

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



T E S I S

**COMPORTAMIENTO DE LINAZA (*Linum usitatissimum*) A DIFERENTES TIEMPOS.
REVOLUCIONES POR MINUTO DE TOSTADO, Y GRANULOMETRÍA; EN EL
CONTENIDO DEL AGUA DE LA MONOCAPA**

**Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**Presentado por la Bachiller:
DANY ELIZABETH SÁNCHEZ VÁSQUEZ**

**Asesor:
Ing. Mtr. MAX EDWIN SANGAY TERRONES**

CAJAMARCA – PERÚ


2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador
Dany Elizabeth Sánchez Vásquez
DNI: N° 47735532
Escuela Profesional/Unidad UNC:
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
2. Asesor:
Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
Ing. Mtr. Yoner Alito Salas Pastor
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
COMPORTAMIENTO DE LINAZA (*Linum usitatissimum*) A DIFERENTES TIEMPOS, REVOLUCIONES POR MINUTO DE TOSTADO, Y GRANULOMETRÍA; EN EL CONTENIDO DEL AGUA DE LA MONOCAPA.
6. Fecha de evaluación: 22/01/2026
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 20%
9. Código Documento: oid: 3117:548302468
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 22/01/2026

Firma y/o Sello
Emisor Constancia


.....
Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
DNI: 10492305

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintiocho días del mes de octubre del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente 2H - 204 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 420-2025-FCA-UNC, de fecha 22 de julio del 2025**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: **"COMPORTAMIENTO DE LINAZA (*Linum usitatissimum*) A DIFERENTES TIEMPOS, REVOLUCIONES POR MINUTO DE TOSTADO, Y GRANULOMETRÍA; EN EL CONTENIDO DEL AGUA DE LA MONOCAPA"**, realizada por la Bachiller **DANY ELIZABETH SÁNCHEZ VÁSQUEZ** para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las diez horas y nueve minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, la Bachiller queda expedita para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las diez horas y cincuenta minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.


Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
PRESIDENTE


Ing. M. Sc. Fanny Lucila Rimarachin Chávez
SECRETARIO


Dr. José Gerardo Salhuana Granados
VOCAL


Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
ASESOR


Ing. Mtr. Yoner Alito Salas Pastor
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante en cada paso de este camino académico, por brindarme fortaleza en los momentos de dificultad y por nunca soltar mi mano.

A mis padres, Alfredo y Ayda, por su inmenso amor, su dedicación incansable y su apoyo incondicional. Gracias por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia.

A mi hermana, Deysi Noemí, mi amiga, confidente y compañera incondicional. Este logro también es tuyo, por tu apoyo, tu cariño y tu presencia constante en cada etapa de mi vida.

A mis sobrinos, Eisner y Dayli, por ser una fuente de alegría e inspiración, y motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi compañero de vida, Melber, por tu amor, comprensión y apoyo inquebrantable. Gracias por caminar a mi lado con paciencia y fe.

A mi hijo, Neythan André, mi fuerza, mi motor y mi mayor motivo para superarme cada día. Este título es también para ti, con todo mi amor.

A mis docentes, por su dedicación, por compartir generosamente sus conocimientos, y por ser parte fundamental de mi formación profesional y personal.

A mis compañeros y amigos de universidad, gracias por su amistad, por el compañerismo, por los desafíos compartidos y los aprendizajes que atesoraré siempre.

A todos quienes, de una u otra forma, me acompañaron en este proceso: mi gratitud eterna. Este logro no hubiera sido posible sin ustedes.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la sabiduría, la fortaleza y la fe necesarias para avanzar con determinación, incluso en los momentos más difíciles.

A mis padres, Alfredo y Ayda, por su amor incondicional, por su ejemplo de lucha y por creer siempre en mí. Gracias por ser mi pilar y mi mayor apoyo desde el inicio de este camino.

A mi hermana, Deysi Noemí, por tu constante compañía, tus consejos, tu cariño y tu aliento. Tu apoyo ha sido fundamental en todo momento.

A mis sobrinos, Eisner y Dayli, por ser luz en mi vida y recordarme cada día que rendirse no es una opción.

A mi compañero de vida, Melber, por estar siempre a mi lado con paciencia, comprensión y amor. Gracias por tu apoyo inquebrantable y por creer en mí aun cuando yo dudaba.

A mi hijo, Neythan André, por ser mi mayor inspiración y la razón más poderosa para superarme. Este logro también es tuyo, y lo dedico con todo mi amor.

A mi abuelo materno, Juan, por ser ejemplo de sabiduría, humildad y fortaleza. Tu legado vive en mí y me ha acompañado en cada paso de este proceso.

A mi tío Edilberto, mis tías Hermelinda, Irma y Luisa, mis primas Anita ,Elita ,y Anali por su cariño sincero, sus palabras de aliento y su constante apoyo emocional. Gracias por estar siempre presentes con amor y generosidad

A mi cuñado, Joel por tu disposición, tus gestos de apoyo y tu presencia constante en mi vida. Gracias por ser parte importante de este logro.

A mi cuñada Yanina por su compañía y su tiempo y su apoyo constante, cada día.

A mi asesor, el ingeniero Max, por su paciencia y orientación, y a la ingeniera Lili Caruajulca, por compartir generosamente sus conocimientos.

A mi compañera Rossmery Minchán, por tu valiosa compañía en este proyecto a mis amigas Rosio ,Tania y Vitaluz por sus palabras de aliento constante .

A mi jefe de trabajo, el ingeniero Henry Bazán, por su comprensión y apoyo durante este proceso.

AL INSTITUTO DE INVESTIGACION ,DESARROLLO,INNOVACION Y
EMPRENDIMIENTO EN CIENCIA ,INGENIERIA Y TECNOLOGIA LIDIECIT .

A mis compañeros y amigos de universidad, con quienes compartí experiencias, aprendizajes y desafíos que enriquecieron mi formación y mi vida. Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, formaron parte de este proceso, mi más sincero agradecimiento. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada enseñanza quedarán siempre en mi corazón.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. Introducción	1
II. JUSTIFICACION Y Problema DE INVESTIGACIÓN	2
2.1. Justificación de la Investigación	2
2.2. Problema de Investigación.....	3
2.3. Formulación del problema	4
III. Objetivos	4
3.1. Objetivo general	4
3.1.1 Objetivos específicos.....	4
IV. Hipótesis	5
V. Revisión Bibliográfica.....	6
5.1. Antecedentes de la Investigación	6
5.2. Bases teóricas	9
5.3. Definición de términos	22

VI.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
VII.	Resultados y DISCUSIÓN.....	34
VIII.	Conclusiones	64
IX.	RECOMENDACIONES.....	66
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	67
XI.	ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <u>Valor nutricional de linaza por cada 100 g</u>	10
Tabla 2. <u>Arreglo de los tratamientos</u>	28
Tabla 3. <u>Humedades relativas a diferentes soluciones de sales preparadas</u>	32
Tabla 4. <u>Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 125 micras</u>	52
Tabla 5. <u>Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 250 micras</u>	53
Tabla 6. <u>Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 500 micras</u>	55
Tabla 7. <u>Análisis de varianza para el valor de monocapa GAB de la harina de linaza en función de la granulometría, tiempo de tostado y RPM.</u>	59
Tabla 8. <u>Análisis de varianza para el valor de monocapa BET de la harina de linaza en función de la granulometría, tiempo de tostado y RPM.</u>	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas típicas de las isothermas de adsorción y desorción de los alimentos	18
Figura 2. Tipos de isothermas de adsorción y desorción de los alimentos	18
Figura 3. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua	22
Figura 4. Ubicación de Universidad Nacional de Cajamarca.....	25
Figura 5. Diagrama de flujograma para la obtención de la harina de linaza.	31
Figura 6. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado con 10 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modeladas por GAB y BET	38
Figura 7. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 10 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET	40
Figura 8. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y tostado con 10 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET	42
Figura 9. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado con 15 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET	43
Figura 10. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 15 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET.	44

Figura 11.Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y tostado con 15 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelado por GAB y BET	46
Figura 12.Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado con 20 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelado por GAB y BET	47
Figura 13.Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 20 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelo GAB.	49
Figura 14.Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y tostado con 20 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelo GAB.	50
Figura 15.Diagrama de Pareto para el valor de monocapa de GAB	59
Figura 16.Efectos principales para el valor de monocapa de GAB	60
Figura 17.Diagrama de Pareto para el valor de monocapa de BET.....	62
Figura 18.Efectos principales para el valor de monocapa de BET	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos experimentales	75
Anexo 2. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado y RPM de la harina de linaza de 125 micras.....	76
Anexo 3. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado y RPM de la harina de linaza de 250 micras.....	77
Anexo 4. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado y RPM de la harina de linaza de 500 micras.....	78
Anexo 5. Panel fotográfico.....	79
Anexo 6. Pasos en statistica para obtener el valor monocapa	80

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia del tiempo y la velocidad de tostado, así como de la granulometría, en el contenido de agua de monocapa de la harina de linaza, determinado mediante los modelos GAB y BET. La investigación se desarrolló en la Universidad Nacional de Cajamarca utilizando linaza marrón adquirida en el Mercado Central de Cajamarca. Se evaluaron tres tiempos de tostado (5, 10 y 15 min), tres velocidades de tostado (10, 15 y 20 RPM) y tres granulometrías (125, 250 y 500 μm), obteniéndose un total de 27 tratamientos. La actividad de agua se estableció en un rango de 0.1 a 0.9 mediante soluciones salinas saturadas, con un tiempo de equilibrio de 10 días. El valor de monocapa del modelo GAB fue influenciado significativamente por el tiempo de tostado ($p < 0.05$), incrementándose de 0.035 a 0.050 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ sólido al aumentar el tiempo de 5 a 15 minutos. El valor de monocapa del modelo BET fue afectado principalmente por la velocidad de tostado ($p < 0.05$), aumentando de 0.026 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ sólido a 10 RPM hasta 0.030 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ sólido a 20 RPM. Las isotermas de adsorción obtenidas para la harina de linaza presentaron una configuración tipo II, según la clasificación de Brunauer. Las condiciones de tostado, en particular el tiempo y la velocidad, desempeñan un papel crítico en la determinación del contenido de agua de monocapa de la harina de linaza. Estos hallazgos resaltan la importancia de controlar los parámetros de procesamiento para mejorar la estabilidad y la funcionalidad de las harinas de linaza en aplicaciones agroindustriales, especialmente en el diseño de procesos de secado y almacenamiento.

Palabras clave: harina de linaza, granulometría, tiempo de tostado, velocidad de tostado (RPM), contenido de monocapa, modelos matemáticos de GAB y de BET, isotermas.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of roasting time, roasting speed, and particle size on the monolayer moisture content of flaxseed flour, as determined by the GAB and BET models. The research was conducted at the National University of Cajamarca using brown flaxseed obtained from the Central Market of Cajamarca. Three roasting times (5, 10, and 15 min), three roasting speeds (10, 15, and 20 RPM), and three particle sizes (125, 250, and 500 μm) were tested, resulting in 27 treatments. Water activity values ranging from 0.1 to 0.9 were achieved with saturated salt solutions, with an equilibration period of 10 days. The GAB monolayer value was significantly influenced by roasting time ($p < 0.05$), increasing from 0.035 to 0.050 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ solid as roasting time rose from 5 to 15 minutes. The BET monolayer value was mainly affected by roasting speed ($p < 0.05$), increasing from 0.026 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ solid at 10 RPM to 0.030 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ solid at 20 RPM. The adsorption isotherms of flaxseed flour exhibited a type II configuration according to Brunauer's classification. Roasting conditions, particularly time and speed, play a critical role in determining the monolayer moisture content of flaxseed flour. These findings highlight the relevance of controlling processing parameters to enhance the stability and functionality of flaxseed flours in agro-industrial applications, especially in the design of drying and storage processes.

Keywords: flaxseed flour, particle size, roasting time, roasting speed (RPM), monolayer moisture content, GAB and BET mathematical models, isotherms.

I. INTRODUCCIÓN

La linaza (*Linum usitatissimum*) ha sido reconocida por su valor nutricional y sus potenciales beneficios para la salud humana, lo que la convierte en un ingrediente importante en la industria alimentaria y nutricional (Ostojich y Sangronis, 2012). El proceso de tostado se ha destacado como una técnica comúnmente empleada para mejorar las características sensoriales y la estabilidad de la linaza. Sin embargo, la influencia de variables específicas, como los tiempos y RPM de tostado, junto con la granulometría, en el contenido del agua de monocapa de la linaza, aún no ha sido completamente explorada en la literatura científica.

El tostado de la linaza implica la aplicación de calor a las semillas con el objetivo de mejorar su palatabilidad y prolongar su vida útil (Figuerola et al., 2008). La variación en los tiempos y RPM de tostado puede desencadenar cambios significativos en la composición química y las propiedades físicas de la linaza (Lares et al., 2012). Además, la granulometría, que refiere al tamaño de partícula resultante del proceso de molienda, puede influir en sus propiedades funcionales y su capacidad para retener agua (Puma, 2017).

El contenido del agua de monocapa es un parámetro crítico que determina la capacidad de la linaza para retener agua en condiciones específicas (Ramírez et al., 2014). La comprensión detallada de cómo diferentes condiciones de tostado y variaciones en la granulometría afectan el contenido del agua de monocapa es esencial para optimizar su uso en la formulación de productos alimenticios y nutricionales.

Por lo tanto, el propósito principal de esta investigación fue determinar la influencia del tiempo y velocidad de tostado, así como también la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina de linaza.

II. JUSTIFICACION Y PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Justificación de la Investigación

La linaza (*Linum usitatissimum*) es una semilla que ha ganado reconocimiento por su valor nutricional y sus potenciales beneficios para la salud humana, gracias a su contenido en ácidos grasos omega-3, fibra dietética y compuestos antioxidantes (Kausser et al., 2024). El proceso de tostado es una técnica muy utilizada para mejorar las características sensoriales y la estabilidad de diversos alimentos, además de aumentar la disponibilidad de los nutrientes (Jia et al., 2023), mientras que la granulometría, es decir, el tamaño de partícula resultante del proceso de molienda puede influir en sus propiedades físicas y funcionales de la harina de linaza.

Sin embargo, existe una brecha de conocimiento en cuanto a cómo diferentes condiciones de tostado, incluidos los tiempos y las revoluciones por minuto (RPM), junto con la variación en la granulometría, afectan el contenido del agua de monocapa de la linaza. El contenido del agua de monocapa es un parámetro crucial que determina la capacidad de la linaza para retener agua, lo que tiene implicaciones directas en su aplicabilidad en la industria alimentaria y nutricional (Badui Dergal, 2006).

La optimización de las condiciones de tostado y de la granulometría en la harina de linaza representa una estrategia tecnológica clave no solo para potenciar la calidad sensorial de los productos, sino también para incrementar su valor nutricional y funcional. Estos aspectos son de especial relevancia para la industria alimentaria y nutracéutica, donde la linaza constituye un insumo versátil en la formulación de productos horneados, cereales y suplementos dietéticos.

En este contexto, la presente investigación evaluó el comportamiento de la linaza frente a diferentes condiciones de tostado y granulometría, con énfasis en la determinación

del contenido de agua de monocapa mediante modelos de sorción. Comprender la interacción de estas variables y su impacto en las propiedades fisicoquímicas de la linaza resulta esencial para optimizar su incorporación en matrices alimentarias, garantizar la estabilidad de los productos y respaldar el desarrollo de innovaciones tecnológicas en el sector. Asimismo, este estudio contribuye a profundizar en la comprensión de los cambios estructurales y químicos inducidos por el tostado, así como del efecto modulador de la granulometría sobre dichas transformaciones, aportando una base científica sólida para su aprovechamiento industrial.

2.2. Problema de Investigación

La linaza (*Linum usitatissimum*) es reconocida por su valor nutricional y sus posibles beneficios para la salud, lo que la convierte en un ingrediente importante en la industria alimentaria y nutricional (Yachachin, 2013). El proceso de tostado viene siendo muy utilizado para mejorar las características sensoriales de los alimentos como también para alargar la vida útil ya que mediante el tostado el producto elimina agua disminuyendo la proliferación de microorganismo que afecten la calidad del producto (Aldave Palacios, 2016), sin embargo, puede influir de manera negativa en las características físicas y químicas si no se lleva un control adecuado de las condiciones de tostado, así mismo la importancia de la granulometría de las harina radica en la calidad de estas, algunos autores mencionan que el tamaño de partícula de la harina puede influir en las características fisicoquímicas (Edel y Rosell, 2007).

A pesar de la importancia del tostado y la granulometría, hay una falta de comprensión sobre cómo diferentes condiciones de tostado, incluidos los tiempos y las revoluciones por minuto (RPM), junto con la variación en la granulometría, influyen en el contenido del agua de monocapa de la linaza. Por tanto, el problema de esta investigación radica en la necesidad de llenar este vacío de conocimiento para comprender mejor cómo

las condiciones de tostado y la granulometría afectan el contenido del agua de monocapa de la linaza.

Por lo tanto, esta investigación aborda esta cuestión mediante la determinación del comportamiento de la linaza frente a diferentes tiempos y RPM de tostado, junto con variaciones en la granulometría, evaluando específicamente el contenido del agua de monocapa de la harina de linaza. Al comprender cómo estas variables interactúan y afectan las propiedades de la harina de linaza, se puede mejorar su aplicación y contribuir al desarrollo de productos alimenticios funcionales y con mayor estabilidad.

