

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**OBTENCIÓN DE HARINA DE BRÓCOLI MEDIANTE EL
PROCESO DE SECADO POR AIRE CALIENTE**

POR:

LOURDES FERNANDEZ ESTEVEZ

Trabajo final de grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería de Alimentos.

TARIJA – BOLIVIA

2024

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez

**DECANO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

M.Sc. Lic. Gustavo Succi Aguirre

**VICEDECANO DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

M.Sc. Ing. Erick Ramírez Ruiz

**DIRECTOR DE LA
CARRERA DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS**

M.Sc. Ing. Erick Ramírez Ruiz

DOCENTE GUÍA

Ing. Luis Fernando Zenteno Benitez

TRIBUNAL

Ing. Never Gustavo Avendaño Vásquez

TRIBUNAL

Ing. Mariela Soruco Andrade

TRIBUNAL

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado va dedicado principalmente:

A Dios

Por guiar mis pasos, iluminar mi vida y darme fuerza en mis debilidades para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres

Roberto Fernandez y Sabina Estevez por ser los pilares más importantes en vida, han sido mi constante apoyo y fuente de inspiración a lo largo de estos años, gracias a su amor, consejos, trabajo y sacrificio incondicional que ha sido el motor que me ha impulsado a alcanzar este logro y convertirme en lo que soy.

A mis hermanas (os)

Luis Miguel, Veronica, Rocio, Adelaida, Yhovana, Paola Daniela por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo incondicional, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Planteamiento del problema.....	4
1.5	Formulación del problema.....	5
1.6	Objeto de estudio.....	5
1.7	Campo de acción	5
1.8	Hipótesis.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	Historia de harina vegetal	7
2.2	Definición de harina de vegetales	7
2.3	Clasificación de las harinas de vegetales	7
2.3.1	Tipos de harina de vegetal.....	8
2.4	Composición fisicoquímica de harina de brócoli.....	8

2.5	Propiedades nutricionales de harina de brócoli	9
2.6	Propiedades microbiológicas de harina de brócoli.....	9
2.7	Aplicaciones culinarias de harina de brócoli.....	10
2.8	Generalidades biológicas del brócoli.....	10
2.8.1	Características físicas del brócoli	10
2.8.2	Clasificación taxonómica del brócoli.....	11
2.8.3	Morfología botánica de la flor de brócoli	11
2.8.4	Variedades de brócoli.....	12
2.8.5	Composición fisicoquímica del brócoli.....	13
2.8.6	Propiedades nutricionales del brócoli	14
2.8.7	Importancia y beneficios del brócoli para la salud alimentaria.....	14
2.9	Secado de los alimentos.....	15
2.10	Factores que intervienen en el proceso de secado	15
2.10.1	Temperatura del aire	15
2.10.2	Humedad relativa del aire.....	15
2.10.3	Velocidad del aire.....	16
2.10.4	Contenido de humedad de alimentos	16
2.10.5	Área de superficie del alimento	17
2.11	Tipos de secadores.....	17
2.12	Cinética de secado	18

2.12.1	Curva de secado	18
2.12.2	Curva de velocidad de secado.....	19
2.12.3	Periodos desecado	20
2.12.3.1	Período de estabilización	21
2.12.4	Períododevelocidadconstante.....	21
2.12.5	Período de velocidad decreciente.....	21
2.13	Tratamientos para prevenir el pardeamiento en el proceso de secado de las muestras de brócoli.....	21
2.13.1	Acido ascórbico	22
2.13.2	Ácido cítrico	22

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1	Desarrollo de la parte experimental	23
3.2	Tipos de intervención en el desarrollo experimental.....	23
3.3	Paradigma investigativo.....	23
3.4	Enfoque de la investigación	24
3.5	Métodos, técnicas e instrumentos.....	24
3.5.1	Análisis de fisicoquímicos, microbiológicos y minerales del brócoli.....	24
3.5.2	Análisis de fisicoquímicos, microbiológicos y minerales de harina de brócoli.....	25

3.6	Equipos, instrumentos de laboratorio, material de laboratorio y utensilios utilizados en el proceso de secado	26
3.6.1	Equipos	26
3.6.2	Instrumentos de laboratorio	27
3.6.3	Material de laboratorio	28
3.6.4	Utensilios	29
3.7	Insumos alimentarios.....	29
3.8	Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de brócoli.....	30
3.8.1	Descripción del diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de brócoli.....	31
3.9	Evaluación sensorial.....	36
3.10	Diseño experimental	37
3.10.1	Diseño factorial 2^3	37
3.10.2	Diseño experimental 2^3 en el proceso de secado de las muestras de brócoli	38
3.11	Operacionalización de las variables para el proceso de obtención de harina de brócoli	39

