



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI  
(*Brassica oleracea var. Italica*) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN  
PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**

**Vladimir Iván Pérez Soto**

Asesorado por Inga. Hilda Piedad Palma de Martini

Guatemala, enero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI  
(*Brassica oleracea var. Italica*) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN  
PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**VLADIMIR IVÁN PÉREZ SOTO**

ASESORADO POR INGA. HILDA PIEDAD PALMA DE MARTINI

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI  
(*Brassica oleracea var. Italica*) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN  
PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 19 de marzo de 2012.



**Vladimir Iván Pérez Soto**



Guatemala, 09 de agosto de 2012.

Ingeniero  
Victor Monzón Valdez  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Ciudad de Guatemala

Estimado Ingeniero Monzón Valdez:

Por este medio hago de su conocimiento que Vladimir Iván Pérez Soto, estudiante de la carrera de Ingeniería Química con carné número 200714399, quien realizó el informe final del trabajo de graduación con tema "**PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI (*Brassica oleracea Var. Italica*) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**". El cual ha sido realizado por el estudiante, para la inmediata revisión, corrección y aprobación. Por lo que hago de su conocimiento que YO como asesor apruebo el informe final de trabajo de graduación, pues su contenido es completo y adecuado al tema cumpliendo también con lo establecido en el normativo para la elaboración de informe final de trabajo de graduación.

Sin otro particular, me despido de usted.

Deferentemente,

Inga. Hilda Piedad Palma de Martini  
Asesora

INGA. HILDA PALMA DE MARTINI  
COLEGIADO No. 453



Guatemala, 17 de septiembre de 2012  
 Ref. EI.Q.TG-IF.042.2012

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
 DIRECTOR  
 Escuela Ingeniería Química  
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-014-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por el estudiante universitario: **Vladimir Iván Pérez Soto**

Identificado con número de carné: **2007-14399**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI  
 (Brassica oleracea Var. Italica) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN  
 PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Hilda Palma**.

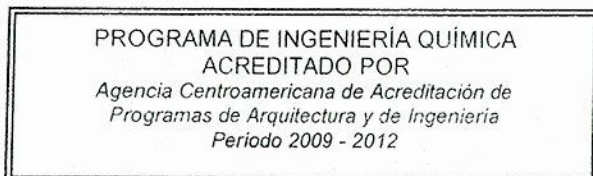
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Otto Raúl de León  
 COORDINADOR DE TERNA  
 Tribunal de Revisión  
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.014.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **VLADIMIR IVÁN PÉREZ SOTO** titulado: "**PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI (*Brassica oleracea* var. *Italica*) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, enero 2013

Cc: Archivo  
VMMV/ale

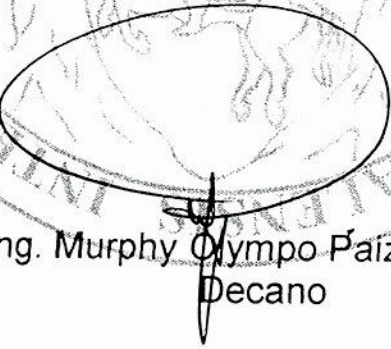


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.023.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **PROCESO Y FABRICACIÓN DE HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI (Brassica oleracea var. Italica) Y SU IMPLEMENTACIÓN PARCIAL EN UN PRODUCTO DE PANIFICACIÓN**, presentado por el estudiante universitario Vladimir Iván Pérez Soto, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 25 de enero de 2013



/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mis padres</b>	Herwin Alfredo Pérez López (q.e.p.d.) y Norma Verónica Soto Schaw por ser los maestros más valiosos de mi vida.
<b>Mis hermanos</b>	Isabel Alejandra Pérez Soto, Herwin José Pérez Soto (q.e.p.d.) y Wherner Mariano Pérez Soto por acompañarme en este trayecto brindándome su amor y apoyo para alcanzar un sueño más.
<b>Mis abuelos</b>	Juan José Soto Morales (q.e.p.d.) y Ana de Jesús López por sus sabios consejos.
<b>Mi tía</b>	Edna Yolanda Pérez López por su apoyo y cariño incondicional.
<b>Mis primos</b>	Por compartir una parte más de mi vida y su cariño fraterno.
<b>Mis tíos</b>	Con mucho cariño y respeto.
<b>Mis amigos</b>	Que con el tiempo han prevalecido y se ha fortalecido nuestra amistad. Es demás decirles que cuentan conmigo indiscutiblemente.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Que me guardó y fortalece en todo momento.
<b>Inga. Hilda Palma</b>	Por su valiosa asesoría, correcta orientación y apoyo incondicional para el desarrollo del presente estudio.
<b>Inga. Telma Cano</b>	Por proporcionarme los instrumentos y orientación adecuada en el desarrollo práctico del estudio.
<b>Ing. Mario Mérida</b>	Por todos los conocimientos transmitidos y el apoyo brindado en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales.
<b>Colaboradores</b>	Amigos y personas que en algún momento me brindaron una mano amiga para el desarrollo de este estudio.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por forjarme como profesional y darme una nueva perspectiva de vida.
<b>A todos en general</b>	Por acompañarme en este momento de mi vida.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Generalidades del brócoli.....	3
2.1.1. Clasificación científica.....	3
2.1.2. Valor nutricional de subproductos del brócoli.....	4
2.1.3. Ubicación y suelo.....	5
2.1.4. Siembra y plantación.....	5
2.1.5. Cuidados rutinarios.....	6
2.1.6. Recolección.....	6
2.1.7. Problemas habituales.....	6
2.2. Lavado.....	7
2.2.1. Importancia del lavado de las hortalizas.....	7
2.2.2. Productos que deben separarse.....	7
2.2.3. Maquinaria del lavado.....	7
2.3. Secado.....	8
2.3.1. Objetivos del secado.....	8
2.3.2. Proceso del secado.....	9

2.3.3.	Maquinaria para secar.....	9
2.3.4.	Curvas de secado.....	10
2.4.	Molienda.....	11
2.4.1.	Objetivos de la molienda de hortalizas.....	11
2.4.2.	Factores del material.....	11
2.4.3.	Maquinaria para la molienda de hortalizas.....	13
2.4.4.	Parámetros de la molienda.....	14
2.5.	Cernido.....	14
2.5.1.	Separación, clasificación y tamizado de productos.....	14
2.5.2.	Maquinaria para el cernido.....	14
2.5.3.	Separador de tamices.....	15
2.6.	Análisis y acabados del producto de molienda.....	15
2.6.1.	Humedad de la harina.....	15
2.6.2.	Ceniza de la harina.....	16
2.6.3.	Porcentaje de proteína de la harina.....	16
2.6.4.	Porcentaje de fibra cruda de la harina.....	16
2.6.5.	Extracto libre de nitrógeno.....	16
2.6.6.	Color de la harina mojada.....	17
2.6.7.	Sabor de la harina.....	17
2.6.8.	Granulometría de la harina.....	17
2.6.9.	Grasa cruda.....	18
2.6.10.	Sulforafano.....	18
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1.	Definición operacional de las variables.....	19
3.1.1.	Variables independientes.....	20
3.1.2.	Variables dependientes.....	20
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	21
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	22

3.4.	Recursos materiales disponibles y equipo.....	22
3.4.1.	Materia prima y reactivos.....	22
3.4.2.	Equipo disponibles.....	23
3.4.3.	Equipo de laboratorio a utilizar.....	23
3.5.	Técnica cuantitativa.....	24
3.5.1.	Diseño general.....	24
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	26
3.6.1.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	27
3.6.1.1.	Metodología experimental para la obtención de la composición química de la harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ) y el pan elaborado.....	27
3.6.1.2.	Metodología de cuantificación de sulforafanos del tallo del brócoli y de la harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ).....	28
3.6.1.3.	Metodología de análisis organoléptico del producto de panificación realizado con harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ).....	29
3.6.1.4.	Metodología para la obtención de harina de brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ).....	31

3.6.1.5.	Metodología para la obtención del tallo de brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ) para el deshidratado en polvo a nivel planta piloto.....	33
3.6.2.	Tablas de tabulación de datos.....	34
3.7.	Análisis estadístico.....	36
4.	RESULTADOS.....	41
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	55
	CONCLUSIONES.....	63
	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICE.....	69
	ANEXOS.....	77

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama del diseño experimental.....	25
2.	Encuesta para la prueba de aceptabilidad.....	30
3.	Tallo del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ).....	31
4.	Secador de bandejas.....	32
5.	Licuada industrial.....	32
6.	Molino de martillos.....	33
7.	Correlación de pérdida de agua en función del tiempo para la obtención de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ), primera corrida, secado a presión atmosférica.....	41
8.	Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ), segunda corrida, secado a presión atmosférica.....	42
9.	Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ), tercera corrida, secado a presión atmosférica.....	43
10.	Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ), primera corrida, secado a presión atmosférica.....	44

11.	Correlación de pérdida de agua en función del tiempo para la obtención de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ), segunda corrida, secado a presión atmosférica.....	45
12.	Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ), tercera corrida, secado a presión atmosférica.....	46
13.	Análisis sensorial de sabor del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli.....	47
14.	Análisis sensorial de aroma del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli.....	47
15.	Análisis sensorial de textura del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli.....	48
16.	Análisis de aceptabilidad del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli.....	48
17.	Análisis sensorial de la intensidad de color del pan de Molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli.....	49

## TABLAS

I.	Clasificación científica del brócoli.....	4
II.	Valor nutricional de subproductos del brócoli.....	4
III.	Parámetros de siembra .....	5



IV.	Definición operacional de las variables para el proceso de fabricación de harina de subproductos del brócoli.....	20
V.	Variables dependientes.....	21
VI.	Condiciones de ensayo en cromatografía líquida de alta resolución del tallo de brócoli y harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ).....	29
VII.	Datos tomados del secador de bandejas.....	34
VIII.	Parámetros de la harina de subproductos del brócoli.....	35
IX.	Cuantificación de sulforafano.....	35
X.	Análisis comparativo del valor nutricional del producto de panificación.....	36
XI.	Datos típicos para el diseño de bloques al azar.....	37
XII.	Análisis de varianza para el experimento de bloque aleatorio.....	39
XIII.	Valor nutricional de la harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ) obtenida a nivel planta piloto a 60°C.....	49
XIV.	Valor nutricional de la harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ) obtenida a nivel planta piloto a 70°C.....	50
XV.	Valor nutricional del pan de molde con harina de trigo al 100% y pan de molde con harina de trigo al 95% y 5% de harina de subproductos del brócoli ( <i>Brassica oleracea var. Italica</i> ) obtenida a nivel planta piloto.....	50
XVI.	Cuantificación de sulforafano del tallo de brócoli y la harina de subproductos del brócoli.....	51
XVII.	Análisis de la varianza de las curvas de secado a 60°C.....	51
XVIII.	Cuadro de análisis de la varianza curvas de secado a 60°C (SC Tipo III).....	51

XIX.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para las curvas de secado a 60°C.....	52
XX.	Análisis de la varianza de las curvas de secado a 70°C.....	52
XXI.	Cuadro de análisis de la varianza curvas de secado a 70°C (SC Tipo III).....	53
XXII.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para las curvas de secada a 70°C.....	53
XXIII.	Formulación del pan de molde con harina de subproductos del brócoli.....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>bs</b>	Base seca
<b>cm</b>	Centímetro
<b>P/P</b>	Concentración en masa/masa
<b>HPLC</b>	Cromatografía líquida de alta resolución
<b>°C</b>	Grados celsius
<b>g</b>	Gramos
<b>Hr</b>	Humedad relativa
<b>MS</b>	Materia seca
<b>µg</b>	Microgramo
<b>mg</b>	Miligramo
<b>No</b>	Número
<b>Ps</b>	Peso seco

<b>PF</b>	Peso fresco
<b>%</b>	Porcentaje
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeno
<b>Var</b>	Variedad

## **GLOSARIO**

### **Análisis proximal**

Método que expresa la calidad nutritiva global de un alimento, mide la cantidad de nutrientes presentes, divididos en seis grupos: contenido de humedad, proteína bruta, fibra cruda, cenizas, extracto etéreo y elementos libres de nitrógeno.

### **Anticarcinogénico**

Sustancia que se opone a la formación del cáncer.

### **Antioxidante**

Sustancia que evita la degradación de los lípidos, oxidación o descomposición de algunas otras sustancias.

### **Curvas de secado**

Gráfico que relaciona el contenido de humedad del sólido con respecto al tiempo transcurrido el secado.

### **Deshidratación**

Operación unitaria que consiste en remover al máximo el agua contenido dentro de los tejidos vegetales previamente fijados y endurecidos.

<b>Desnaturalización</b>	Alteración de estructuras secundaria, terciaria o cuaternaria, dejando intacta la estructura primaria con lo que pierde su actividad biológica.
<b>Escaldado</b>	Proceso consiste en un tratamiento térmico, el cual se hace muy rápido y su duración depende del tipo de hortaliza que se trabaje.
<b>Fibra cruda</b>	Parte de las plantas comestibles que resiste la digestión y absorción en el intestino delgado humano.
<b>Humedad</b>	Cantidad de agua libre y combinada que contiene un alimento.
<b>Inflorescencia</b>	Es la disposición de las flores sobre las ramas o la extremidad del tallo; su límite está determinado por una hoja normal.
<b>Inmersión</b>	Inclusión de un sólido en un líquido para el tratamiento químico.
<b>Organoléptico</b>	Características de un alimento o sustancia que se perciben con los sentidos.
<b>Pardeamiento enzimático</b>	Reacción de oxidación en la que interviene como sustrato el oxígeno molecular, catalizada por un tipo de enzimas.

<b>Proteína</b>	Macromoléculas formadas por cadenas lineales de aminoácidos.
<b>Subproducto</b>	Residuo de un proceso que se le puede sacar una segunda utilidad.
<b>Sulforafano</b>	Es un isotiocianato con propiedades antimicrobianas y anticarcinogénicas, se encuentra en una amplia variedad de vegetales del género <i>Brassica oleracea</i> .





## RESUMEN

En la sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, LIEXVE, se realizó el proceso para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) específicamente el tallo y en el área de procesamiento de alimentos en la Panificadora La Corona se realizó la implementación parcial de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) en un pan de molde.

Se tuvo por objetivo establecer las partes del proceso para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) y su fabricación. Para controlar la calidad de la harina se realizó un análisis proximal y se determinó el contenido de sulforafanos por medio de un análisis cromatografía de líquidos de alta resolución.

Para la obtención de la harina de brócoli se inició el proceso por una selección del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), un lavado de las inflorescencias, inmersión en ácido cítrico al 0,01%, escurrido, escaldado por 12 segundos, picado en juliana de 0,25 centímetro por 3 centímetro, secado, licuado y molido en un molino de martillos.