2.3. Formulación del problema

¿Cuál es la influencia del tiempo y velocidad de tostado y la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina de linaza (*Linum usitatissimum*)?

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar la influencia del tiempo y la velocidad de tostado y la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina linaza *Linum usitatissimum*.

3.1.1 Objetivos específicos

- Determinar la influencia de diferentes tiempos de tostado en el valor de monocapa de la harina de linaza.
- Determinar la influencia de diferentes velocidades de tostado en el valor de monocapa de la harina de linaza.
- Determinar la influencia de la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina de linaza.
- Caracterizar las isotermas de sorción de humedad experimentales y modeladas.

IV. HIPÓTESIS

La harina de linaza presenta menor valor de monocapa a medida que el tiempo de tostado y las revoluciones por minuto son mayores debido a cambios en la estructura y composición de la linaza, mientras que la granulometría más fina produce mayor retención de agua de monocapa debido a una mayor área superficial y una estructura de partículas más accesible para la absorción de agua.

V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

5.1. Antecedentes de la Investigación

Brito et al. (2019) desarrollaron películas biodegradables utilizando harina de residuos de frutas y verduras con diferentes rangos de granulometría y niveles de pectina. Usaron tres tamaños de granulometría: A (425–500 μm), B (212–300 μm) y C (<150 μm). Las harinas presentaron distribución granulométrica heterogénea y estructura fibrosa mostrando compuestos granulares adheridos a la superficie. Las películas que obtuvieron fueron maleables, homogéneas, amarillentas y presentaron alta solubilidad (90%). Para construir las isothermas realizaron análisis a 25 °C. Las isothermas de sorción de las películas con pectina evidenciaron la menor disponibilidad de grupos polares capaces de funcionar como sitios de sorción de agua el valor de monocapa vario entre 5 y 3.6 en función de la cantidad de pectina, mientras que la granulometría no obtuvo diferencias significativas, la ecuación del modelo de GAB describió mejor las características de sorción de las muestras. Concluyeron que las diferentes fracciones de residuos podrían tener diferentes aplicaciones dependiendo de su tamaño y composición de partículas, ya sea como fuente de fibras dietéticas (las fracciones más gruesas) o como materia prima para la producción de películas. Esta investigación sirve como referencia para delimitar el rango de granulometría y seleccionar el modelo matemático de mejor ajuste para las isothermas.

Reyes et al. (2017) caracterizaron la harina de mezquite para su aplicación en alimentos. Las muestras fueron secadas en condiciones controladas a 60°C, humedad relativa (10%) y velocidad de aire (2.5 m/s). Posterior al secado, lo trituraron/molieron para obtener harinas con un tamaño de partícula promedio de 200 micras y analizar sus propiedades físicas, de estabilidad y de almacenamiento. Tamizaron las harinas en mallas #40 y #60. Las harinas fueron analizadas por microscopia electrónica de barrido para observar su tamaño y morfología. Los hallazgos mostraron que las harinas contenían azúcares, proteína y fibra, y su

tamaño de partículas vario de 25 a 250 micras, con una morfología irregular, tortuosa y no esférica. Asimismo, obtuvieron las isothermas de sorción a 30 y 35°C para un rango de actividad de agua 0.07- 0.97, para obtener las curvas de sorción utilizaron el modelo de GAB. Con las isothermas encontraron que el material es altamente higroscópico, debido al incremento de la temperatura a diferentes humedades relativas, cuando la temperatura aumento el valor de monocapa fue menor. Esta investigación sirve de referencia ya que utiliza diferentes tamaños de partículas de la harina y utiliza dos temperaturas de almacenamiento lo cual ayuda a seleccionar estas variables.

Agama (2018) correlacionó la actividad de agua y el contenido de humedad a temperatura constante de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$, utilizando el método gravimétrico de soluciones saturadas de sal para obtener isothermas de adsorción de cuatro formulaciones de papilla en las que se varió la variedad de papa. Para modelar los datos experimentales utilizó las ecuaciones de BET y GAB obteniendo isothermas de forma sigmoidea tipo II. encontró valores de humedad de monocapa (w_0) en los rangos de 0.042 a 0.048 g agua/g m.s. así mismo determinó los valores críticos de humedad de almacenamiento los cuales estuvieron entre 0.13 y 0.15 (g H_2O /g materia seca), por otro lado, encontró que la humedad óptima de almacenamiento está en el rango de 0.040 a 0.042 (g H_2O /g materia seca) que corresponde a a_w de 0,2 para las cuatro formulaciones. Además, determinó la granulometría y reportó que las muestras no tenían uniformidad entre sus partículas, el tamaño fue 215 y 337.5 μm siendo tamaños óptimos. Sirve como referencia para determinar el rango de granulometría y la aplicación de la metodología para construir las isothermas.

Briceño (2017) estudio el efecto de la temperatura en el valor de la monocapa de tres tipos de harina de tarwi en función del procesamiento mediante el modelo de GAB. Para la construcción de las isothermas usó soluciones de ácido sulfúrico. Las actividades de agua estuvieron en el rango de 0.1 hasta 0.9. Trabajo con tres temperaturas (20 30 y 40 $^{\circ}\text{C}$) para

determinar la influencia en la monocapa. Reporto que el valor de la monocapa GAB disminuye al aumentar la temperatura, variando desde 0.0130 hasta 0.0915 (g agua/g muestra base seca) según el tipo de harina, concluye que la temperatura afecta significativamente al agua de monocapa. Este estudio sirve como referencia en la metodología ya que usa diferentes temperaturas y determina la influencia en el valor de la monocapa.

Rajo y Matos (2010) evaluaron la influencia del tamaño de partícula sobre la capacidad de adsorción de humedad de la harina de haba. En la obtención de la harina determinaron la cinética de secado, y encontraron humedad inicial 63 % base húmeda para el haba fresca y 10 % base húmeda en la harina. Para la determinación de las isothermas de adsorción utilizaron el método estático, con soluciones saturadas y de a_w conocida, hasta obtener el equilibrio másico a temperatura constante (25 °C); para la obtención de los diferentes tamaños de las muestras utilizaron tamices (malla 12, 16, 20 y 32). Ajustaron a modelos matemáticos los valores experimentales de las isothermas de adsorción, encontrando para el modelo B.E.T. un valor de monocapa (X_m) entre (0.02946 y 0.03691 g H₂O / 100g de ms). Mientras que en el modelo G.A.B el valor de la capa monomolecular varía entre 0.15817 y 0.18936 g H₂O / 100g de ms. Determinaron la mejor calidad de ajuste para el modelo propuesto por Henderson, con un ERM de 4.57 % para la malla 20 con un tamaño de partícula menor a 0.08 mm. Sirve como referencia porque determina el tamaño de partícula óptima para obtener valores de monocapa adecuados en harinas, que aseguren estabilidad en el almacenamiento.

Allca (2022) determinó mediante la estimación de las isothermas de adsorción, propiedades funcionales y vida útil de la harina de chuño blanco de papa andina, los parámetros de humedad relativa (%HR) y temperatura de almacenamiento. Para construir las isothermas de adsorción de harina de chuño lo midió la humedad por el método gravimétrico estático usando tres temperaturas (15, 25 y 35 °C), con soluciones salinas saturadas, con un rango de a_w entre 0.11 a 0.44 obtuvo las humedades relativas. Uso el modelo de GAB para el modelamiento de

las isothermas, y encontró que las isothermas de adsorción tenían un comportamiento tipo I. concluye que la humedad de monocapa (X_m) depende de la temperatura, ya que está aumento de 0.2755 a 1.0191 g.H₂O/g.m.s., en el rango de temperaturas de 15, 25 y 35 °C. Este estudio sirve de referencia para delimitar las humedades relativas a la que será almacenada la harina de linaza.

Caruajulca (2019) determino la vida útil de harina de tres variedades de arveja (*Pisum sativum* L.), sometidas a tres tiempos diferentes de tostado. En la obtención de la harina empleó tres tiempos diferentes de tostado (12, 20 y 25 minutos). Para la obtención de las isothermas de adsorción utilizó el método gravimétrico de soluciones saturadas de sal con actividad de agua comprendidas entre (0.11 y 0.9), la actividad de agua fue medido con el equipo AQUALAB 4 TEV. Para el modelamiento de los datos experimentales utilizo las ecuaciones de GAB y de BET, obtuvo isothermas de forma sigmoidea tipo II. Observo que el modelo de GAB presento un buen ajuste, arrojando valores de humedad de monocapa (0.0403 y 0.0552 g agua/gm.s) mayores a los calculados con el modelo de BET (0.0119 y 0.0226 gagua/gm.s) para las tres temperaturas evaluadas (25, 30 y 35 °C). concluyendo que el tiempo de tostado y la temperatura de almacenamiento influyen en el valor de monocapa, a mayor temperatura mayor será el valor de monocapa. Esta investigación sirve como referencia para elaborar la metodología y para definir el rango del tiempo de tostado.

5.2.Bases teóricas

2.2.1. Linaza

La linaza es una semilla oleaginosa originaria de Asia y Europa, su nombre científico es (*Linum usitatissimum*), tiene la forma de granillos elipsoidales, duros y brillantes es muy cultivada para producir semilla, fibra y aceite de lino; es rica en ácidos grasos, molida proporciona una harina muy usada para adicionarlo como ingrediente en la producción de alimentos como: bebidas, lácteos y productos de panificación (Magro, 2015). Contiene

diversos compuestos bioactivos que benefician a la salud, por ejemplo su consumo previene enfermedades cardiovasculares y cáncer, gracias a las propiedades prebióticas mejora la salud de la microbiota intestinal (Yachachin, 2013; Kauser et al., 2024).

Composición y aporte nutricional. La linaza es una fuente rica grasa, contiene alrededor de 40 % de lípidos, 30% de fibra dietética y 20 % de proteína. La composición proximal varía en función a las condiciones ambientales en la que se produce (Yachachin, 2013). Es fuente importante de ácidos grasos omega 3, especialmente α linolénico (ALA) que puede constituir hasta el 52% del total de ácidos grasos; de compuestos fenólicos conocidos como lignanos (secoisolaciresinol) y polisacáridos diferentes al almidón, goma coloidal y de proteína de buena calidad (Ostojich y Sangronis, 2012). Los ácidos fenólicos más abundantes en la harina de semilla descascarada son el trans-ferúlico 46 %, trans-sinápico 36 %, p-cumárico 7,5 % y trans-caféico 6,5 % (Yachachin, 2013).

Tabla 1

Valor nutricional de linaza por cada 100 g

Componente		Contenido	Componente		Contenido
Energía		450 kcal.	Fibra		30 g
Proteína		20 g	Carbohidratos		29 g
Grasa total		41 g			
Acido	alfa-	23 g	Calcio		240 mg
linolénico					
ácido linoleico		16.5 g	Hierro		15.8 mg

Nota. La tabla muestra la composición nutricional aproximada de la semilla de linaza tomado de Torres (2023) y Ostojich y Sangronis (2012).

2.2.2. *Harina*

La harina es definida científicamente como el producto que resulta de triturar o moler los granos, semillas o tubérculos, y es muy utilizada en la industria de alimentos para la producción de una amplia gama de productos, este polvo fino generalmente es obtenido de cereales, pero en la actualidad se ha ido generando harinas de distintos materiales alimenticios después de deshidratarlos, que en su gran mayoría contiene elevado porcentaje de almidón. Está formada por una mezcla compleja de diversos nutrientes como: proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales que varían según el producto y el proceso de molienda. La harina resulta de la molienda del grano a través de equipos que convierten el producto en tamaños de partículas muy finas, uniformizadas mediante tamices (Edel y Rosell, 2007).

El uso de las harinas depende de sus propiedades tecnológicas determinadas principalmente por las características físicas y químicas y la interacción entre componentes (proteínas, hidratos de carbono, pectinas, gomas), siendo estas propiedades uno de los criterios más importantes para definir el uso que se les dará a las harinas en la producción de los diversos alimentos (Figuerola et al., 2008).

Tipos de harina. Las harinas se clasifican en función de: clase de materia prima, la calidad, propiedades tecnológicas entre otras; dentro de los tipos de harina están las harinas: refinadas, integrales, de fuerza, flojas, sin gluten, entre otras (Rubio, 2020).

Mientras que León (2020) menciona que los tipos de harina están determinadas en función de la parte del grano o semilla usado para su obtención siendo estas:

Harina integral: es el resultado de triturar todas las partes de la semilla o grano, incluido la cascara, esta harina es rica en fibras y minerales.

Harinas ½ 0, 0 y 00: estas harinas se obtienen de la porción del endospermo más externo o alejado de su centro (contra una fina capa llama aleurona, recubierta por el salvado), es ingrediente fundamental en la elaboración de alimentos balanceados.

Harina 000: son las que se generan de moler el trigo u otro cereal, separando sólo el salvado y el germen, son consideradas como las de mejor calidad panadera, conocidas también como harina de fuerza.

Harina 0000: se obtiene del centro de endospermo y tiene una mejor calidad pastelera, es una harina blanca llamada también harina floja.

Harina de linaza. Para Pianesso et al. (2020) la harina de linaza generalmente es un subproducto debido a que es obtenida después de su extracción del aceite, esta harina es rica en proteína y fibra. Mientras que para Figuerola et al. (2008) la harina de linaza es el producto que resulta después de triturar las semillas, este autor recomienda tostar las semillas con la finalidad de facilitar la molienda, mejorar sus características organolépticas y obtener mayor digestibilidad y disponibilidad de sus componentes.

Esta harina es muy reconocida por su elevado contenido de ácidos grasos omega-3, fibras dietéticas, proteínas y compuestos antioxidantes, su perfil nutricional lo convierte en un alimento funcional lo cual ha promovido un interés en la industria alimentaria y un aumento en su consumo entre los consumidores conscientes de la salud, además de sus propiedades funcionales notables, incluyendo su capacidad para formar geles viscosos debido a la presencia de mucílagos y polisacáridos. Estas características hacen que la harina de linaza sea útil como agente espesante y estabilizante en la formulación de diversos alimentos (Kajla et al., 2020).

Gracias a su perfil nutricional y propiedades funcionales, la harina de linaza se utiliza en una amplia gama de productos alimenticios, como panes, galletas, cereales y productos horneados, su inclusión aporta beneficios para la salud, mejorando la textura y contribuyendo con sabores característicos (Figuerola et al., 2008).

2.2.3. Tostado

El tostado es un proceso térmico que se le da a ciertos alimentos debido a que contribuye con la mejora del aroma, realza el sabor, y le confiere una textura crujiente a los productos procesados, estos factores resultan importantes a la hora de elegir un alimento (Jia et al., 2023). El tostado se realiza con tres propósitos: disminuir la humedad de los granos de 7-8 a 2,5%; eliminar compuestos volátiles no deseados (por ejemplo, ácido acético) y generar nuevos compuestos volátiles (aroma de origen térmico) (Pacheco et al., 2020).

Las principales reacciones químicas que se desarrollan durante el proceso de tostado son: las reacciones de Maillard, caramelización de azúcares, degradación de proteínas y la síntesis de compuestos azufrados (reacciones menores). Las reacciones de Maillard dan lugar a pigmentos marrones y compuestos de pirazina asociados con la generación de los sabores característicos en productos tostados. Por otro lado, el secado influye en las características texturales crujientes típicas de un producto tostado. Además las reacciones de Maillard durante el tostado son las responsables de la formación de aromas propios de los alimentos tostados como los granos, cereales y semillas (Magro, 2015).

El tostado se utiliza para mejorar y alterar la calidad de los alimentos, extender su vida útil y mejorar la eficiencia del procesamiento del tratamiento posterior. Estos efectos beneficiosos del tueste se ven influidos decisivamente por las condiciones del tueste. Las condiciones más importantes del proceso de tostado son la temperatura y el tiempo. Las temperaturas y tiempos de tostado óptimos requeridos dependen de varios factores, como el grado de tostado requerido, el tipo de tostador y el tipo, variedad, madurez y contenido de humedad de la materia prima (Youn y Chung, 2012).

Técnicas de tostado. Según IICA como se citó en Caruajulca (2019) hay dos técnicas de tostado, que se diferencian principalmente en el contacto directamente o no de los granos con la fuente de calor, se describen a continuación:

Técnica de tostado directo. En esta técnica el alimento a tostar es colocado directamente sobre una corriente caliente o llama.

Técnica de tostado indirecto. esta técnica consiste en colocar los granos dentro de un cilindro que protege a los granos a no estar en contacto directo con la fuente de calor.

Métodos de tostado. Para Aldave (2016) el proceso de tostado presentan diferentes métodos entre ellos está:

Tostado en seco. Consiste en tostar alimentos sin añadir ningún tipo de grasa, generalmente consiste en colocar el alimento directamente en una superficie caliente, como una sartén o una plancha.

Tostado al horno. Para llevar a cabo este método es necesario usar un horno, básicamente consiste en colocar los granos en una bandeja y exponerlo al calor del horno, con o sin la adición de algún tipo de grasa.

Tostado por infrarrojos. Este método consiste en exponer al alimento a la radiación infrarroja que calienta rápidamente la superficie de los alimentos, produciendo un tostado más rápido y uniforme.

Tostado por convección. Este método utiliza la circulación del aire caliente para tostar los alimentos de manera uniforme, el aire caliente se mueve alrededor de los alimentos, transfiriendo calor y cocinándolos de manera eficiente.

