2; a temperatura 50 °C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,1 cm; a 30 minutos R01 presenta (4,197) kg agua/kg sólido seco, para RC1 a 80 minutos presenta (1,726) kg agua/kg sólido seco. Así mismo; a temperatura 50 °C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,1 cm, R02 a los 30 minutos (4,331) kg agua/kg sólido seco, RC2 a 80 minutos (1,071) kg agua/kg sólido seco. También, se observar que R01 y R02 finaliza el secado en mayor tiempo con 220 minutos (0,022 – 0,016) kg agua/kg sólido seco comparadas con RC1 a 190 minutos 0,010 kg agua/kg sólido seco y RC2 a 180 minutos con humedad 0,011 kg agua/kg sólido seco.

4.4.2 Variación del contenido de humedad a temperatura entre A₁₂ (50 - 60) °C: B₂ (5,5) m/s versus C₁ (0,1) cm

En la figura 4.14, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R03-R04) y solución ácido cítrico (RC3 - RC4). Para tal efecto, se tomaron datos a intervalos de 10 min variando la temperatura entre (50 – 60) °C; manteniendo constante la velocidad del aire (5,5 m/s) y corte (0,1 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

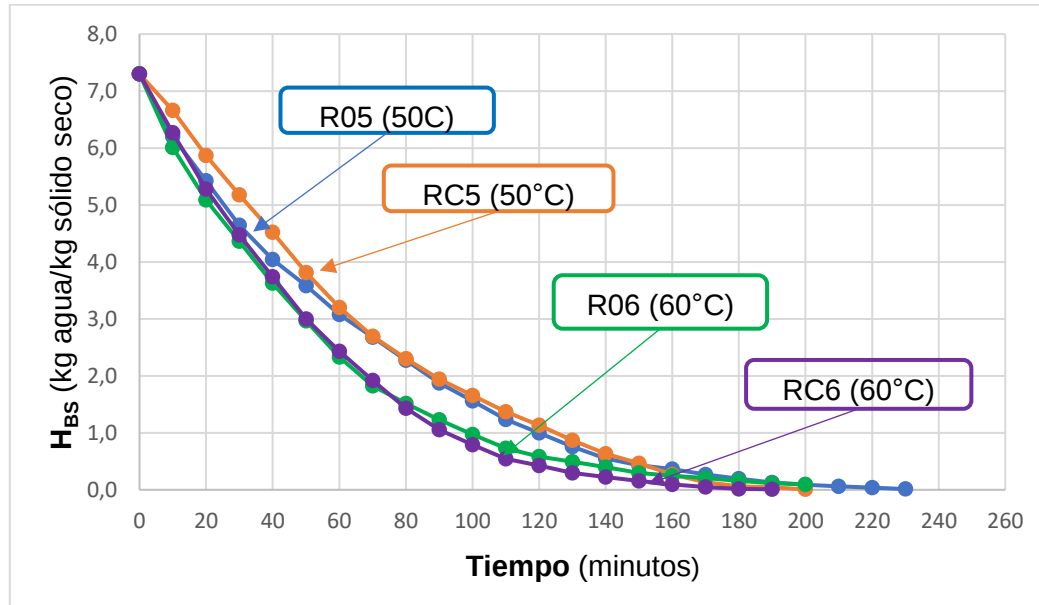
Figura 4.14: Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) °C: B_2 (5,5) m/s versus C_1 (0,1) cm

En la figura 4.14, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo de las muestras R03, RC3, R04 y RC4; a temperatura de 50 °C, velocidad del aire 5,5 m/s y corte 0,1 cm; a 40 minutos R03 presenta (3,412) kg agua/kg sólido seco, RC3 a 120 minutos presenta (0,386) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a temperatura 60 °C, velocidad del aire 5,5 m/s y corte 0,1 cm se observa que R04 a 40 minutos (3,559) kg agua/kg sólido seco y RC4 a 120 minutos (0,280) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, R03 y R04 finalizan el proceso de secado en mayor tiempo que RC3 y RC4; para R03 a 220 minutos y R04 a 180 minutos (0,022 – 0,087) kg agua/kg sólido seco, RC3 a 190 minutos con (0,007) kg agua/kg sólido seco y RC4 a 170 minutos con (0,015) kg agua/kg sólido seco.

4.4.3 Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) °C: B_1 (5) m/s versus C_2 (0,2) cm

En la figura 4.15, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R05-R06) y solución ácido cítrico (RC5 - RC6). Para tal efecto, se tomaron datos a intervalos de 10

min variando temperatura entre (50 – 60) °C; manteniendo constante la velocidad del aire (5 m/s) y corte (0,2 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



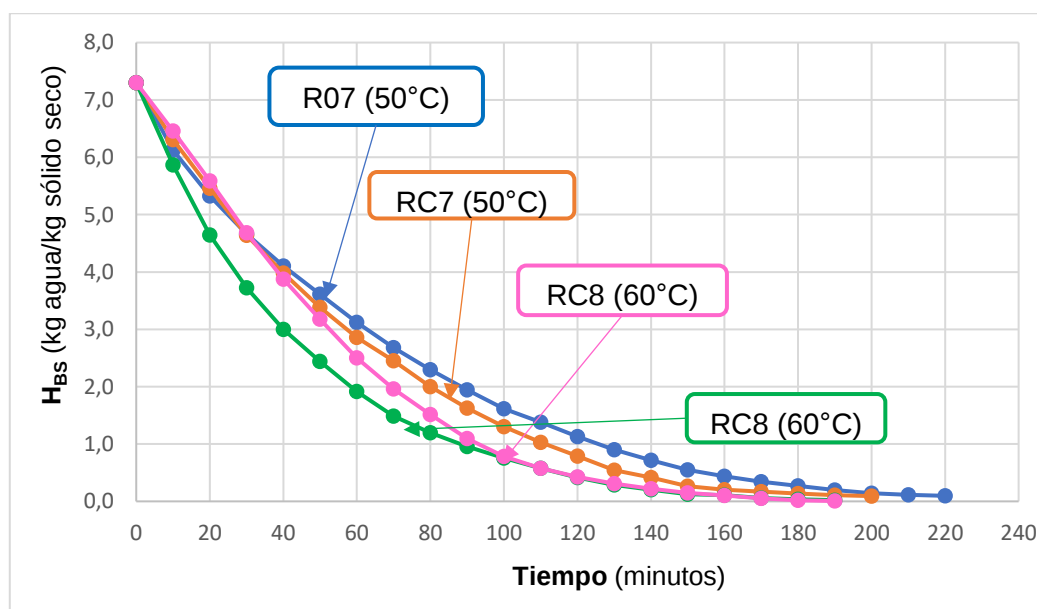
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15: Variación del contenido de humedad a temperatura entre A₁₂ (50 – 60) °C: B₁ (5) m/s versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.15, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R05, RC5, R06 y RC6; a temperatura de 50 °C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,2 cm; a 60 minutos R05 presentan (3,074) kg agua/kg sólido seco, RC5 a los 150 minutos presenta (0,467) kg agua/kg sólido seco. Así mismo; a temperatura de 60 °C, velocidad del aire 5,5 m/s y corte 0,2 cm, R06 a 60 minutos (2,329) kg agua/kg sólido seco y RC6 a los 150 minutos presenta (0,155) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se observar que las muestras R05 y R06 finalizan el proceso de secado en mayor tiempo comparadas con RC5 y RC6; para R05 a 230 minutos y R06 su secado finaliza a 200 minutos (0,013– 0,096) kg agua/kg sólido seco y las muestras RC5 a 200 minutos con (0,007) kg agua/kg sólido seco y RC6 a 190 minutos con (0,009) kg agua/kg sólido seco.

4.4.4 Variación del contenido de humedad a temperatura entre A₁₂ (50 - 60) °C: B₂ (5,5) m/s versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.16, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R07- R08) y solución ácido cítrico (RC7 - RC8). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando la temperatura entre (50 – 60) °C; manteniendo constante la velocidad del aire (5,5 m/s) y corte (0,2 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

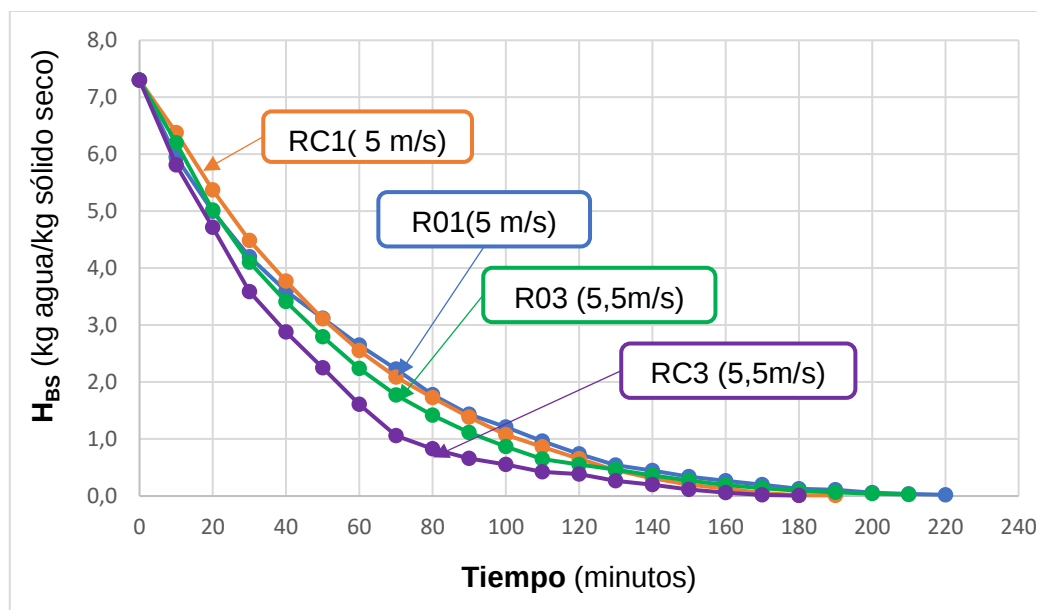
Figura 4.16: Variación del contenido de humedad a temperatura entre A₁₂ (50 - 60) °C: B₂ (5,5) m/s versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.16, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R07, RC7, R08 y RC8; a temperatura de 50 °C, velocidad del aire 5,5 m/s y corte 0,2 cm; a 30 minutos R07 presentan (4,663) kg agua/kg sólido seco, RC7 a 150 minutos presenta (0,264) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a temperatura de 50 °C, velocidad de aire 5,5 m/s y corte 0,2 cm, R08 a 100 minutos (0,758) kg agua/kg sólido seco y RC8 110 minutos (0,575) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se observar que las muestras R07 finaliza su secado 220 minutos

(0,097) kg agua/kg sólido seco en mayor tiempo que RC7, R08 y RC8; para R07 y las muestras R08 y RC8 el secado finaliza a 190 minutos (0,022 – 0,005) kg agua/kg sólido seco y RC7 a 200 minutos con (0,092) kg agua/kg sólido seco.

4.4.5 Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₁ (50) °C versus C₁(0,1) cm

En la figura 4.17, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R01- (R03) y solución ácido cítrico (RC1 - RC3). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando velocidad del aire entre (5 - 5,5) m/s; manteniendo constante la temperatura (50°C) y corte (0,1 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

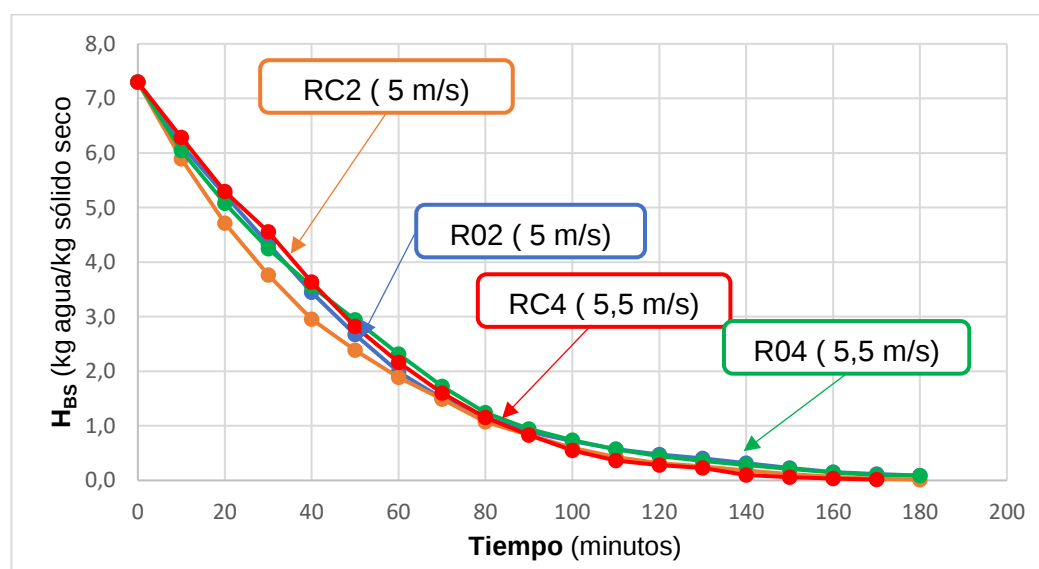
Figura 4.17: Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₁ (50) °C versus C₁(0,1) cm

En la figura 4.17, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R01, RC1, R03 y RC3, a velocidad de 5 m/s, temperatura 50 °C y corte 0,1 cm; a 50 minutos R01 (3,118) kg agua/kg sólido seco, RC1 a 90 minutos (1,385) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a velocidad de aire 5,5 m/s, temperatura de 50 °C y corte 0,1 cm; R02

a 50 minutos (2,794) kg agua/kg sólido seco, RC2 a 90 minutos (0,661) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se observa que R01 y R03 finalizan su secado en mayor tiempo que RC1 y RC3; (R01) 220 minutos y (R03) 210 minutos con (0,022 – 0,026) kg agua/kg sólido seco respectivamente, RC1 a 190 minutos 0,010 kg agua/kg sólido seco y RC2 a 180 minutos con 0,007 kg agua/kg sólido seco.