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Caracterización del brócoli.....	42
4.1.1	Propiedades físicas del brócoli	42
4.1.2	Análisisfísicoquímicodebrócoli.....	43
4.1.3	Análisis de minerales del brócoli.....	44
4.1.4	Análisis microbiológico del brócoli	45
4.2	Caracterización de las variables del proceso de secado para la obtención de harina de brócoli	45
4.2.1	Pruebas iniciales para el proceso de secado para la obtención de harina de brócoli.....	45
4.2.2	Secado de brócoli sin tratamiento para el tipo de corte del ensayo 1	47
4.2.3	Pruebas preliminares para determinar pretratamiento a ser aplicado en la muestra de brócoli.....	48
4.2.3.1	Evaluación sensorial de muestras preliminares para elegir el pretratamiento.....	50
4.2.3.2	Estadístico caja y bigote del atributo color de muestras preliminares	51
4.2.3.2.1	Estadístico de Tukey del atributo color de muestras preliminares	51
4.2.3.3	Estadístico caja y bigote del atributo apariencia de muestras preliminares	52
4.2.3.3.1	Estadístico de Tukey para el atributo apariencia de las muestras preliminares para elegir el pretratamiento	53

4.3	Diseño experimental en el proceso de secado de brócoli para la obtención de harina de brócoli	54
4.3.1	Diseño experimental en el proceso de secado sintratamiento	54
4.3.2	Diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de muestras en brócoli sin tratamiento	54
4.3.2.1	Análisis de varianza del diseño factorial de las muestras en brócoli sin tratamiento	55
4.3.2.2	Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca de las muestras de brócoli sin tratamiento.....	58
4.3.2.3	Optimización de respuesta del diseño factorial de las muestras de brócoli sin tratamiento	59
4.3.3	Diseño experimental en el proceso de secado en solución de ácido cítrico	60
4.3.4	Diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de muestras en brócoli con solución de ácido cítrico.....	61
4.3.4.1	Análisis de varianza del diseño factorial de las muestras en brócoli con solución de ácido cítrico.....	61
4.3.4.2	Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca de las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico	65
4.3.4.3	Optimización de respuesta del diseño factorial de las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico.....	66
4.4	Influencia de las variables sobre el contenido de humedad en el proceso de secado por aire caliente de las muestras de brócoli	67

4.4.1	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A ₁₂ (50 - 60) °C: B ₁ (5,0) m/s versus C ₁ (0,1) cm	68
4.4.2	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A ₁₂ (50 - 60) °C: B ₂ (5,5) m/s versus C ₁ (0,1) cm	69
4.4.3	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A ₁₂ (50 - 60) °C: B ₁ (5) m/s versus C ₂ (0,2) cm	70
4.4.4	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A ₁₂ (50 - 60) °C: B ₂ (5,5) m/s versus C ₂ (0,2) cm.....	72
4.4.5	Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B ₁₂ (5 – 5,5) m/s: A ₁ (50) °C versus C ₁ (0,1) cm	73
4.4.6	Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B ₁₂ (5 – 5,5) m/s: A ₂ (60) °C versus (0,1) cm	74
4.4.7	Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B ₁₂ (5 – 5,5) m/s: A ₁ (50) °C versus C ₂ (0,2) cm.....	75
4.4.8	Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B ₁₂ (5 – 5,5) m/s: A ₂ (60) °C versus C ₂ (0,2) cm	76
4.4.9	Variación del contenido de humedad a corte C ₁₂ (0,1 – 0,2) cm: A ₁ (50) °C versus B ₁ (5) m/s.....	77
4.4.10	Variación del contenido de humedad a corte C ₁₂ (0,1 – 0,2) cm: A ₂ (60) °C versus B ₁ (5) m/s.....	78
4.4.11	Variación del contenido de humedad a corte C ₁₂ (0,1 – 0,2) cm: A ₁ (50) °C versus B ₂ (5,5) m/s.....	80
4.4.12	Variación del contenido de humedad a corte C ₁₂ (0,1 – 0,2) cm: A ₂ (60) °C versus B ₂ (5,5) m/s	81
4.5	Cinética de secado para el proceso de secado en la obtención de harina de brócoli.....	82