Tiempo de tostado. Es el periodo de tiempo durante un alimento es sometido al calor con el objetivo de mejorar sus características sensoriales, esta variable es importante en el proceso de tostado, debido a que influye en la formación del color y aroma, este periodo de tiempo está sujeto al contenido de humedad con la que entra el grano al tostador, este parámetro se puede determinar mediante la construcción de una curva de tiempo de tostado, la cual indica el tiempo que se debe tostar con relación a la humedad inicial de los granos a una temperatura determinada, otros factores que determinan el tiempo de tostado es el tamaño

del grano, la tostadora y la costumbre del mercado consumidor, resulta importante controlar este factor ya que un tiempo de tostado más prolongado puede provocar variaciones en la textura, sabor y aroma (Aldave, 2016; Caruajulca, 2019).

El tiempo de tostado en linaza se refiere al período durante el cual las semillas de linaza son sometidas a calor para mejorar sus características sensoriales deseadas y optimizar la calidad del producto final, este tiempo de exposición al calor es crucial, porque influye directamente sobre las propiedades sensoriales, como por ejemplo: el perfil de sabor, la textura, el color y la estabilidad nutricional de las semillas tostadas, un tiempo de tostado adecuado también es decisivo en la preservación de los nutrientes esenciales y sensibles al calor, como ácidos grasos omega-3 y antioxidantes, mientras se elimina la humedad y se mejora la estabilidad del producto, así mismo durante el tostado se eliminan los antinutrientes presentes en la linaza (Figuerola et al., 2008).

2.2.4. *Revoluciones por minuto en el tostado*

Las revoluciones por minuto (RPM) es una medida de la velocidad angular de rotación de un objeto en el sistema internacional. En términos físicos, la RPM se define como el número de vueltas completas que realiza un objeto en un minuto. Se utiliza comúnmente para describir la velocidad de rotación de diferentes dispositivos, desde motores hasta herramientas y equipos industriales. En términos más profundos, la RPM es una medida angular que cuantifica la rapidez con la que un objeto gira alrededor de un eje central. Esta velocidad angular puede influir en diversas propiedades físicas y dinámicas del objeto, como la fuerza centrífuga, el torque y la energía cinética rotacional (Young et al., 2016). En la formula 1 se representa la definición física.

$$RPM = \frac{\text{Numero de vueltas}}{\text{tiempo en minutos}} \dots\dots\dots(1)$$

Illy y Rinantonio (2005) mencionan que, en el tostado, las revoluciones por minuto (RPM) se refieren a la velocidad de rotación del tambor tostador, que es el componente central

en las máquinas de tostado. La velocidad a la que el tambor gira durante el proceso de tostado es un factor crítico que afecta la calidad y el perfil de sabor del café final. La velocidad del tambor, medida en RPM, influye en la distribución del calor durante el tostado. Un aumento en las RPM puede acelerar la transferencia de calor al café y afectar la uniformidad del tostado. Además, la velocidad de rotación del tambor puede influir en la duración del proceso de tostado y, por ende, en el desarrollo de los compuestos aromáticos y sabores característicos del alimento.

2.2.5. Granulometría

La granulometría en las harinas describe la distribución del tamaño de partícula presentes en las harinas utilizadas en la industria alimentaria, es un aspecto fundamental en el procesamiento de harinas, debido a que evalúa la uniformidad de la molienda y tiene influencias directas en diversas propiedades de las harinas tanto funcionales como sensoriales. La medición de la granulometría proporciona información detallada sobre el tamaño y la distribución de las partículas, lo que es esencial para comprender y controlar diversos aspectos del procesamiento y calidad de las harinas (Puma, 2017).

La granulometría puede afectar aspectos como la capacidad de absorción de líquidos, la textura de las masas, la formación de gluten, la capacidad de retención de gases durante el proceso de fermentación y la calidad final del producto horneado (Edel y Rosell, 2007).

Para uniformizar el tamaño de partícula se utiliza el ensayo de granulometría que radica en pasar el producto de la molienda por tamices o zarandas de diferente tamaño, donde se va separando la harina del mismo tamaño quedando retenida en las mallas de los tamices que siguen un orden de mayor a menor tamaño de partícula, siendo la parte superior la que tiene la malla de mayor apertura y la de menor se ubica en la parte inferior del tamiz, evaluar la granulometría resulta ser una característica importante, debido a la información que brinda

sobre el proceso de molienda de la harina, específicamente de la clasificación y reducción (Puma, 2017).

2.2.6. Isotermas de adsorción

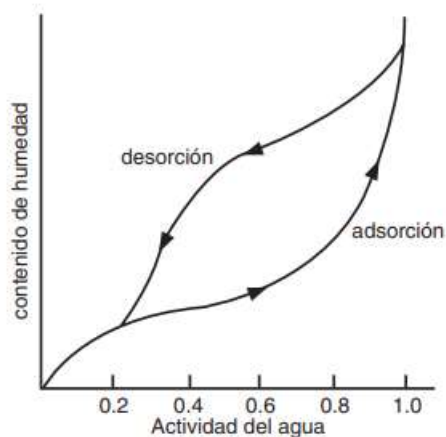
La isoterma de sorción de agua relaciona, a una temperatura constante, el contenido de humedad de equilibrio con la actividad de agua en el producto, en un intervalo dado de humedad o actividad. Su conocimiento, tiene aplicaciones en el análisis y diseño de procesos alimentarios como el secado, mezclado o envasado, y además sirve para determinar las condiciones óptimas de almacenamiento, predicción de vida útil y selección del material de envasado adecuado. En este artículo vamos a presentar como podemos determinar la isoterma de sorción de agua de un alimento (Talens Oliag, 2020).

La isoterma de adsorción son representaciones graficas de la cinética con la que un producto adsorbe humedad y se hidrata, resulta importante conocerla ya que refleja el comportamiento de los alimentos deshidratados almacenados en atmósferas húmedas (higroscopicidad), de manera semejante, la de desorción equivale al proceso de deshidratación y refleja la forma como pierde agua, para graficar estas curvas es necesario calcular la humedad y la actividad de agua, cuando esto alcanza el equilibrio en un sistema cerrado (Fennema y Tannenbaum, 1996). Estas curvas sirven para diseñar los sistemas de secado, almacenamiento, rehidratación, entre otros, también ayudan a predecir la estabilidad de los alimentos almacenados en distintas condiciones (Badui, 2006).

Según la clasificación de S. Brunauer la isotermas pueden ser de cinco tipos con muy pocas acepciones tal como se muestra en la figura 2.

Figura 1.

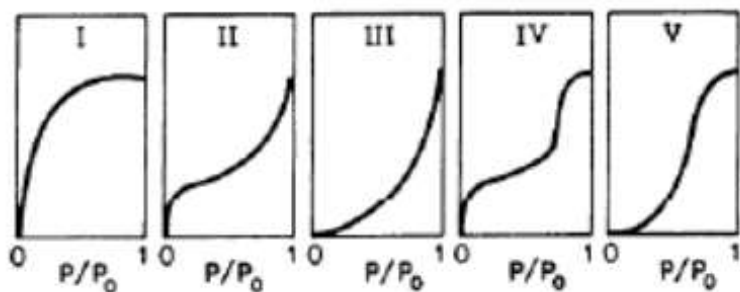
Curvas típicas de las isotermas de adsorción y desorción de los alimentos



Nota. Tomado de (Badui, 2006)

Figura 2.

Tipos de isotermas de adsorción y desorción de los alimentos



Nota. Tomado de Ramírez 2012 como se citó, en caruajulca (2019)

Importancia de las isotermas. García (2021) menciona que es muy importante conocer el comportamiento de las isotermas de sorción de humedad de alimentos para establecer los parámetros que establecen la estabilidad del alimento; asimismo permiten determinar: el calor de sorción o desorción, la interacción del agua y sus componentes, las propiedades estructurales (área superficial específica, volumen de poros, distribución del tamaño de poros y cristalinidad), las condiciones críticas de humedad, y la temperatura adecuada para el almacenaje.

Determinación de las isothermas. Se determina utilizando distintas cámaras cerradas herméticamente que en su interior se generan humedades relativas conocidas, usando diferentes sales saturadas con actividad de agua conocida, al introducir el alimento en estas cámaras logra alcanzar el equilibrio se cuantifica el contenido de agua, con lo que se obtiene valores que se grafican (Badui, 2006). Basilio (2015) asegura que ningún modelo de isoterma puede representar a todos los alimentos, se han realizado varios intentos para modelar (caracterización matemática), alcanzar la conformidad de un modelo, en todo el intervalos de los datos experimentales es casi imposible, se han explorado muchos modelos matemáticos para modelar las isothermas de una infinidad de alimentos, entre los más usados hasta la actualidad son el modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) y el modelo de Brauner, Emmett y Teller (BET). Por tanto, ajustar las isothermas experimentales es aplicar estos modelos matemáticos que permiten entender la sorción de agua en los alimentos y ayudan a predecir la estabilidad y su almacenamiento.

Modelo de Brauner, Emmett y Teller (BET). Es el modelo más antiguo y mejor conocido, describe adecuadamente el equilibrio entre el vapor de agua y el agua adsorbida sobre la matriz sólida que forma el alimento (Fennema y Tannenbaum, 1996), es muy utilizado para determinar el valor del contenido de humedad de monocapa en alimentos, las dos constantes obtenidas del modelo de B.E.T. son el contenido de humedad de monocapa W_0 y característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción C . Ambas constantes derivadas de la ecuación de Langmuir a altos valores de presión. Sin embargo el modelo de BET solo se ajusta a isothermas dentro de un intervalo limitado de actividad de agua, pero cabe mencionar que el valor de monocapa de BET da como punto de referencia del contenido de humedad más estable para alimentos secos (Ramírez et al., 2014). La ecuación de B.E.T. se muestra en la ecuación 2.

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot a_w)} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

X_m: es el contenido de humedad del producto correspondiente a una capa monomolecular de agua absorbida.

C: constante característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción.

Modelo de Guggenheim Anderson de Boer (GAB). Para Fennema y Tannenbaum, (1996) este modelo desarrollado es el más confiable adaptable y amplio, muy usado para alimentos con rangos de actividad de agua hasta de 0.9, es decir se ajusta para la mayoría de alimentos, este modelo incluye una constante adicional a las que presenta el modelo de BET, sin embargo, ambos modelos están basados en los mismos principios de la monocapa, el modelo GAB asume que las moléculas en multicapas, tienen interacciones con el adsorbente en valores energéticos similares a los que tienen las moléculas de la monocapa (Ramírez et al., 2014). La ecuación de GAB se muestra en la ecuación 3.

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w)} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

X_m: humedad de equilibrio, humedad del producto correspondiente a la situación en que los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua.

C: constante de Guggenheim, características del producto y relacionada con el calor de sorción de la monocapa.

K: factor de correlación relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

2.2.7. Agua de monocapa

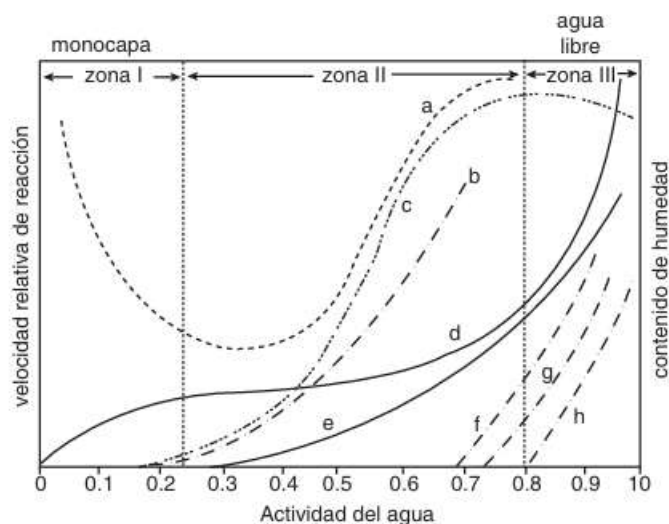
El agua de monocapa es el agua ligada (zona I), incluye el agua estructural (agua con enlaces de hidrógeno) y el agua de monocapa, que es adsorbida por los grupos hidrofílicos y polares de los componentes alimentarios (polisacáridos, proteínas, etc.), es decir la capa de agua que se adsorbe y forma una película monomolecular en la superficie de ciertos materiales

sólidos, este fenómeno es particularmente relevante en el contexto de la adsorción y la superficie de sólidos porosos. El agua de monocapa es la más difícil de eliminar en los procesos comerciales de secado, así mismo representa el contenido de humedad donde se minimizan las reacciones bioquímicas o de mayor estabilidad y es la región de la isoterma donde los alimentos tienen el valor máximo de vida de anaquel, mediante procesos de deshidratación de los productos se puede eliminar esta agua, sin embargo no es recomendable por el alto costo y el daño que sufre el alimento debido a que este contenido de agua sirve como barrera sobre todo contra las reacciones de oxidación de lípidos (Badui, 2006; Andrade et al., 2011).

Para Fennema y Tannenbaum, (1996), La formación de la denominada monocapa ocurre dentro de un rango de actividad de agua comprendido entre 0.05 y 0.3, mientras que la generación de multicapas se presenta en valores de actividad de agua entre 0.3 y 0.7. El agua adsorbida en la monocapa se encuentra principalmente interaccionando con grupos iónicos, por lo que no se congela ni actúa como disolvente en las reacciones químicas. Este tipo de agua, conocida comúnmente como agua “ligada”, debe interpretarse como una fracción con movilidad limitada o restringida.

Figura 3.

Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua



Nota. La figura muestra los cambios que ocurren en los alimentos en base a la actividad de agua. a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias. Tomado de (Badui, 2006)

5.3. Definición de términos

2.3.1 Agua de monocapa

El agua de monocapa en alimentos se refiere a la cantidad mínima de agua que está asociada directamente con las moléculas de agua en la superficie de los sólidos alimenticios, esta capa de agua puede afectar diversas propiedades de los alimentos, como la textura, la estabilidad y la capacidad de conservación, por lo que conocer la cantidad de agua de monocapa en los alimentos es importante en la industria alimentaria (Badui, 2006).

2.3.2 Granulometría

La granulometría es una técnica utilizada en la ciencia de los alimentos para medir y describir la distribución de tamaños de partículas en la harina, proporcionando un perfil

completo sobre la textura y uniformidad de la molienda. Esta distribución se expresa generalmente en función del tamaño de las partículas, para lo cual se usa con mucha frecuencia los tamices o zarandas, estos materiales están constituidos por mallas metálicas con diferentes dimensiones desde muy finas a muy gruesas, en este trabajo de investigación se usaran zarandas de 125, 250 y 500 micras (Puma, 2017).

2.3.3 *Harina*

La harina es un producto que se genera a partir de la molienda de alimentos con bajo contenido de humedad como los granos, leguminosas, tubérculos o semillas, principalmente de cereales como trigo, arroz, maíz, o centeno, principalmente de alimentos ricos en almidón. Mediante la trituration los granos se convierten en partículas finas, formando un polvo que se utiliza como ingrediente base principalmente en la elaboración de productos de panificación así como en la preparación de diversos de alimentos (Figuerola et al., 2008).

2.3.4 *Isotermas de sorción*

Las isotermas de sorción son gráficos que representaciones la relación entre la actividad de agua y la humedad relativa a una temperatura constante, es decir, muestran la cantidad de agua que un alimento puede absorber o liberar en función de la humedad relativa del ambiente circundante. Estas graficas son importantes en la industria alimentaria porque proporcionan información crucial sobre la estabilidad y la vida útil de los alimentos, así como sobre sus propiedades físicas y sensoriales (Talens, 2020).

2.3.5 *Linaza*

La linaza cultivada principalmente por sus semillas que son fuentes ricas en ácidos grasos poliinsaturados ω -3, lignanos, fibra dietética y otros nutrientes beneficiosos para la salud, pueden ser de color marrón dorado o marrón oscuro y tienen un sabor ligero a nuez, se utilizan en una variedad de formas, incluyendo enteras, molidas en harina o prensadas para extraer aceite de linaza (Saleh et al., 2022).

2.3.6 Tiempo de tostado

El tiempo de tostado se refiere al periodo necesario para someter las semillas de linaza a un proceso de tostado durante el cual las semillas son expuestas al calor con el propósito de desarrollar cambios físicos y químicos que afectan su sabor, aroma, textura y color, además mejorar su digestibilidad, el tiempo de tostado puede variar dependiendo de varios factores, como la temperatura del horno o la sartén, la cantidad de semillas y la preferencia del usuario en cuanto al grado de tostado deseado (Aldave, 2016).

2.3.7 Revoluciones por minuto

En el contexto del tostado, las revoluciones por minuto (RPM) se refieren a la velocidad de rotación del tambor tostador, que es el componente central en las máquinas de tostado de alimentos, la velocidad a la que el tambor gira durante el proceso de tostado es un factor crítico que afecta la calidad y el perfil de sabor del producto final (Illy y Rinantonio, 2005).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación

Esta investigación se desarrolló tanto el proceso productivo como el análisis en laboratorio de Análisis de Alimentos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias, de la Universidad Nacional de Cajamarca, ubicada en el Distrito, Provincia y Región Cajamarca, geográficamente se encuentra localizado entre las coordenadas 7° 10' 06" S Latitud Sur y 78° 29' 43" W Longitud Oeste, a una altitud de 2683 msnm

Figura 4.

Ubicación de Universidad Nacional de Cajamarca



Nota. Tomado de Google Maps.

6.2. Equipos y materiales

6.2.1. *Materia prima e insumos*

3 kilogramos de linaza variedad marrón se obtuvo del mercado central de la ciudad de Cajamarca.