4.4.6 Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₂ (60) °C versus (0,1) cm

En la figura 4.18, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R02-R04) y solución ácido cítrico (RC2 - RC4). Para tal efecto, se tomó datos a intervalos de 10 min variando la velocidad del aire entre (5 - 5,5) m/s; manteniendo constante la temperatura (60 °C) y corte (0,1 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

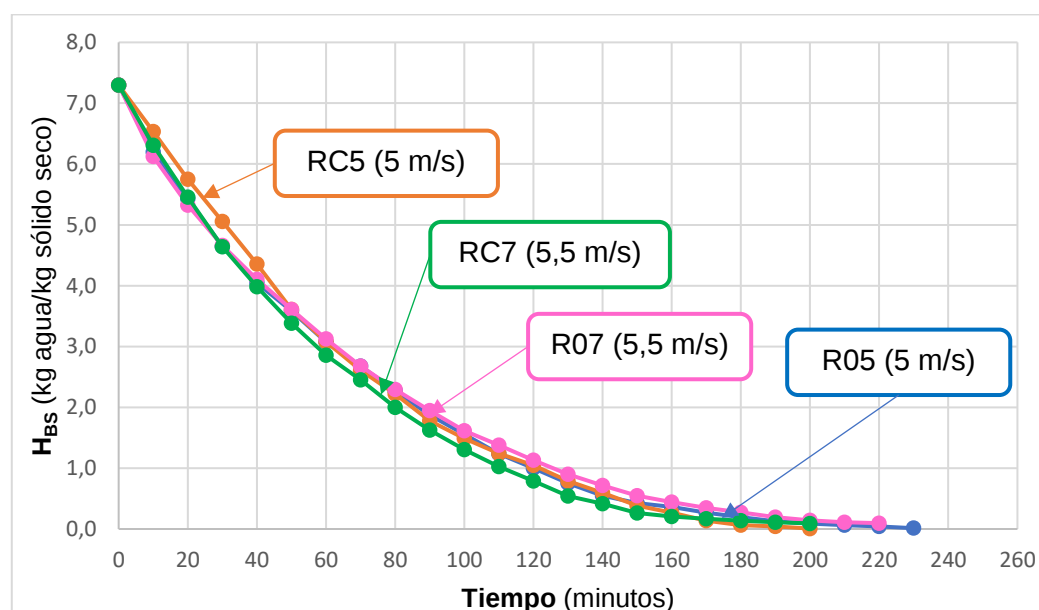
Figura 4.18: Variación del contenido de humedad con velocidad de aire B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₂ (60) °C vs C₁(0,1) cm

En la figura 4.18, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R02, RC2, R04 y RC4, a velocidad de 5 m/s, temperatura 60 °C y corte 0,1 cm; a 50 minutos R02 (2,673)

kg agua/kg sólido seco, RC2 a 90 minutos (0,835) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a velocidad de aire 5,5 m/s, temperatura de 60°C y corte 0,1 cm; R04 a 50 minutos (2,941) kg agua/kg sólido seco, RC4 a 90 minutos (0,947) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se observa que R02, RC2 y R04 finalizan el proceso de secado en mayor tiempo que RC4; para (R02, RC2 y R04) 180 minutos (0,088 – 0,011 – 0,087) kg agua/kg sólido seco respectivamente y RC4 a 170 minutos 0,015 kg agua/kg sólido seco.

4.4.7 Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₁ (50) °C versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.19, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R05-R07) y en solución con ácido cítrico (RC5 - RC7). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando la velocidad del aire entre (5 - 5,5) m/s; manteniendo constante la temperatura (50 °C) y corte (0,2 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

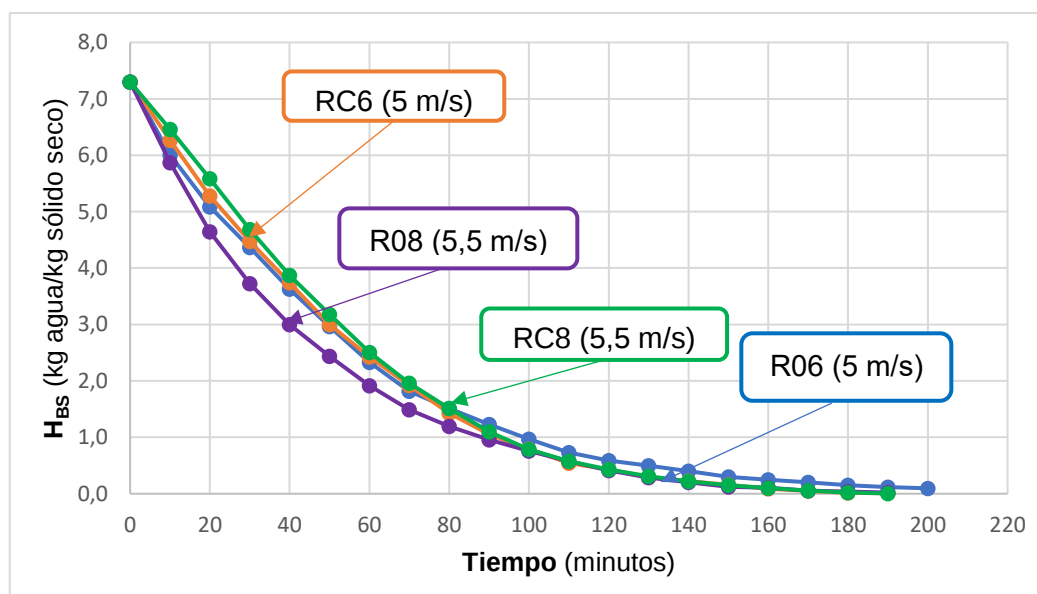
Figura 4.19: Variación del contenido de humedad con velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₁ (50) °C versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.19, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para R05, RC5, R07 y RC7, a velocidad de aire 5 m/s,

temperatura 50 °C y corte 0,2 cm; a 50 minutos R05 (3,583) kg agua/kg sólido seco, RC5 a 100 minutos (1,490) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a velocidad de aire 5,5 m/s, temperatura de 50 °C y corte 0,2 cm; R07 a 50 minutos (3,611) kg agua/kg sólido seco, RC7 a 100 minutos (1,304) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, R05 y R07 finalizan el proceso de secado en mayor tiempo que RC5 y RC7; para (RC5 y RC7) 200 minutos con (0,007 – 0,092) kg agua/kg sólido seco respectivamente, R05 y R07 a (230 - 240) minutos (0,013 – 0,097) kg agua/kg sólido seco.

4.4.8 Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₂ (60) °C versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.20, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R06-R08) y solución ácido cítrico (RC6 - RC8). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando la velocidad del aire entre (5 - 5,5) m/s; manteniendo constante la temperatura (60 °C) y corte (0,2 cm); los resultados se detallan en el (Anexo E).



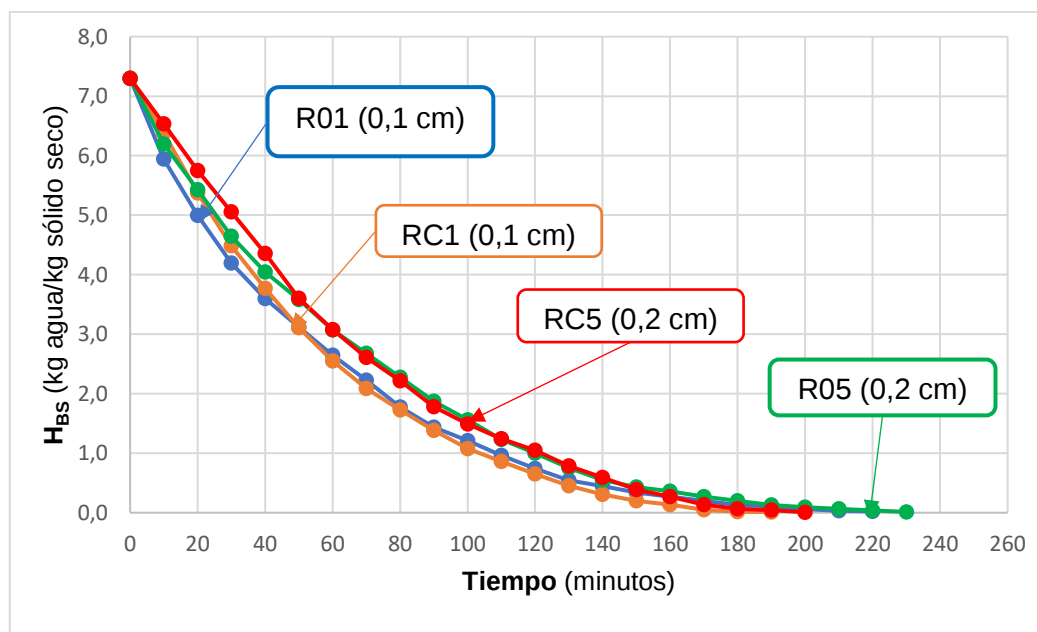
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.20: Variación del contenido de humedad a Velocidad de aire entre B₁₂ (5 – 5,5) m/s: A₂ (60) °C versus C₂ (0,2) cm

En la figura 4.20, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R06, RC6, R08 y RC8, a velocidad de aire 5 m/s, temperatura 60 °C y corte 0,2 cm; a 70 minutos R06 (1,821) kg agua/kg sólido seco, RC6 a 130 minutos (0,294) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a velocidad de aire 5,5 m/s, temperatura de 60 °C y corte 0,2 cm; R08 a 70 minutos (1,488) kg agua/kg sólido seco, RC8 a 130 minutos (0,310) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, RC6, R08 y RC8 finalizan su secado en menor tiempo que R06; para (RC6, R08 y RC8) 190 minutos (0,009 – 0,022 – 0,005) kg agua/kg sólido seco respectivamente en cambio la muestra R06 a 200 minutos 0,096 kg agua/kg sólido seco.

4.4.9 Variación del contenido de humedad a corte C₁₂ (0,1 – 0,2) cm: A₁ (50) °C versus B₁ (5) m/s

En la figura 4.21, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R01-R05) y solución ácido cítrico (RC1 - RC5). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando el corte entre (0,1 – 0,2) cm manteniendo constante la temperatura (50) °C y velocidad del aire (5 m/s); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

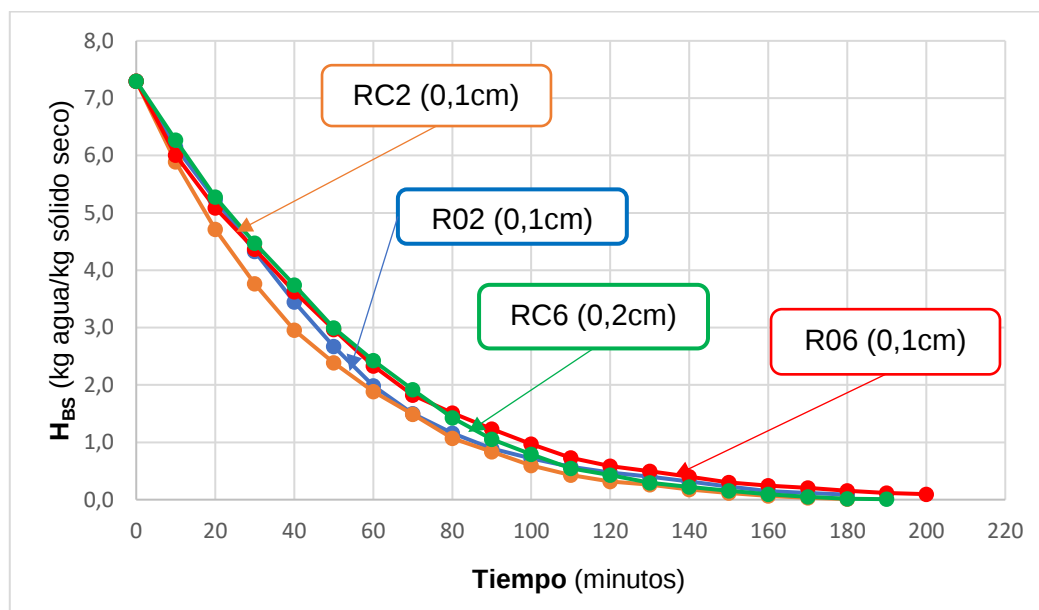
Figura 4.21: Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 - 0,2) cm: A_1 (50) °C versus B_1 (5) m/s

En la figura 4.21, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo de las muestras R01, RC1, R05 y RC5; a temperatura de 50 °C, velocidad de aire 5 m/s y corte 0,1 cm; a 30 minutos R01 (4,197) kg agua/kg sólido seco, RC1 a 90 minutos (1,435) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a temperatura de 60°C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,2 cm; R05 a 30 minutos (4,645) kg agua/kg sólido seco, RC5 a 90 minutos (1,779) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, R01 y R05 finalizan su secado en mayor tiempo que RC1 y RC5; para R01 a 220 minutos y R05 a 230 minutos (0,022 – 0,013) kg agua/kg sólido seco respectivamente, RC1 y RC5 a (190 - 200) minutos (0,010 - 0,007) kg agua/kg sólido seco.