4.5.1	Cinética de secado para el proceso de secado de brócoli sin tratamiento	82
4.5.2	Cinética de secado para el proceso de secado de brócoli con solución de ácido cítrico	85
4.6	Caracterización de la harina de brócoli.....	88
4.6.1	Análisis fisicoquímico de la harina de brócoli.....	88
4.6.2	Análisis de minerales de la harina de brócoli	89
4.6.3	Análisis microbiológico de harina de brócoli	89
4.7	Control de harina de brócoli en el almacenamiento.....	90
4.8	Balance de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli	91
4.8.1	Balance de materia en la etapa de cortado.....	95
4.8.2	Balance de materia en la etapa de selección.....	97
4.8.3	Balance de materia en la etapa de lavado y escurrido.....	97
4.8.4	Balance de materia en la etapa de laminado	100
4.8.5	Balance de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido ..	101
4.8.6	Balance de materia en el proceso de secado	104
4.8.7	Balance general de materia en la etapa de molienda	108
4.8.8	Balance general de materia en el proceso de tamizado	109
4.9	Resumen general del balance de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli.....	110
4.10	Balance de energía para la obtención de harina de brócoli	111

4.10.1	Balance de energía en el proceso de secado	111
4.10.2	Balance de energía en el proceso de molienda	117
4.10.3	Balance de energía en el proceso de tamizado	118

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

5.1	Conclusiones.....	119
5.2	Recomendaciones.....	121
	Bibliografía	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Características fisicoquímicas de harina de brócoli	9
Tabla 2.2	Características microbiológicas del brócoli.....	10
Tabla 2.3	Clasificación taxonómica del brócoli	11
Tabla 2.4	Composición fisicoquímica del brócoli	14
Tabla 2.5	Composición nutricional del brócoli fresco.....	14
Tabla 3.1	Insumos alimentarios.....	29
Tabla 3.2	Niveles de variación aplicado en el proceso de secado por aire caliente	38
Tabla 3.3	Matriz de diseño factorial aplicado al proceso de secado por aire caliente	39
Tabla 4.1	Propiedades físicas de brócoli.....	43
Tabla 4.2	Análisis fisicoquímicos del brócoli.....	44
Tabla 4.3	Análisis de minerales del brócoli.....	44

Tabla 4.4	Análisis microbiológicos del brócoli	45
Tabla 4.5	Variación del contenido de humedad en base seca para ensayo 1	47
Tabla 4.6	Variación del contenido de humedad en base seca del brócoli	49
Tabla 4.7	Estadístico de Tukey para el atributo color	52
Tabla 4.8	Estadístico de Tukey para el atributo apariencia	53
Tabla 4.9	Contenido de humedad en base seca de muestras de brócoli sin tratamiento	54
Tabla 4.10	Análisis de varianza para la variable respuesta contenido de humedad en base seca.....	55
Tabla 4.11	Muestras de brócoli sin tratamiento	59
Tabla 4.12	Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad....	60
Tabla 4.13	Contenido de humedad en base seca de muestras de brócoli con solución ácido cítrico.....	61
Tabla 4.14	Análisis de varianza para la variable respuesta contenido de humedad en base seca.....	62
Tabla 4.15	Muestras de brócoli sin tratamiento	66
Tabla 4.16	Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad....	67
Tabla 4.17	Variables para el análisis del contenido de humedad en base seca	68
Tabla 4.18	Variación del contenido de humedad y velocidad de secado para la obtención de harina de brócoli sin tratamiento	83
Tabla 4.19	Variación del contenido de humedad y velocidad de secado para la obtención de harina de brócoli con solución de ácido cítrico	86

Tabla 4.20	Análisis fisicoquímicos de harina de brócoli	88
Tabla 4.21	Análisis de micronutrientes de harina de brócoli.....	89
Tabla 4.22	Análisis microbiológicos de harina de brócoli	89
Tabla 4.23	Control de humedad de la harina de brócoli	90
Tabla 4.24	Propiedades psicrométricas del aire.....	107
Tabla 4.25	Datos de la composición fisicoquímica del brócoli	116
Tabla 4.26	Datos de la composición fisicoquímica de harina de brócoli	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1:	Clasificación de harina por la cantidad de gluten que contiene.....	8
Figura 2.2:	Tipos de harinas de vegetales	8
Figura 2.3:	Morfología botánica del brócoli.....	12
Figura 2.4:	Variedadesdebrócoli.....	13
Figura 2.5:	Tiposdesecadores.....	17
Figura 2.6:	Secador de bandejas	18
Figura 2.7:	Curva de secado.....	19
Figura 2.8:	Curvadevelocidaddesecado	20
Figura 3.1:	Métodos y técnicas de análisis fisicoquímicos microbiológicos y minerales del brócoli	25
Figura 3.2:	Métodos y técnicasde análisis fisicoquímicos microbiológicos y minerales de harina de brócoli	26