6.2.2. Reactivos

- Cloruro de sodio
- Ácido sulfúrico
- Cloruro de magnesio
- Tiosulfato de sodio
- Cloruro de litio
- Cromato de potasio
- Acetato de potasio

6.2.3. Equipos

- Determinador de actividad de agua AQUALAB (4 TE Dew Point Water Activity Meter SERIE S40005228)
- Balanza analítica (Mettler Toledo SERIE AB204-S/FACT)
- Estufa (Hot Air Oven DSO-300D, SERIE. 0711259)
- Molinillo eléctrico JUBAKE[®] COFFEE GRINDER, AC220 – 240V
- Tostador semiindustrial elaborado por el investigador

6.2.4. Materiales de laboratorio

- Zarandas granulometría BOLIN-674 N° 120, 60 y 35 de 125, 250 y 500 micras.
- Campanas de desecación.
- Placas Petri
- Probetas
- Vasos de precipitación

6.2.5. Otros materiales experimentales

Guantes látex, Mascarilla, Mandil, Gorro, Mesa de trabajo de acero inoxidable, Papel toalla, Alcohol, USB, Tijera, Lapicero, Cuaderno, cronometro, laptop entre otros.

6.3. Metodología

6.3.1 Variables

Variables independientes

- Tiempo de tostado: (5, 10 y 15 min)
- Revoluciones por minuto en el tostado: (10, 15 y 20 RPM)
- Granulometría (125, 250 y 500 micras)

Variable dependiente

- Agua de monocapa (monocapa de GAB y de BET)

6.3.2 Diseño experimental y arreglo de los tratamientos

El método estadístico corresponde a un diseño estadístico DCA con arreglo factorial 3^3 (combinaciones de los factores y de los niveles) en total 27 corridas (Tabla 2), se realizó un ANOVA para la variable contenido de agua de monocapa de BET y de GAB. Todos los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de confianza del 95%. Para procesar los datos se utilizó el software STATGRAPHICS Centurión.

Los factores en estudio son 3: tiempo de tostado (A), revoluciones por minuto en el tostado (B) y granulometría (C), cada factor se dividirá en 3 niveles obteniendo los niveles A1, A2, A3; B1, B2 y B3; C1, C2 Y C3. La combinación de estos niveles da 27 tratamientos para la investigación.

Tabla 2*Arreglo de los tratamientos*

Factores	Niveles	Combinaciones	Tratamientos
A: Tiempo de tostado	A1 10 min	A1*B1*C1	T1
		A1*B1*C2	T2
		A1*B1*C3	T3
	A2 15 min	A1*B2*C1	T4
		A1*B2*C2	T5
		A1*B2*C3	T6
	A3 20 min	A1*B3*C1	T7
		A1*B3*C2	T8
		A1*B3*C3	T9
B: revoluciones por minuto	B1 10 RPM	A2*B1*C1	T10
		A2*B1*C2	T11
		A2*B1*C3	T12
	B2 15 RPM	A2*B2*C1	T13
		A2*B2*C2	T14
		A2*B2*C3	T15
	B3 20 RPM	A2*B3*C1	T16
		A2*B3*C2	T17
		A2*B3*C3	T18
C: granulometría	C1 125 micras	A3*B1*C1	T19
		A3*B1*C2	T20
		A3*B1*C3	T21
	C2 250 micras	B3*A2*C1	T22
		A3*B2*C2	T23
		A3*B2*C3	T24
	C3 500 micras	A3*B3*C1	T25
		A3*B3*C2	T26
		A3*B3*C3	T27

6.3.3 Procedimiento

Obtención de la harina de linaza. Para desarrollar esta investigación se utilizó linaza de la variedad marrón (3 kilogramos), la cual fue comprada directamente del mercado Central de Cajamarca, luego fue transportada en bolsas de polietileno de alta densidad hasta el laboratorio de análisis de alimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias para continuar con el proceso que se describe a continuación:

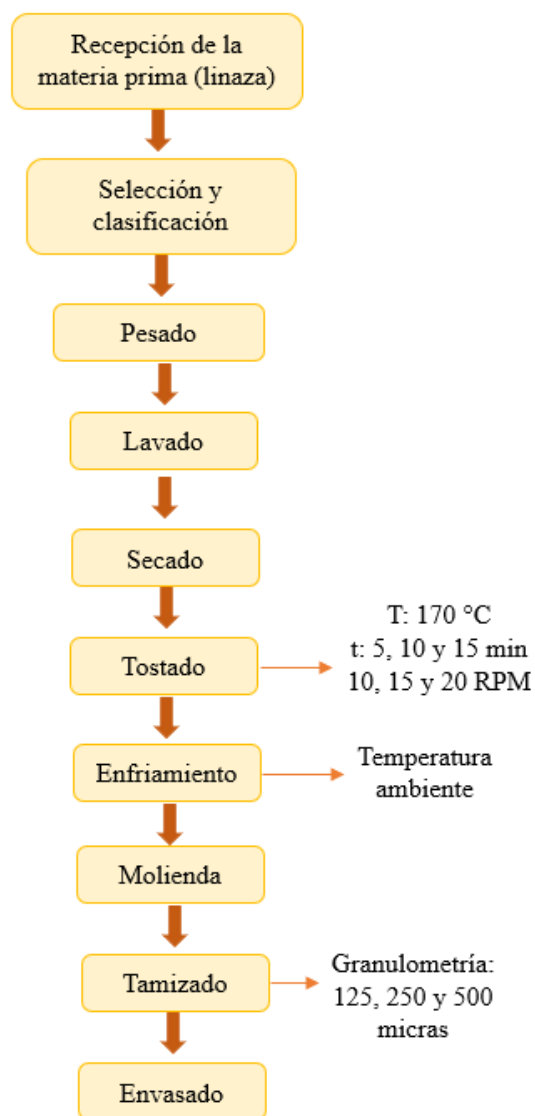
- **Recepción de la materia prima:** la obtención de harina de linaza empieza con la recepción de las semillas de linaza, se recepcionó 3 kilogramos de semillas de linaza cruda para posterior proceso.
- **Selección y clasificación:** se seleccionó 3 kilogramos de semilla de linaza libres de materia extraña y daños biológicos, las semillas tienen que ser de buena apariencia física sin daños físicos.
- **Pesado:** se utilizó una balanza digital, para pesar la cantidad de linaza que se utilizó en la elaboración de harina (2.950), esta operación resulta importante para calcular el rendimiento.
- **Lavado del grano:** El lavado se realizó con agua potable por inmersión y frotamiento de las semillas en agua, de manera que se puedan eliminar sustancias y partículas extrañas (Caruajulca, 2019).
- **Secado:** La semilla húmeda se colocó en una bandeja de acero inoxidable de manera uniforme para optimizar el secado, el cual se realizó en una estufa a una temperatura de 50 °C, hasta eliminar el exceso de humedad producida por el lavado (García, 2021). Con la finalidad de eliminar el exceso de agua de la superficie de los granos, evitar el crecimiento de microorganismos y asegurar un tostado homogéneo.
- **Tostado:** esta etapa consiste en exponer a las semillas al calor seco generado por un tostador artesanal donde el calor se distribuye de manera uniforme, se realizó a una temperatura constante de 170 ° C durante 5, 10 y 15 minutos a 10 15 y 20 RPM (Pacheco et al., 2020).
- **Enfriamiento:** Después del proceso de tostado, las semillas se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de ser molidas.
- **Molienda:** La molienda se realizó en molinillo eléctrico JUBAKE® COFFEE GRINDER, AC220 – 240V, para reducir el tamaño de las semillas. Para ello las

semillas ya tostadas se colocaron en la tolva del molino de granos, donde fueron trituradas y pulverizadas. Este proceso tiene como objetivo principal liberar los componentes internos de las semillas, como los ácidos grasos omega-3, fibra y otros nutrientes, haciéndolos más accesibles para el consumo humano y mejorando la biodisponibilidad (Agama, 2018).

- **Tamizado:** el tamizado se realizó de forma manual mediante zarandas de granulometría Bolin-674, de tamaño 125, 250 y 500 micras, con códigos 120, 60 y 35, para finalmente obtener la harina de linaza, con diferentes tamaños de partícula (granulometría). La cantidad de harina corresponde a 2.725 kg.
- **Envasado:** La harina obtenida fue envasada en bolsas de polietileno herméticamente selladas, con el propósito de resguardarla de posibles agentes externos y garantizar la conservación de sus propiedades físico-químicas hasta su posterior análisis (Polo, 2023).

Figura 5.

Diagrama de flujograma para la obtención de la harina de linaza.



Nota. Adaptado de Caruajulca (2019)

6.3.4 Determinación de isothermas de adsorción

La determinación de las isothermas se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito por Bell y Labuza (2000), con las modificaciones propuestas por Caruajulca (2019). Este método consiste en emplear soluciones acuosas de sales saturadas con actividad de agua conocida, bajo un enfoque estático utilizando seis tipos de sales: LiCl, CH₃COOK, MgCl₂,

NaCl, K₂CrO₄ y Na₂S₂O₃. En la Tabla 3 se presentan los valores correspondientes a cada sal saturada y sus respectivas humedades de equilibrio.

Tabla 3

Humedades relativas a diferentes soluciones de sales preparadas

Sales	Humedad Relativa (%HR) a temperatura ambiente
LiCl	11.3
CH ₃ COOK	22.5
MgCl ₂	32.9
NaCl	75.5
K ₂ CrO ₄	91.07
Na ₂ S ₂ O ₃	97.45

Nota: tomado de Rodríguez (2015)

Las soluciones salinas se dispusieron en la base de frascos de vidrio herméticamente sellados, previamente acondicionados para el experimento. En cada recipiente se colocaron vasos de vidrio que contenían 1,5 g de muestra (harina de linaza). Los sistemas fueron mantenidos a temperatura ambiente durante 10 días, periodo considerado suficiente para alcanzar la condición de humedad de equilibrio. Posteriormente, dicha humedad se determinó mediante balance de materia, a partir de la comparación entre el contenido inicial y la variación de peso (pérdida o ganancia). La actividad de agua de las muestras se evaluó utilizando el equipo AQUALAB 4 TEV.

6.3.5 Evaluación del contenido de agua de monocapa

Los datos experimentales obtenidos fueron ajustados empleando los modelos matemáticos de GAB y BET, a partir de cuyas ecuaciones se determinó el contenido de agua de monocapa. Para este propósito se utilizó el software Statistica 10, aplicando análisis de regresión no lineal. Los valores de actividad de agua (Aw) y de humedad de equilibrio

experimental fueron procesados en dicho programa para la estimación de los parámetros de sorción (Anexo 5).

La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E), calculados según las ecuaciones (3) y (4). Para ello se utilizó Microsoft Office Excel, 2016.

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot a_w)} \dots\dots\dots \text{BET (1)}$$

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w)} \dots\dots\dots \text{GAB (2)}$$

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{(\hat{Y} - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$(\%)E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \dots\dots\dots (4)$$

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Influencia de diferentes tiempos y velocidades de tostado y granulometría en el contenido de agua de monocapa en la harina de linaza

7.1.1. Determinación de las isothermas de sorción de humedad en la harina de linaza

La humedad de equilibrio de la harina de linaza tostada se determinó considerando distintos tiempos, velocidades de agitación (RPM) y granulometrías. Para ello, se emplearon disoluciones saturadas de sales con actividad de agua conocida, mantenidas a temperatura ambiente. Bajo condiciones de humedad relativa elevada, los productos secos tienden a absorber agua hasta alcanzar un estado de equilibrio, fenómeno que responde a la transferencia de masa del gas hacia el sólido. Al almacenar la harina en diferentes niveles de humedad, se obtuvieron pares de valores que permitieron la construcción de las isothermas de adsorción (Badui, 2013).

Los resultados de la humedad de equilibrio correspondientes a las tres repeticiones se presentan en los Anexos 2, 3 y 4. La evaluación de este parámetro resulta fundamental, ya que determina la seguridad del almacenamiento y depende directamente de las condiciones ambientales a las que se exponga el producto. En general, las harinas de cereales presentan un bajo contenido de humedad, lo que las hace microbiológicamente seguras; sin embargo, su calidad puede deteriorarse significativamente durante periodos prolongados de almacenamiento (Liu et al., 2022). Se ha reportado que el contenido de humedad en la harina oscila entre 6 % y 13 %, dependiendo de las condiciones de manipulación y molienda. No obstante, este valor puede aumentar considerablemente cuando el producto se conserva en ambientes con elevada humedad relativa (Yupanqui, 2023).

La humedad en equilibrio que presentaron las muestras almacenadas en diferentes humedades relativas, según muestras las figuras de la 5 a la 13 estuvo en un intervalo de 0.01

hasta 0.19 g agua/ g de m.s. siendo el máximo valor encontrado para la harina de 125 micras con un tiempo de tostado de 5 minutos y 10 RPM.

Estos resultados se alinean con lo mencionado por Matos y Rajo (2010), quienes señalan que la harina de 125 micras tiene partículas más finas, lo que implica una mayor área superficial expuesta y una mayor capacidad para absorber agua desde el entorno; las partículas más finas suelen ser más densas y pueden tener estructuras internas que favorecen la retención de agua, ya sea por capilaridad o por mayor afinidad de los grupos hidrofílicos en la superficie, pueden tener mayor proporción de almidones o proteínas expuestas que interactúan con el agua, permitiendo aumentar la capacidad de retener agua en equilibrio.

Los resultados evidenciaron que, en todos los tratamientos, la humedad de equilibrio aumentó con el incremento del tiempo de tostado y de las revoluciones por minuto (RPM). Este comportamiento responde a los procesos de transferencia de masa y calor, ya que una mayor exposición al calor favorece la evaporación del agua, alcanzándose el equilibrio con un menor contenido de humedad remanente (Cengel, 2011). Dichos hallazgos coinciden con lo reportado por Liu et al. (2022), quienes destacan que la harina de cereales presenta un bajo contenido de humedad, condición que la hace microbiológicamente segura.

No obstante, los resultados también indican que la humedad de equilibrio en la harina de linaza puede verse influenciada por el tiempo de tostado y la granulometría, lo que tendría repercusiones en su estabilidad y calidad durante el almacenamiento prolongado. En comparación con los valores reportados por Magro (2015) para harina de linaza germinada y tostada durante 30 minutos estos valores fueron 7,88% y 9,45%, esta diferencia se debe posiblemente a la naturaleza de la linaza puesto que en esta investigación se utilizó granos de linaza sin germinar. Por otro lado, Yupanqui (2023), señala que el contenido de humedad de la harina puede variar dependiendo de las condiciones de manipulación y molienda, y que puede incrementarse cuando se almacena en condiciones de humedad muy alta. En este sentido,

nuestros resultados sugieren que la humedad de equilibrio de la harina de linaza puede ser afectada por factores como el tiempo de tostado, la granulometría y las RPM, lo que podría tener implicaciones para el almacenamiento y la calidad de la harina.

La isoterma de adsorción representa cómo un alimento absorbe humedad y se hidrata, mostrando su comportamiento higroscópico en condiciones de almacenamiento con alta humedad. Estas curvas son esenciales para identificar las condiciones ideales de conservación, evaluar procesos como el secado y deshidratado, diseñar envases adecuados y otros aspectos relacionados. Además, sirven como herramienta para anticipar la estabilidad de los alimentos a lo largo del tiempo durante su almacenamiento (Badui, 2006).

Las isotermas experimentales y modelas por GAB y BET (Figuras 6 hasta la 13) describen la relación entre la a_w y el contenido de humedad en equilibrio de la harina de linaza de diferente granulometría, para tres tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos) y 3 RPM (10, 15 y 20). Estas figuras presentan las isotermas experimentales y las modeladas utilizando los modelos matemáticos GAB y BET. Según la clasificación de Brunauer, Deming y Teller, estas isotermas se identifican como Tipo II, las cuales se caracterizan por su forma sigmoideal, típica de productos secos con una alta capacidad para disolverse en un medio acuoso. Este comportamiento refleja un proceso de adsorción física en múltiples capas. A medida que la isoterma se aproxima a un valor cercano a la unidad, adquiere una forma asintótica, lo que indica la saturación gradual de las superficies disponibles para la adsorción de humedad Agama (2018). Isotermas del mismo tipo fueron encontradas para harina de maíz por (Ramírez, 2011), café soluble (Noguera y Rivero, 2021), harina de loche (Bocanegra y Sandoval, 2014) y arveja por (Caruajulca, 2019).

Las isotermas de tipo II se dividen en tres regiones principales. La primera corresponde al agua de la monocapa, que se encuentra fuertemente ligada a la matriz del producto, dentro de un rango de actividad de agua aproximado de 0 a 0.2. La segunda región, que muestra un

comportamiento casi lineal, representa el agua en múltiples capas y se ubica entre los valores de 0.2 y 0.75. Por último, la tercera región está relacionada con el agua libre disponible, presente en un rango de 0.75 a 0.1, siendo esta fracción la que interviene de manera activa en las reacciones químicas (Fennema y Tannenbaum, 1996).

El comportamiento de la harina de linaza se relaciona con su composición nutricional, que incluye carbohidratos, proteínas, compuestos bioactivos y fibras, estos componentes interactúan con el agua de diversas maneras; en las isotermas de Tipo II, que se divide en tres regiones: monocapa (0-0.12 de actividad de agua), multicapa (0.12-0.70) y agua libre (0.70-0.95) (Yupanqui, 2023). El agua inicialmente adsorbida forma una monocapa que se adhiere firmemente a las moléculas polares de la matriz del alimento a medida que aumenta la actividad de agua, el agua adicional se acumula en capas sucesivas alrededor de la monocapa, un fenómeno característico de la harina de linaza debido a su elevada capacidad de retención de agua (Figuerola et al., 2008). Agama (2018) explica que este comportamiento se refleja en la saturación progresiva de las superficies disponibles para la adsorción de humedad. Resultados similares fueron encontrados por Ramírez (2011) para harina de maíz y Caruajulca (2019) para harina de arveja. Este comportamiento se debe a la composición nutricional de la harina de linaza, rica en carbohidratos, proteínas y fibras, que interactúan con el agua en distintas formas, como se describe en Magro (2015).