4.4.10 Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_2 (60) °C versus B_1 (5) m/s

En la figura 4.22, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R02-R06) y solución ácido cítrico (RC2 - RC6). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min

variando el corte entre (0,1 – 0,2) cm manteniendo constante la temperatura (60) °C y velocidad del aire (5 m/s); los resultados se detallan en el (Anexo E).



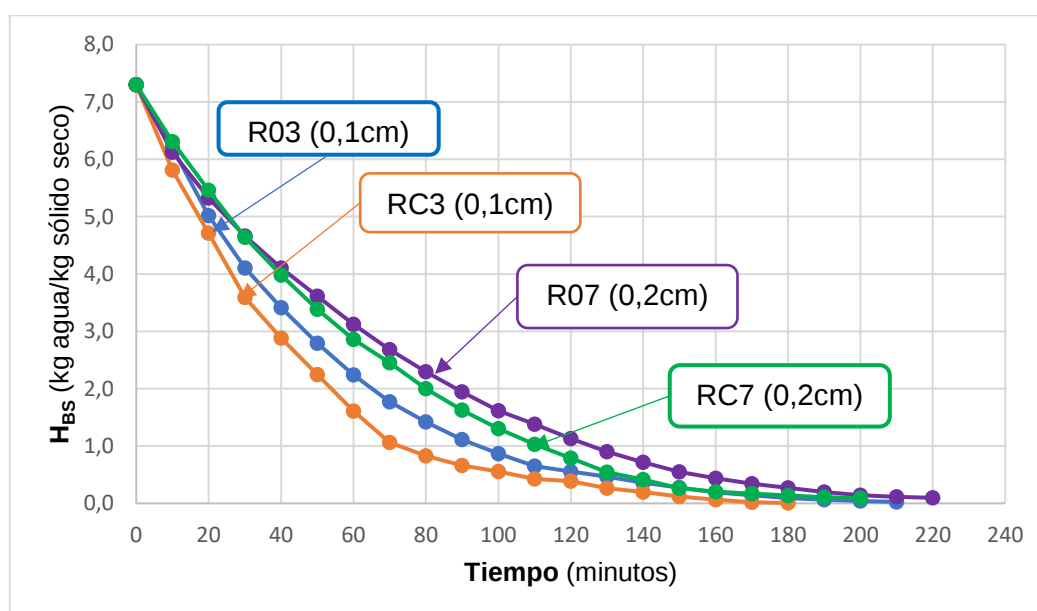
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.22: Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_2 (60) °C versus B_1 (5) m/s

En la figura 4.22 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R02, RC2, R06 y RC6; a temperatura de 60 °C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,1 cm; a 60 minutos R02 (1,988) kg agua/kg sólido seco, RC2 a 120 minutos (1,887) kg agua/kg sólido seco. Así mismo, a temperatura de 60°C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,2 cm; R06 a 60 minutos (2,329) kg agua/kg sólido seco y RC6 a 120 minutos (0,428) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se puede observar que R02 y RC2 finalizan el proceso de secado a 180 minutos con (0,088 – 0,011) kg agua/kg sólido seco respectivamente, R06 200 minutos RC6 a 190 minutos (0,096 – 0,009) kg agua/kg sólido.

4.4.11 Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_1 (50) °C versus B_2 (5,5) m/s

En la figura 4.23, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R03- R07) y solución ácido cítrico (RC3 - RC7). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando el corte (0,1 – 0,2) cm manteniendo constante temperatura entre (50) °C y velocidad del aire (5,5 m/s); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

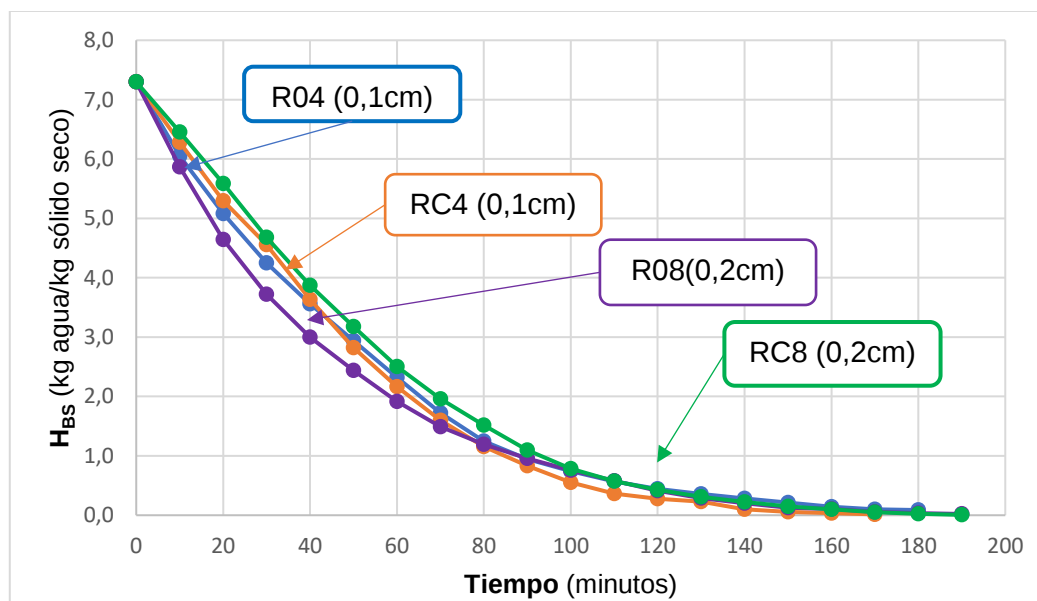
Figura 4.23: Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_1 (50) °C versus B_2 (5,5) m/s

En la figura 4.23, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R03, RC3, R07 y RC7; a temperatura de 50 °C, velocidad del aire 5,5 m/s y corte 0,1 cm; a 60 minutos R03 (2,240) kg agua/kg sólido seco, RC3 a 120 minutos (0,386) kg agua/kg sólido seco. Así mismo a temperatura de 60 °C, velocidad del aire 5 m/s y corte 0,2 cm; R07 a 60 minutos (3,123) kg agua/kg sólido seco, RC7 a 120 minutos (0,790) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se observa que R03 finaliza su proceso de secado a 210 minutos y R07 a 180 minutos con (0,026 –

0,097) kg agua/kg sólido seco respectivamente, muestra RC3 a 180 minutos RC7 a 200 minutos (0,007 – 0,092) kg agua/kg sólido seco.

4.4.12 Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_2 (60) °C versus B_2 (5,5) m/s

En la figura 4.24, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo en muestras sin tratamiento (R04) y (R08) y solución con ácido cítrico (RC4) y (RC8). Para tal efecto, se tomaron de datos a intervalos de 10 min variando el corte entre (0,1 – 0,2) cm manteniendo constante temperatura entre (60) °C y velocidad del aire (5,5 m/s); los resultados se detallan en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.24: Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_2 (60) °C versus B_2 (5,5) m/s

En la figura 4.24, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras R04, RC4, R08 y RC8; a temperatura de 50°C, velocidad de aire 5,5 m/s y corte 0,1 cm; a 80 minutos R04 (1,246) kg agua/kg sólido seco, RC4 a 130 minutos presenta (0,227) kg agua/kg sólido seco. Así mismo a temperatura de 60 °C, velocidad de aire 5

m/s y corte 0,2 cm; R08 a 80 minutos (1,196) kg agua/kg sólido seco, RC8 a 130 minutos (0,310) kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, se puede observar que las muestras R08 y RC8 finaliza su secado a 190 minutos con (0,022 - 0,005) kg agua/kg sólido respectivamente en cambio la muestra R04 180 minutos con (0,087) kg agua/kg sólido seco y RC4 finaliza su secado a 170 minutos (0,015) kg agua/kg sólido seco.

4.5 Cinética de secado para el proceso de secado en la obtención de harina de brócoli

La cinética del secado se realizó en las muestras de brócoli sin tratamiento (R03) y con solución de ácido cítrico (RC1) para observar la cualidad que tiene cada muestra sobre la variación del contenido de humedad y de la velocidad de evaporación en función del tiempo.

4.5.1 Cinética de secado para el proceso de secado de brócoli sin tratamiento

En la tabla 4.18, se muestra los resultados de variación de contenido de humedad y velocidad de secado para obtención de harina de brócoli sin tratamiento (R03); en condiciones de temperatura 50°C, velocidad de aire 5,5 m/s y corte 0,1 cm. Los resultados fueron obtenidos con ayuda de la ecuación (2.3) para cálculo de masa de sólido seco y mediante regresión por Excel (2019), tomando en cuenta los siguientes datos:

- Cantidad de materia prima: 100,61 g
- Contenido de humedad: 87,95 % (CEANID, 2023)
- Masa de solido seco: 12,163 g
- Área de la bandeja: 0,035 m²
- Tiempo de secado: 3,30 horas

Tabla 4.18

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

Tiempo (min)	Peso (g)	H _{BS} (kg/kg)	H _{BS} media (kg/kg)	ΔΘ (h)	ΔH _{BS} (kg/kg)	ΔH _{BS} /ΔΘ (kg/kg*h)	N (kg/m ² h)
0	100,61	7,299	-	-	-	-	-
10	86,82	6,161	6,730	0,167	1,137	6,811	2,335
20	73,67	5,077	5,619	0,167	1,085	6,495	2,227
30	62,72	4,173	4,625	0,167	0,903	5,408	1,854
40	54,51	3,496	3,835	0,167	0,677	4,055	1,390
50	46,96	2,873	3,185	0,167	0,623	3,729	1,279
60	39,87	2,289	2,581	0,167	0,585	3,502	1,201
70	33,64	1,775	2,032	0,167	0,514	3,077	1,055
80	29,39	1,424	1,599	0,167	0,351	2,099	0,720
90	25,21	1,079	1,252	0,167	0,345	2,065	0,708
100	21,83	0,801	0,940	0,167	0,279	1,669	0,572
110	19,89	0,641	0,721	0,167	0,160	0,958	0,329
120	18,84	0,554	0,597	0,167	0,087	0,519	0,178
130	17,86	0,473	0,514	0,167	0,081	0,484	0,166
140	16,64	0,373	0,423	0,167	0,101	0,603	0,207
150	15,61	0,288	0,330	0,167	0,085	0,509	0,174
160	14,82	0,222	0,255	0,167	0,065	0,390	0,134
170	13,83	0,141	0,182	0,167	0,082	0,489	0,168
180	13,03	0,075	0,108	0,167	0,066	0,395	0,135
190	12,92	0,066	0,070	0,167	0,009	0,054	0,019
200	12,75	0,052	0,059	0,167	0,014	0,084	0,029
210	12,39	0,022	0,037	0,167	0,030	0,178	0,061

Fuente: Elaboración propia

Donde

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

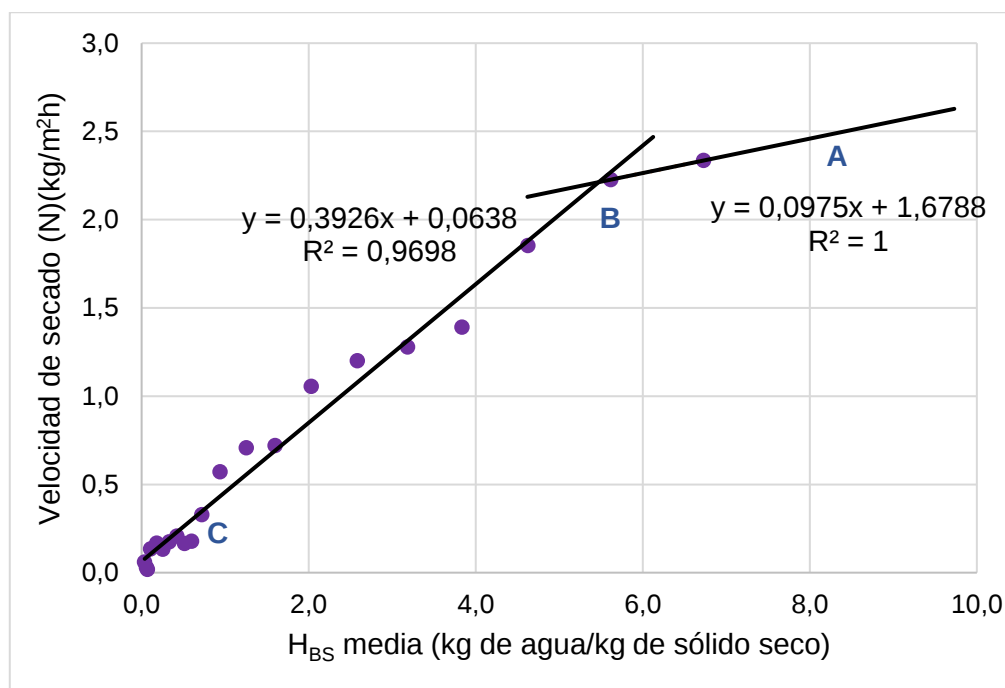
H_{BS} media = Contenido de humedad media (kg agua/kg sólido seco)