El secado se realizó por medio de un secador de bandejas a temperaturas de 60 y 70°C. Se determinó las curvas de secado. Una vez se realizó el producto de panificación se procedió a realizar un análisis proximal y una evaluación organoléptica por medio de 30 encuestas para medir la aceptación.



## OBJETIVOS

### General

Establecer el proceso para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*).

### Específicos

1. Describir el proceso de obtención de harina de subproductos del brócoli, acorde a las operaciones unitarias implicadas y sus respectivos parámetros técnicos.
2. Determinar las curvas de secado del brócoli.
3. Realizar a la harina de subproductos del brócoli análisis de humedad, proteína, fibra cruda, grasa cruda, cenizas, tamaño de partícula y cuantificación de sulforafanos.
4. Desarrollar un producto de panificación con un 5% de harina de subproductos del brócoli en sustitución de harina de trigo.
5. Determinar si existe diferencia entre los 2 tipos de pan (con harina de subproductos del brócoli y sin ella) en base a un análisis de proteína, fibra cruda y grasa cruda.



## INTRODUCCIÓN

El brócoli tiene un alto valor nutritivo y medicinal, que radica en su alto contenido de vitaminas, minerales, fibra, carbohidratos y alto nivel de proteínas, dado su elevado valor nutricional, ha sido estudiado últimamente para prevención del cáncer. Según estudios agrícolas, Guatemala produce un millón de quintales de brócoli al año, siendo ésta una hortaliza de baja exportación, a pesar que las regiones de Chimaltenango, Jalapa y Sololá cuentan con todas las atribuciones para su cosecha. La fabricación de harina de subproductos del brócoli, implica entonces una integración a nivel socioeconómico, médico y tecnológico.

La harina de subproductos del brócoli se convertiría entonces, en una alternativa al monopolio que tiene la harina de trigo, debido a que ésta no da formación de gluten, es industrialmente desventajoso. La desventaja consiste en que no puede retener el dióxido de carbono y no permite el boleado de la masa, por lo que sería un producto de molde. El proceso de la harina de subproductos del brócoli, consiste básicamente en el deshidratado de la hortaliza, la molienda por medio de un molino de martillos, para la reducción del tamaño de partícula, hasta obtener una partícula de 80 mesh, para que exista una buena interacción con la harina de trigo.

La deshidratación del brócoli, puede realizarse por medio de un secador al vacío y por un secador de bandejas con flujo transversal. El mejor secado consiste en un vacío perfecto, pero viene siendo un proceso sumamente caro a nivel industrial, mientras que un secado por medio de un secador de bandejas suele ser más provechoso a ese mismo nivel.

La última etapa en la fabricación de la harina de subproductos del brócoli, consiste en el control de calidad de la harina, por medio de un análisis proximal y por pruebas organolépticas.

## 1. ANTECEDENTES

Para establecer los parámetros del proceso de harina de subproductos del brócoli se buscaron estudios en la Biblioteca de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería, en la Facultad de Agronomía y de Ciencias Químicas y Farmacia, en las bibliotecas de las universidades Del Valle de Guatemala y Rafael Landívar.

En noviembre del 2004, en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó el estudio Cuantificación de sulforafano procedentes de glucorafanina, en retoños de *Brassica Oleracea var. Italica* por cromatografía de líquidos de alta resolución. El estudio determinó la presencia de 4,76 miligramo de sulforafano por cada gramo en la muestra de retoños de brócoli.

En el Laboratorio de Bioquímica de Alimentos, Instituto de Química y Tecnología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela en julio del 2003, con la finalidad de conocer, las características del proceso de secado de este vegetal, se construyeron las curvas de secado a diferentes temperaturas de bulbo seco (60, 70 y 80°C), utilizando un deshidratador de bandeja espacio. La humedad en estado fresco del brócoli, fue de 92,11%. La humedad de equilibrio fue de 5,4% en la harina de subproductos del brócoli a la temperatura de 80°C, equivalentes a una reducción de humedad del 85%.

Los resultados indican que, a medida que la temperatura de secado aumenta, mayor es el descenso de la humedad del sólido, mayor la velocidad de secado, en el periodo antecrítico y más bajo es el tiempo de secado. La zona de velocidad constante fue observada claramente a 60 y 70°C, no presentándose a la temperatura de 80°C. La humedad de equilibrio fue alcanzada a las tres horas de secado.

En el 2006, en el Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias del Instituto Tecnológico de Sonora, México, se realizó un estudio para obtener productos de valor agregado, a partir de los residuos de la cosecha del brócoli por lo cual se realizó su caracterización bioquímica y la cuantificación de sulforafano como muestra de valor biológico. Se obtuvo una composición química de la harina, superando en un 44% y en un 60%, a las harinas de hojas y tallos, respectivamente. En general, las harinas presentaron variaciones significativas en su composición química, la cual debe considerarse para su uso y aplicación en la industria alimentaria.



## **2. MARCO TEÓRICO**

El origen del brócoli se asienta en los países con climas templados a orilla del Mediterráneo oriental, en Oriente próximo. La península de Anatolia, Libano o Siria acogerían los primeros ejemplares de esta planta proveniente de una especie silvestre común con las coles y coliflores. En la actualidad su cultivo se extiende por Europa, diversas naciones asiáticas y Estados Unidos.

### **2.1. Generalidades del brócoli**

El brócoli es también conocido por términos como brécol. Su nombre botánico es *Brassica oleracea* y pertenece a la familia crucífera, al igual que coles o coliflores. Posee una forma similar a la coliflor pero con pedúnculos florales menos compacto, conformado un ramillete o cabeza irregular y abierta.

#### **2.1.1. Clasificación científica**

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.

Su clase corresponde a Dicotiledónea Magnaliopsida debido a sus dos cotiledones que tiene en sus primeras etapas de desarrollo. Son clasificadas en el orden de las Brassicales y la familia de Brassicaceae del género Brassica.

Tabla I. **Clasificación científica del brócoli**

<b>Reino</b>	Plantae
<b>División</b>	Fanerógama Magnaliophyta
<b>Clase</b>	Dicotiledónea Magnaliopsida
<b>Orden</b>	Brassicales
<b>Familia</b>	Brassicaceae
<b>Género</b>	Brassica

Fuente: Pollock, Michael. *Enciclopedia del cultivo de frutas y hortalizas*. España: Blume, 2003.  
p. 401.

### 2.1.2. Valor nutricional de subproductos del brócoli

El valor nutricional de un alimento se basa en la cuantificación de las macromoléculas presentes. El valor nutricional de subproductos del brócoli en base a 100 g de muestra:

Tabla II. **Valor nutricional de subproductos del brócoli**

<b>Variable Nutricional</b>	<b>Gramos</b>
Proteína	4,0 g
Grasa Cruda	0,3 g
Fibra Cruda	1,9 g
Hidratos de Carbono	3,7 g
Humedad	92,11
Sulforafanos	214 µg/g bs

Fuente: Pollock, Michael. *Enciclopedia del cultivo de frutas y hortalizas*. España: Blume, 2003. p. 437.

### 2.1.3. Ubicación y suelo

El mejor suelo para la cosecha de brócoli es el fértil, bien drenado, retentivo de la humedad y firme. Aunque la hortaliza tolera sombra parcial es de preferencia un lugar soleado.

Sus hojas vigorosas resisten bien el viento pero sus tallos necesitan una protección y habitualmente se les sujeta con estacas para evitar ser derribadas. Se obtiene un buen crecimiento en suelos neutros o ligeramente ácidos, es deseable un pH de 6,8 o superior para evitar la hernia de la col. Si el suelo fuera ácido se agrega cal para alcalinizarlo.

### 2.1.4. Siembra y plantación

La siembra se realiza directamente en surcos convencionales, donde serán cosechadas. Se cosecha en módulos y su siembra es en tresbolillo para aprovechamiento del espacio.

Tabla III. **Parámetros de siembra**

Profundidad de siembra	2 cm
Distancia entre plantas	20 cm
Distancia entre surcos	60 cm

Fuente: Pollock, Michael. *Enciclopedia del cultivo de frutas y hortalizas*. España: Blume, 2003.

401 p.

### **2.1.5. Cuidados rutinarios**

El aporte del agua es crucial para el desarrollo de la planta. Se establece un sistema de riego cada 2 días una hora mediante un sistema de aspersión. Se agrega fertilizante triple quince granular (15% de potasio, 15% de fósforo, 15% de nitrógeno) y el fertilizante Bayfolan foliar cada cuatro días.

Mantenerse libre de maleza para tener una prevención de enfermedades y comprobación de regular de la presencia de enfermedades. En contribución a la prevención de enfermedades se colocan trampas de insectos.

### **2.1.6. Recolección**

Las hortalizas deberán de estar listas para cosechar 10-15 semanas después del trasplante. Cuando los brotes florales tienen unos 15-20 centímetros de longitud, pero antes que se abran las yemas florales, se corta 8-10 centímetros de longitud para producir nuevos brotes laterales.

### **2.1.7. Problemas habituales**

Un problema habitual es la hernia de col la cual consiste en una enfermedad fúngica que hace que las raíces de las *brassicas* desarrollen grandes protuberancias, que a su vez se descomponen para liberar esporas patógenas en el suelo. Las plantas infectadas se atrofian, pierden color, se marchitan y mueren.

El brócoli es un alimento altamente perecedero debido a que con la pérdida de un 3% de su agua pierde sus cualidades aceptables a criterio del consumidor.

## **2.2. Lavado**

Es aquella operación unitaria en la que el alimento se libera de sustancias diversas que contaminan, dejando su superficie en condiciones adecuadas para su elaboración posterior. Esta operación es básica en la industria alimenticia para garantizar la inocuidad del proceso.

### **2.2.1. Importancia del lavado de las hortalizas**

En la producción de harinas, es de suma importancia la limpieza de las hortalizas, debido a su contacto con insectos, plaguicidas y otros materiales extraños que alteran las propiedades fisicoquímicas de la harina.

### **2.2.2. Productos que deben separarse**

Al inicio del lavado, debe de separarse todo material terroso y orgánico que se encuentre en su superficie, mediante un lavado con agua. Posteriormente debe desinfectarse las hortalizas, para eliminar cualquier contaminación microbiana, que pueda afectar al producto final haciéndolo inutilizable.

Una vez desinfectado la hortaliza se puede realizar un hisopado por lote de producción y así se asegura la sanitización.

### **2.2.3. Maquinaria del lavado**

Para el lavado del brócoli, se utiliza una lavadora de tambor rotatorio a cepillos o una lavadora de canasta, siendo estas las mas funcionales y comunes para el proceso.

La lavadora de tambor rotatorio a cepillos, consiste en un cilindro colocado horizontalmente, sobre un contenedor rectangular, el cilindro está formado de espas, las cuales a la hora de rotar soban el brócoli y quitan las incrustaciones.

La lavadora de canasta, consiste en una canasta agujereada, la cual es colocada sobre una base rotatoria, dentro de un contenedor cuadrado y por acción de la turbulencia generada por la centrifugación de la canasta, se limpia el brócoli.

### **2.3. Secado**

Es un método de conservación de alimentos consistente en extraer el agua de estos, lo que inhibe la proliferación de microorganismos y dificulta la putrefacción. Muchos alimentos se preparan deshidratándolos como por ejemplo el jamón, la cecina y pasas.

#### **2.3.1. Objetivo del secado**

En general el objetivo principal del secado, es la remoción de agua por medio de aire calentado. La eliminación de agua puede realizarse por medios mecánicos como el prensado, centrifugado y otros medios.

Otro objetivo es la preservación de alimentos sujetos a la descomposición por microorganismos, debido a que los microorganismos no pueden crecer ni multiplicarse en ausencia de agua. Es por esta característica que los alimentos deshidratados tienen una vida en anaquel mucho mayor que todos aquellos en los que su contenido de agua es alto, como es el caso de la mayoría de frutas y verduras.

### **2.3.2. Proceso del secado**

El proceso de secado se clasifica de diferentes maneras; se dividen en procesos de lotes, cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo; o continuos, si el material se agrega sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo a las condiciones físicas para adicionar calor y extraer vapor de agua:

- El calor se añade por contacto directo con el aire caliente a presión atmosférica y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
- Secado al vacío, la evaporación de agua se verifica con mayor rapidez a presiones bajas y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación.
- Liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado.

### **2.3.3. Maquinaria para secar**

Los diferentes métodos de secados, se caracterizan por las cualidades del producto que se va a secar y así también las características del producto final.

Para el secado de brócoli se pueden utilizar básicamente dos: la secadora de bandejas y el secador de vacío.

- Secadora de bandejas
  - El sólido en terrones o en forma de pasta, se esparce uniformemente sobre la bandeja de metal de 10 a 100 milímetros de profundidad. El secador de bandejas típico tiene bandejas para su carga y descarga de un gabinete.
  - Un ventilador recircula aire calentado en un intercambiador de calor de vapor-aire previamente, sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Mas o menos el 10 o 20% del aire que pasa sobre las bandejas es fresco, y el resto es recirculado.
- Secador al vacío: se calienta indirectamente y son del tipo por lotes. El sistema es hermético, de tal manera que se pueda operar al vacío y el calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Para operaciones a temperaturas bajas, se usa circulación de agua en lugar de vapor para suministrar el calor que vaporiza la humedad.

#### **2.3.4. Curvas de secado**

Curva de velocidad de secado: se obtiene de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total del sólido húmedo a diferentes tiempos en el período de secado. Es característica para la determinación de las diferentes etapas del secado a determinado tiempo; este instrumento normalmente está compuesto de tres etapas: secado superficial, secado de la capa de zona franca y el secado intersticial.



## **2.4. Molienda**

Operación unitaria que se basa en la pulverización y a la dispersión del material sólido. La molienda reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado.

### **2.4.1. Objetivos de la molienda de hortalizas**

El objetivo de una molienda es la reducción de tamaño de partícula por medio de una variedad de operaciones físicas. Para la reducción de partícula se usan una serie de equipos mecánicos que aumentan el área superficial del sólido.

### **2.4.2. Factores del material**

El material por su defecto de ser un sólido de tamaño de partícula pequeña se puede considerar diferentes características que son esenciales a considerar en su procesamiento. Entre los efectos que se pueden considerar están:

- Efecto del tamaño de entrada
  - En general, es más fácil moler sólidos más grandes que los finos, pues los finos consumen mucha más energía por unidad de masa procesada. Es importante que el tamaño sea homogéneo al momento de entrar a molienda para evitar pérdidas de energía en molienda de polvos finos.

- Efecto de la dureza- friabilidad
  - Lógicamente un sólido duro consume más energía que uno friable, pero a menudo un friable se pasa del tamaño reducido deseable, se achica demasiado y acaba volviéndose un fino, con derroche energético innecesario.
  