Estos hallazgos indican que la harina de linaza es altamente higroscópica, lo que puede ser beneficioso para su uso en aplicaciones alimentarias.

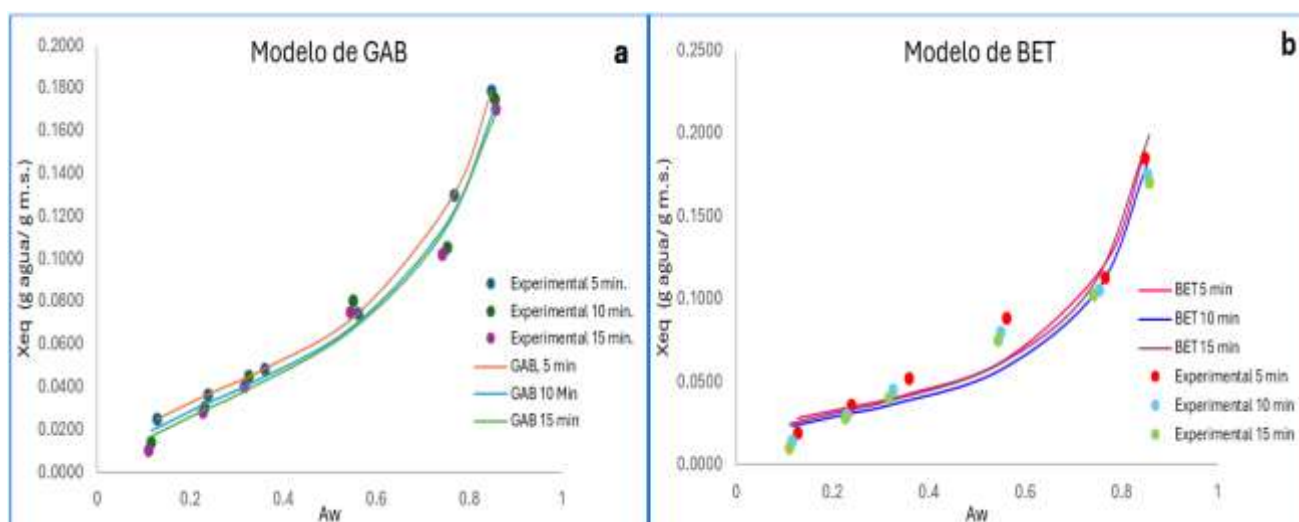
A partir de una actividad de agua (a_w) de 0.80, se observa un aumento en la pendiente de la curva, lo que indica una intensificación en la adsorción de agua cuando la harina se almacena en condiciones de humedad relativa superiores al 80%. Asimismo, se puede deducir que, por encima de este nivel de actividad de agua, se incrementa la actividad enzimática y las interacciones moleculares entre el agua, los carbohidratos y las proteínas, lo cual corresponde

a la Zona II del mapa de Labuza (Ramírez, 2011). Por ello, es fundamental almacenar estos alimentos en ambientes con una humedad relativa inferior al 80%.

Claramente se observa que las muestras presentaron una isoterma ligeramente más baja a medida que el tiempo de tostado aumenta, debido a los cambios estructurales, es bien sabido que, durante el tostado, se producen reacciones como la caramelización y la reacción de Maillard, que pueden consumir o modificar los grupos funcionales hidrofílicos (como los grupos -OH de carbohidratos o proteínas). Esto reduce la capacidad del material para interactuar con el agua, disminuyendo la adsorción. (Ramírez, 2011). Durante el tostado, el calor aplicado provoca la evaporación del agua libre presente en la harina, este tipo de agua es el principal contribuyente a la actividad de agua en el alimento, ya que no está firmemente ligada a los componentes de la matriz alimentaria (Badui, 2006). Además, el tostado favorece la estabilidad del agua ligada, al permitir que esta interactúe con componentes como las proteínas y los almidones modificados (Fukui et al., 2022). Este fenómeno es observable en esta investigación con la harina de linaza variando el tiempo de tostado.

Figura 6.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado con 10 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modeladas por GAB y BET



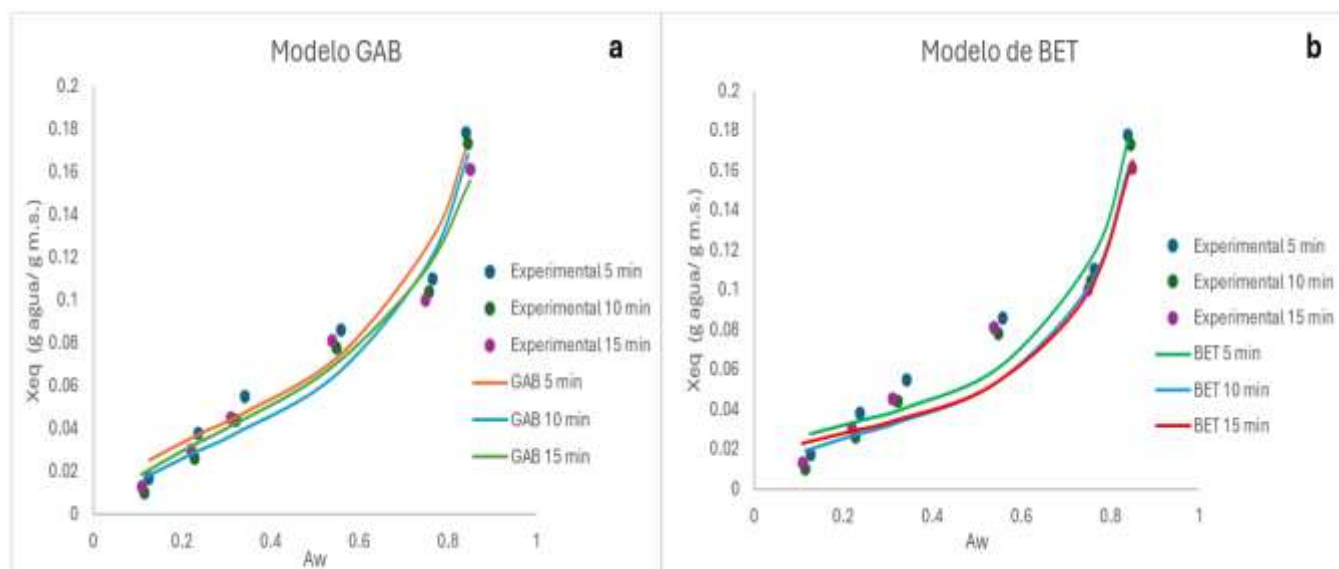
La Figura 6a muestra las isoterma experimental y modelada con el modelo GAB para la harina de linaza de 125 micras obtenida por tostado con 10 RPM y 5, 10 y 15 minutos de proceso. Así mismo se observa la isoterma de adsorción de la misma harina (Figura 6b). Se evidencia un buen ajuste para todo el rango de A_w por parte del modelo de GAB, confirmando su importancia para describir alimentos de este tipo. Mientras que el modelo de BET se ajusta mejor en un rango de terminado de A_w ($0.5 > A_w > 0.8$), debido a sus limitaciones, siendo diseñado solo para describir la adsorción en la monocapa (Badui, 2006).

Los resultados coinciden con lo reportado por Salinas (2024) quien reporto que el modelo de GAB es apropiado para predecir la humedad en equilibrio de harinas oleaginosas como la linaza, siendo importante para determinar las condiciones de almacenamiento adecuado para su conservación. Por su parte Badui (2006) señala que la isothermas de adsorción son esenciales para identificar las condiciones ideales de conservación y evaluar procesos como el secado y deshidratado. Por otro lado, Ramírez (2011) menciona que almacenar alimentos en ambientes con humedad relativa menor a 70% ya que por encima de 0.8 la adsorción de agua es mayor, lo cual podría provocar reacciones enzimáticas desfavorables para la conservación.

A menor tiempo de tostado la humedad en equilibrio aumenta, siendo más visible para actividades de agua menor a 0.4. Probablemente este comportamiento se atribuya a la desnaturalización y/o degradación de componentes nutricionales altamente hidrofílicos como las proteínas y fibra dietética, generados por el tratamiento térmico prolongado (Bonilla et al. 2024). Además durante el proceso de tostado se adiciona calor el cual genera cambios estructurales reduciendo la actividad de agua (Fukui et al., 2022).

Figura 7.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 10 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET



En la Figura 7 se muestran las isotermas experimentales y modeladas por GAB (Figura 7a) y BET (Figura 6b) para la harina de linaza tostada con una velocidad de 10 RPM durante 5, 10 y 15 minutos y de 250 micras de granulometría. De la misma manera que para la harina de 125 micras, el modelo que mejor predice el valor de humedad de equilibrio es el de GAB siendo más preciso para describir el comportamiento de la harina de linaza en todo el rango de A_w . Por su parte el modelo de BET tiene mejor ajuste solo para un rango de A_w determinado. En las Figuras 6a y 6b se observa una curva que se eleva rápidamente a medida que aumenta la A_w .

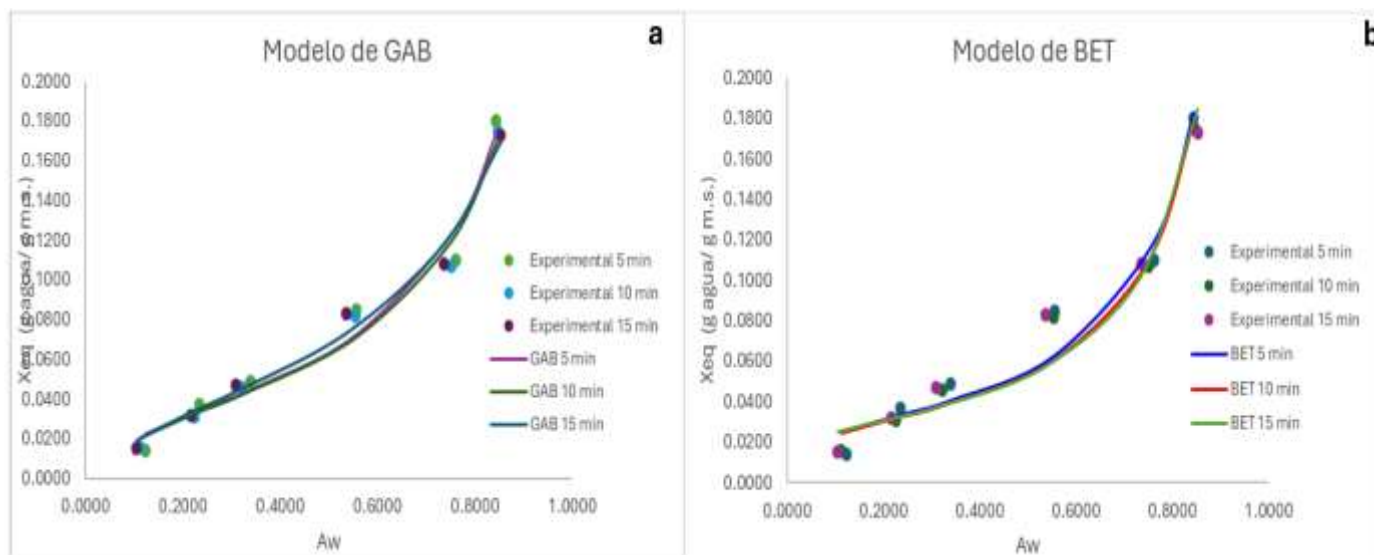
Se observa un comportamiento distinto frente al tiempo de tostado, claramente se observa que 5 min muestra la mayor humedad de equilibrio, mientras que el tiempo de tostado de 10 min muestra la menor y valores intermedios se observa para 15 minutos de tostado. Esta tendencia se observó también para la harina de linaza tostada mediante las mismas condiciones y de granulometría 125 micras, por lo que se reafirma que el tiempo de tostado influye debido a que puede modificar la estructura inicial de los componentes hidrofílicos de la harina, cuando

el producto está expuesto solamente por 5 minutos al tratamiento térmico la mayoría de sus sitios activos con afinidad al agua como las proteínas y polisacáridos conservan su estructura inicial, estos sitios al aumentar el tiempo de tostado pueden sufrir modificaciones como desnaturalización o degradación, generando una disminución de sitios de unión para el agua disponibles en consecuencia acortando la humedad en equilibrio, y finalmente el aumento que se observa a los 15 minutos de tostado, podría deberse a que en tratamientos térmicos más severos podrían generar un colapso de los componentes generando nuevos sitios activos para el agua, probablemente con baja afinidad (Bonilla et al. 2024). Resultados similares fueron reportados por Siqueira et al. (2024) para harina de curcuma y Riganakos y Kontominas (1994) para harina de trigo y soya.

Sin embargo, se observan diferencias entre los modelos GAB y BET de 250 micras y 150 micras, con el modelo de 250 micras presentando una humedad de equilibrio ligeramente más alta y una mayor capacidad de adsorción de agua. Esto sugiere que el tamaño de partícula puede afectar la capacidad de adsorción de agua de los alimentos, lo que es consistente con los resultados de (Matos y Rajo, 2010).

Figura 8.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y tostado con 10 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET



En la Figura 8 se muestra las isothermas experimentales y modelos por GAB (Figura 8a) y BET (Figura 8b) de la harina de linaza de granulometría 500 micras y diferentes tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos, 10 RPM). Se observa que ambos modelos presentan un buen ajuste siendo el mejor el modelo de GAB, este resultado coincide con Muñoz et al. (2020) quienes señalan que el modelo GAB describe adecuadamente la sorción en alimentos ricos en lípidos y proteínas.

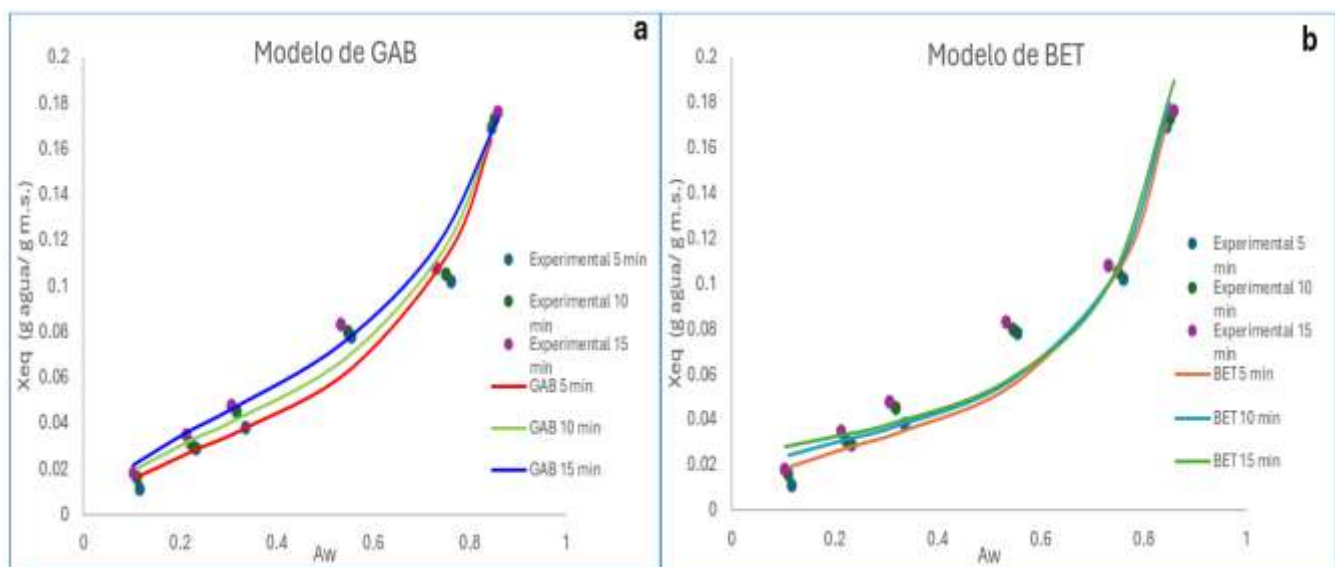
Se observa un aumento de la capacidad de adsorción a medida que incrementa la actividad de agua (A_w), siendo más pronunciado a partir de $A_w > 0.6$. Además, el leve descenso en la humedad de equilibrio con mayor tiempo de tostado podría asociarse a la desnaturalización de proteínas y la pérdida de sitios activos de adsorción, como indican Ramírez et al. (2014) en estudios similares con harinas tratadas térmicamente.

A diferencia con las harinas de granulometría 125 y 250 en las mismas condiciones de tostado, se ha demostrado que las diferencias entre las isothermas con relación al tiempo de

tostado son mínimas, estas diferencias se podrían atribuir al tamaño de partícula, lo que se podría afirmar que el efecto del tiempo de tostado es menos visible en partículas más grandes. Este comportamiento se puede explicar ya que las partículas más grandes tienen menor área superficial expuesta al tratamiento térmico por lo que conservarían mejor los componentes hidrofílicos (Edel y Rosell, 2007). Resultados similares han sido reportados por (Matos y Rajo, 2010) en harina de haba y de Muñoz et al. (2020) en harina de leguminosas.