ΔH_{BS} = Gradiente de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

ΔH_{BS}/ΔΘ = Gradiente de humedad en base seca sobre el gradiente de tiempo
(kg agua/kg sólido seco * h)

N = Velocidad de secado ($\text{kg sólido seco}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

En la figura 4.25, se muestran la cinética en el proceso de secado para las muestras de brócoli sin tratamiento en función del contenido de humedad media en base de datos de la tabla 4.17.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.25: Cinética en el proceso de secado para las muestras de brócoli sin tratamiento

En la figura 4.25, se observan el comportamiento de humedad media en relación con la velocidad de secado, donde se pudo concluir que existe dos tramos distintos:

El tramo (A - B) representa el periodo ante-crítico donde el contenido de humedad de las muestras de brócoli 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 $R^2(1)$ se describe en la ecuación 4.3.

$$y = 0,0975x + 1,6788$$

Ecuación (4.3)

El tramo (B-C) representa el periodo pos-critico donde la velocidad de secado decrece hasta que el contenido de humedad de las muestras de brócoli alcanza el equilibrio, logrando un secado total en la superficie, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión R^2 (0,9698) se describe en la ecuación 4.4.

$$y = 0,3926x + 0,0638 \quad \text{Ecuación (4.4)}$$

4.5.2 Cinética de secado para el proceso de secado de brócoli con solución de ácido cítrico

En la tabla 4.19, se muestra los resultados de variación de contenido de humedad y velocidad de secado para obtención de harina de brócoli con solución de ácido cítrico (RC1); en condiciones de temperatura 50°C, velocidad de aire 5,5 m/s y corte 0,1 cm. Los resultados fueron obtenidos con ayuda de la ecuación (2.3) para cálculo de masa de sólido seco y mediante regresión por Excel (2019), tomando en cuenta los siguientes datos:

- Cantidad de materia prima: 100,61 g
- Contenido de humedad: 87,95 %
- Masa de solido seco tiempo de secado: 12,163 g=0,012163
- Área de la bandeja: 0,035 m²
- Tiempo de secado: 3,30 min

Tabla 4.19

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

Tiempo (min)	Peso (g)	H _{BS} (kg/kg)	H _{BS} media (kg/kg)	$\Delta\theta$ (h)	ΔH_{BS} (kg/kg)	$\Delta H_{BS}/\Delta\theta$ (kg/kg*h)	N (kg/m ² h)
0	100,44	7,299	-	-	-	-	-
10	88,18	6,468	6,884	0,167	0,830	4,972	1,705
20	76,31	5,440	5,954	0,167	1,029	6,159	2,112
30	65,67	4,543	4,991	0,167	0,897	5,371	1,841
40	57,61	3,778	4,161	0,167	0,765	4,578	1,570
50	50,25	3,066	3,422	0,167	0,713	4,268	1,463
60	43,39	2,516	2,791	0,167	0,549	3,289	1,128
70	38,23	2,012	2,264	0,167	0,505	3,023	1,036
80	33,64	1,672	1,842	0,167	0,340	2,033	0,697
90	29,09	1,366	1,519	0,167	0,306	1,831	0,628
100	25,45	1,049	1,207	0,167	0,317	1,900	0,652
110	22,63	0,851	0,950	0,167	0,197	1,182	0,405
120	20,01	0,650	0,751	0,167	0,201	1,206	0,414
130	17,43	0,466	0,558	0,167	0,184	1,103	0,378
140	15,67	0,323	0,394	0,167	0,143	0,857	0,294
150	14,53	0,203	0,263	0,167	0,120	0,719	0,246
160	13,73	0,131	0,167	0,167	0,072	0,428	0,147
170	12,81	0,043	0,087	0,167	0,088	0,527	0,181
180	12,36	0,011	0,027	0,167	0,032	0,192	0,066
190	12,28	0,005	0,008	0,167	0,006	0,034	0,012

Fuente: Elaboración propia

Donde:

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

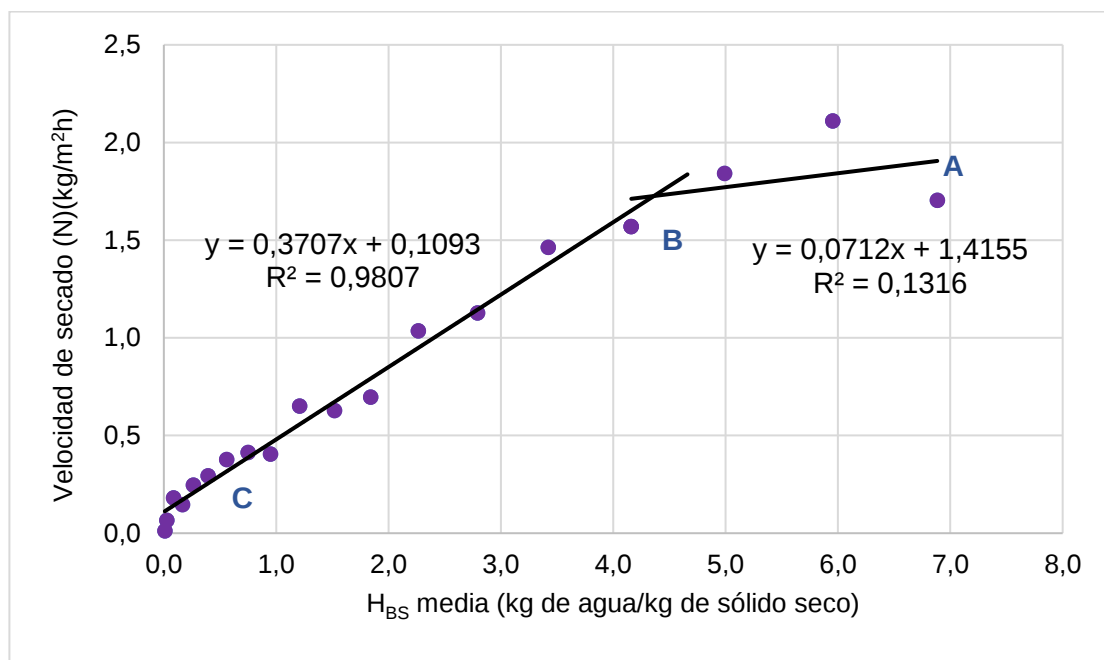
H_{BS} media = Contenido de humedad media (kg agua/kg sólido seco)

ΔH_{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/m² * h)

En la figura 4.26, se muestran la cinética en el proceso de secado para las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico en función de la tabla 4.17.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.26: Cinética en el proceso de secado para las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico

En la figura 4.26, se observar el comportamiento de humedad media en relación con la velocidad de secado, donde se pudo concluir que existe dos tramos distintos:

El tramo (A - B) representa el periodo ante-critico donde el contenido de humedad de las muestras de brócoli 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 $R^2(0,1316)$ se describe en la ecuación 4.5.

$$y = 0,0712x + 1,4155 \quad \text{Ecuación (4.5)}$$

El tramo (B-C) representa el periodo pos-critico donde la velocidad de secado decrece hasta que el contenido de humedad de las muestras de brócoli alcanza el equilibrio, logrando un secado total en la superficie, por lo tanto, la ecuación

matemática con un coeficiente de regresión R^2 (0,9807) se describe en la ecuación 4.6.

$$y = 0,3707x + 0,1093 \quad \text{Ecuación (4.6)}$$

4.6 Caracterización de la harina de brócoli

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

4.6.1 Análisis fisicoquímico de la harina de brócoli

En la tabla 4.20, se muestran los resultados de análisis fisicoquímico de harina de brócoli de datos extraídos del anexo A.2 (Anexo A).

Tabla 4.20

Análisis fisicoquímicos de harina de brócoli

Parámetros	Unidad	Resultado
Cenizas	%	7,60
Fibra	%	19,20
Grasa	%	4,48
Hidratos de carbono	%	45,12
Proteína total (N*6,25)	%	35,57
Humedad	%	7,23
Valor energético	Kcal/100 g	363,00

Fuente: CEANID, 2024

Como se observa en la tabla 4.20, se expresan los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de harina de brócoli que contiene: Cenizas 7,60%; Fibra 19,20%; Grasa 4,48%; Hidratos de carbono 45,12%; Proteína total (N*6,25) 35,57%; Humedad 7,23% y Valor energético 363 Kcal/100 g.

4.6.2 Análisis de minerales de la harina de brócoli

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de análisis de minerales de harina de brócoli de datos extraídos del anexo A.2 (Anexo A).

Tabla 4.21

Análisis de minerales de harina de brócoli

Minerales	Unidad	Resultado
Calcio	mg/100 g	362,0
Potasio	mg/100 g	4,0

Fuente: CEANID, 2024

Como se puede observar en la tabla 4.21, se muestran los resultados obtenidos del análisis de minerales de harina de brócoli que contiene: Calcio 362 mg/100 g y potasio 4,0 mg/100 g.

4.6.3 Análisis microbiológico de harina de brócoli

En la tabla 4.22, se muestran los resultados de análisis microbiológicos de harina de brócoli de datos extraídos del anexo A.2 (Anexo A).

Tabla 4.22

Análisis microbiológicos de harina de brócoli

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

Fuente: CEANID, 2024

En la tabla 4.22, se observan los resultados obtenidos del análisis microbiológico de harina de brócoli: Coliformes totales $<1 \times 10^1$ UFC/g (*); Escherichia coli $<1,0 \times 10^1$ UFC/g (*) y Salmonella, Ausencia P/A/25 g.

4.7 Control de harina de brócoli en el almacenamiento

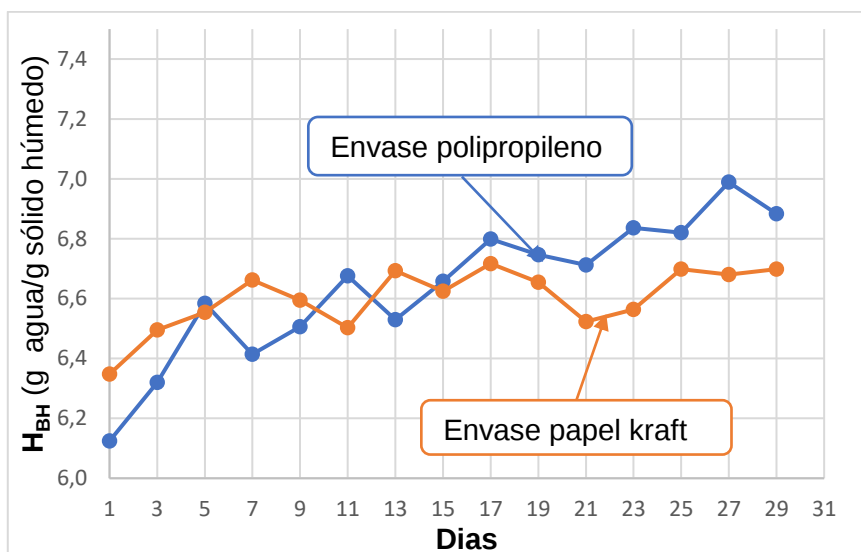
En la tabla 4.23, se muestran los resultados del almacenamiento de la harina de brócoli. Para tal efecto, se tomó en cuenta (RC1) envasado en dos tipos de envase: bolsa de polipropileno (MC1) y papel Kraft (MC2). Por lo cual, se controló el contenido de humedad en la termobalanza cada dos días.

Tabla 4.23

Control de humedad de la harina de brócoli		
Día	Envase polipropileno	Papel Kraft
	(plástico transparente)	(papel Kraft negro)
	MC1(H _{BH})	MC2(H _{BH})
1	6,1245	6,3478
3	6,3199	6,4951
5	6,5836	6,5546
7	6,4136	6,6621
9	6,5064	6,5947
11	6,6761	6,5029
13	6,5292	6,6931
15	6,6578	6,6247
17	6,7985	6,7169
19	6,7466	6,6545
21	6,7122	6,5229
23	6,8365	6,5637
25	6,8207	6,6982
27	6,9886	6,6804
29	6,8831	6,6987

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.27, se muestra el control de la harina de brócoli en el almacenamiento en dos tipos de envases de polipropileno: plástico transparente y papel Kraft negro, para observar la variación del contenido de humedad en bases a datos de la tabla 4.23.