- Efecto de la estructura del sólido
  - Los sólidos cristalinos generalmente son más duros y abrasivos, pero se fragmentan con más regularidad y dan fases salientes más homogéneas. Los amorfos dan fases heterogéneas y si son fibrosos o pegajosos traban los equipos.
  
- Efecto de la higroscopia
  - Los sólidos higroscópicos a veces exageradamente humedecidos, pueden formar lodos, siendo esto deseable bajo ciertas condiciones y otras veces no.
  
- Efectos de la termolabilidad
  - Los procesos de molienda liberan mucho calor y éste puede elevar la temperatura del sólido arriba de su índice de seguridad termolábil, arruinándolo. Incluso algunos sólidos pueden explotar, si el proceso de molienda no tiene un adecuado ventilador enchaquetado de enfriamiento, añadiendo agua y si no se evitan chispas.

- Efecto de la electrostaticidad
  - Al frotarse en un solo sentido, a veces se genera estática y esto puede originar chispas, que de estarse trabajando en un ambiente muy seco y con polvos en suspensión, puede ocasionar explosiones.

### **2.4.3. Maquinaria para la molienda de hortalizas**

En la molienda de hortalizas se utilizan diferentes maquinarias que se acomoden a las propiedades de cada alimento. El principio para el uso adecuado de un equipo consiste en aquel que no degrade el alimento de tal manera que pierda sus propiedades. Algunos equipos son:

- Molino de martillos
  - Es el molino que tiene más versatilidad y cuyo rango de reducción de tamaño es el mayor. Puede recibir partículas muy finas, de pocos milímetros, y lograr reducciones hasta partículas muy finas o intermedias. Reduce hasta quince veces el tamaño de partícula de alimentación. Se utiliza para sólidos no muy abrasivos y preferiblemente friables.
  
- Molino de cilindros
  - Es el molino típico de las industrias harineras, siendo que se trabajan en series de hasta 5 y 7 unidades sucesivas, cada cual más estrecha. Estos molinos reciben partículas de tamaño grano y las reducen hasta 4 veces el tamaño de alimentación.

#### **2.4.4. Parámetros de la molienda**

Los parámetros de molienda son los que se establecen en el proceso de producción para la obtención de harinas. Son los que rigen y miden el flujo continuo, la calidad del producto y los estándares que se logran a través de la práctica continua del proceso. Son establecidos en cada molino ya que no se puede generalizar la molienda con diferentes molinos y con diferentes morfologías.

#### **2.5. Cernido**

Se da una clasificación granulométrica, medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia correspondiente a cada uno de los tamaños.

##### **2.5.1. Separación, clasificación y tamizado de productos**

El proceso consiste en la diferenciación de los diferentes tamaños de partículas. La separación mide la partícula y al mismo tiempo la separa acorde a su tamaño por lo que se da una clasificación.

##### **2.5.2. Maquinaria para el cernido**

El proceso de obtención de harinas el tipo de separador más utilizado consiste en el separador de tamices debido a su simplicidad y versatilidad.

Un separador de tamices permite determinar la eficiencia del proceso mecánico para la reducción de partícula.

### **2.5.3. Separador de tamices**

Cuando dos o más sólidos se diferencian en tamaño o forma, se pueden separar por tamizado. Esto consiste en una pila de tamices o bien solo uno, pero de tamaño grande que a base de la fuerza de gravedad y diferencia de tamaño o de forma, se separan una o más fases de sólidos diferentes o del mismo sólido pero de diferente tamaño.

## **2.6. Análisis y acabados del producto de molienda**

Para todos los productos alimenticios existe una reglamentación adecuada para su aceptación. Esta reglamentación restringe el campo de utilidad de la misma. COGUANOR establece los diferentes análisis que se le deben de hacer a las harinas origen vegetal.

### **2.6.1. Humedad de la harina**

Es fundamental conocer el contenido de agua en cada uno de los elementos que compondrá un alimento; así mismo, es necesario vigilar la humedad en el alimento preparado, ya que niveles superiores al 8% favorecen la presencia de insectos y arriba de 14%, existe el riesgo de contaminación por hongos y bacterias.

La Normativa COGUANOR establece que el porcentaje adecuado para todas las harinas de tipo vegetal son menores al 14%, en cuanto a la industria normalmente mantiene un porcentaje de 11% para mantener un margen de error durante el secado.

### **2.6.2. Ceniza de la harina**

El método se emplea para determinar el contenido de ceniza en los alimentos o sus ingredientes mediante la calcinación. Se considera como el contenido de minerales totales o material inorgánico en la muestra.

### **2.6.3. Porcentaje de proteína de la harina**

Por su costo es éste el nutriente más importante en la dieta en una operación comercial; su adecuada evaluación permite controlar la calidad de los insumos proteicos que están siendo adquiridos o del alimento que se está suministrando.

Su análisis se efectúa mediante el método de Kjeldahl, mismo que evalúa el contenido de nitrógeno total en la muestra, después de ser digerida con ácido sulfúrico en presencia de un catalizador de mercurio o selenio.

### **2.6.4. Porcentaje de fibra cruda de la harina**

El método permite determinar el contenido de fibra en la muestra, después de ser digerida con soluciones de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio y calcinado el residuo. La diferencia de pesos después de la calcinación indica la cantidad de fibra presente.

### **2.6.5. Extracto libre de nitrógeno**

En este concepto se agrupan todos los nutrientes no evaluados con los métodos señalados anteriormente dentro del análisis proximal, constituido principalmente por carbohidratos digeribles.

Debido a que se obtiene como la resultante de restar a 100 los porcentos calculados para cada nutriente, los errores cometidos en su respectiva evaluación repercutirán en el cómputo final.

#### **2.6.6. Color de la harina mojada**

A través de este análisis, se logra determinar mejor el color de la harina. Un buen color, debe de visualizarse de color crema, a la hora de agregar agua a la harina. A esto también se le conoce como prueba de Pekar, la cual consiste en acondicionar unos 100 gramos de harina en una paleta de forma rectangular y lisa, la cual se vierte en un recipiente con agua, luego se observa las pecas, que no son más que la cascarilla que está contaminando la harina; se compara con una muestra base y si se tiene los mismos parámetros se da por aceptada.

#### **2.6.7. Sabor de la harina**

Se determina por pruebas organolépticas, mediante criterio personal de un grupo de catadores. Una medición muy común en pruebas organolépticas es la prueba hedónica que permite establecer un grado de satisfacción del consumidor. Teniendo nueve parámetros como objeto de comparación de las diferentes características y estableciendo un valor numérico a cada uno de los parámetros.

#### **2.6.8. Granulometría de la harina**

Consiste en la medición del tamaño de partícula, para tener una mejor reacción de mezclado con los diferentes productos. Se utiliza un mesh de 80 que por lo general establece una partícula de 216 micrómetros.

### **2.6.9. Grasa cruda**

En este método, las grasas de la muestra son extraídas con éter de petróleo y evaluadas como porcentaje del peso después de evaporar el solvente.

### **2.6.10. Sulforafano**

Se determina el contenido de este bioquímico, a partir de cromatografía líquida de alta resolución. Para la determinación del sulforafano primero se hace un aislamiento.



### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

El diseño metodológico organiza el proceso de fabricación de harina de subproductos del brócoli por medio de soportar la postura epistemológica, conceptual y ontológica. El diseño pretende responder con coherencia interna a la concepción de la educación y a los principios pedagógicos que orientan la carrera de Ingeniería Química.

Se delimita la población beneficiaria y las diferentes áreas de influencia para privilegiar con el presente estudio. El diseño metodológico presenta los métodos realizados para alcanzar los objetivos o el procedimiento para ordenar la actividad.

Es fundamental que los métodos utilizados sean herramientas ingenieriles que conlleven operaciones prácticas para el manejo de la problemática a un contexto determinado. Así como también el análisis de resultados usando las herramientas matemáticas, estadísticas y analíticas adecuadas para concluir adecuadamente y dar una función práctica al estudio.

#### **3.1. Definición operacional de las variables**

Por medio de la revisión de estudios similares al proceso de obtención de harina de subproductos del brócoli se determinará los factores que influyen directamente en las propiedades del producto final y las variables de entrada.

Tabla IV. **Definición operacional de las variables para el proceso de fabricación de harina de subproductos del brócoli**

No.	Variable	Formula química	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlables	No controlables
<b>Análisis del proceso para la fabricación de harina de subproductos del brócoli</b>						
1	Inmersión de ácido cítrico al 0,01%	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	X		X	
2	Corte del brócoli a 0,25 cm <sup>2</sup>	—				
3	Deshidratación por un secador de bandejas de flujo transversal	—	X		X	
<b>Análisis de la caracterización química</b>						
1	% de Húmeda	(%) I		X		X
2	% de Proteínas	(%)		X		X
3	% de Fibra cruda	(%)		X		X
4	% de Cenizas	(%)		X		X
5	% de Grasa cruda	(%)		X		X
6	% de Sulforafanos	(%)		X		X

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.1. Variables independientes

Para la fabricación de harina de subproductos del brócoli se utilizará una solución de 0,01% ácido cítrico en la cual se hará una inmersión de las inflorescencias del brócoli.

### 3.1.2. Variables dependientes

Se caracteriza todos los parámetros que van a depender del proceso y de la calidad del brócoli. Permitiendo determinar la correcta ejecución del estudio.

Tabla V. **Variables dependientes**

<b>Variable dependiente</b>	<b>Objeto</b>
% de Húmeda	Se determinará la cantidad de húmeda.
% de Proteína	Se determinará el porcentaje de proteína contenida en el brócoli.
% de Fibra	Se determinará el porcentaje de fibra contenida.
% de Cenizas	Se determinará el % de cenizas.
Tamaño de partícula	Se determinará el tamaño de partícula.
% de Grasa cruda	Se determinara el contenido de grasa cruda o extracto etéreo.
% Sulforafanos	Se cuantifica por medio de cromatografía líquida de alta resolución.

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El campo de estudio determinado se basa en la división de dos partes: la primera es el sector donde va a ser aplicado industrialmente y la segunda es el área operativa que tiene el estudio.

- Industrial: alimenticia y agropecuaria.
- Proceso: determinación de los parámetros para la obtención de harina de subproductos del brócoli y su análisis químico y organoléptico.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Investigador: Vladimir Iván Pérez Soto  
Asesor: Inga. Hilda Piedad Palma de Martini  
Colaboradores: Dr. Ricardo Bressani, Mynor Alay

### **3.4. Recursos materiales disponibles y equipo**

Para la fabricación de harina de subproductos del brócoli tipo se dispondrá de 200 pilones sembrados en los campos de Agronomía, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, los mismos se han sembrado al mismo tiempo por lo que se pretende tener una uniformidad en cuanto a su madurez. El índice de madurez del brócoli se identifica por tener los floretes cerrados y de color verde oscuro brillante, la cabeza compacta (firme a la presión de la mano), el tallo bien cortado y de la longitud requerida, sin daños de plagas o enfermedades.

#### **3.4.1. Materia prima y reactivos**

La materia prima a utilizar para los diferentes secados del estudio y los reactivos a utilizar para los análisis proximales y sensoriales que contiene el estudio son:

- Tallo del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)
- Óxido de mercurio
- Sulfato de potasio
- Ácido sulfúrico
- Granallas de zinc
- Rojo de metilo

- Hidróxido de sodio
- Alcohol etílico
- Fenolftaleína
- Eter anhidro
- Asbesto preparado
- Alúndum granulado
- Arena purificada con ácido y calcinada

### **3.4.2. Equipos disponibles**

Los equipos con los que se disponen en la panificadora La Corona y su en el Laboratorio de Extractos Vegetales para la corrida del estudio y el análisis de resultados son:

- Contenedor rectangular de lavado
- Cortador
- Molino de martillos marca Duke

### **3.4.3. Equipo de laboratorio a utilizar**

Los equipos que se usaron a nivel planta piloto corresponden principalmente a los correspondientes para el secado y los análisis para obtención de las curvas de secado.

- Balanza analítica marca Ohaus Adventurer 0,0001gramos
- Plancha de calentamiento marca Ohaus
- Equipo de destilación por reflujo, marca kimax 24'40
- Horno de convección marca Hobart
- Desecador de sílice gel

- Secador de bandejas de flujo transversal
- Molino de martillos, marca Sottoriva
- Licuadora industrial
- Aparato de vibración para tamices
- Equipo de extracción Soxhlet
- Aparato de digestión
- Aparato de Kjeldahl

### **3.5. Técnica cuantitativa**

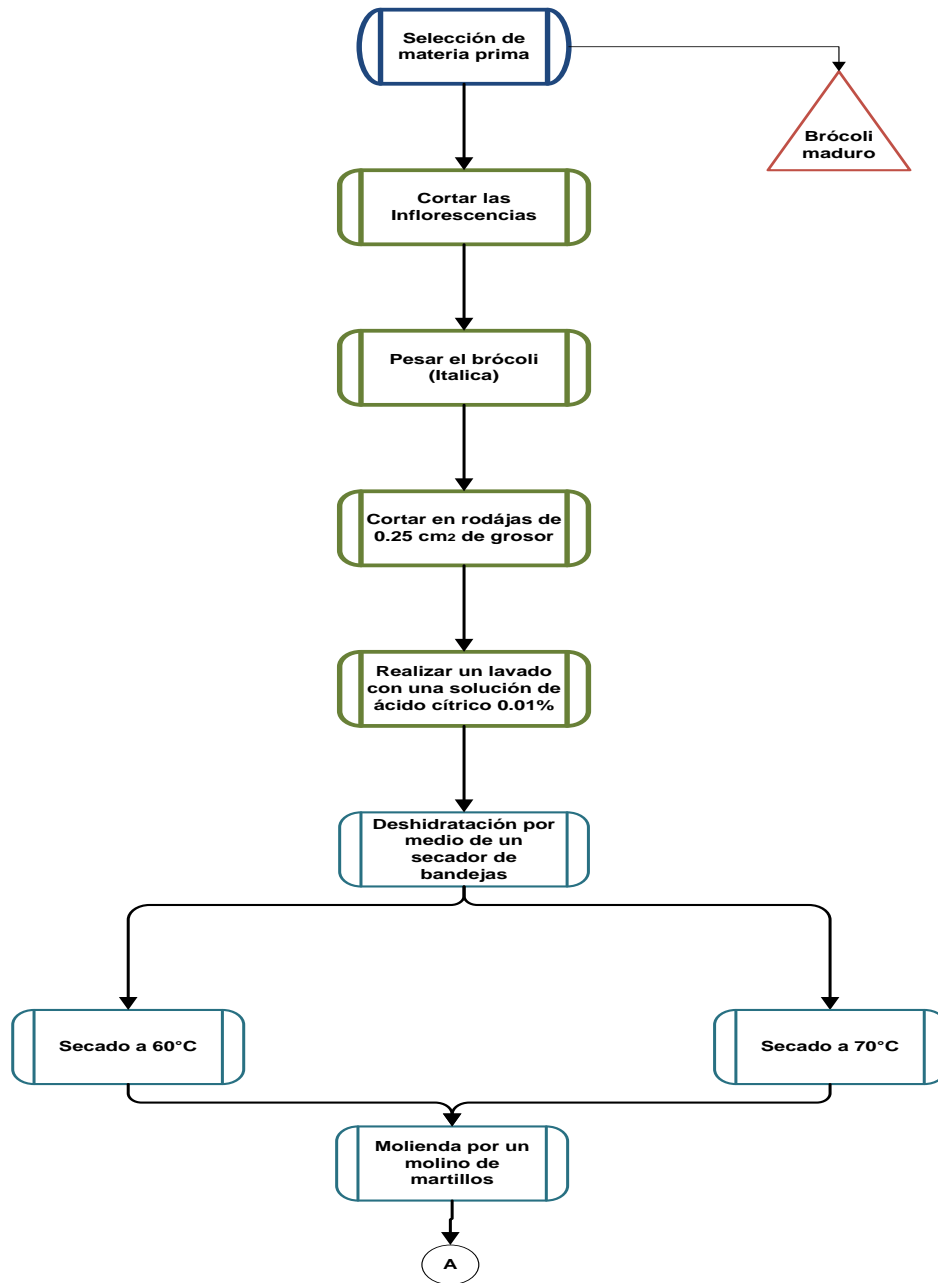
El proceso para la fabricación de harina de subproductos del brócoli es posible mediante un deshidratado a través de un secador de bandejas y la reducción del tamaño de partícula por medio de molino de martillos.