Figura 9.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado con 15 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET



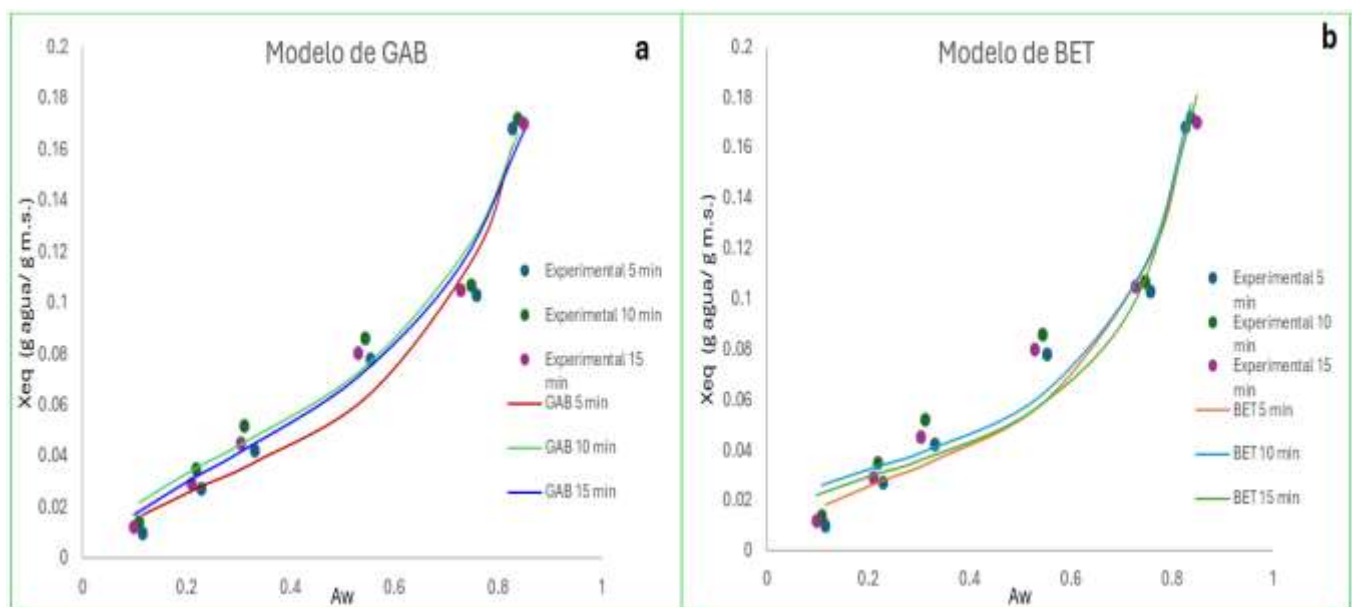
La figura 9 muestra la isoterma de adsorción de harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado a 15 RPM en diferentes tiempos de tostado, se observa que el modelo de GAB (Figura 9a) se ajusta adecuadamente en comparación con el modelo de BET (Figura 9b) que solo es aplicable a ciertos rangos de A_w , mostrando un comportamiento sigmoidal típico de alimentos con alta afinidad por el agua, especialmente a bajas A_w . El modelo predice con precisión los datos experimentales, lo cual concuerda con estudios recientes como los de

Delgado et al. (2019) y Medina et al. (2021), quienes reportan que GAB es el modelo más apropiado para productos vegetales finamente molidos por su capacidad de representar adsorción en múltiples capas. Se observa un ligero aumento en la capacidad de adsorción con mayor tiempo de tostado, posiblemente debido a cambios estructurales que exponen más sitios polares, como también lo señalan Morales et al. (2020) en harinas de origen vegetal sometidas a tratamientos térmicos.

Por otro lado, con respecto al modelo de BET y su menor ajuste a los datos experimentales, se debe a que este modelo es útil solo para la región inicial de adsorción monomolecular (Silva et al., 2023). Estos resultados coinciden con estudios como el de Ramírez et al. (2014) en harina de maíz y el de Salinas (2024) en harina de linaza.

Figura 10.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 15 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelados por GAB y BET.



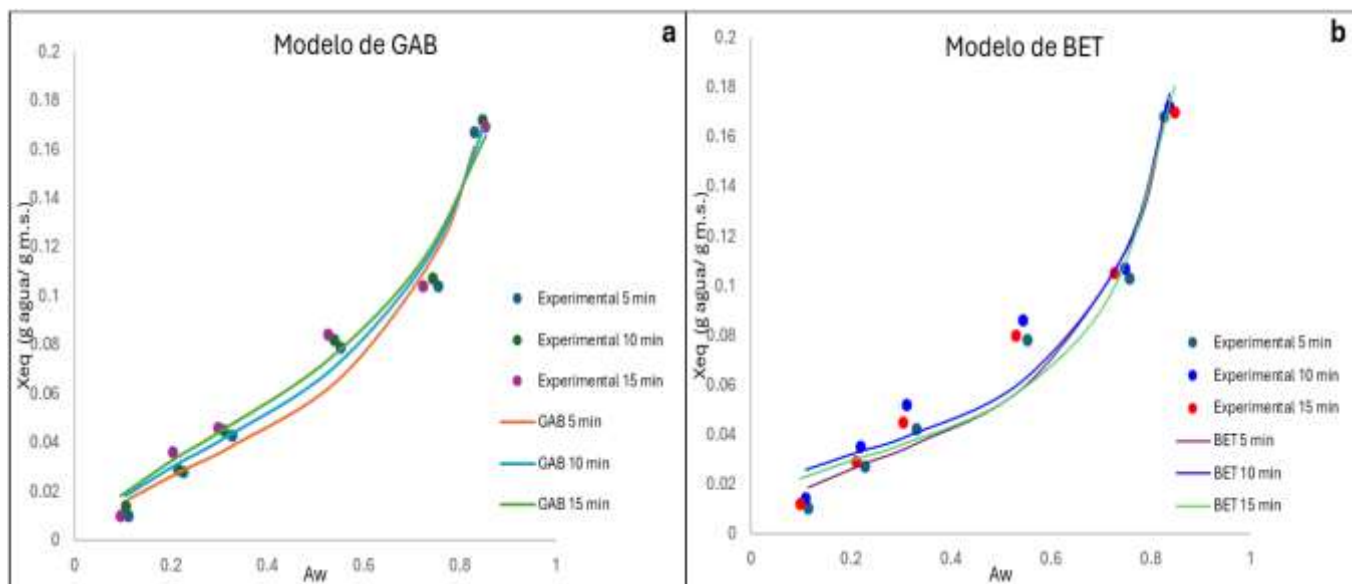
Los resultados que se muestran en la figura 10 son las isotermas experimentales y modeladas por GAB (Figura 10a) y BET (Figura 10b) de la harina de linaza de granulometría 500 micras con un proceso de tostado mediante diferentes tiempos (5, 10 y 15 minutos) y 15 RPM, comparando entre la granulometría de 250 micras con 10 RPM y 15 RPM utilizando el modelo GAB muestra que la humedad de equilibrio es ligeramente más baja para la velocidad de revolución de 15 RPM, y que el modelo GAB predice valores similares de humedad de equilibrio para ambas velocidades de revolución, sugiriendo que la velocidad de revolución puede afectar la capacidad de adsorción de agua de la harina de linaza.

Estos resultados se alinean con Badui (2006) y Agama (2018), quienes también encontraron que la capacidad de adsorción de agua depende de factores como la actividad de agua y el tratamiento térmico. Además se observa que la granulometría también es un factor que podría intervenir en la adsorción de agua en alimentos molidos tal como lo describe (Matos y Rajo, 2010).

También se observa que el modelo de BET solo es ajustable para un rango de actividad de agua determinado, esto se debe su aplicabilidad se centra en el intervalo de 0.05 a 0.4 aw, donde se asume que la adsorción ocurre en capas múltiples sobre superficies homogéneas (Ramírez et al., 2014).

Figura 11.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y tostado con 15 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelado por GAB y BET



La Figura 11 muestra las isothermas experimentales y modeladas para la harina de linaza tostada con 15 RPM de granulometría 500 micras obtenida mediante diferentes tiempos de tostado, se observa que el modelo de GAB (Figura 11a) sigue siendo aplicable ya que presenta un buen ajuste. Además, se aprecia que la humedad de equilibrio experimental y modelada es ligeramente más baja para la granulometría de 500 micras en comparación con la granulometría de 150 micras y 250 micras, para la misma velocidad de revolución de 15 RPM, lo que sugiere que la capacidad de adsorción de agua disminuye con el aumento de la granulometría.

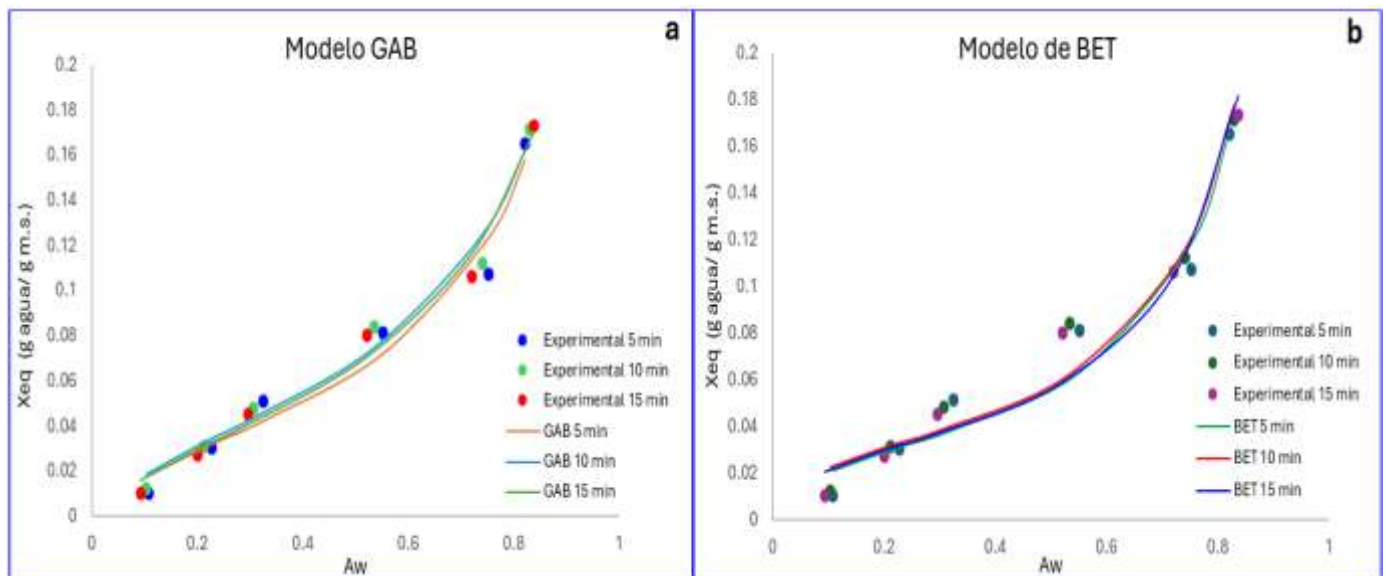
Por otro lado, los resultados indican que el modelo BET presenta un buen ajuste a los datos experimentales en los rangos bajos de A_w (hasta aproximadamente 0.5), pero pierde precisión a valores más altos, donde se observa una mayor dispersión entre los datos experimentales y los valores calculados por el modelo. Este comportamiento es esperado, ya que el modelo BET se basa en la formación de una monocapa y no considera la formación de

multicapa o condensación capilar, fenómenos más relevantes en altos niveles de A_w (Fennema y Tannenbaum, 1996).

Además, se observa que los diferentes tiempos de tostado (5, 10 y 15 min) son similares en la forma de las isothermas, aunque hay una ligera variación en los niveles de X_{eq} , especialmente en valores de A_w mayores a 0.6. Esto podría deberse al tamaño de partícula que atenúa al efecto del tostado debido a la menor penetración de calor en los componentes necesarios para la adsorción (Edel y Rosell, 2007).

Figura 12.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y tostado con 20 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelado por GAB y BET



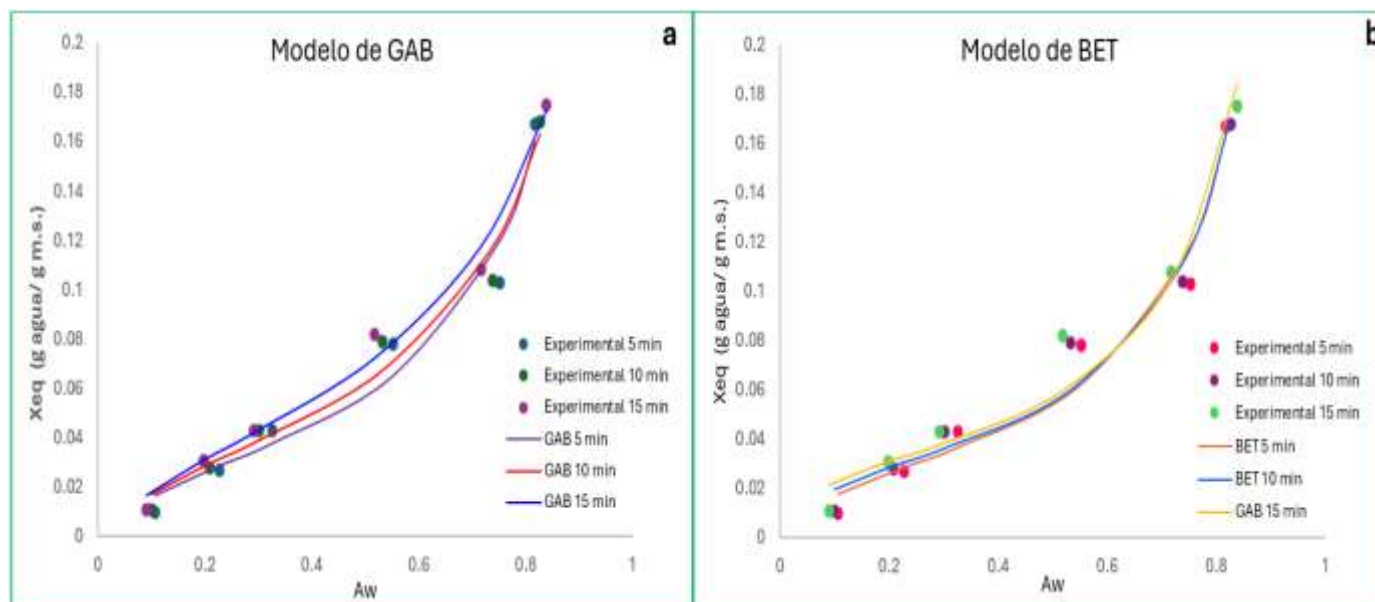
La Figura 12 presenta la isoterma de adsorción de harina de linaza con granulometría de 125 micras, tostada a 20 RPM durante tres tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos). Se observa un buen ajuste entre los datos experimentales y las curvas modeladas por GAB (Figura 12a) a lo largo de todo el rango de actividad de agua (A_w), lo que indica que el modelo GAB describe adecuadamente el comportamiento higroscópico del producto (Acurio et al., 2024).

Los tiempos de tostado no generaron diferencias marcadas en la capacidad de adsorción, aunque se aprecia una ligera tendencia a menor X_{eq} con mayor tiempo de tostado, posiblemente debido a cambios estructurales por efecto térmico. Estos resultados son coherentes con lo reportado por Ahumada et al. (2020) y Aviara et al. (2014), quienes destacan la aplicabilidad del modelo GAB en alimentos deshidratados por su precisión en un amplio rango de A_w .

Por otro lado, se observa que el BET (Figura 12b) solo logra un buen ajuste en los valores bajos y medios de actividad de agua ($A_w < 0.5$), disminuyendo su precisión en niveles superiores de A_w . Este comportamiento se debe a que el modelo BET fue desarrollado para describir adsorción en monocapa y presenta limitaciones para captar fenómenos de adsorción multilaminar o capilaridad, predominantes en altas A_w (Badui, 2006). A pesar de estas limitaciones, las curvas generadas muestran un ajuste razonable, especialmente para los tiempos de tostado de 10 y 15 minutos. La capacidad de adsorción, representada por X_{eq} , parece ser ligeramente mayor en muestras con menor tiempo de tostado, lo que sugiere que el proceso térmico reduce la afinidad por el agua posiblemente por cambios estructurales o pérdida de grupos funcionales hidrofílicos como se había explicado anteriormente.

Figura 13.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 20 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelo GAB.