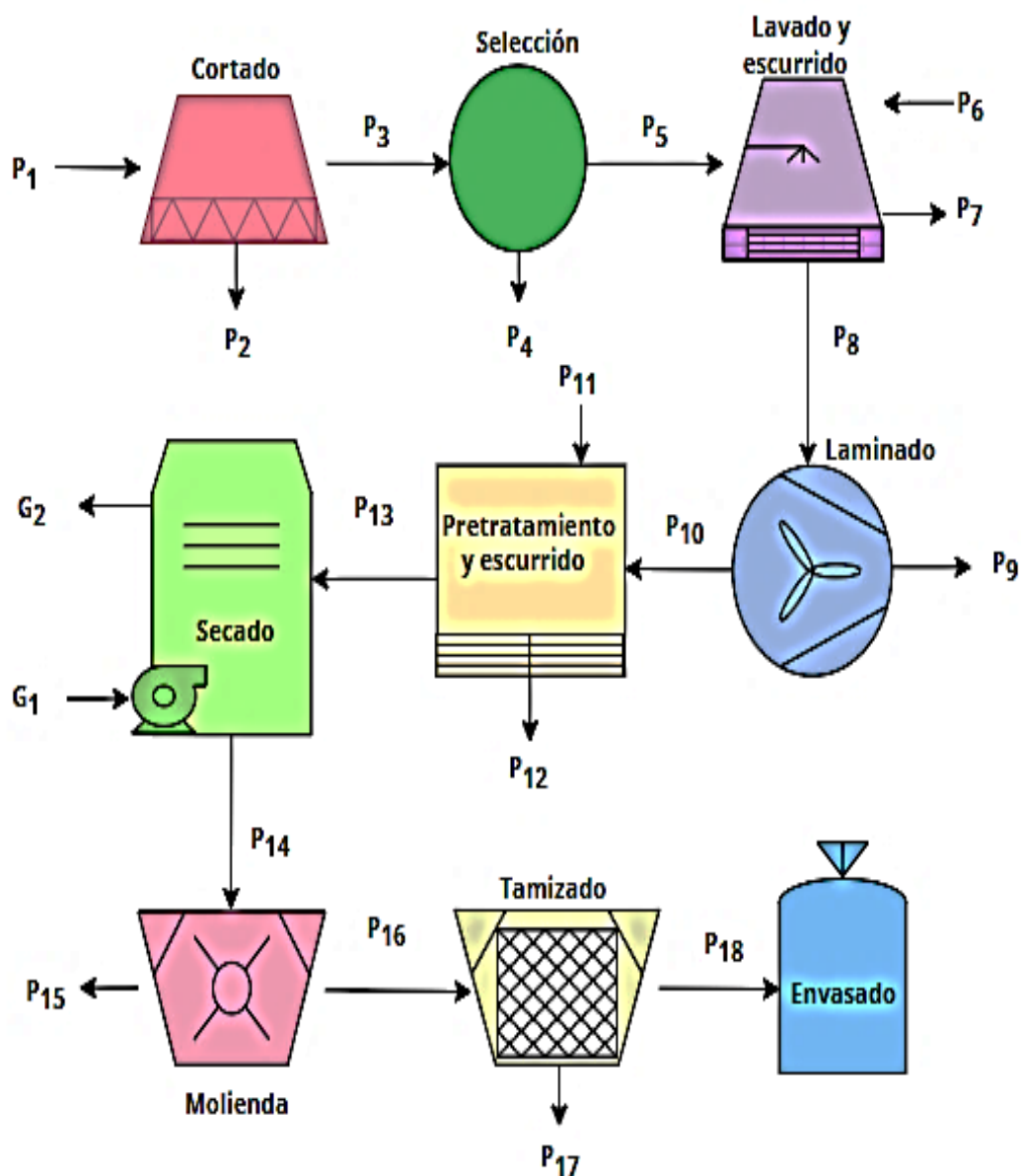
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.27: Control de almacenamiento de harina de brócoli

En la figura 4.27, se observa que la muestra (MC1) y (MC2) presentan inicialmente un contenido de humedad en base húmeda de (6,1245 – 6,3478) kg agua/kg sólido húmedo en el primer día. Así mismo, al finalizar el control de 29 días MC1 con 6,8831 (kg agua/kg sólido húmedo) y MC2 (kg agua/kg sólido húmedo). Por tanto, el envase de papel Kraft negro (MC2) conserva su contenido de humedad estable, por lo tanto, se tomó como el envase elegido para conservar la harina de brócoli.

4.8 Balance de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli

El balance de materia del proceso de obtención de harina de brócoli se realizó para una base de cálculo 1000,00 g de brócoli y para su resolución se realizó de acuerdo diagrama de flujo (figura 4.28).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.28: Balance de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli

Donde:

P_1 = Brócoli (g)

X_1^{PC} = Fracción de porción comestible en el brócoli

X_1^{PNC} = Fracción de porción no comestible en el brócoli

P_2 = Tallo de brócoli (g)

X_2^{PC} = Fracción de porción comestible en el brócoli

X_2^{PNC} = Fracción de porción no comestible en el brócoli

P_3 = Floretes de brócoli (g)

X_3^{PC} = Fracción de porción comestible en el brócoli

X_3^{PNC} = Fracción de porción no comestible en el brócoli

P_4 = Floretes amarillos de brócoli (g)

X_4^{PC} = Fracción de porción comestible en el brócoli

X_4^{PNC} = Fracción de porción no comestible en el brócoli

P_5 = Floretes de brócoli seleccionado (g)

X_5^{PC} = Fracción de porción comestible en el brócoli

X_5^{PNC} = Fracción de porción no comestible en el brócoli

X_5^H = Fracción de humedad del brócoli

X_5^S = Fracción de sólido soluble del brócoli

P_6 = Agua potable (g)

X_6^A = Fracción de agua en el agua

P_7 = Agua residual del lavado (g)

X_7^A = Fracción de agua en el agua residual de lavado

X_7^I = Fracción de impurezas en el agua residual de lavado

P_8 = Brócoli lavado (g)

X_8^H = Fracción de humedad del brócoli lavado

X_8^S = Fracción de sólidos solubles del brócoli lavado

X_8^{AD} = Fracción de agua adherida en el brócoli lavado

X_8^{LU} = Fracción de porción de láminas útiles del brócoli lavado

X_8^{LNU} = Fracción de porción láminas no útiles del brócoli lavado

P_9 = Láminas de brócoli desecho (g)

X_9^{LU} = Fracción de porción de láminas útiles en el desecho

X_9^{LNU} = Fracción de porción de láminas no útiles en el desecho

P_{10} = Brócoli laminado (g)

X_{10}^{LU} = Fracción de porción de láminas útiles en el brócoli laminado

X_{10}^{LNU} = Fracción de porción de láminas no útiles en el brócoli laminado

X_{10}^H = Fracción de humedad en las láminas de brócoli

X_{10}^S = Fracción de sólido soluble en las láminas de brócoli

X_8^{AD} = Fracción de agua adherida en el brócoli

P_{11} = Solución ácido cítrico al 0,01 % (g)

X_{11}^A = Fracción de agua en la solución ácido cítrico

P_{12} = Solución residual del pretratamiento (g)

X_{12}^A = Fracción de agua en la solución residual del pretratamiento

P_{13} = Brócoli con pretratamiento (g)

X_{13}^H = Fracción de humedad en el brócoli con pretratamiento

X_{13}^S = Fracción de sólido soluble en el brócoli con pretratamiento

X_{13}^{AD} = Fracción de agua adherida en el brócoli con pretratamiento

X_{13}^{NS} = Fracción no solida de brócoli con pretratamiento

P_{14} = Brócoli seco (g)

X_{14}^H = Fracción de humedad en el brócoli seco

X_{14}^S = Fracción de sólido soluble en el brócoli seco

P_{15} = Pérdida en la molienda (g)

P_{15} = Porcentaje de pérdida en la molienda (%)

P_{16} = Harina de brócoli (g)

P_{16} = Porcentaje de harina de brócoli (%)

P_{17} = Pérdida de harina de brócoli en el tamizado (g)

P_{17} = Porcentaje pérdida de harina de brócoli en el tamizado (%)

P_{18} = Harina de brócoli tamizado (g)

P_{18} = Porcentaje de harina tamizada (%)

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

G_2 = cantidad de masa de agua evaporada (g)

H_{P13} = Entalpía del brócoli en la entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

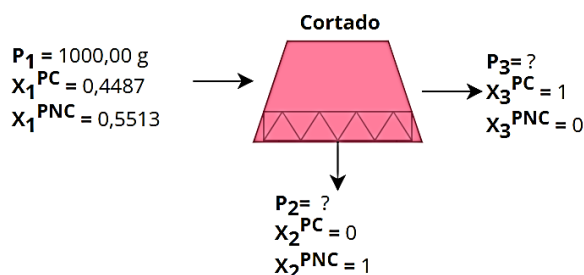
H_{P14} = Entalpía del brócoli en la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

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

H_{G2} = Entalpía del aire seco de salida del secador (kJ/kg sólido seco)

4.8.1 Balance de materia en la etapa de cortado

En la figura 4.29, se muestra el balance de materia en la etapa de cortado con una cantidad de 1000,00 g de brócoli, tomando en cuenta datos de la tabla 4.1, donde: porción comestible 44,87% (PC) y porción no comestible 55,13% (PNC).



Fuente: Elaboración propia
Figura 4.29: Balance de materia en la etapa de cortado

Balance general de materia en la etapa de cortado

$$P_1 = P_2 + P_3 \quad \text{(Ecuación 4.7)}$$

Balance parcial de materia de la porción comestible de brócoli

$$P_1 X_1^{PC} = P_2 X_2^{PC} + P_3 X_3^{PC} \quad \text{(Ecuación 4.8)}$$

Despejamos P_3 de la ecuación 4.8, se obtiene:

$$P_1 X_1^{PC} = \cancel{P_2 X_2^{PC}} + P_3 X_3^{PC}$$

$$P_3 = \frac{P_1 X_1^{PC}}{X_3^{PC}}$$

$$P_3 = \frac{(1000,00 \text{ g} * 0,4487)}{1}$$

$$P_3 = 448,70 \text{ g floretes de brócoli}$$

Despejando P_2 de la ecuación 4.7, se obtiene:

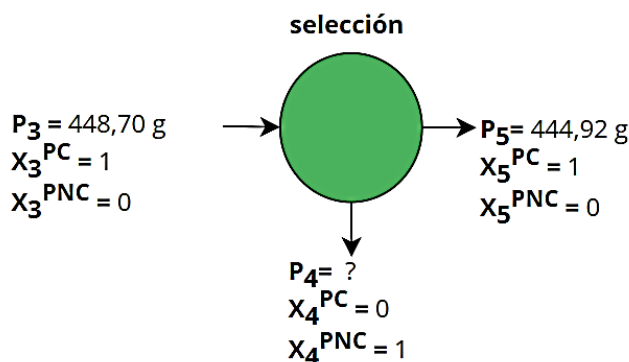
$$P_2 = P_1 - P_3 \quad \text{(Ecuación 4.9)}$$

$$P_2 = 1000,00 \text{ g} - 452,51$$

$$P_2 = 551,80 \text{ g de tallos del brócoli}$$

4.8.2 Balance de materia en la etapa de selección

En la figura 4.30, se muestra el balance de materia en la etapa de selección con una cantidad de 448,70 g de floretes de brócoli obtenidos de la etapa de cortado.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.30: Balance de materia en la etapa de selección

Balance general de materia en la etapa de cortado

$$P_3 = P_4 + P_5 \quad \text{(Ecuación 4.10)}$$

Despejando P_2 de la ecuación 4.10, se obtiene:

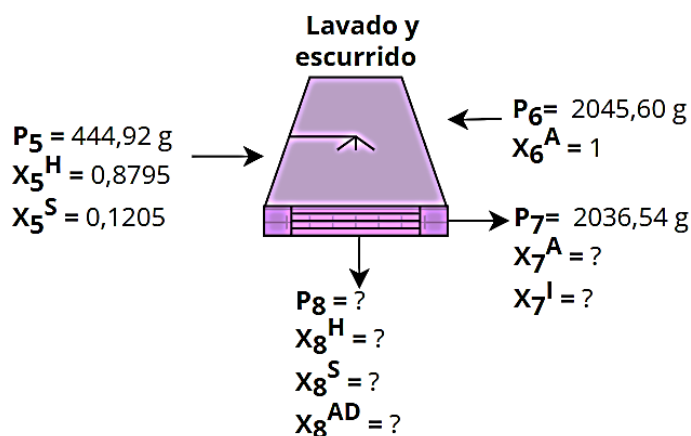
$$P_4 = P_3 - P_5 \quad \text{(Ecuación 4.11)}$$

$$P_4 = (448,70 - 444,92) \text{ g}$$

$$P_4 = 3,78 \text{ g de floretes amarillentos de brócoli}$$

4.8.3 Balance de materia en la etapa de lavado y escurrido

En la figura 4.31, se muestra el balance de materia en la etapa de lavado y escurrido en cual se realizó con 2000 ml de agua potable con una densidad de 1,0228 g/ml calculado como masa 2045,60 g agua potable para el lavado de 444,92 g de floretes de brócoli con humedad inicial en base húmeda 87,95 % (CEANID, 2023).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.31: Balance de materia en etapa de lavado y escurrido

Balance general de materia en la etapa de lavado y escurrido

$$P_5 + P_6 = P_7 + P_8 \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Despejando P_8 de la ecuación 4.12 y reemplazando los valores se obtiene:

$$P_8 = P_5 + P_6 - P_7 \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

$$P_8 = (444,92 + 2045,60 - 2036,54) \text{ g}$$

$$P_8 = 453,98 \text{ g brócoli lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción sólido soluble de brócoli

$$P_5 X_5^S + P_6 X_6^S = P_7 X_7^S + P_8 X_8^S \quad (\text{Ecuación 4.14})$$

Despejamos X_8^S de la ecuación 4.14, se obtiene:

$$P_5 X_5^S + P_6 X_6^S = P_7 X_7^S + P_8 X_8^S$$

$$P_5 X_5^S = P_8 X_8^S$$

$$X_8^S = \frac{P_5 X_5^S}{P_8}$$

$$X_8^S = \frac{(444,92 \text{ g} * 0,1205)}{453,98 \text{ g}} = 0,1181 \text{ fracción sólida soluble de brócoli lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción humedad de brócoli

$$P_5X_5^H + P_6X_6^H = P_7X_7^H + P_8X_8^H \quad \text{(Ecuación 4.15)}$$

Despejamos X_6^H de la ecuación 4.15, se obtiene:

$$P_5X_5^H + \cancel{P_6X_6^H} = \cancel{P_7X_7^H} + P_8X_8^H$$

$$P_5X_5^H = P_8X_8^H$$

$$X_8^H = \frac{P_5X_5^H}{P_8}$$

$$X_8^H = \frac{(444,92 \text{ g} * 0,8795)}{453,98 \text{ g}} = 0,8619 \text{ fracción húmeda de brócoli lavado}$$