La metodología para el proceso de harina de subproductos del brócoli se realizó en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales.

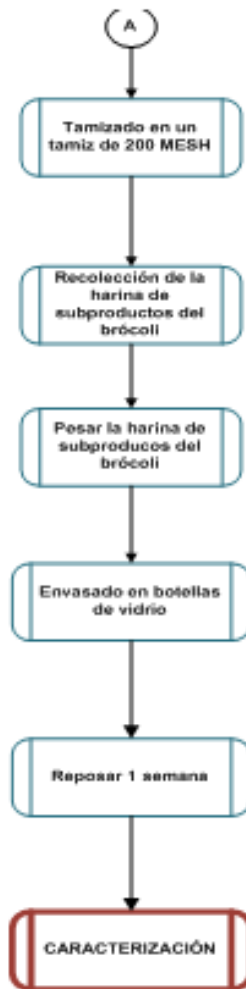
#### **3.5.1. Diseño general**

El diseño experimental desarrollado es puramente factorial, en donde se determina la incidencia de varias variables, que se encuentran ligadas a una variable respuesta. Tomando en cuenta que los datos obtenidos son puramente cuantitativos, se buscarán las correlaciones de los datos y planteamientos matemáticos del caso.

Figura 1. Diagrama del diseño experimental



### Continuación de la figura 1



Fuente: elaboración propia.

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La determinación del proceso de fabricación de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) por medio de un secador de bandejas de flujo transversal.



A la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) como producto final se le realizará 7 pruebas químicas para su caracterización y para el producto de panificación se realizará 3 pruebas: porcentaje de proteína, fibra cruda y grasa. También se realizará una evaluación organoléptica por medio de un análisis estadístico de encuestas de respuesta cerrada para determinar si el producto contiene las cualidades para ser aceptado comercialmente.

### **3.6.1. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

El ordenamiento de los datos como el procesamiento realizando, se hizo de una forma estadística, partiendo desde la obtención de materia prima fresca hasta las pruebas de aceptación.

#### **3.6.1.1. Metodología experimental para la obtención de la composición química de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) y el pan elaborado**

- Materia prima: tallo del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)
- Análisis químico proximal: el análisis químico proximal es un método por medio del que se conoce cuantitativamente el valor nutricional de un alimento o materias prima. Este se realizó en el laboratorio de bromatología del Centro de Investigaciones de Alimentos en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Las muestras fueron: tres lotes de 2 libras de harina de subproductos del brócoli deshidratadas a 60°C, tres lotes de 2 libras de harina de subproductos del brócoli deshidratadas a 70°C y 1 muestra de pan con una sustitución del 5% de harina de trigo por harina de subproductos de brócoli.

### **3.6.1.2. Metodología de cuantificación de sulforafanos del tallo del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) y de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)**

- Materia prima: tallo del brócoli y harina de subproductos del brócoli
- Cromatografía líquida de alta resolución

La cromatografía líquida de alta resolución es un método que se utiliza para separar una mezcla de compuestos con el propósito de identificar, cuantificar y purificación de los compuestos individuales de la mezcla. Este se realizó en la unidad de Análisis Instrumental, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala y en apoyo del Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Las muestras fueron: tallos de brócoli sin ningún tratamiento y harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*).

Tabla VI. **Condiciones de ensayo en cromatografía líquida de alta resolución del tallo de brócoli y harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)**

<b>Patrón:</b>	Sulforafano
<b>Columna:</b>	LiChrospher Rp-18
<b>Longitud de onda:</b>	236 nm
<b>Fase móvil:</b>	Acetonitrilo: agua pH 5,4 (85:15)
<b>Tiempo de corrida:</b>	10 minutos
<b>Flujo:</b>	1 ml/min
<b>Atenuación</b>	4
<b>Velocidad de carta:</b>	10

Fuente: elaboración propia.

### **3.6.1.3. Metodología de análisis organoléptico del producto de panificación realizado con harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)**

Para esto se utilizará la prueba de aceptabilidad de 10 puntos. En donde una cualidad como suavidad, olor, color, sabor y aceptabilidad se caracteriza como muy buena o muy malo según corresponda.

Figura 2. Encuesta para la prueba de aceptabilidad

**DEGUSTACIÓN DE PAN CON HARINA DE SUBPRODUCTOS DEL BRÓCOLI**  
FECHA \_\_\_\_\_ EDAD \_\_\_\_\_

Instrucciones: valore de 1 a 10 con una X, los siguientes atributos.

**1. GRADO DE SABOR**  
Muy desagradable Muy agradable

1  2  3  4  5  6  7  8  9  10

**2. GRADO DE AROMA**  
Muy desagradable Muy agradable

1  2  3  4  5  6  7  8  9  10

**3. GRADO DE TEXTURA**  
Muy dura Muy suave

1  2  3  4  5  6  7  8  9  10

**4. GRADO DE INTENSIDAD DE COLOR**

1  2  3  4  5  6  7  8  9  10

**5. GRADO DE ACEPTABILIDAD**

1  2  3  4  5  6  7  8  9  10

**6. ¿CON QUÉ FRECUENCIA CONSUME PAN?**

1 o < veces al mes  
 1 vez a la semana  
 4 o > veces a la semana  
 diario

**7. ¿LE GUSTA EL PAN?**

mucho  
 poco  
 nada

Fuente: elaboración propia.

#### 3.6.1.4. Metodología para la obtención de harina de brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) a nivel planta piloto

El proceso para la obtención de la harina de brócoli a nivel planta piloto fue la transformación de la materia prima por medio de un proceso de deshidratación y molienda para obtener el producto deseado.

- Materia prima: tallo del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*).

Figura 3. Tallo del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)



Fuente: Panificadora La Corona.

- Equipos para el proceso de deshidratación y molienda
  - Secador de bandejas: capacidad de 15 bandejas con malla. El proceso de secado se realiza a una temperatura de 60°C y 70°C.

Figura 4. **Secador de bandejas**



Fuente: Laboratorio investigación de extractos vegetales.

- Licuadora Industrial: capacidad de 10 litros.

Figura 5. **Licuadora Industrial**



Fuente: Panificadora La Corona.

- Molino de martillos: Marca Sottoriva especialistas en equipo de panificación.

Figura 6. **Molino de martillos**



Fuente: Panificadora La Corona.

#### **3.6.1.5. Metodología para la obtención del tallo de brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) para el deshidratado en polvo a nivel planta piloto**

Se lavó las inflorescencias, se hizo un corte en juliana y una inmersión en ácido cítrico para poder ser escaldadas posteriormente y secadas en el secador de bandejas con un flujo de aire transversal. Cada escaldado fue de 15 segundos acorde al tamaño del brócoli.

- Materia prima

Tallo del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*). Todas las inflorescencias del brócoli tienen un tallo de aproximadamente 20 centímetros, el cual es desechado por su poco tiempo de vida.

- Materiales

- Ácido cítrico
- Hielo
- Agua a 100°C

- Equipo

- Olla de aluminio
- Estufa industrial
- Malla metálica para alimentos

### 3.6.2. Tablas de tabulación de datos

Tabla VII. Datos tomados del secador de bandejas

	1ra. Corrida	2da. Corrida	3ra. Corrida
Tiempo (horas)	%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)	%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)	%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)

Fuente: elaboración propia.



Tabla VIII. **Parámetros de la harina de subproductos de brócoli**

Descripción de la muestra	Base	Agua %	Materia seca total %	Grasa cruda %	Fibra cruda %	Proteína cruda %	Cenizas %	Extracto libre de nitrógeno %
Muestra 100% Harina de trigo	Seca							
	Como Alimento							
Muestra 95% Harina de trigo y 5% Harina de subproductos de brócoli	Seca							
	Como Alimento							

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Cuantificación de sulforafano**

Número de cromatograma	Sulforafano	Tiempo de retención	Área del pico	Concentración de sulforafano (µg/ml)	Concentración de sulforafano en 100 g de muestra (%P/%P)

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Análisis comparativo del valor nutricional del producto de panificación**

Descripción de la muestra	Base	Agua %	Materia seca total %	Grasa cruda %	Fibra cruda %	Proteína cruda %	Cenizas %	Extracto libre de nitrógeno %
Muestra 100% Harina de trigo	Seca							
	Como Alimento							
Muestra 95% Harina de trigo y 5% Harina de subproductos de brócoli	Seca							
	Como Alimento							

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Análisis estadístico

Para la fabricación de la harina de brócoli se utilizará como variable la temperatura de secado. Para esto se realizarán 2 procedimientos de secado uno a 60°C y otro a 70°C, se realizara 3 corridas por procedimiento dando un total de 6 deshidrataciones. Posteriormente se aplicarán 11 pruebas para caracterizar la harina.

El análisis estadístico de los datos obtenidos del rendimiento que se obtenga de humedad, cenizas, proteína, fibra cruda y sulforafanos.

Se llevará a cabo por medio de un análisis de varianza utilizando un diseño de bloques aleatorio con la distribución de Fisher, esto debido a que se tratan más de dos niveles.

El diseño para el tratamiento es el siguiente:

Tabla XI. Datos típicos para el diseño de bloques al azar

Tratamientos	Bloques		Promedio
	1	2	
1	Y <sub>1,1</sub>	Y <sub>1,2</sub>	Y <sub>1prom</sub>
2	Y <sub>2,1</sub>	Y <sub>2,2</sub>	Y <sub>2prom</sub>
3	Y <sub>3,1</sub>	Y <sub>3,2</sub>	Y <sub>3prom</sub>
4	Y <sub>4,1</sub>	Y <sub>4,2</sub>	Y <sub>4prom</sub>
5	Y <sub>5,1</sub>	Y <sub>5,2</sub>	Y <sub>5prom</sub>
6	Y <sub>6,1</sub>	Y <sub>6,2</sub>	Y <sub>6prom</sub>
7	Y <sub>7,1</sub>	Y <sub>7,2</sub>	Y <sub>7prom</sub>
8	Y <sub>8,1</sub>	Y <sub>8,2</sub>	Y <sub>8prom</sub>
9	Y <sub>9,1</sub>	Y <sub>9,2</sub>	Y <sub>9prom</sub>
Promedio	Y <sub>1prom</sub>	Y <sub>2prom</sub>	Y

Fuente: Walpole, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 4a ed. México: McGraw-Hill. p. 509.

- Donde:

$Y_{i,j}$  = total de las observaciones bajo el  $i,j$ -ésimo tratamiento

$y$  = promedio total de las observaciones bajo el  $i,j$ -ésimo tratamiento

$Y_{a,b}$  = datos obtenidos para cada observación bajo cada tratamiento

Generalmente el procedimiento para un diseño de bloque aleatorio consiste en seleccionar  $b$  bloques y en ejecutar una repetición completa del experimento en cada bloque, con un solo factor con  $a$  niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal.

$$\begin{aligned}i &= 1, 2, \dots, a \\ y_{ij} &= \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \\ j &= 1, 2, \dots, b\end{aligned}$$

- Donde:

$y_{ij}$  = observación

$\mu$  = media general

$\tau_i$  = efecto del tratamiento  $i$ ésimo

$\beta_j$  = efecto del bloque  $j$ ésimo

$\varepsilon_{ij}$  = error aleatorio

Los efectos de bloque y tratamiento se definen como desviaciones respecto a la media general. Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

Las operaciones para el análisis de varianza se resumen en la siguiente tabla, así como las fórmulas para el cálculo de suma de cuadrados.

Tabla XII. **Análisis de varianza para el experimento de bloque aleatorio**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo
Tratamientos	$a$ $\sum_{i=1} y_i^2 ./b - y^2 ./ab$	$a - 1$	$(SS_{\text{tratamientos}}) / (a - 1)$	$(MS_{\text{tratamientos}}) / MS_E$
Bloques	$b$ $\sum_{j=1} y_j^2 ./a - y^2 ./ab$	$b - 1$	$(SS_{\text{bloques}}) / (b - 1)$	
Error	$SS_E$ (por sustracción)	$(a - 1)(b - 1)$	$(SS_E) / [(a - 1)(b - 1)]$	
Total	$A \quad b$ $\sum_{i=1} \sum_{j=1} y_{ij}^2 - y^2 ./ab$	$ab - 1$		

Fuente: WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 4a ed. México: McGraw-Hill. p. 510.