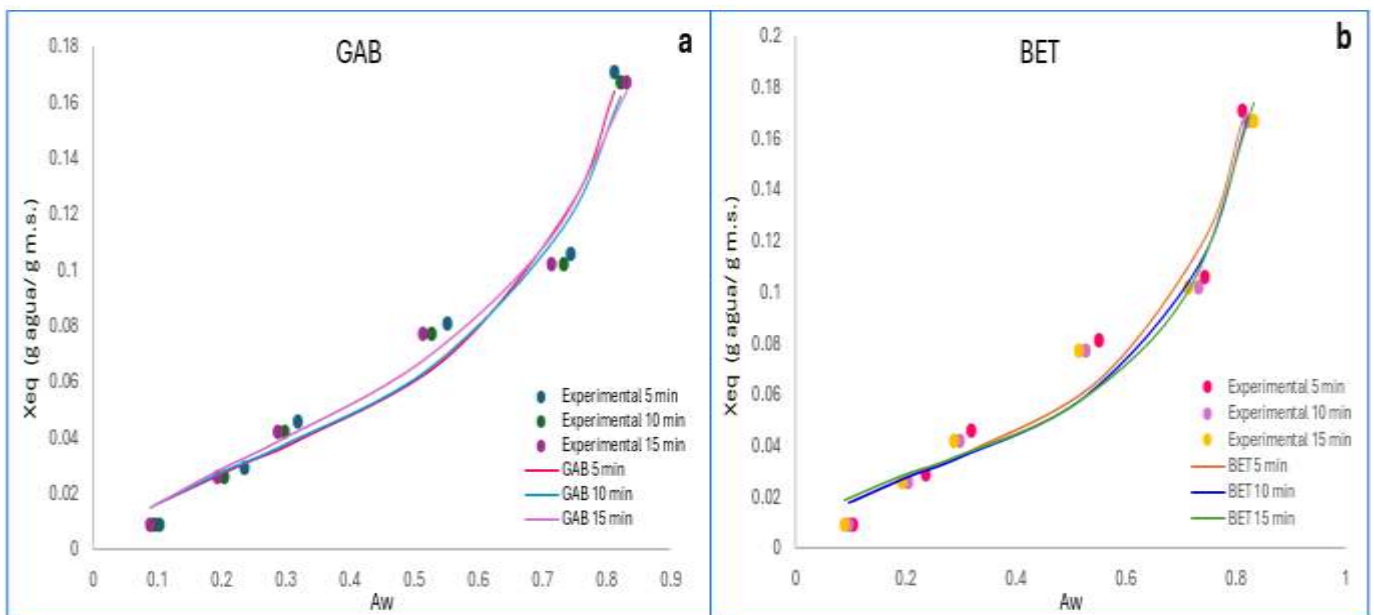
En la Figura 13 la harina de linaza con granulometría de 250 micras y tostado con 20 RPM muestra una capacidad de adsorción de agua que depende de la actividad de agua y el tiempo de tostado. La humedad de equilibrio experimental aumenta con la actividad de agua y el modelo GAB (Figura 13a) predice valores similares de humedad de equilibrio. En comparación con 10 y 15 RPM, la humedad de equilibrio modelada es ligeramente más baja para 20 RPM, lo que sugiere que la capacidad de adsorción de agua disminuye con el aumento de la velocidad de revolución.

En la Figura 13b se observa que los valores predichos por el modelo BET muestran una buena concordancia con los datos experimentales excepto para un rango de actividad de agua entre 0.4 y 0.8. Esto se debe a que se producen fenómenos como la condensación capilar y la formación de multicapas de agua, que el modelo BET no considera adecuadamente. Lo cual lleva a una sobreestimación o subestimación de la humedad de equilibrio en este rango (Caiza,

2021). Al comparar con velocidades de tostado de 10 y 15 RPM, se aprecia que la humedad de equilibrio modelada a 20 RPM es ligeramente inferior, lo que sugiere que la capacidad de adsorción de agua disminuye a medida que se incrementa la velocidad de revolución.

Figura 14.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y tostado con 20 RPM y tres tiempos de tostado, experimentales y modelo GAB.



En la Figura 14a se aprecia las isothermas experimentales y ajustadas al modelo matemático de GAB para los diferentes tratamientos de la harina de linaza tostada de granulometría 500 micras, tostado de 20 RPM y tres tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos). Se observa que las isothermas son muy similares, además se muestra que el modelo de GAB tiene un mejor ajuste en comparación con el modelo de BET (Figura 14b) para los mismos tratamientos debido a que el modelo de GAB es aplicable en todo el rango de actividad de agua mientras que el modelo de BET tiene limitaciones. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por diferentes autores como (Ramírez et al., 2014; Pérez, 2023; Salinas, 2024).

El modelo BET (Figura 14b) ajusta adecuadamente los datos experimentales de adsorción de agua de harina de linaza en el rango de baja actividad de agua ($a_w < 0.4$), pero presenta desviaciones notables entre 0.4 y 0.8, donde subestima la humedad de equilibrio, especialmente a mayores tiempos de tostado. Esta limitación se debe a que el modelo BET solo considera la formación de una monocapa y no contempla fenómenos como la adsorción en multicapas ni la condensación capilar, frecuentes en a_w elevadas. Estudios similares en harinas de chíá, quinua y sésamo han reportado comportamientos equivalentes, recomendando el uso de modelos como GAB u Oswin para representar con mayor precisión la adsorción de agua en matrices alimentarias con alto contenido de lípidos y fibra, como es el caso de la linaza (Arslan, 2020; Bustos et al., 2018; Menkov et al., 2007).

6.3.6 Determinación del valor de monocapa de GAB y BET

Los resultados de los parámetros de sorción obtenidos para los modelos matemáticos propuestos, empleados ampliamente en alimentos en polvo para describir los fenómenos de sorción de agua se muestran en las tablas 6, 7 y 8. Para evaluar estos modelos, se hizo mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E), la evaluación se hizo a los 27 tratamiento (harina con diferente granulometría). Los cálculos se realizaron utilizando el paquete estadístico STATISTICA versión 10, aplicando técnicas de regresión no lineal.

Tabla 4

Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 125 micras

Modelo	Constante	10 RPM			15 RPM			20 RPM		
		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
Modelo de GAB	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.0392	0.0391	0.0409	0.035079	0.04604	0.038886	0.041704	0.047177	0.046572
	C	9.1047	6.6734	4.8628	6.151672	7.561238	7.86078	5.92869	5.511712	5.041431
	K	0.9268	0.9131	0.8974	0.940669	0.868472	0.914453	0.911596	0.883491	0.887243
	R ²	0.9701	0.9798	0.9879	0.97343469	0.98915876	0.98170682	0.96596356	0.98019482	0.98518875
	%E	11.9276	13.6512	14.7976	15.0892792	7.70062977	15.0893	22.9171175	15.6000545	17.100969
Modelo de BET	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.028569	0.026509	0.02834	0.026904	0.026735	0.026822	0.029904	0.030444	0.029709
	C	42.08067	27.04913	28.17231	33.6465	132.919	13.75038	13.87262	17.4458	15.74721
	R ²	0.9552	0.9773	0.9247	0.9605392	0.93215658	0.96565723	0.95515915	0.95885356	0.96074889
	%E	17.7082	20.4215	35.1844	17.2980309	21.5406509	20.472252	28.6225518	23.7525406	27.5245616

La Tabla 4 presenta los parámetros de ajuste de los modelos GAB y BET para la harina de linaza con granulometría de 125 micras, sometida a tres tiempos de tostado y tres velocidades de agitación. Se observa que el modelo GAB muestra mejores coeficientes de determinación ($R^2 > 0.96$ en la mayoría de los casos) y menores errores porcentuales (%E) que el modelo BET, lo cual indica un ajuste más preciso a los datos experimentales en todo el rango de actividad de agua. Además, el contenido de humedad en la monocapa (Xm), que representa la cantidad de agua más firmemente ligada, es consistentemente mayor en el modelo GAB (0.035–0.047 g H₂O/g sólido) que en el modelo BET (0.026–0.030 g H₂O/g sólido), lo que concuerda con su capacidad para describir tanto la monocapa como las multicapas. Estos valores de Xm son similares a los reportados en estudios con harinas ricas en fibra y lípidos, como la harina de sorgo crudo (Xm = 0.038 a 0.40 g H₂O/g sólido) (Galdeano et al., 2018) y para harina de linaza almacenada a diferentes temperaturas (Xm= 0.045 y 0.050 g H₂O/ g m.s.) (Salinas, 2024). Pero están por debajo de

los resultados reportados por Velázquez et al. (2015) para harina de chía ($X_m = 0.34$ a 0.53 g H_2O /g sólido) donde también se determinó que el modelo GAB proporciona un mejor ajuste que BET, especialmente en rangos de actividad de agua medios y altos. En conjunto, estos hallazgos refuerzan que el modelo GAB es más adecuado para describir el comportamiento higroscópico de harinas como la de linaza, particularmente cuando se consideran variaciones en el procesamiento térmico como el tostado.

Tabla 5

Parámetros de los modelos GAB y BET (g H_2O /g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 250 micras

Modelo	Constante	10 RPM			15 RPM			20 RPM		
		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
Modelo de GAB	X_m (g H_2O / g m.s)	0.0398	0.0372	0.0436	0.034213	0.044055	0.046719	0.034033	0.039544	0.048073
	C	9.6138	5.8576	6.1594	7.581865	7.581865	5.295176	6.775009	6.301266	5.333347
	K	0.9196	0.9331	0.8655	0.889366	0.889366	0.869331	0.971708	0.929463	0.880983
	R ²	0.9604	0.9733	0.9711	0.96682476	0.96682476	0.98674886	0.9654453	0.97670906	0.98749305
	%E	16.4337	21.6010	15.2479	17.0579902	17.0579902	13.0404769	20.5242	16.7792923	12.6616999
Modelo de BET	X_m (g H_2O / g m.s)	0.02886	0.027586	0.025537	0.028941	0.028941	0.027473	0.030294	0.029901	0.030161
	C	41.31915	13.50523	37.64862	31.74167	31.74167	25.04639	9.190835	13.25187	18.36123
	R ²	0.9436	0.9514	0.9299	0.94118494	0.94118494	0.94769941	0.96427748	0.96805318	0.95924967
	%E	22.4682	25.8716	23.8083	25.2028175	25.2028175	25.1972215	22.6972246	22.0315233	24.0836359

La Tabla 5 muestra los parámetros de los modelos GAB y BET para la harina de linaza con granulometría de 250 micras sometida a tres tiempos de tostado y tres velocidades de agitación. Al igual que en la Tabla 6 se observa que el modelo GAB presenta mejores ajustes que el

modelo BET, con valores de R^2 más altos (hasta 0.9875) y errores porcentuales más bajos (hasta 12.66%) en comparación con los de BET, cuyos errores superan el 22% en varios casos. El contenido de humedad de la monocapa (X_m) es consistentemente mayor en GAB (0.034–0.048 g H_2O /g sólido) que en BET (0.025–0.030 g/g), lo que reafirma que GAB representa con mayor precisión la interacción del agua con los componentes higroscópicos del alimento. El valor de X_m más alto (0.048 g/g) se obtuvo a 20 RPM y 15 min, indicando una mayor capacidad de retención de agua firmemente ligada en estas condiciones. Estos resultados coinciden con estudios previos, como los de Galdeano et al. (2018) en harina de sorgo y Salinas (2024) en harina de linaza, donde también se reportó un mejor ajuste del modelo GAB frente a BET. Asimismo, Menkov et al. (2007) reportaron que en harinas con alta fracción lipídica, como la de sésamo, GAB representa de manera más fiel la sorción de agua, especialmente en rangos intermedios y altos de actividad de agua.

Al comparar ambas tablas (4 y 5), se observa que la harina de linaza con granulometría de 125 micras presenta valores de X_m ligeramente inferiores a los de 250 micras, lo que indica una menor capacidad de retención de agua en la monocapa. En ambos casos, el modelo GAB mostró un mejor ajuste (mayor R^2 y menor %E) que el modelo BET, aunque los errores fueron más bajos en la harina de 125 micras. Esto sugiere que las partículas más finas tienen una distribución más homogénea de sitios de adsorción (Matos y Rajo, 2010). Además, el modelo BET resultó menos preciso en ambas granulometrías, especialmente en condiciones de mayor tostado. En general, GAB fue más robusto ante variaciones de tamaño de partícula y condiciones de procesamiento.

Tabla 6

Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 500 micras

Modelo	Constante	10 RPM			15 RPM			20 RPM		
		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
Modelo de GAB	X _m (g H ₂ O / g m.s)	0.0391	0.0392	0.0469	0.037006	0.043761	0.050361	0.036409	0.038409	0.045073
	C	8.0556	7.5637	6.0299	5.924431	5.90747	5.805107	6.404686	5.998379	5.059507
	K	0.9266	0.9183	0.8665	0.940167	0.888426	0.838694	0.968901	0.941868	0.892972
	R ²	0.9683	0.9804	0.9860	0.9705	0.9820	0.9802	0.9657	0.9756	0.9857
	%E	18.1400	11.5476	10.6164	19.7345	12.3404388	20.1076381	24.1388	20.8994018	17.2246211
Modelo de BET	X _m (g H ₂ O / g m.s)	0.028703	0.026822	0.027249	0.028855	0.027596	0.026941	0.03218	0.03048	0.029669
	C	25.39233	13.75038	41.68586	11.4568	25.40888	39.57508	8.712647	10.60409	13.98415
	R ²	0.9552	0.9624	0.9404	0.96464279	0.95365975	0.91665684	0.96434603	0.97017486	0.96529698
	%E	24.3732	17.5112	21.9351	24.1754931	20.7757367	37.4974534	26.5810766	25.5567482	27.25977

La Tabla 6 muestra los parámetros de los modelos GAB y BET para la harina de linaza con granulometría de 500 micras sometida a tres tiempos de tostado y tres velocidades de agitación. Al igual que en las Tablas 4 y 5 se observa que el modelo GAB presenta mejores ajustes que el modelo BET, con valores de R² más altos (hasta 0.9860) y errores porcentuales más bajos (hasta 24.14 %) en comparación con los de BET, cuyos errores superan el 37 % en alguno de los casos. El contenido de humedad de la monocapa (X_m) es consistentemente mayor en GAB (0.036–0.050 g H₂O/g sólido) que en BET (0.027–0.032 g/g), lo que reafirma que GAB representa con mayor precisión la interacción del agua con los componentes higroscópicos del alimento.

Como se puede observar en las tablas 4, 5 y 6, el modelo GAB mostró un mejor ajuste con un R^2 superior a 0.96, superando el rango establecido de 0.85, y con un porcentaje de error inferior al 24%. Además, se observa una relación indirecta con la granulometría. En harinas con partículas más finas, las interacciones entre las partículas pueden ser más estrechas, lo que podría reducir la disponibilidad de los sitios activos para la adsorción de agua, debido a bloqueos físicos o cambios en las propiedades superficiales (Matos y Rajo, 2010).

Por otro lado, Agama (2018) menciona que el modelo de BET se obtiene a través de la descripción física del proceso de sorción, por tal motivo se podría decir que los parámetros obtenidos de este modelo son de carácter físico, ya que se relacionan directamente con las características reales de sorción; se considera que las moléculas de agua en las capas superiores interactúan entre sí de manera análoga a como lo harían en un líquido, lo que refleja de forma más precisa los comportamientos de adsorción que se producen en los alimentos. En este estudio se demostró que el modelo de BET tiene buen ajuste ($R^2 > 0.92$) este valor está por encima del rango establecido. Sin embargo, este modelo es diferentes estudios ha demostrado que no es ajustable a todo el rango de actividad de agua sino solo a un rango limitado (0.4 a 0.6), por ejemplo, Caruajulca (2019) reportó que el modelo de BET no tuvo un buen ajuste para la harina de arveja obtuvo valores hasta de 47 %. Mientras en un estudio realizado por Galdeano et al. (2018) reportaron un buen ajuste del modelo de BET para harina de sorgo integral cruda. Por su parte Martínez (2011) menciona que el modelo de BET al ser útil solo en un limitado rango de actividad de agua deja de aplicable cuando sobrepasa el rango máximo de actividad de agua, por tanto, recomienda usar el modelo de GAB ya que es aplicable a rangos más extensos de actividad de agua.

Los valores de monocapa (X_m) calculados con el modelo de GAB, que oscilan entre 0.0340 y 0.0504, son mayores que los obtenidos con el modelo de BET, que varían entre 0.0255 y 0.0322. Estos resultados son similares a los reportados en otros estudios, como el de Polo

(2023), quien encontró que los valores de monocapa para harina de jengibre almacenada a diferentes temperaturas no coincidían entre los modelos GAB y BET, los valores oscilaron entre 0.0818 y 0.1069. Asimismo, Caruajulca (2019) reportó valores de monocapa superiores a 0.0403 para el modelo GAB y mayores a 0.0119 para el modelo BET en harina de arveja. Por otro lado, Yupanqui (2023) encontró valores de monocapa de GAB mayores a 0.9093. Esta diferencia podría atribuirse a la composición de la materia prima, ya que cada alimento presenta un comportamiento de sorción particular. No obstante, estos resultados son cercanos a los reportados por Ahmed et al. (2018) para harina de trigo, arroz y maíz, con valores de monocapa de GAB de 0.0567, 0.0667 y 0.0738 g H₂O/g m.s., respectivamente.