Cálculo de la fracción X_8^{AD} de agua adherida en la etapa de lavado

$$X_8^{AD} = 1 - X_8^H - X_8^S \quad \text{(Ecuación 4.16)}$$

Remplazando valores se obtiene:

$$X_8^{AD} = 1 - 0,8619 - 0,1181$$

$$X_8^{AD} = 0,02 \text{ fracción de agua adherida del brócoli lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción de agua en la etapa de lavado y escurrido.

$$P_5X_5^A + P_6X_6^A = P_7X_7^A + P_8X_8^A \quad \text{(Ecuación 4.17)}$$

Despejamos X_7^A de la ecuación 4.17, se obtiene:

$$\cancel{P_5X_5^A} + P_6X_6^A = P_7X_7^A + P_8X_8^A$$

$$P_7 X_7^A = P_6 X_6^A - P_8 X_8^A$$

$$X_7^A = \frac{P_6 X_6^A - P_8 X_8^A}{P_7}$$

$$X_7^A = \frac{(2045,60 \text{ g} * 1) - (453,98 \text{ g} * 0,02)}{2036,54 \text{ g}} = 0,9999 \text{ fracción de agua residual}$$

Cálculo para la fracción X_7^I de impureza en el agua residual

$$X_7^I = 1 - X_7^A \quad \text{(Ecuación 4.18)}$$

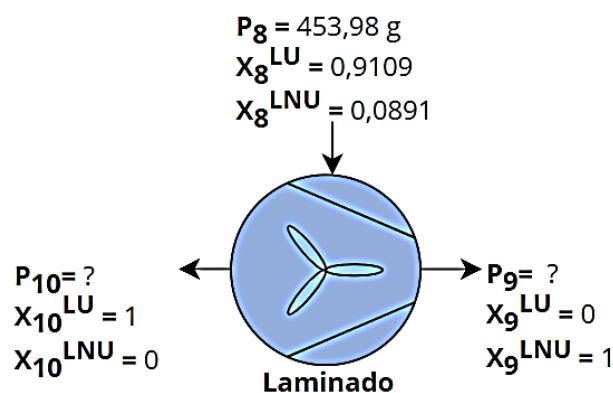
Remplazando valores se obtiene:

$$X_7^I = 1 - 0,9999$$

$$X_7^I = 0,0001 \text{ fracción de impureza en el agua residual}$$

4.8.4 Balance de materia en la etapa de laminado

En la figura 4.32, se muestra el balance de materia en la etapa de laminado en cual se realizó con 453,98 g de brócoli limpio y tomando en cuenta datos de la tabla 4.1, en donde: lámina útil de brócoli 91,09 % (LU) y lámina no útil de brócoli 8,91 % (LNU).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.32: Balance de materia en la etapa de laminado

Balance general de materia en la etapa de laminado

$$P_8 = P_9 + P_{10} \quad \text{(Ecuación 4.19)}$$

Balance parcial de materia de la fracción de láminas útiles

$$P_8 X_8^{LU} = P_9 X_9^{LU} + P_{10} X_{10}^{LU} \quad \text{(Ecuación 4.20)}$$

Despejamos P_{10} de la ecuación 4.20, se obtiene:

$$P_8 X_8^{LU} = \cancel{P_9 X_9^{LU}} + P_{10} X_{10}^{LU}$$

$$P_{10} = \frac{P_8 X_8^{LU}}{X_{10}^{LU}}$$

$$P_{10} = \frac{(453,98 \text{ g} * 0,9109)}{1}$$

$$P_{10} = 413,53 \text{ g de láminas útiles de brócoli}$$

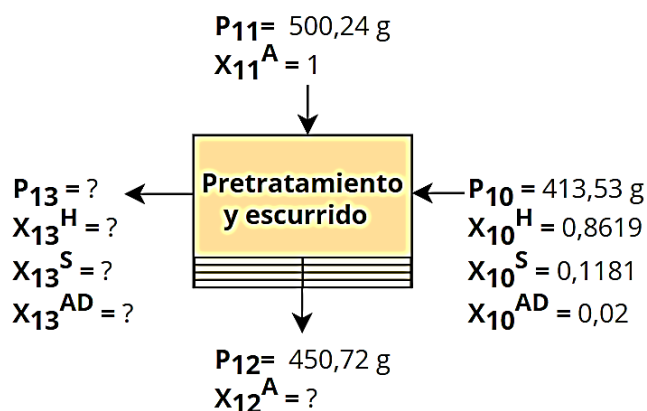
Despejando P_9 de la ecuación 4.19, se obtiene:

$$P_9 = P_8 - P_{10} \quad \text{(Ecuación 4.21)}$$

$$P_9 = (453,98 - 413,53) \text{ g} = 40,45 \text{ g pérdida en la etapa de laminado}$$

4.8.5 Balance de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido

En la figura 4.33, se muestra el balance de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido que se realizó pesando 500,24 g de solución ácido cítrico y 413,53 g de láminas de brócoli con un contenido de humedad del 86,21 %



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.33: Balance de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido

Balance general de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido

$$P_{10} + P_{11} = P_{12} + P_{13} \quad \text{(Ecuación 4.22)}$$

Despejando P_{13} de la ecuación 4.22, se obtiene:

$$P_{13} = P_{10} + P_{11} - P_{12} \quad \text{(Ecuación 4.23)}$$

$$P_{13} = (413,53 + 500,24 - 450,72) \text{ g}$$

$$P_{13} = 463,05 \text{ g brócoli con pretratamiento}$$

Balance parcial de materia de la fracción húmeda de brócoli pretratado

$$P_{10}X_{10}^H + P_{11}X_{11}^H = P_{12}X_{12}^H + P_{13}X_{13}^H \quad \text{(Ecuación 4.23)}$$

Despejamos X_{13}^H de la ecuación 4.23, se obtiene:

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

$$P_{10}X_{10}^H = P_{13}X_{13}^H$$

$$X_{13}^H = \frac{P_{10}X_{10}^H}{P_{13}}$$

$$X_{13}^H = \frac{(413,53 \text{ g} * 0,8619)}{463,05 \text{ g}} = 0,7697 \text{ fracción de humedad del brócoli}$$

Balance parcial de materia de la fracción sólido soluble en el brócoli

$$P_{10}X_{10}^S + P_{11}X_{11}^S = P_{12}X_{12}^S + P_{13}X_{13}^S \quad \text{(Ecuación 4.24)}$$

Despejamos X_{13}^S de la ecuación 4.24, se obtiene:

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

$$P_{10}X_{10}^S = P_{13}X_{13}^S$$

$$X_{13}^S = \frac{P_{10}X_{10}^S}{P_{13}}$$

$$X_{13}^S = \frac{(413,53 \text{ g} * 0,1181)}{463,05 \text{ g}} = 0,1055 \text{ fracción sólido soluble en el brócoli pretratado}$$

Cálculo para la fracción de agua adherida X_{13}^{AD} del brócoli con pretratamiento

$$X_{13}^{AD} = 1 - X_{13}^H - X_{13}^S \quad \text{(Ecuación 4.25)}$$

Remplazando valores se obtiene:

$$X_{13}^{AD} = 1 - 0,7697 - 0,1055$$

$$X_{13}^{AD} = 0,1248 \text{ fracción de agua adherida en el brócoli pretratado}$$

Balance parcial de materia de la fracción de agua de la solución residual

$$P_{10}X_{10}^A + P_{11}X_{11}^A = P_{12}X_{12}^A + P_{13}X_{13}^A \quad \text{(Ecuación 4.26)}$$

Despejamos X_{12}^A de la ecuación 4.24, se obtiene:

$$X_{12}^A = \frac{P_{10}X_{10}^A + P_{11}X_{11}^A - P_{13}X_{13}^A}{P_{12}}$$

$$X_{12}^A = \frac{(413,53 \text{ g} * 0,02) - (500,24 \text{ g} * 1) - (463,05 \text{ g} * 0,1248)}{450,72 \text{ g}}$$

X_{12}^A = 1 fracción de agua en solución residual

Cálculo de la fracción no sólida de brócoli con pretratamiento

$$X_{13}^{NS} = X_{10}^H + X_{11}^{AD}$$

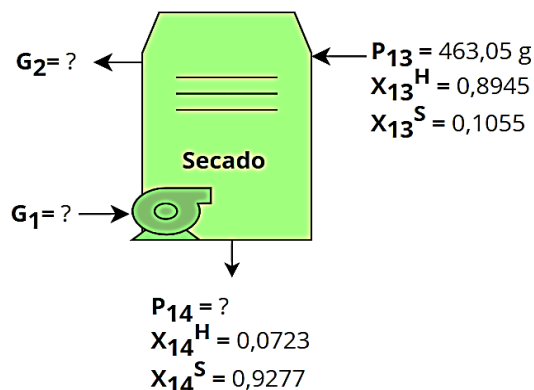
Reemplazando los valores se obtiene:

$$X_{13}^{NS} = 0,7697 + 0,1248$$

$$X_{13}^{NS} = 0,8945 \text{ fracción no solida de brócoli con pretratamiento}$$

4.8.6 Balance de materia en el proceso de secado

En la figura 4.34, se muestra balance de materia en la etapa de secado de brócoli previamente pretratada con solución ácido cítrico, este proceso se realizó con 463,05 g de láminas brócoli con contenido de humedad en base húmeda de 87,35 % y con contenido de agua adherida de 0,68%, al finalizar el proceso de secado el brócoli seco presento 7,23% (CEANID, 2024) humedad en base húmeda.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.34: Balance de materia en la etapa de secado

Balance de materia global en el proceso de secado, se tomó en cuenta la ecuación 4.27 citada por (Valiente, 2002)

$$P_{13} + G_1 = P_{14} + G_2 \quad \text{(Ecuación 4.27)}$$

Balance parcial de materia de la fracción sólido soluble en la etapa de secado

$$P_{13}X_{13}^S = P_{14}X_{14}^S \quad \text{(Ecuación 4.28)}$$

Despejamos P_{14} de la ecuación 4.28, se obtiene:

$$P_{14} = \frac{P_{13}X_{13}^S}{X_{14}^S}$$

$$P_{14} = \frac{(463,05 \text{ g} \cdot 0,1055)}{0,9277} = 52,66 \text{ g de brócoli seco}$$

Para determinar la masa de sólido seco del brócoli con pretratamiento a la entrada del secador se utilizó la ecuación 4.30 citada por (Valiente, 2002)

$$m_{ss} = P_{13}(1 - X_{13}^H) \quad \text{(Ecuación 4.29)}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 4.27 se obtiene:

$$m_{ss} = 463,05 \text{ g} (1 - 0,8945)$$

$$m_{ss} = 48,85 \text{ g de sólido seco del brócoli a la entrada del secador}$$

El contenido de humedad inicial en base seca de brócoli seco en la etapa de secado se determinó según la ecuación 4.29 citada por (Valiente, 2002)

$$X_{BS} = \frac{X_{BH}}{(1 - X_{BH})} \quad \text{(Ecuación 4.30)}$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.29 se obtiene:

$$X_{P13} = \frac{0,8945}{(1 - 0,8945)}$$

$$X_{P13} = 8,4787 \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

El contenido de humedad en base seca al final del proceso de secado se tomó en cuenta la ecuación 4.29:

$$X_{P14} = \frac{0,0723}{(1 - 0,0723)}$$

$$X_{P14} = 0,0779 \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

Para determinar la cantidad de masa seca de aire seco en la etapa de secado, se tomó en cuenta la ecuación 4.31 citada por (Valiente, 2002)

$$P_{13} * X_{P13} + G_1 * Y_{G1} = P_{14} * X_{P14} + G_2 * Y_{G2} \quad \textbf{(Ecuación 4.31)}$$

Donde las variables:

$$G_1 = G_2 = G = \text{Caudal másico del aire (kg aire seco/h)}$$

$$P_{13} = P_{14} = P = \text{Caudal másico del producto (g sólido seco/h)}$$

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

$$Y = \text{Humedad del aire (g agua/kg aire seco)}$$

Reemplazando variables en la ecuación 4,31 se obtiene:

$$P * X_{P13} + G * Y_{G1} = P * X_{P14} + G * Y_{G2} \quad \textbf{(Ecuación 4.32)}$$

Agrupando términos semejantes de la ecuación 4.32 se obtiene:

$$P * X_{P13} - P * X_{P14} = G * Y_{G2} - G * Y_{G1} \quad \textbf{(Ecuación 4.33)}$$

Factorizando la ecuación 4.33 se obtiene:

$$P (X_{P13} - X_{P14}) = G (Y_{G2} - Y_{G1}) \quad \textbf{(Ecuación 4.34)}$$

Despejando G de la ecuación 4.34 se obtiene:

$$G = \frac{P (X_{P13} - X_{P14})}{(Y_{G2} - Y_{G1})} \quad \textbf{(Ecuación 4.35)}$$

Según (SENAMHI, 2023) la altura de la ciudad de Tarija es de 1859 msnm; por tanto, los datos fueron introducidos al software Psicrom 4.1 de psicrometría y los resultados se muestran en la tabla 4.24 en base a la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo medidos a la entrada y salida del secador.