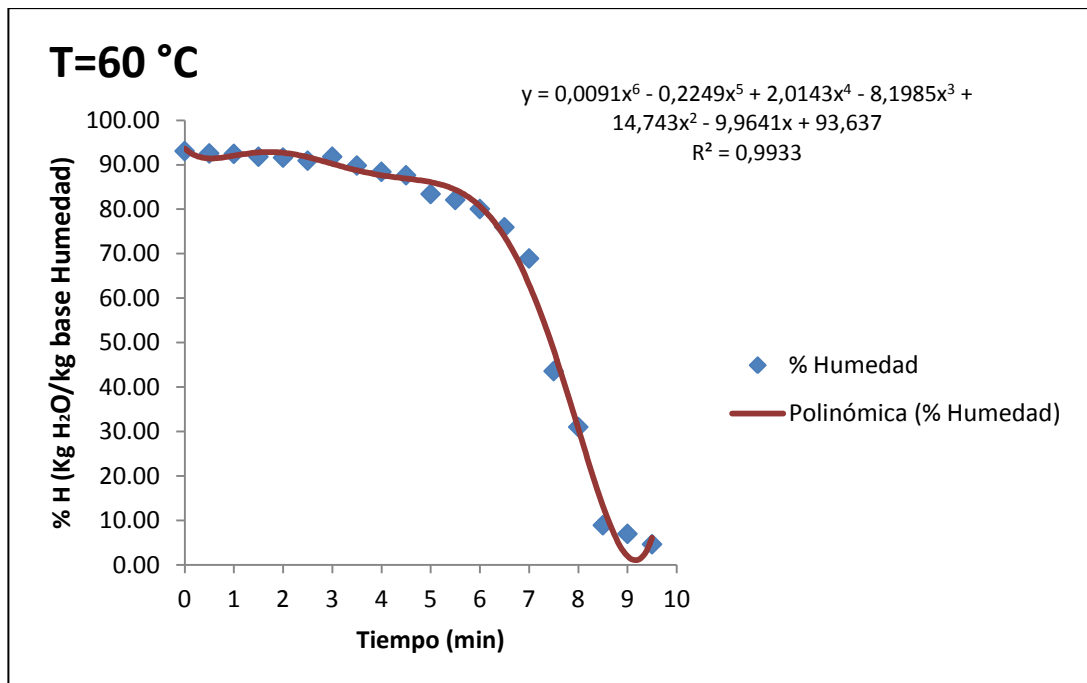
La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento se prueba mediante la razón de Fisher, que se define como:  $F = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$  donde  $MS_{\text{tratamientos}}$  es la media cuadrática de los tratamientos y  $MS_E$  es la media cuadrática del error; y que para un nivel de confianza  $\alpha = 0,05$  y con 2 grados de libertad para tratamientos y 5 para bloques.



## 4. RESULTADOS

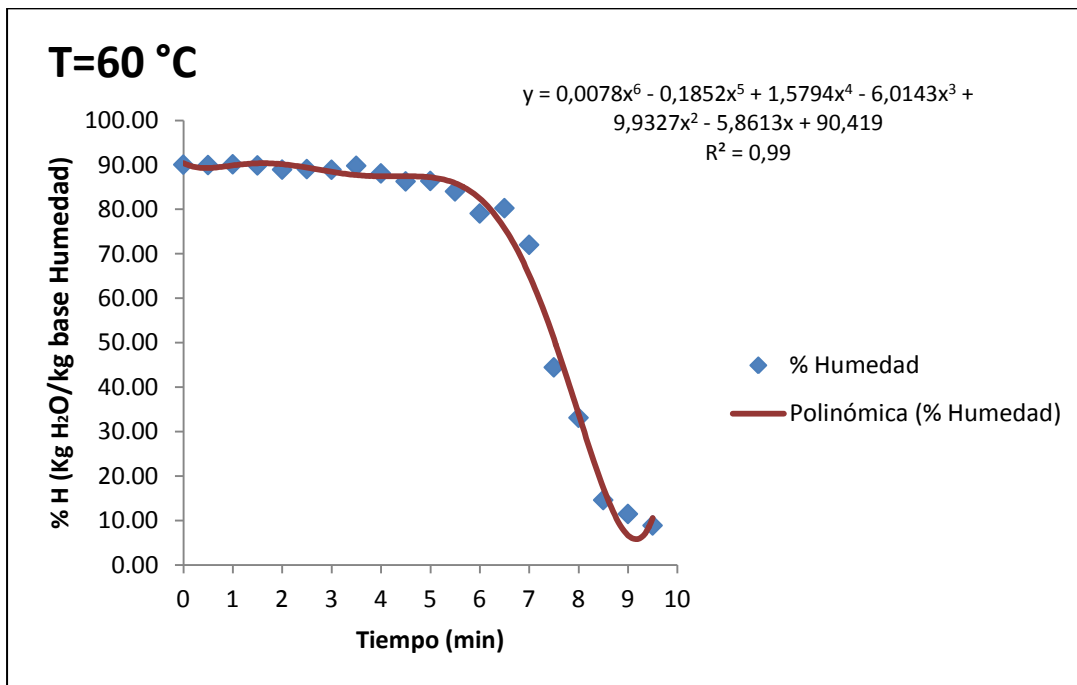
Los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos planteados del estudio se muestran según el orden planteado en el diseño metodológico y según los objetivos del estudio.

Figura 7. **Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), primera corrida, secado a presión atmosférica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), segunda corrida, secado a presión atmosférica**

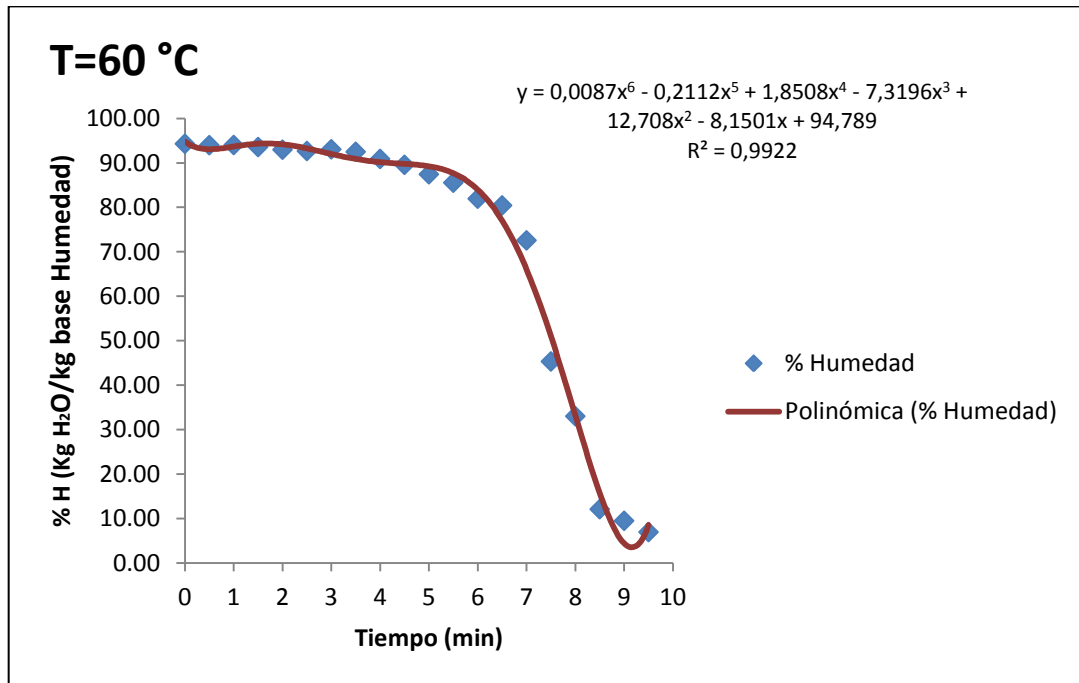


Fuente: elaboración propia.

Figura 7 y 8 muestran un comportamiento polinomial de sexto grado con un coeficiente de correlación de 0.99 por lo que demuestra que el secado en las primeras dos corridas tienen un comportamiento similar en cuanto a tiempo y humedad extraída del sólido. Las dos figuras tienen un tiempo de secado de aproximadamente nueve horas y media para obtener una humedad relativa menor del 10%.



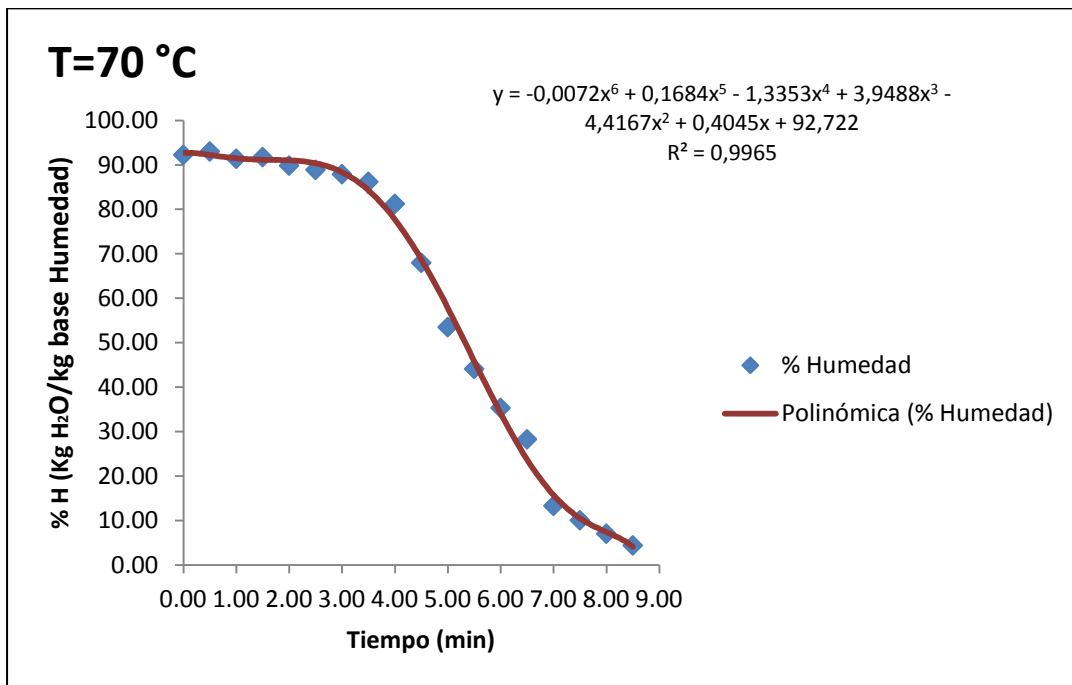
Figura 9. **Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), tercera corrida, secado a presión atmosférica**



Fuente: elaboración propia.

La figura 9 también muestra un comportamiento polinomial de sexto grado al igual que las otras dos corridas a 60°C y un coeficiente de correlación de 0.99 estableciendo por lo tanto que la curva de secado del brócoli en juliana tiene una tendencia de un polinomio de sexto grado y un tiempo de secado de aproximadamente nueve horas y media para obtener humedades relativas menores al 10%.

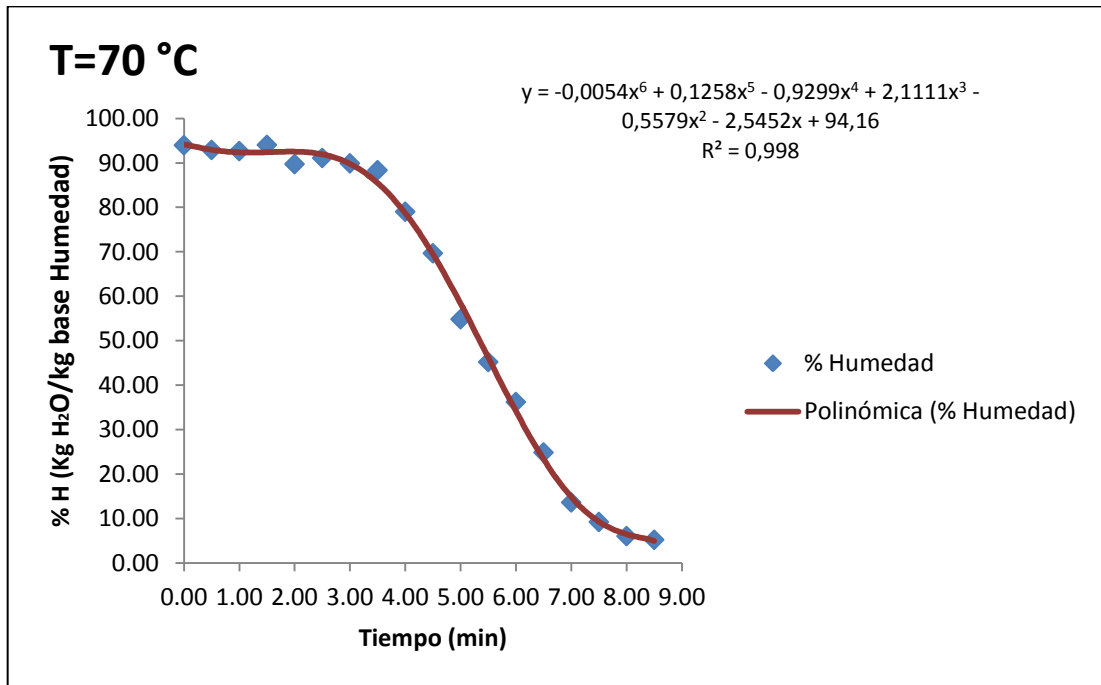
Figura 10. **Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), primera corrida, secado a presión atmosférica**



Fuente: elaboración propia.

La figura 10 muestra un comportamiento polinomial de sexto grado y un coeficiente de correlación de 0.99 para un tiempo de secado de ocho horas y media. A diferencia de las curvas a 60°C se tiene que para las curvas a 70°C hay una pendiente mucho más pronunciada, lo que ocasiona un tiempo de residencia en el secador de bandejas mucho menor para lograr obtener humedades relativas menores al 10%.

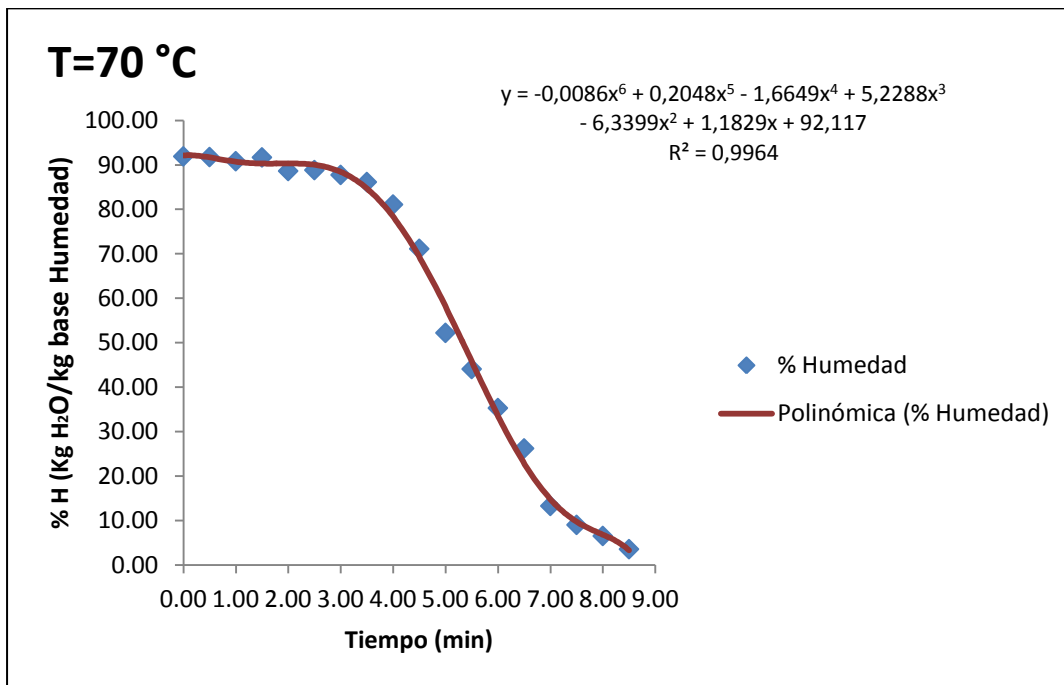
Figura 11. **Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), segunda corrida, secado a presión atmosférica**



Fuente: elaboración propia.