Figura 3.3:	Equipos de laboratorio para el proceso de obtención de harina de brócoli	27
Figura 3.4:	Instrumentos de laboratorio utilizados para la obtención de harina de brócoli	28
Figura 3.5:	Materiales de laboratorio	28
Figura 3.6:	Utensilios de cocina	29
Figura 3.7:	Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de brócoli	30
Figura 3.8:	Brócoli.....	31
Figura 3.9:	Cortado.....	31
Figura 3.10:	Selección	31
Figura 3.11:	Lavado.....	32
Figura 3.12:	Escurrido	32
Figura 3.13:	Laminado	32
Figura 3.14:	Pretratamiento	33
Figura 3.15:	Escurrido	33
Figura 3.16:	Secado	34
Figura 3.17:	Preenvasado.....	35
Figura 3.18:	Molienda	35
Figura 3.19:	Tamizado	35
Figura 3.20:	Almacenamiento	36
Figura 3.21:	Evaluación sensorial de las muestras de harina de brócoli ...	36
Figura 4.1:	Muestras de brócoli	42
Figura 4.2:	Proceso de secado para la obtención de harina de brócoli	46

Figura 4.3:	Variación del contenido de humedad en base seca para el tipo de corte del ensayo 1	48
Figura 4.4:	Variación del contenido de humedad en función del tiempo de secado	50
Figura 4.5:	Caja y bigote del atributo color de las muestras preliminares para elegir el pretratamiento	51
Figura 4.6:	Caja y bigote del del atributo apariencia de la muestra preliminares para elegir el pretratamiento	52
Figura 4.7:	Efectos principales para el contenido de humedad en base seca	56
Figura 4.8:	Interacción de los factores para el contenido de humedad en base seca	57
Figura 4.9:	Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad en base seca	58
Figura 4.10:	Efectos principales para el contenido de humedad en base seca	63
Figura 4.11:	Interacción de factores para el contenido de humedad en base seca	64
Figura 4.12:	Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad en base seca	65
Figura 4.13:	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) °C: B_1 (5,0) m/s versus C_1 (0,1) cm	68
Figura 4.14:	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) °C: B_2 (5,5) m/s versus C_1 (0,1) cm	70
Figura 4.15:	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) °C: B_1 (5) m/s versus C_2 (0,2) cm	71

Figura 4.16:	Variación del contenido de humedad a temperatura entre A_{12} (50 - 60) °C: B_2 (5,5) m/s versus C_2 (0,2) cm.....	72
Figura 4.17:	Variación del contenido de humedad a velocidad de aire entre B_{12} (5 – 5,5) m/s: A_1 (50) °C versus C_1 (0,1) cm	73
Figura 4.18:	Variación del contenido de humedad con velocidad de aire B_{12} (5 – 5,5) m/s: A_2 (60) °C vs C_1 (0,1) cm	74
Figura 4.19:	Variación del contenido de humedad con velocidad de aire entre B_{12} (5 – 5,5) m/s: A_1 (50) °C versus C_2 (0,2) cm	75
Figura 4.20:	Variación del contenido de humedad a Velocidad de aire entre B_{12} (5 – 5,5) m/s: A_2 (60) °C versus C_2 (0,2) cm	76
Figura 4.21:	Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 - 0,2) cm: A_1 (50) °C versus B_1 (5) m/s	78
Figura 4.22:	Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_2 (60) °C versus B_1 (5) m/s	79
Figura 4.23:	Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_1 (50) °C versus B_2 (5,5) m/s	80
Figura 4.24:	Variación del contenido de humedad a corte C_{12} (0,1 – 0,2) cm: A_2 (60) °C versus B_2 (5,5) m/s	81
Figura 4.25:	Cinética en el proceso de secado para las muestras de brócoli sin tratamiento.....	84
Figura 4.26:	Cinética en el proceso de secado para las muestras de brócoli con solución de ácido cítrico	87
Figura 4.27:	Control de almacenamiento de harina de brócoli.....	91
Figura 4.28:	Balance de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli	92
Figura 4.29:	Balance de materia en la etapa de cortado	96

Figura 4.30:	Balance de materia en la etapa de selección	97
Figura 4.31:	Balance de materia en etapa de lavado y escurrido	98
Figura 4.32:	Balance de materia en la etapa de laminado.....	100
Figura 4.33:	Balance de materia en la etapa de pretratamiento y escurrido	102
Figura 4.34:	Balance de materia en la etapa de secado.....	104
Figura 4.35:	Balance de materia en la etapa de molienda.....	108
Figura 4.36:	Balance de materia en la etapa de tamizado.....	109
Figura 4.37:	Resumen del balance general de materia en el proceso de obtención de harina de brócoli.....	110
Figura 4.38:	Balance de energía en la etapa de secado de brócoli	111

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1	Operacionalización de variables para el proceso de obtención de harina de brócoli.....	40
-------------------	---	----