Tabla 4.24

Propiedades psicrométricas del aire

Propiedades	Aire frío	Aire saturado
T _{BS} (°C)	19,40	39,70
T _{BH} (°C)	15,17	27,16
H _R (%)	66,23	40,67
Y (g agua/kg aire seco)	11,85	23,63
PVP (Kpa)	1,50	9,96

Fuente: Elaboración propia

Donde:

PVP = Presión parcial de vapor de agua (kpa)

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

T_{BS} = Temperatura de bulbo seco (°C)

T_{BH} = Temperatura de bulbo húmedo (°C)

Para una cantidad de brócoli con pretratamiento de 463,05 g la relación de cantidad de brócoli seco (P₁₄) es 52,66 g.

Por lo tanto, para calcular la cantidad de masa de aire seco se utilizó la ecuación 4.35.

$$G_1 = \frac{52,66 \text{ g sólido seco} * (8,4787 - 0,0779) \text{ g agua/g sólido seco}}{(23,63 - 11,85) \text{ g agua/kg aire seco}}$$

$$G_1 = 37,55 \text{ kg de aire seco}$$

Para calcular la masa de agua evaporada, se tomó en cuenta la ecuación 4,36 citada por (valiente, 2002).

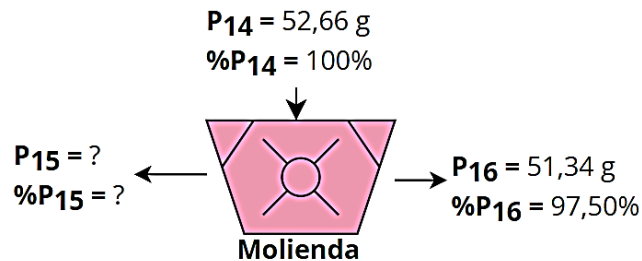
$$G_2 = (X_{P13} - X_{P14}) * m_{ss}$$

$$G_2 = (8,4787 - 0,0779) \text{ g de agua/g sólido seco} * 48,85 \text{ g sólido seco}$$

$$G_2 = 410,38 \text{ g de agua evaporada}$$

4.8.7 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 52,66 g de brócoli seco y terminando el proceso se obtuvo 51,34 g de harina de brócoli.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.35: Balance de materia en la etapa de molienda

Balance general de materia en la etapa de molienda

$$P_{14} = P_{15} + P_{16} \quad \text{(Ecuación 4.36)}$$

Despejando P_{13} de la ecuación 4.36:

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

$$P_{15} = (52,66 - 51,34) \text{ g}$$

$$P_{15} = 1,32 \text{ g de pérdida en el proceso de molienda}$$

Cálculo de la cantidad de porcentaje de pérdida en el proceso de molienda

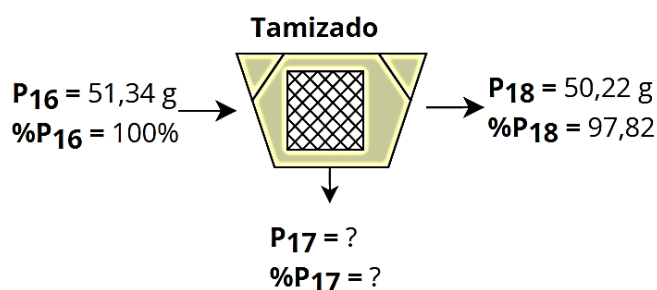
$$X_{P15} = \frac{P_{15} * 100\%}{P_{14}} \quad \text{(Ecuación 4.37)}$$

$$X_{P15} = \frac{1,32 \text{ g} * 100\%}{52,66 \text{ g}}$$

$$X_{P15} = 2,50 \% \text{ de pérdida en la etapa de molienda}$$

4.8.8 Balance general de materia en el proceso de tamizado

En la figura 4.36, se muestra el balance de materia en la etapa de tamizado el cual se realizó con 51,34 g de harina de brócoli y terminando el proceso se obtuvo 50,22 g de harina de brócoli.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.36: Balance de materia en la etapa de tamizado

Balance general de materia en la etapa de tamizado

$$P_{16} = P_{17} + P_{18} \quad \text{(Ecuación 4.38)}$$

Despejando P_{17} de la ecuación 4.37:

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

$$P_{17} = (51,34 - 50,22) \text{ g}$$

$$P_{17} = 1,12 \text{ g de pérdida en el proceso de tamizado}$$

Cantidad de porcentaje de perdida en el proceso de tamizado

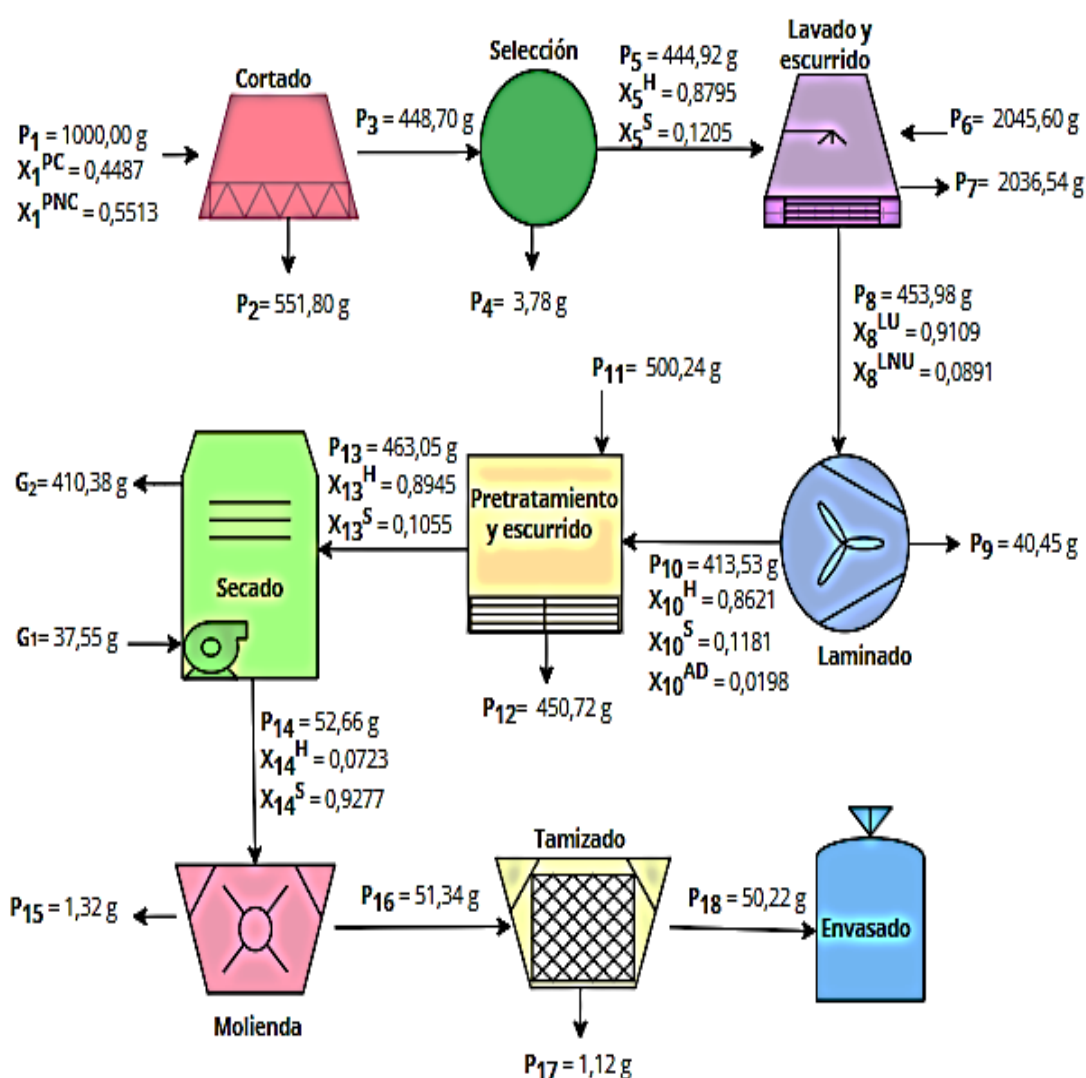
$$X_{P17} = \frac{P_{17} * 100\%}{P_{16}} \quad \text{(Ecuación 4.39)}$$

$$X_{P17} = \frac{1,12 \text{ g} * 100\%}{51,34 \text{ g}}$$

$$X_{P17} = 2,18 \% \text{ pérdida en la etapa de tamizado}$$

4.9 Resumen general del balance de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli

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



Fuente: Elaboración propia

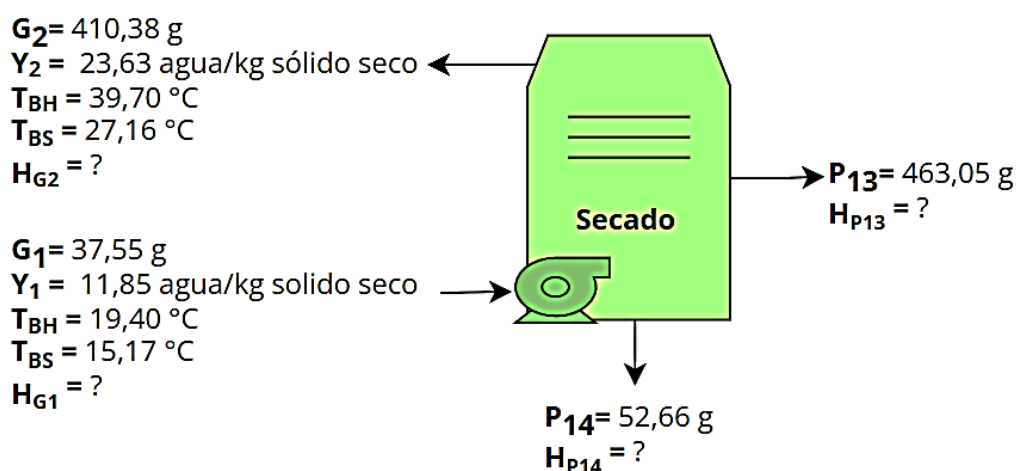
Figura 4.37: Resumen del balance general de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli

4.10 Balance de energía para la obtención de harina de brócoli

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

4.10.1 Balance de energía en el proceso de secado

En la figura 4.38, se muestra el balance de energía en la etapa de secado de la muestra pretratada con solución ácido cítrico al 0.01%, tomando en cuenta los factores temperatura (50°C), velocidad de aire (5,5 m/s) y corte (0,1 cm).



Fuente: Elaboración propia

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

Balance combinado de materia y energía en el proceso de secado, se describe en la ecuación 4.40 (Valiente, 2002)

$$P_{13} * H_{13} + G_1 * H_{G1} + Q_P = P_{14} * H_{14} + G_2 * H_{G2} \quad (\text{Ecuación 4.40})$$

Donde las variables:

P_{13} = Cantidad de brócoli a la entrada del secador (g)

P_{14} = cantidad de brócoli a la salida del secador (g)

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

G_2 = Cantidad de masa de agua evaporada (g)

H_{P13} = Entalpía del brócoli a la entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

H_{P14} = Entalpia del brócoli en la entrada del secador (kj/kg sólido seco)

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

H_{G2} = Entalpia del agua evaporada a la salida del secador (kj/kg sólido seco)

Q_P = Calor aportado al sistema (kj)

Reemplazando los valores en la ecuación 4.40, se obtiene la ecuación 4.41:

$$P * H_{13} + G * H_{G1} + Q_P = P * H_{14} + G * H_{G2} \quad \text{(Ecuación 4.41)}$$

Despejando Q_P de la ecuación 4.41, se obtiene la ecuación 4.42:

$$Q_P = P * H_{14} + G * H_{G2} - P * H_{13} + G * H_{G1} \quad \text{(Ecuación 4.42)}$$

Ordenando las variables de la ecuación 4.42, se obtiene la ecuación 4.43:

$$Q_P = G(H_{G2} - H_{G1}) + P(H_{14} - H_{13}) \quad \text{(Ecuación 4.43)}$$

Para calcular la entalpia del aire a la entrada y salida del secador se toma en cuenta la ecuación 4.44 citada por (Sing & Heldman, 2009).

$$H_a = C_s(T_a - T_0) + Y * L_v \quad \text{(Ecuación 4.44)}$$

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_v = Calor latente de evaporación del agua (kj/kg de agua)

Para calcular el calor húmedo del aire, se tomó en cuenta la ecuación 4.45, citado por (Singh & Heldman, 2009) en donde el calor específico del aire seco es 1,005 (kj/kg aires seco °C) y el calor específico para el agua 1,88 (kj/kg aire seco °C).

$$C_s = (1,005 + 1,88 * Y) \quad \text{(Ecuación 4.45)}$$

Reemplazando datos de la ecuación 4.45 en la ecuación 4.44, se obtiene la ecuación 4.46:

$$H_a = (1,005 + 1,88 * Y)(T_a - T_0) + Y * L_v \quad \text{(Ecuación 4.46)}$$

Según (SENAMHI, 2024) la altitud de la ciudad de Tarija es 1859 msnm. Entonces, para determinar la presión atmosférica en función de la altura se realizó utilizando la ecuación 4.47:

$$P_{atm} = 10,3297 \left(\frac{293 - 0,0065 * \text{altitud}}{293} \right)^{5,26} \quad \text{(Ecuación 4.47)}$$