La figura 11 muestra un comportamiento polinomial de sexto grado y un coeficiente de correlación de 0.99 para un tiempo de secado de ocho horas y media. Teniendo la misma tendencia que la primera corrida y su mismo coeficiente de correlación. A diferencia de las curvas a 60°C se tiene que para las curvas a 70°C hay una pendiente mucho más pronunciada, lo que ocasiona un tiempo de residencia en el secador de bandejas mucho menor para lograr obtener humedades relativas menores al 10%.

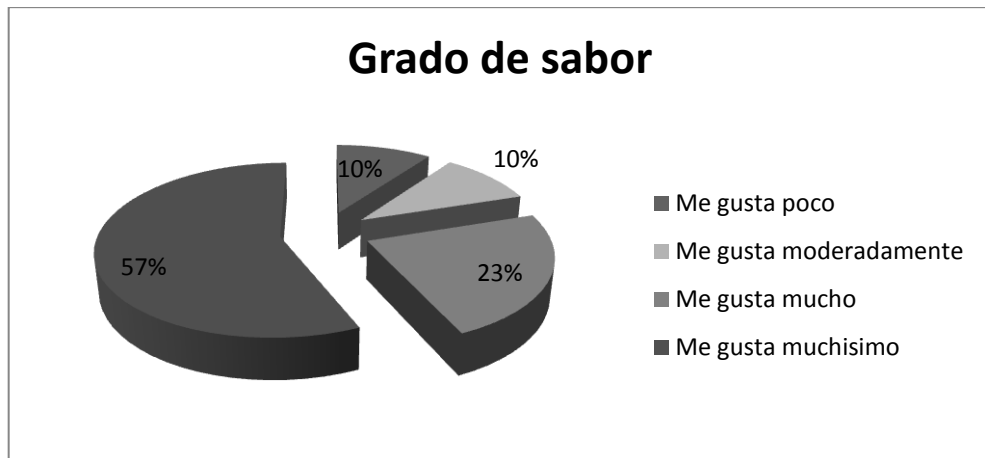
Figura 12. **Correlación de pérdida de agua en función del tiempo, para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*), tercera corrida, secado a presión atmosférica**



Fuente: elaboración propia.

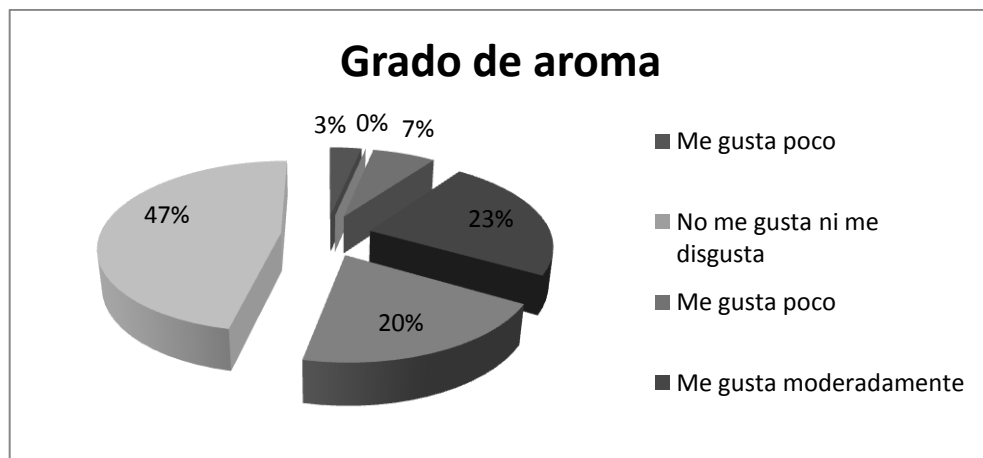
La figura 12 muestra un comportamiento polinomial de sexto grado y un coeficiente de correlación de 0.99 para un tiempo de secado de ocho horas y media. Estableciendo que la correlación para un secado de brócoli en un secador de bandejas a una temperatura de 60°C es un polinomio de sexto grado y un tiempo de residencia de ocho horas y media. A diferencia de las curvas a 60°C se tiene que para las curvas a 70°C se necesita una hora menos de secado.

Figura 13. **Análisis sensorial de sabor del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli**



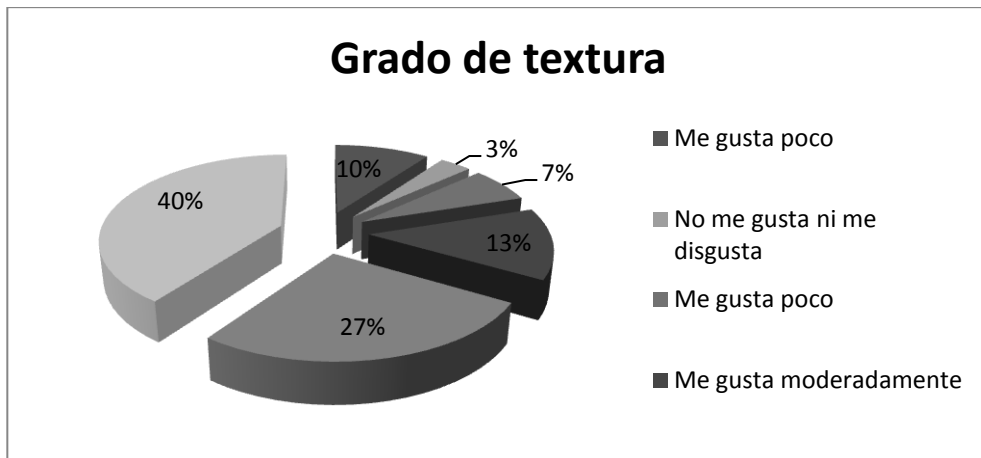
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Análisis sensorial de aroma del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli**



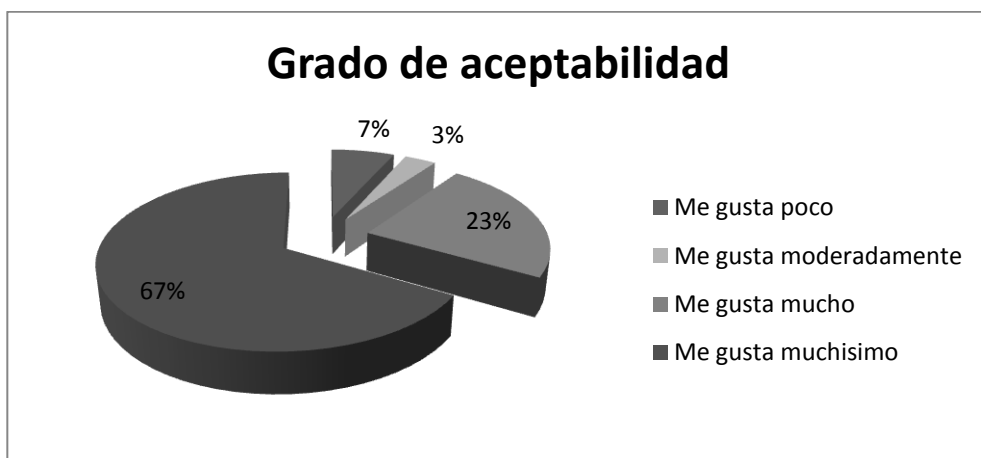
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Análisis sensorial de textura del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli**



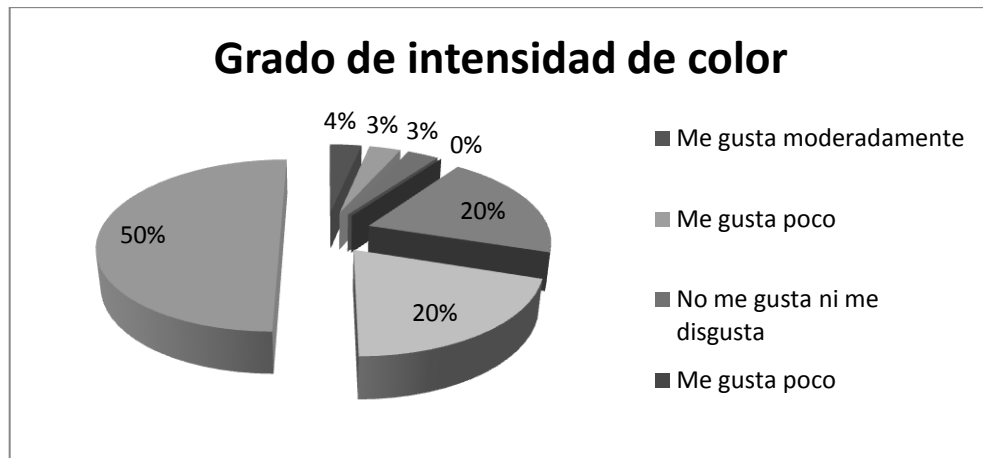
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Análisis de aceptabilidad del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Análisis sensorial de la intensidad de color del pan de molde con una composición 95% harina de trigo y 5% harina de subproductos de brócoli**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Valor nutricional de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) obtenida a nivel planta piloto a 60°C**

Descripción de la Muestra	Base	Agua %	Materia Seca Total %	Grasa Cruda %	Fibra Cruda %	Proteína Cruda %	Cenizas %	Extracto Libre de Nitrogeno %
Muestra No.1	Seca	11,50	88,5	0,82	31,94	21,02	17,45	28,77
	Como Alimento	-----	-----	0,72	28,27	18,61	15,44	-----
Muestra No. 2	Seca	10,32	89,68	0,84	32,36	21,78	17,97	27,05
	Como Alimento	-----	-----	0,74	29,03	19,53	16,11	-----
Muestra No. 3	Seca	11,78	88,22	0,83	32,74	21,27	17,21	27,95
	Como Alimento	-----	-----	0,73	29,87	18,76	15,18	-----

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Valor nutricional de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) obtenida a nivel planta piloto a 70°C**

Descripción de la Muestra	Base	Agua %	Materia Seca Total %	Grasa Cruda %	Fibra Cruda %	Proteína Cruda %	Cenizas %	Extracto Libre de Nitrogeno %
Muestra No.1	Seca	12,38	87,62	0,55	22,74	12,01	12,94	51,76
	Como Alimento	-----	-----	0,48	19,92	10,52	11,34	-----
Muestra No. 2	Seca	13,62	86,38	0,53	21,58	14,18	12,09	51,61
	Como Alimento	-----	-----	0,46	18,64	12,25	10,44	-----
Muestra No. 3	Seca	13,17	86,83	0,56	22,23	13,78	12,67	50,76
	Como Alimento	-----	-----	0,49	19,30	11,97	11,01	-----

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Valor nutricional del pan de molde con harina de trigo al 100% y pan de molde con harina de trigo al 95% y 5% de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) obtenida a nivel planta piloto**

Descripción de la Muestra	Base	Agua %	Materia Seca Total %	Grasa Cruda %	Fibra Cruda %	Proteína Cruda %	Cenizas %	Extracto Libre de Nitrogeno %
Muestra 100% Harina de trigo	Seca	24,17	75,83	10,96	4,47	11,83	2,32	70,42
	Como Alimento	-----	-----	8,31	3,39	8,97	1,76	-----
Muestra 95% Harina de trigo y 5% Harina de subproductos de brócoli	Seca	28,88	71,12	6,12	2,79	14,19	3,21	73,70
	Como Alimento	-----	-----	4,35	1,98	10,10	2,28	-----

Fuente: elaboración propia.



Tabla XVI. **Cuantificación de sulforafano del tallo de brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) y de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)**

Cromatograma	Sulforafano	Tiempo de Retención	Área del Pico	Concentración de Sulforafano µg/ml	Concentración de Sulforafano en 100 g de muestra (%P/P)
Muestra No.1	Tallo	2,41	43 100	70,80	-----
Muestra No. 2	Extracto	2,40	61 221	95,26	0,476

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Análisis de la varianza de las curvas de secado a 60°C**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJ	CV
Medidas	60	1,0	1,0	2,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Cuadro de análisis de la varianza curvas de secado a 60°C (SC tipo III)**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	54 480	19	2867,37	755,87	0,0001
Analista	54 480	19	2867,37	755,87	0,0001
Error	151,74	40	3,79		
Total	54 631,77	59			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para las curvas de secado a 60°C**

Test LSD Fisher		Alfa= 0,10		DMS = 1,46116	
Error : 1,1235		gl :36			
Tiempo (h)	Medias	n	E.E.		
8,50	4,41	3	0,61	A	
8,00	6,55	3	0,61	B	
7,50	9,45	3	0,61	C	
7,00	13,42	3	0,61	D	
6,50	26,46	3	0,61	E	
6,00	35,63	3	0,61	F	
5,50	44,49	3	0,61	G	
5,00	53,54	3	0,61	H	
4,50	69,62	3	0,61	I	
4,00	80,47	3	0,61	J	
3,50	86,93	3	0,61	K	
3,00	88,55	3	0,61	L	
2,50	89,43	3	0,61	L	
2,00	89,64	3	0,61	L	
1,50	91,66	3	0,61	M	
1,00	92,52	3	0,61	M	
0,50	92,60	3	0,61	M	
0,00	92,75	3	0,61	M	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Análisis de la varianza de las curvas de secado a 70°C**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJ	CV
Medidas	54	1,0	1,0	1,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Cuadro de análisis de la varianza curvas de secado a 70°C  
(SC tipo III)**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
<b>Modelo</b>	61 971,92	17	3 645,41	3 244,59	0,0001
<b>Analista</b>	61 971,92	17	3 645,41	3 244,59	0,0001
<b>Error</b>	40,45	36	1,12		
<b>Total</b>	54 631,77	53			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Análisis de Fisher y DMS para las curvas de secado a 70°C**

Test LSD Fisher		Alfa= 0,10		DMS = 2,67778	
Error : 3,7934		gl :40			
Tiempo (h)	Medias	n	E.E.		
9,50	6,83	3	1,12	A	
9,00	9,32	3	1,12	A	B
8,50	11,88	3	1,12		B
8,00	32,39	3	1,12		C
7,50	44,47	3	1,12		D
7,00	71,19	3	1,12		E
6,50	78,90	3	1,12		F
6,00	80,38	3	1,12		F
5,50	83,91	3	1,12		G
5,00	85,77	3	1,12		G
4,50	87,85	3	1,12		H
4,00	89,15	3	1,12		H
3,50	90,73	3	1,12		I
3,00	90,91	3	1,12		I
2,50	91,20	3	1,12		J
2,00	91,28	3	1,12		J
1,50	91,78	3	1,12		J
1,00	92,19	3	1,12		J
0,50	92,23	3	1,12		K
0,00	92,51	3	1,12		K

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se tuvo por objeto establecer el proceso para la obtención de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) y la fabricación de un producto de panificación. El brócoli es un alimento de alto valor nutritivo, que radica en su alto contenido de vitaminas, minerales, fibra carbohidratos, alto nivel de proteína y para efectos de este estudio su contenido de sulforafano. El tallo del brócoli es un alimento altamente perecedero y sus propiedades nutricionales empiezan a declinar al momento de su corte.

Para poder realizar el estudio se procedió a obtener materia prima fresca con no más de 12 horas después de su corte, al mismo se le realizó un tratamiento para su posterior deshidratación. Para deshidratación se realizó un análisis de corte para identificar el tipo de corte logra las mejores condiciones de secado donde se hizo una comparación entre: corte circular con un espesor de 2 mm, corte circular con un espesor de 1 milímetro y corte en juliana con un grosor de 2 milímetro por un largo de 15 milímetro. Este análisis determino que el corte que se ajusta más a las condiciones de secado es el corte en juliana.

El tratamiento consistió en el corte en juliana del tallo, una inmersión en ácido cítrico al 0,01% y un escaldado de 12 a 15 segundos. La inmersión en ácido cítrico logra una mayor estabilidad y menor oxidación de los pigmentos (beta-caroteno confiere el color amarillo-anaranjado-rojizo a los vegetales), logrando con ello conservar la pigmentación en la harina de subproductos del brócoli.

El escaldado realizado consistió en una inmersión en agua hirviendo por un periodo de 12 a 15 segundos con el objeto de inactivar las enzimas, evitando así el pardeamiento debido a la actuación consistente en la transformación de polifenoles en melaninas. Una vez realizado el pretratamiento se procedió a realizar la deshidratación en periodo no mayor a una hora para evitar la declinación de las propiedades nutricionales del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*).

Se hicieron seis deshidrataciones en un secador de bandejas de flujo transversal, haciendo tres corridas a 60°C y tres corridas a 70°C para comparar la diferencia de pérdida de nutrientes entre las diferentes temperaturas. Para todas las corridas se realizó la curva de secado para poder determinar la pérdida de peso, en las corridas a 60°C se obtuvo un tiempo de 9 horas y 30 minutos en promedio para llegar a una humedad menor al 9% y en el caso de las corridas a 70°C se obtuvo un promedio de 8 horas y 30 minutos en promedio para obtener una humedad menor al 5.50%.

En las curvas de secado se logra observar tres etapas del secado con diferencia en tiempos acorde a la temperatura que se utilizó.

En las tres corridas a 60°C se observa que en las primeras tres horas se da la etapa de estabilización en la cual las condiciones de la superficie del tallo se equilibran con el aire de secado. Este tiempo es una proporción despreciable del total del tiempo de secado pues no hay mayor pérdida de agua. De la tercera a la sexta, tres horas, se da la etapa de velocidad constante en la que la superficie del sólido se mantiene saturado de agua líquida debido a que el movimiento del agua desde el interior del sólido hasta la superficie ocurre a la misma velocidad de la evaporación en la superficie.

Por último el periodo de velocidad decreciente, tiene una duración de 3 horas y 30 minutos, la superficie del sólido comienza a desecarse porque el agua que aun se halla en su interior encuentra dificultades para llegar a la superficie del sólido.

Para las corridas a 70°C se observa que la etapa de estabilización dura dos horas, la etapa de velocidad constante de dos horas y la etapa de velocidad decreciente de 3 horas y 30 minutos.

El tiempo de secado se estableció con respecto al contenido de humedad, siempre que este fuera menor al 10% se daba por terminado el proceso debido a que COGUANOR establece que el porcentaje de humedad para harinas debe de ser menor al 15%.

Una vez obtenido el deshidratado se dio la reducción del tamaño de partícula, de primero se licuó por medio de una licuadora industrial y posteriormente se molió en un molino de martillo. En el molino de martillos se utilizó una malla de 80 mesh para que el tamaño de partícula de la harina de subproductos del brócoli tenga compatibilidad con la harina de trigo en mezcla.

Se obtuvo la harina procedente del secado a las dos temperaturas y se procedió a realizar un análisis proximal para poder determinar las pérdidas nutritivas. El comportamiento de las tres corridas es sumamente similar sin embargo entre las corridas a diferentes temperaturas si se observa una diferencia notable.

El análisis proximal realizado a la harina obtenida a 60°C mostró un contenido promedio de 0,73% de grasa cruda, 29,05% de fibra cruda, 18,96% de proteína cruda, 15,57% de cenizas y 27,92% extracto libre de nitrógeno.

Con estos valores nutricionales se puede determinar que el alimento es sumamente rico en fibra, proteína, vitaminas y minerales.

Por contraste el análisis proximal realizado a la harina obtenida a 70°C mostro un contenido promedio de 0,48% de grasa cruda, 19,29% de fibra cruda, 11,58% de proteína cruda, 10,93% de cenizas y 51,37% extracto libre de nitrógeno. Se ve una pérdida considerable de nutrientes por el incremento de 10°C en la temperatura de secado. Considerando que estos son valores porcentuales se debe tener en cuenta que el decrecimiento de un contenido permite que los otros valores incrementen su valor automáticamente, se ve una pérdida considerable de proteínas por la desnaturalización a causa de la influencia térmica.

Las proteínas se desnaturalizan cuando pierden su estructura tridimensional y así el característico plegamiento de su estructura. Si la forma de la proteína es alterada por algún factor externo como la aplicación de calor, este no es capaz de cumplir su función celular, proceso denominado desnaturalización.

Así también el contenido de cenizas, obtenido en la harina a 70°C a diferencia de la harina a 60°C, disminuye considerablemente por el tiempo de la aplicación de calor y la pérdida de vitaminas por el incremento de la temperatura de secado. La pérdida de vitaminas y proteínas por el secado a 70°C hacen que el valor de extracto libre de nitrógeno se incremente automáticamente.



Por comparación entre las dos harinas obtenidas, se puede considerar que para fines de este estudio es mucho más útil y funcional la harina de subproductos de brócoli deshidratada a 60°C pues contiene una serie de parámetros nutricionales de mayor valor. Una vez determinada la calidad de la harina acorde a sus propiedades nutricionales se utilizó para cuantificar los sulforafanos presentes y la realización de un producto de panificación.

En el desarrollo del producto de panificación se pretendía únicamente alterar sus propiedades nutricionales para darle un valor agregado al producto y no el desarrollo de un producto con el uso al 100% de la harina de subproductos del brócoli. Se hizo una prueba con la utilización de un 20% de harina de subproductos del brócoli la cual no dio las características adecuadas para la aceptación del consumidor.

La harina de subproductos del brócoli no es panificable pues tiene la ausencia de gliadina y gluteína, que son proteínas que dan la formación del gluten. El gluten es la capacidad de elasticidad de la masa y la que da la capacidad de retención de dióxido de carbono en la fermentación ocasionada por la levadura. En la prueba realizada con una proporción 20:80, harina de subproductos del brócoli y harina de trigo respectivamente, se obtuvo una masa inconsistente y muy débil, lo que ocasionó que la masa no fuera capaz de retener el dióxido de carbono producido por la fermentación además de dar un sabor sumamente fuerte a brócoli.

Esta prueba permitió establecer que la proporción de 20% de harina de brócoli en un producto de panificación es demasiado alta, además de desarrollar una masa inconsistente, da un sabor muy concentrado por el alto contenido de agua en el brócoli. La harina obtenida es una muestra sumamente concentrada con una tasa de recuperación de sólidos de aproximadamente 7,5%.

Se corrió una segunda prueba con una proporción 5:95, harina de subproductos del brócoli y harina de trigo respectivamente, la cual desarrollo una masa con las características primordiales para su uso en panificación. La formulación del producto fue la siguiente:

Tabla XXIII. **Formulación del pan de molde con harina de subproductos del brócoli**

<b>Ingrediente</b>	<b>% del ingrediente (Lb de ingrediente*100/ Lb de harina total)</b>
Azúcar	9
Manteca	4
Levadura	3
Sal	2
Propionato de Calcio	1
Harina de Trigo	95
Harina de Subproductos del brócoli	5

Fuente: elaboración propia.

Pese a que la proporción es mínima se dan cambios peculiares en la nueva formulación que incrementan los valores nutritivos del alimento en cuestión. Comparando el pan producido a partir del 100% de harina de trigo contra la mezcla parcial de harina de brócoli, se observa un incremento en la cantidad de proteína, de vitaminas y minerales favoreciendo al pan con harina de subproductos del brócoli. Agregando con ello valor nutricional al pan producido con harina de subproductos del brócoli.

Además del incremento de los macro nutrientes más significativos en el alimento también se comprobó la existencia de sulforafanos contenida en la harina de subproductos del brócoli para catalogarlo como un alimento nutraceutico.

El sulforafano [ 1-isotiocianato-4-(metilsulfinil) butano], actúa estimulando las defensas anticancerígenas previniendo la aparición de tumores, actúa rápidamente con la desintoxicación por electrófilos y la reactividad del oxígeno a los metabolitos que puedan causar la mutagénesis de las células y la neoplasia. Siendo así la harina de subproductos del brócoli un complemento alimenticio en la panificación de alto valor nutricional y como método de medicina preventiva.

Para finalizar el estudio se procedió a medir las propiedades organolépticas del producto por medio de un análisis de aceptación, a través de encuestas cerradas tomadas directamente de los clientes de Panificadora La Corona. Se tuvo una población de 30 individuos elegidos al azar, de los cuales el 90% de ellos les gusta el pan como producto de consumo general y tienen un consumo promedio de más de tres veces por semana.

En la encuesta se midió el grado de sabor, de aroma, de textura, de intensidad de color y de aceptación como producto nuevo. Las encuestas reflejaron el gusto general por el producto, al establecer en una escala hedónica los valores obtenidos y obteniendo como promedio “Me gusta mucho” en los diferentes parámetros encuestados.

Por lo tanto el estudio refleja que la harina de brócoli cumple con lo siguiente: utilidad de un desecho que contamina el ambiente, factibilidad de proceso al darle utilidad a un desecho, fabricación de un alimento de alto valor nutritivo, catalogar al alimento como nutracéutico por su contenido de sulforafano, su funcionalidad parcial en la industria panificadora y su aceptación organoléptica por parte de los consumidores de productos de panificación.

## CONCLUSIONES

1. Es factible darle utilidad al desecho del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) por medio de un bioterio.
2. La temperatura de deshidratado que conserva mejor las propiedades de la harina es de 60°C porque a 70°C pierde contenido de vitaminas y proteínas.
3. Las curvas de secado para 60°C y 70°C muestran un comportamiento polinomial grado 6.
4. La harina de subproductos del brócoli conserva sus macro nutrientes a una temperatura de secado de 60°C.
5. Es posible la fabricación de harina de subproductos de brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) que cumple con los parámetros para harinas vegetales.
6. La harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) tiene un alto contenido de proteína, fibra cruda y cenizas.
7. Es posible la fabricación de un producto de panificación con una mezcla parcial del 5% de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)

8. El uso de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) en productos de panificación le da un valor agregado a la cantidad de proteínas, vitaminas y minerales.
9. El producto de panificación con una mezcla parcial del 5% de harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) tiene una aceptabilidad de 95% por el consumidor, que corresponde a un “Me gusta muchísimo”.
10. La disminución del contenido de fibra en el producto de panificación se debió al constante estrés mecánico al que está sometido la masa en las mezcladoras.
11. Se logró determinar la concentración de sulforafano presente en la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) deshidratado a 60°C por cromatografía líquida de alta resolución la cual se cuantifica a 0,476% P/P.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio biológico de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) por medio de un bioterio.
2. Medir la eficiencia proteínica de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*).
3. Cuantificar los sulforafanos presentes en un producto que ha sido sometido a cocción.
4. Medir la inactivación enzimática del escaldado para dar una mayor vida de anaquel a la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*).
5. Investigar diferentes métodos para darle una funcionalidad a los desechos del brócoli.
6. Desarrollar nuevos productos con el uso de la harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) en la industria alimenticia.
7. Diseñar una metodología para la extracción de sulforafano procedente de los subproductos del brócoli debido a que su valor comercial asciende \$12 000,00 el gramo.
8. Hacer un ensayo de reproducibilidad para determinar si los tiempos de secado disminuyen al uso de otros tipos de deshidratadores.