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

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

Ajustando los datos de la ecuación 4.46, 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) y el calor específico del agua 1,51 (kJ/kg agua °C). Por tanto, se obtiene la ecuación 4.48:

$$H_a = (0,81 + 1,51 * Y)(T_a - T_0) + Y * L_v \quad \text{(Ecuación 4.48)}$$

Para determinar la entalpia del aire (H_{G1}) a la entrada del secador se empleó la tabla F.4 (Anexo F) propiedades del agua saturada. Para lo cual, en base a la temperatura de bulbo seco 19,40 °C se determinó el calor latente de vaporización (L_v) 2455,54 (kJ/kg agua °C) a la entrada del secador de bandejas; reemplazando datos en la ecuación 4.48

Donde:

$$L_v = 2455,54 \text{ kJ/kg agua } ^\circ\text{C a } 19,49 ^\circ\text{C de la tabla F.4 (Anexo F)}$$

$$Y_{G1} = 0,012 \text{ kg agua/kg aire seco}$$

$$T = 19,40 ^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0^\circ\text{C}$$

Ajustando el valor L_v (2455,54 kJ/kg agua °C) a presión atmosférica de la ciudad de Tarija (608,99 mmHg), se obtiene el valor ajustado es 1967,63 kJ/kg de agua a 19,40 °C.

$$H_{G1} = (0,81 + (1,51 * 0,012\text{kg/kg}))(19,40 - 0) + (0,012\text{kg/kg} * 1967,63\text{kJ/kg})$$

$$H_{G1} = 39.68 \text{ kJ/kg aire seco}$$

Para determinar la entalpía del aire (H_{G2}) a la salida del secador se empleó la tabla F.4 (Anexo F) propiedades del agua saturada. Para lo cual, en base a la temperatura de bulbo seco 39,70 °C se determinó el calor latente de vaporización (L_v) 2407,42 (kJ/kg agua °C) a la salida del secador de bandejas; reemplazando datos en la ecuación 4.48:

Donde:

$$L_v = 2407,42 \text{ kJ/kg agua } ^\circ\text{C a } 39,70 ^\circ\text{C de la tabla F.4 (Anexo F)}$$

$$Y_{G2} = 0,040 \text{ kg agua/kg aire seco}$$

$$T = 39,70 ^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0^\circ\text{C}$$

Ajustando el valor L_v (2407,74 kJ/kg) a presión atmosférica de la ciudad de Tarija (608,99 mmHg), se obtiene el valor ajustado es 1928,74 kJ/kg de agua a 39,70 °C.

$$H_{G2} = (0,81 + (1,51 * 0,040\text{kg/kg}))(39,70 - 0) + (0,040\text{kg/kg} * 1928,74\text{kJ/kg})$$

$$H_{G2} = 80,36 \text{ kJ/kg aire seco}$$

Para calcular la entalpía del producto, se tiene la ecuación 4.49

$$H_P = C_P(T_P - T_0) + X_P C_{PX}(T_P - T_0) \quad \textbf{(Ecuación 4.49)}$$

Donde:

$$E_P = \text{Entalpía del producto (kJ/kg aire seco)}$$

$$C_P = \text{Calor específico del producto (Kj/kg } ^\circ\text{C)}$$

T_p = Temperatura del producto ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$)

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

C_{PX} = Calor específico del agua (Kj/kg agua $^{\circ}\text{C}$)

Para calcular el calor específico de cualquier tipo de alimentos, se tiene la ecuación 4.50, citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$C_{Pp} = X_c * C_{Pc} + X_p * C_{Pp} + X_f * C_{Pf} + X_a * C_{Pa} + X_w * C_{Pw} \quad \textbf{(Ecuación 4.50)}$$

Donde:

$C_{Pc} = 1,424$ (kj/kg $^{\circ}\text{C}$) = Calor específico de carbohidratos

$C_{Pp} = 1,549$ (kj/kg $^{\circ}\text{C}$) = Calor específico de proteínas

$C_{Pf} = 1,675$ (kj/kg $^{\circ}\text{C}$) = Calor específico de grasas

$C_{Pa} = 0,837$ (kj/kg $^{\circ}\text{C}$) = Calor específico de cenizas

$C_{Pw} = 4,187$ (kj/kg $^{\circ}\text{C}$) = 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 los valores en la ecuación 4.50, se obtiene la ecuación 4.51:

$$C_{Pp} = X_c * 1,424 + X_p * 1,549 + X_f * 1,675 + X_a * 0,837 + X_w * 4,187 \quad \textbf{(Ecuación 4.51)}$$

Para calcular el calor específico del brócoli, se tomó en cuenta los datos de la tabla 4.25.

Tabla 4.25***Datos de la composición fisicoquímica del brócoli***

Parámetros	Símbolo	Resultado
Carbohidratos	X_c	0,0761
Proteína	X_p	0,0302
Grasa	X_f	0,0013
Cenizas	X_a	0,0129
Humedad	X_w	0,8795

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, reemplazando datos de la tabla 4.23 en la ecuación 4.51 se obtiene:

$$C_{Pp11} = (0,0761 \cdot 1,424 + 0,0302 \cdot 1,549 + 0,0013 \cdot 1,675) + (0,0129 \cdot 0,837 + 0,8795 \cdot 4,187)$$

$$C_{Pp11} = 3,850 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.49 y reemplazando datos se obtiene la entalpia del brócoli a la entrada de secador de bandejas:

$$H_{P11} = C_{P11}(T_{P11} - T_0) + X_{P11}C_{P11}(T_{P11} - T_0)$$

$$H_{P11} = 3,850 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}(19,40 - 0)^\circ\text{C} + 7,35 \cdot 4,187 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}(19,40 - 0)^\circ\text{C}$$

$$H_{P11} = 659,41 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Para calcular el calor específico de la harina de brócoli, se tomó en cuenta los datos de la tabla 4.26.

Tabla 4.26***Datos de la composición fisicoquímica de harina de brócoli***

Parámetros	Símbolo	Resultado
Carbohidratos	X_c	0,4512
Proteína	X_p	0,3557
Grasa	X_f	0,0448
Cenizas	X_a	0,0760
Humedad	X_w	0,0723

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, reemplazando datos de la tabla 4.24 en la ecuación 4.51 se obtiene:

$$C_{Pp12} = (0,04512 \cdot 1,424 + 0,3557 \cdot 1,549) + (0,0448 \cdot 1,675 + 0,0760 \cdot 0,837 + 0,0723 \cdot 4,187)$$

$$C_{P12} = 1,06 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.49 y reemplazando datos se obtiene la entalpia del brócoli a la salida de secador de bandejas:

$$H_{P12} = C_{P12}(T_{P12} - T_0) + X_{P12}C_{P12}(T_{P12} - T_0)$$

$$H_{P12} = 1,06 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}(39,70 - 0)^\circ\text{C} + 0,08 \cdot 4,187 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}(39,70 - 0)^\circ\text{C}$$

$$H_{P12} = 55,38 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Tenemos los siguientes datos:

$$H_{P11} = 659,41 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$H_{P12} = 55,38 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$H_{G1} = 39,68 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$H_{G2} = 80,36 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$G = 37,55 \text{ kg aire seco}$$

$$P = 52,66 = 0,0527 \text{ kg sólido seco}$$

Reemplazando datos en la ecuación 4.43 se obtiene:

$$Q_P = 37,55 \text{ kg}(80,36 \text{ kJ/kg} - 39,68 \text{ kJ/kg}) + 0,0527(55,38 \text{ kJ/kg} - 659,41) \text{ kJ/kg}$$

$$Q_P = 1495,70 \text{ kJ}$$

$$Q_P = 357,48 \text{ kcal}$$

El calor necesario para el proceso de secado de las muestras de brócoli es de 573,48 kcal para obtener una cantidad de 52,66 g de brócoli seco.

4.10.2 Balance de energía en el proceso de molienda

Para el balance de energía en la etapa de molienda se utilizó el molino eléctrico con una potencia de 150 W durante 0,125 horas.

Para determinar la energía eléctrica necesaria se utilizó la ecuación 4.52 (Rodríguez, 2016).

$$E = Z * \theta \quad \text{(Ecuación 4.52)}$$

Donde:

E = Energía eléctrica (W/h)

Z = Potencia (W)

θ = Tiempo (horas)

Así mismo 1 kcal/h: 1,163 W

Reemplazando los valores en la ecuación 4.52 se obtiene:

$$E = 150 \text{ W} * \frac{\left(1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}\right)}{1,163 \text{ W}} * 0,125 \text{ h}$$

E = 16,12 kcal energía eléctrica necesaria para la etapa de molienda del brócoli seco.

4.10.3 Balance de energía en el proceso de tamizado

Para el balance de energía en el proceso de tamizado se utilizó tamiz vibratorio con una potencia de 80 W durante 0,13 horas.

Reemplazando los valores en la ecuación 4.52 se obtiene:

$$E = 80 \text{ W} * \frac{\left(1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}\right)}{1,163 \text{ W}} * 0,13 \text{ h}$$

E = 8,94 kcal energía eléctrica necesaria para la etapa de tamizado de harina de brócoli.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Para el presente trabajo experimental de obtención de harina de brócoli y según datos obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones.

- El brócoli que se utilizó como materia prima presenta en promedio las siguientes propiedades físicas: peso total 668,95 g; diámetro ecuatorial 18,81 cm; diámetro longitudinal 20,20 cm; porción comestible 44,87%; porción no comestible 55,13%; laminas útiles 91,09 % y laminas no útiles 8,91%.
- Tomando en cuenta el análisis de laboratorio que se realizó en el CEANID, las características fisicoquímicas del brócoli son: Cenizas 1,29%; Fibra 1,35%; Grasa 0,13%; Hidratos de carbono 7,61%; Proteína total 3,02%; Humedad 87,95%; y Valor energético 43,64 Kcal/100 g. Así mismo, las características de los minerales son: Calcio 32,0 mg/100 g y potasio 290 mg/100 g.
- Los análisis microbiológicos del brócoli indican que: Coliformes totales $9,0 \times 10^1$ UFC/g; *Escherichia coli* $<1,0 \times 10^1$ UFC/g (*) y *Salmonella*, Ausencia P/A/25 g. Donde (*) no se observa desarrollo de colonias.
- Realizadas las curvas de variación de contenido de humedad en función de los tratamientos, se eligió la muestra (K02) tratada con solución ácido cítrico como tratamiento previo para las muestras de brócoli; debido a que finaliza su secado en 140 min presentando 0,362 (kg agua/kg sólido seco) de humedad en base seca. Así mismo, se eligió la muestra sin tratamiento (K01) con la finalidad de determinar si existen diferencias durante el proceso de secado.

- Realizadas las pruebas del diseño factorial 2^3 con solución de ácido cítrico y sin tratamiento, la muestra R03 para un tiempo 210 minutos presento 0,022 (kg agua/kg sólido seco) y la muestra RC1 para tiempo de 190 minutos presenta 0,005 (kg agua/kg sólido seco), por tanto, se procedió a elegir la muestra RC1 con solución de ácido cítrico para la obtención de harina de brócoli.
- En base a la variación de los factores: temperatura A1 (50 °C) a A2 (60 °C), velocidad del aire B1 (5,0 m/s) a B2 (5,5 m/s) y corte C1 (0,1 cm) a C2 (0,2 cm), las muestras con solución ácido cítrico se ven favorecidas en la disminución de tiempo de secado y contenido de humedad en base seca, en donde se pudo evidenciar que la muestra RC1 para tiempo de 190 minutos presenta 0,005 (kg agua/kg sólido seco). Así mismo, la variación del factor temperatura, velocidad del aire y corte para las muestras sin tratamiento no son muy significativos, ya que influye mínimamente en el tiempo de secado y contenido de humedad en base seca.
- El análisis fisicoquímico de la harina de brócoli presenta: Cenizas 7,60%; Fibra 19,20%; Grasa 4,48%; Hidratos de carbono 45,12%; Proteína total (N*6,25) 35,57%; Humedad 7,23% y Valor energético 363 Kcal/100 g. Así mismo, en minerales contiene: Calcio 362 mg/100 g y potasio 4,0 mg/100 g.
- En base a los análisis microbiológicos de la harina de brócoli esta contiene: Coliformes totales $<1 \times 10^1$ UFC/g (*); Escherichia coli $<1,0 \times 10^1$ UFC/g (*) y Salmonella, Ausencia P/A/25 g. Donde (*) no se observa desarrollo de colonias.
- En base al balance de materia y de energía se determinó que la cantidad de calor necesario para el proceso de obtención de harina de brócoli es de 382,54 kcal para obtener 50,22 g de harina de brócoli.

5.2 Recomendaciones

- Incentivar a la producción de harina de hortalizas y vegetales mediante la implementación de una planta piloto en la provincia Cercado, con la finalidad de contribuir al desarrollo económico y agroindustrial de la ciudad de Tarija.
- Se sugiere la introducción de la harina de brócoli en el mercado local como una alternativa innovadora para su uso en una variedad de preparaciones culinarias. Esta medida permitiría aprovechar al máximo las propiedades nutricionales del brócoli, ofreciendo a los consumidores una opción saludable y versátil para enriquecer sus platos.
- La importancia de incorporar harina de brócoli en programas nutricionales locales, como la canasta alimentaria o los desayunos escolares, puede tener un impacto positivo en la salud pública. Al proporcionar alimentos más nutritivos, se pueda promover hábitos alimenticios más saludables desde temprana edad.