9. Realizar un ensayo industrial con 100 libras de mezcla para determinar la panificabilidad de la harina.



## BIBLIOGRAFÍA

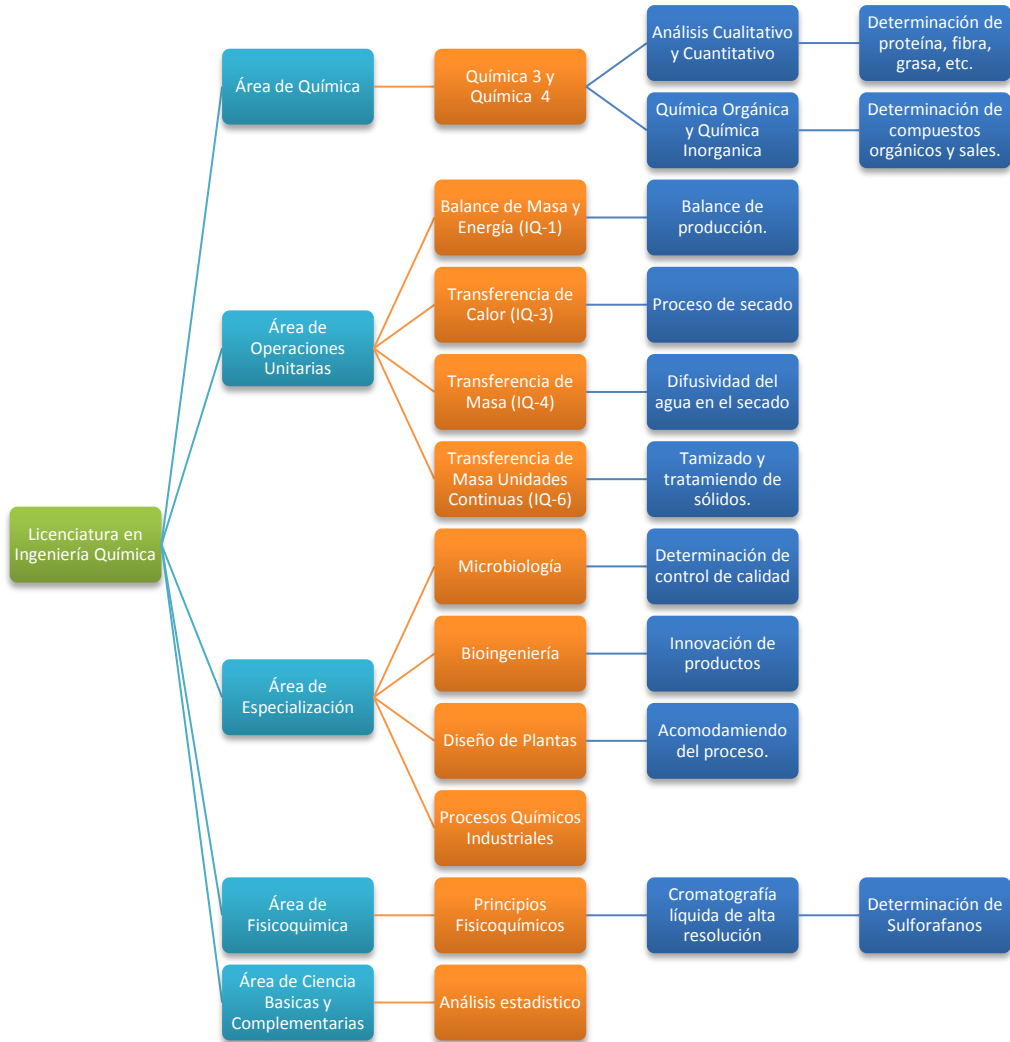
1. EARLE, R. L. *Ingeniería de alimentos*. 2a ed. España: Acribia, 1988. 203 p.
2. KERN, Donald Q. *Procesos de transferencia de calor*. México: Continental, 1999. 660 p.
3. NELSON, David L.; COX, Michael M. LEHNINGER: *Principios de bioquímica*. 4a ed. México: Omega, 2005. 1119 p.
4. POLLOCK, Michael. *Enciclopedia del cultivo de frutas y hortalizas*. España: Blume, 2003. 437 p.
5. SHARMA, Mulvaney. *Ingeniería de alimentos, operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México: Limusa Wiley, 2003. 348 p.
6. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Mexico: McGraw-Hill, 1992. 510 p.



## APÉNDICES

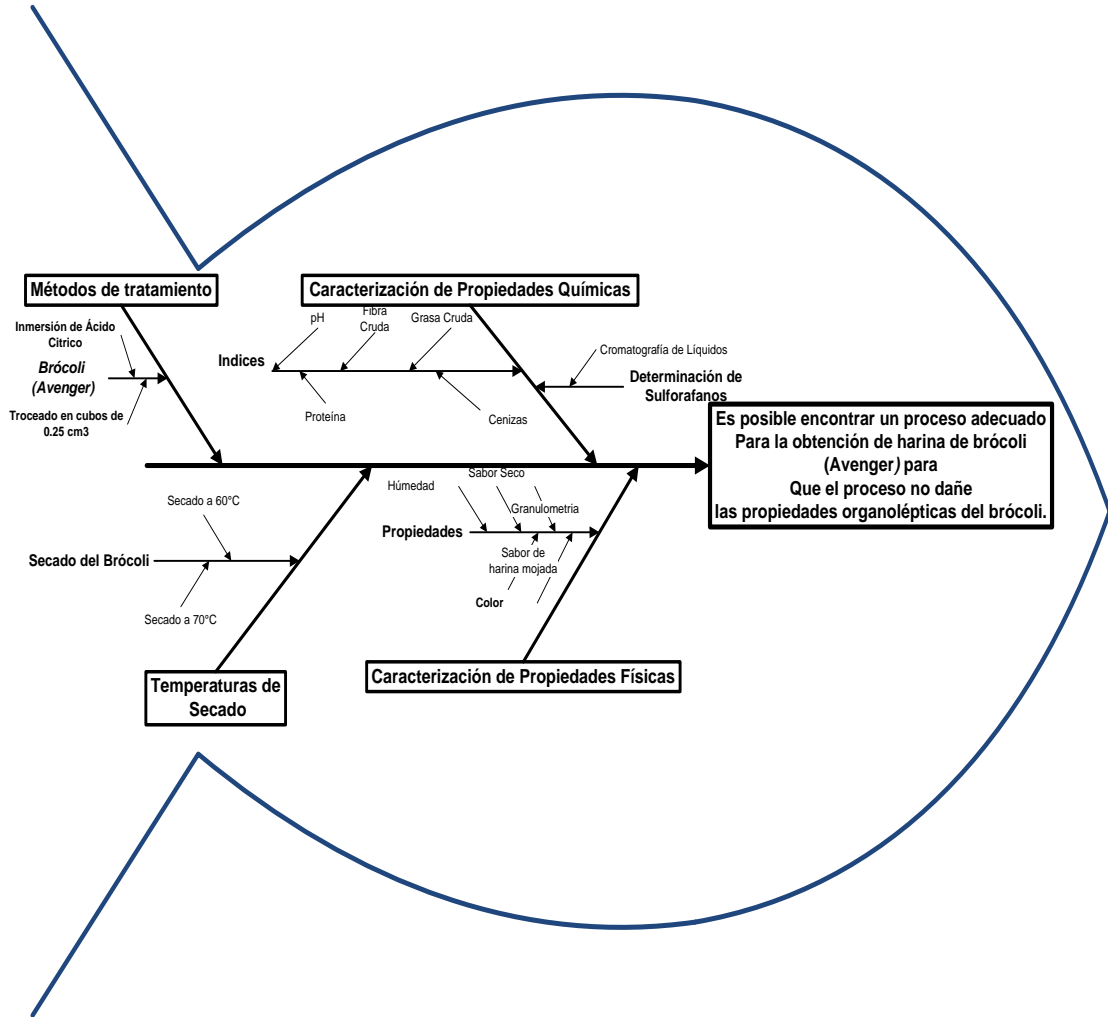
Apéndice A:	Tabla de requisitos académicos .....	70
Apéndice B:	Diagrama Ishikawa .....	71
Apéndice C:	Figuras de deshidratación .....	72
Apéndice D:	Datos Calculados .....	74

Apéndice A: **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice B: Diagrama Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice C: Figuras de deshidratación

1. Preparación del tallo del brócoli para su corte y deshidratación



2. Corte en juliana del tallo del brócoli



3. Carga del secador de bandejas en el LIEXVE con 25 Lb de brócoli



4. Harina de subproductos del brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*)

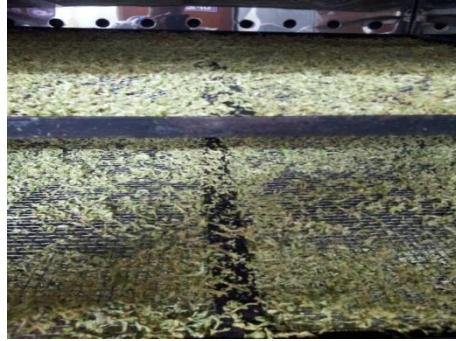


## Continuación del Apéndice C

5. Comparación entre la muestra a 5% de harina de brócoli y a 20%.



6. Producto final del secado a 60 °C



Fuente: fotografías tomadas en el LIEXVE y Panificadora La Corona.

Apéndice D: **Datos Calculados**

**Datos tomados del secador de bandejas a 60 °C**

	<b>1ra. Corrida</b>	<b>2da. Corrida</b>	<b>3ra. Corrida</b>
<b>Tiempo (horas)</b>	<b>%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)</b>	<b>%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)</b>	<b>%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)</b>
0,00	93,09	90,09	94,34
0,50	92,56	90,00	94,02
1,00	92,46	90,17	94,05
1,50	91,82	89,92	93,60
2,00	91,62	88,97	93,00
2,50	90,93	89,09	92,71
3,00	91,82	88,94	93,09
3,50	89,84	89,83	92,53
4,00	88,42	88,12	90,92
4,50	87,65	86,32	89,59
5,00	83,43	86,42	87,47
5,50	82,09	84,07	85,57
6,00	80,06	79,11	81,97
6,50	75,94	80,30	80,46
7,00	68,92	72,05	72,60
7,50	43,58	44,48	45,35
8,00	31,00	33,14	33,03
8,50	8,90	14,62	12,11
9,00	6,96	11,49	9,50
9,50	4,62	8,90	6,96

Fuente: elaboración propia.



**Datos tomados del secador de bandejas a 70 °C**

	<b>1ra. Corrida</b>	<b>2da. Corrida</b>	<b>3ra. Corrida</b>
<b>Tiempo (horas)</b>	<b>%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)</b>	<b>%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)</b>	<b>%Humedad (Kg brocoli*100/Kg masa inicial)</b>
0,00	92.29	94.01	91.94
0,50	93.06	92.95	91.80
1,00	91.42	92.69	90.86
1,50	91.78	94.07	91.72
2,00	89.88	89.76	88.65
2,50	88.92	91.14	88.86
3,00	87.94	89.93	87.78
3,50	86.23	88.39	86.17
4,00	81.26	79.05	81.11
4,50	68.00	69.70	71.15
5,00	53.52	54.86	52.24
5,50	44.13	45.23	44.10
6,00	35.34	36.22	35.32
6,50	28.29	24.87	26.23
7,00	13.31	13.64	13.30
7,50	10.08	9.24	9.04
8,00	7.06	6.06	6.54
8,50	4.42	5.23	3.57

Fuente: elaboración propia.

### Datos tomados del secador de bandejas a 70°C

Grado de aceptabilidad		Pregunta 1	%	Pregunta 2	%	Pregunta 3	%
Me gusta muchísimo	2						
Me gusta mucho	3						
Me gusta moderadamente	4						
Me gusta poco	5			1	3.33%	3	10.00%
No me gusta ni me disgusta	6				0.00%	1	3.33%
Me gusta poco	7	3	10.00%	2	6.67%	2	6.67%
Me gusta moderadamente	8	3	10.00%	7	23.33%	4	13.33%
Me gusta mucho	9	7	23.33%	6	20.00%	8	26.67%
Me gusta muchísimo	10	17	56.67%	14	46.67%	12	40.00%

Fuente: elaboración propia.

### Datos tomados del secador de bandejas a 70°C

Grado de aceptabilidad		Pregunta 1	%	Pregunta 2	%
Me gusta muchísimo	2				
Me gusta mucho	3				
Me gusta moderadamente	4				
Me gusta poco	5	1	3.33%		
No me gusta ni me disgusta	6	1	3.33%		
Me gusta poco	7	1	3.33%		
Me gusta moderadamente	8		0.00%	2	6.67%
Me gusta mucho	9	6	20.00%	1	3.33%
Me gusta muchísimo	10	6	20.00%	7	23.33%

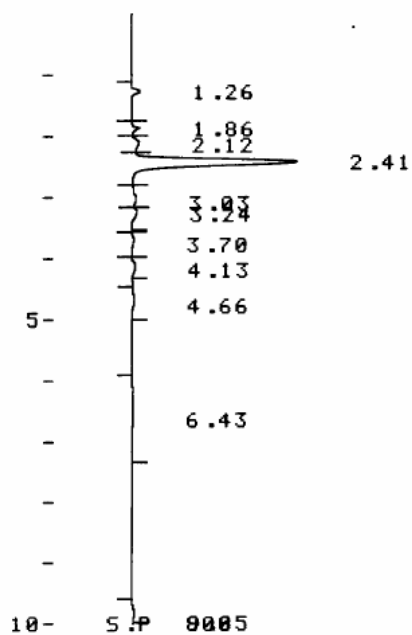
Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

Anexo A:	Cromatografía de líquido de alta resolución del tallo de brócoli ..	78
Anexo B:	Cromatografía de líquido de alta resolución de la harina de subproductos del brócoli .....	79

Anexo A: Cromatografía líquida de alta resolución del tallo del brócoli

CH. 1 C.S 10.00 ATT 5 OFFS 3 14/07/12 13:42



D-2500

14/07/12 13:42

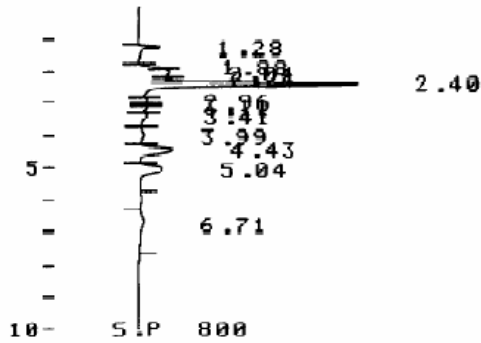
METHOD: SULFORAFANO- TAG: 6 CH: 1

FILE: 1 CALC-METHOD: AREA% TABLE: 0 CONC: AREA

NO.	RT	AREA	CONC	BC	HEIGHT
1	1.26	1857	3.218	BB	291
2	1.86	1267	2.196	BU	277
3	2.12	2866	4.967	VU	256
4	2.41	43100	74.692	VU	5321
5	3.03	1452	2.516	TBU	110
6	3.24	1605	2.781	TVB	161
7	3.70	718	1.244	TBB	65
8	4.13	1250	2.166	BB	109
9	4.66	914	1.584	BB	63
10	6.43	2161	3.745	BB	55
11	9.85	514	0.891	BB	37
TOTAL		57704	100.000		6745
PEAK REJ :		0			
RAW DATA STORAGE NO.			4		

Anexo B: Cromatografía del líquido de alta resolución de la harina de subproductos del brócoli

CH. 1 C.S 5.00 ATT 5 OFFS 3 10/07/12 18:49



D-2500

10/07/12 18:49

METHOD: SULFORAFANO- TAG: 25 CH: 1

FILE: 1 CALC-METHOD: AREA% TABLE: 0 CONC: AREA

NO.	RT	AREA	CONC	BC	HEIGHT
1	1.28	4487	3.590	BB	671
2	1.88	3518	2.814	BU	803
3	2.04	15086	12.069	VV	982
4	2.24	7517	6.014	UU	1021
5	2.40	61221	40.978	UU	6516
6	2.96	874	0.699	TBU	108
7	3.11	1134	0.907	TUU	110
8	3.41	1673	1.338	TVB	142
9	3.99	1426	1.141	TBB	100
10	4.43	13793	11.035	VV	1005
11	5.04	10809	8.647	UB	680
12	6.71	3459	2.767	BB	108
TOTAL		124997	100.000		12246
PEAK REJ :		0			
RAW DATA STORAGE NO.		18			