7.2. Análisis estadístico

Los resultados de la tabla ANOVA (Tabla 7) para la variable monocapa de GAB muestra alta significancia para tiempo de tostado, puesto que $p < 0.05$, lo cual indica que este factor produce efectos significativos en el contenido de agua de monocapa de GAB. Por lo tanto, se afirma que hay diferencias entre los tratamientos. Mientras que la velocidad de tostado (RPM) y las interacciones de estos factores no influyen ya que el valor de $p > 0.05$. Claramente se observa en la figura 15, el modelo explicó el 51.25 % de la variabilidad total ($R^2 = 51.25 \%$), se podría decir que el ajuste es moderado, lo cual explica que aproximadamente la mitad de la variación del contenido de monocapa se debe a los factores evaluados y que la otra mitad corresponde a los factores de ruido, es decir los que no están incluidos en el modelo o error experimental. Al exponer los granos de linaza al proceso de tostado ocurre varios cambios físicos y químicos, entre ellos la deshidratación y reducción de la actividad de agua, en este proceso se elimina el agua libre (Fukui et al., 2022). El tiempo de exposición al calor en este proceso afecta la estructura de alimento, cuando estos productos son sometidos a tiempos prolongados de tostado puede ocurrir que la estructura del alimento se ve alterada, especialmente su porosidad y superficie específica, estas modificaciones aumentan la superficie activa disponible para la

adsorción de agua, aunque la cantidad de agua libre disminuye debido a la evaporación, las partículas modificadas pueden retener más agua en la forma de monocapa, especialmente si la interacción con los grupos polares de la matriz alimentaria se incrementa (Labuza y Altunakar, 2007). Sin embargo, Ruiz (2024) encontró que el tiempo de tostado disminuye el valor de monocapa en harina de habas y hace referencia que el proceso de tostado es un factor que influye en el valor de monocapa debido a los cambios que provoca en la composición y estructura del alimento. Por ejemplo, un tostado prolongado puede desnaturalizar las proteínas y modificar los polisacáridos, lo que altera los sitios activos disponibles para la adsorción de agua, estos cambios pueden reducir la afinidad del alimento por el agua, lo que resulta en una disminución del valor de monocapa. Esto explicaría que el proceso de adsorción no solo depende de del proceso que se les da a los alimentos sino también de la composición de estos. Por ejemplo, la linaza tiene una alta cantidad de lignina y ácidos grasos insaturados, lo que puede hacer que su matriz no se vea afectada de la misma manera durante el tostado. Además, el tostado puede favorecer la liberación de sitios activos en los polímeros de fibra y en las proteínas de la linaza, lo que puede aumentar su capacidad de adsorber agua. De esta forma, el valor de monocapa tiende a aumentar al incrementar el tiempo de tostado (Figuerola et al., 2008; Fennema y Tannenbaum, 1996).

Tabla 7

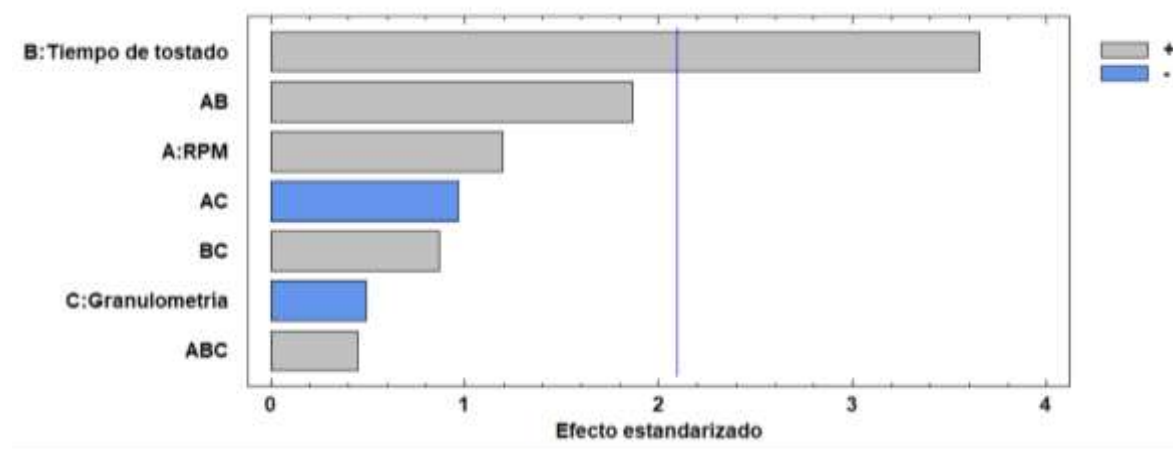
Análisis de varianza para el valor de monocapa GAB de la harina de linaza en función de la granulometría, tiempo de tostado y RPM.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: RPM	0.0000174482	1	0.0000174482	1.43	0.2466
B: Tiempo de tostado	0.000162807	1	0.000162807	13.34	0.0017
C: Granulometría	0.00000298951	1	0.00000298951	0.24	0.6264
AB	0.0000425632	1	0.0000425632	3.49	0.0774
AC	0.0000114036	1	0.0000114036	0.93	0.3459
BC	0.00000917756	1	0.00000917756	0.75	0.3967
ABC	0.00000247909	1	0.00000247909	0.20	0.6574
Error total	0.00023195	19	0.0000122079		
Total (corr.)	0.000475819	26			

R-cuadrada = 51.2526 porciento

Figura 15.

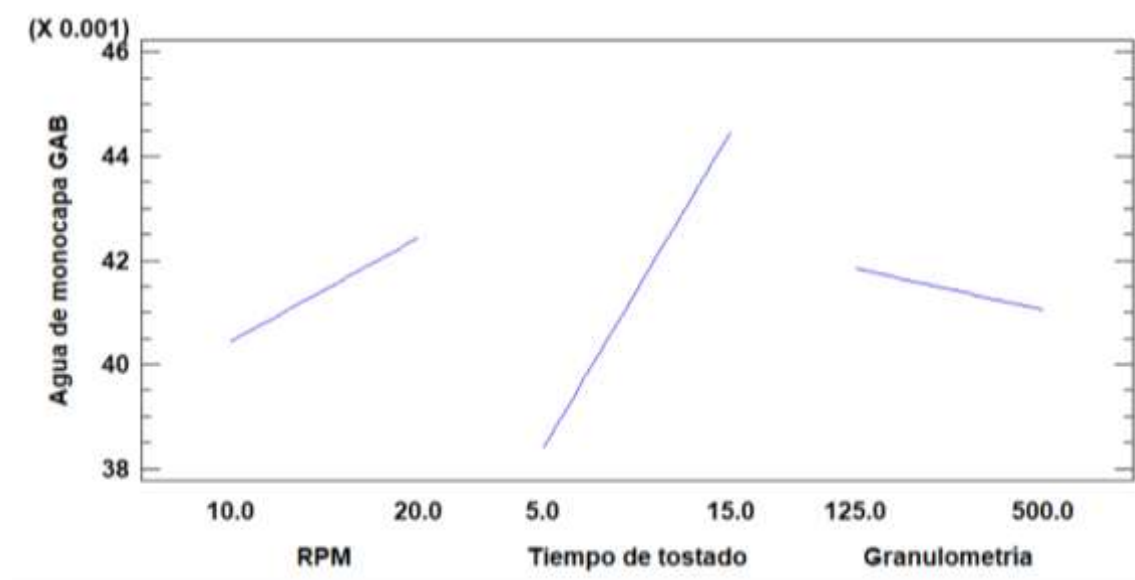
Diagrama de Pareto para el valor de monocapa de GAB



El diagrama de Pareto representa los efectos estandarizados a un nivel de 0.05 en esta figura podemos apreciar que los efectos del tiempo de tostado sobrepasan la línea azul, esto indica que el efecto lineal de este factor es estadísticamente significativo, lo que señala que el factor mencionado ejerce influencia en el contenido de agua del valor de monocapa (fue el factor más importante), se observa que los efectos son positivos lo que quiere decir que cuando el tiempo de tostado aumenta va a aumentar el valor de agua de monocapa de GAB.

Figura 16.

Efectos principales para el valor de monocapa de GAB



La Figura 16 muestra los efectos principales de los factores en estudio (RPM, tiempo de tostado y granulometría) de manera independiente, donde se observa que las RPM y la granulometría no tienen cambios ya que los valores de monocapa se mantienen casi constantes, por tanto, no hay diferencias estadísticas, mientras que los efectos del tiempo de tostado tienen un comportamiento directo ya que cuando el tiempo de tostado es mayor 15 minutos el contenido de agua de monocapa también aumenta.

Los resultados de la tabla ANOVA para la variable monocapa de BET (Tabla 8) muestra alta significancia para la velocidad de tostado (RPM), puesto que $p < 0.05$, lo cual indica que este factor produce efectos significativos en el contenido de agua de monocapa de BET. Por lo tanto, se afirma que hay diferencias entre los tratamientos. Mientras que el tiempo de tostado y la granulometría, además las interacciones de estos factores no influyen ya que el valor de $p > 0.05$. Claramente se observa en la figura 17. El modelo explicó el 55.18 % de la variabilidad total ($R^2 = 55.18 \%$), se considera ajuste moderado, valores de R^2 en este rango evidencian que, si bien se identificaron factores determinantes, aún existe una proporción importante de la variabilidad atribuida a otras variables no incluidas en el modelo

Las RPM influye en el valor de monocapa de BET debido a que está relacionado con la distribución de temperatura, movimiento de partículas y acceso de agua a los sitios activos en el alimento. Cuando aumenta las RPM, la mezcla de partículas o el alimento puede experimentar una distribución más uniforme de calor, lo cual resulta en una evaporación más homogénea del agua libre en el alimento, lo que puede influir en la cantidad de agua de monocapa adsorbida si la evaporación es más eficiente y uniforme, el alimento puede retener una cantidad diferente de agua, modificando el valor de monocapa (Galván, 2020).

Tabla 8

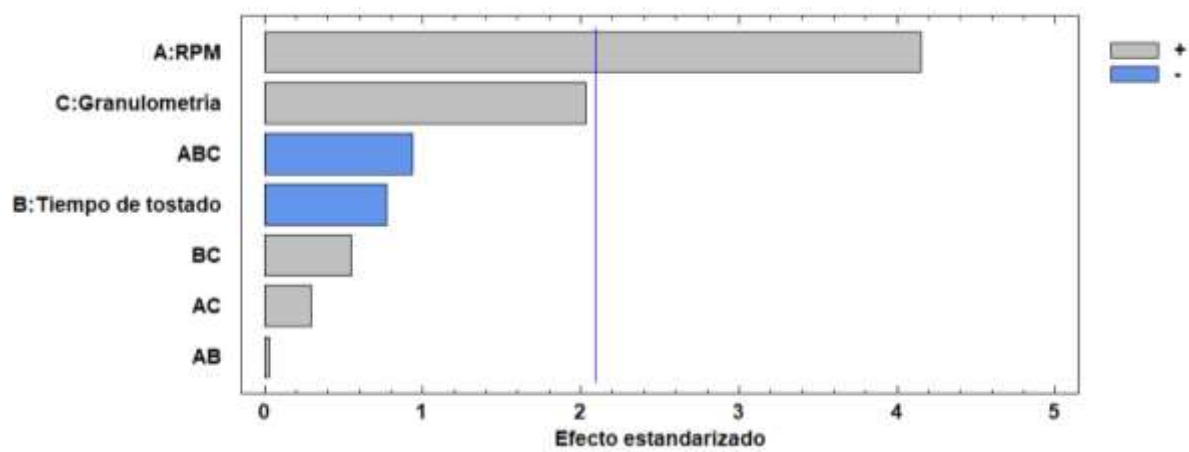
Análisis de varianza para el valor de monocapa BET de la harina de linaza en función de la granulometría, tiempo de tostado y RPM.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: RPM	0.0000293534	1	0.0000293534	17.26	0.0005
B: Tiempo de tostado	0.00000100742	1	0.00000100742	0.59	0.4510
C: Granulometría	0.00000704108	1	0.00000704108	4.14	0.0561
AB	1.7409E-9	1	1.7409E-9	0.00	0.9748
AC	1.49797E-7	1	1.49797E-7	0.09	0.7699
BC	5.12282E-7	1	5.12282E-7	0.30	0.5895
ABC	0.00000150123	1	0.00000150123	0.88	0.3593
Error total	0.0000323147	19	0.00000170077		
Total (corr.)	0.0000721046	26			

R-cuadrada = 55.1835 porciento

Figura 17.

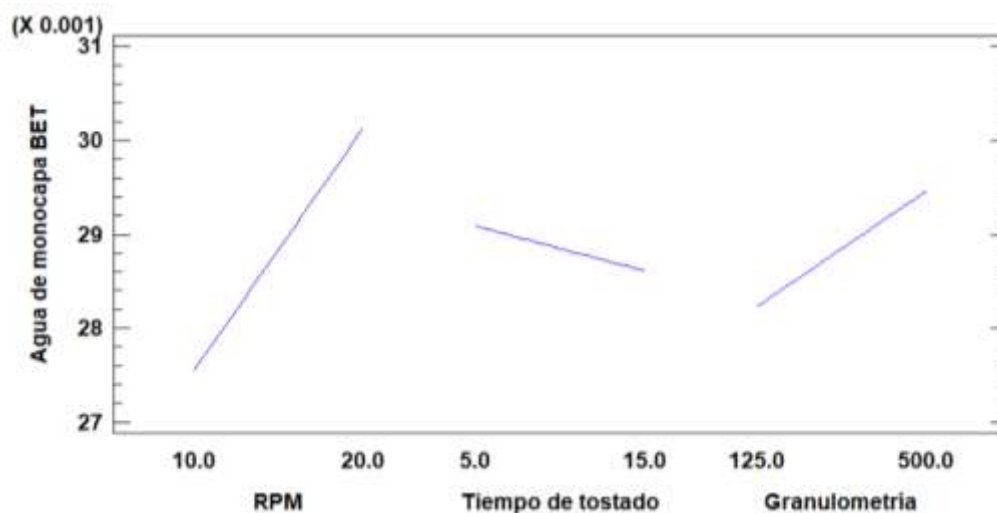
Diagrama de Pareto para el valor de monocapa de BET



El diagrama de Pareto representa los efectos estandarizados a un nivel de 0.05 en esta figura podemos apreciar que los efectos de la velocidad de tostado (RPM) sobrepasan la línea azul, esto indica que el efecto lineal de este factor es estadísticamente significativo, lo que señala que el factor mencionado ejerce influencia en el contenido de agua del valor de monocapa (fue el factor más importante) a mayor velocidad va a ver un mayor valor de agua de monocapa de BET debido a que se observa un efecto positivo.

Figura 18.

Efectos principales para el valor de monocapa de BET



La Figura 18 muestra los efectos principales de los factores en estudio (RPM, tiempo de tostado y granulometría) de manera independiente, donde se observa que el nivel más alto (20 RPM) de velocidad de tostado produce mayor contenido de agua de monocapa de BET en las muestras, es decir tiene una relación directa ya que esta aumenta a medida que las RPM se incrementan, mientras que el tiempo de tostado y la granulometría tiene promedios de agua de monocapa muy cercanas a lo largo del intervalo de 5 a 15 minutos y 125 a 500 micras, siendo las muestras con un tostado de 5 minutos y la granulometría de 500 micras la que produce mayor contenido de agua de monocapa.

VIII. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos evidenciaron que el valor de monocapa de la harina de linaza presentó una relación directa con el tiempo de tostado, mostrando diferencias significativas cuando fue estimado mediante el modelo GAB. El mayor valor se registró en la harina sometida a 15 minutos de tostado (0,054 g H₂O/g m.s.), mientras que el menor correspondió al tostado de 5 minutos (0,034 g H₂O/g m.s.). Estos cambios podrían atribuirse a modificaciones estructurales inducidas por la exposición térmica, que incrementan la porosidad del material y favorecen la adsorción de agua. En contraste, el modelo BET no mostró diferencias significativas asociadas al tiempo de tostado.
- El valor de monocapa de la harina de linaza presentó una dependencia directa con la velocidad de tostado (RPM), mostrando efectos significativos en la monocapa estimada mediante el modelo BET, mientras que el modelo GAB no evidenció diferencias significativas. En general, los valores de monocapa BET fueron menores a velocidades más bajas. Para la granulometría de 125 µm, a 5, 10 y 15 minutos de tostado y 10, 15 y 20 RPM, los valores oscilaron entre 0.0265 y 0.0304 g H₂O/g m.s. En harinas de 250 µm, los valores estuvieron entre 0.0255 y 0.0303, y para granulometría de 500 µm, entre 0.0268 y 0.0322 g H₂O/g m.s.
- En cuanto a la granulometría de la harina de linaza no tuvo efectos significativos en la monocapa de GAB y de BET, se observó una ligera tendencia al incremento conforme aumentó el tamaño de partícula.
- Las isothermas obtenidas exhiben un comportamiento de tipo II, con una forma sigmoide, lo que es característico de la adsorción física en múltiples capas, similar a las isothermas experimentales. Los valores de humedad de monocapa determinados para los modelos GAB y BET se encuentran en los rangos de 0.0340 a 0.0504 y de 0.0255 a

0.0322 g H₂O/g m.s, respectivamente. El modelo GAB resultó ser el más adecuado para describir las características de la harina de linaza, mostrando un buen ajuste en todo el rango de actividad de agua, lo cual se confirmó con un coeficiente de determinación superior a 0.96 y un error medio relativo inferior al 24 %.

IX. RECOMENDACIONES

- Evaluar el comportamiento higroscópico con otros modelos de adsorción: por ejemplo, considerar modelos adicionales como Halsey, Oswin o Peleg para complementar el análisis de isothermas, especialmente en harinas funcionales como la de linaza, a fin de obtener una mejor descripción del mecanismo de retención de agua bajo diferentes condiciones térmicas.
- Investigar el efecto combinado del tostado y almacenamiento en la estabilidad de la harina: Sería relevante estudiar cómo los cambios estructurales generados por el tostado a distintas velocidades y tiempos afectan la estabilidad del producto durante el almacenamiento a diferentes temperaturas, incluyendo parámetros como vida útil, actividad de agua y desarrollo de rancidez.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Acurio, L., Salazar, D., García, M. E., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., & Igual, M. (2024). Characterization, mathematical modeling of moisture sorption isotherms and bioactive compounds of Andean root flours. *Current Research in Food Science*, 8(April). <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100752>
- Agama, A. R. (2018). Estudio de las condiciones óptimas de almacenamiento de papilla para niños de 6 a 36 meses a base de harina de papa nativa (*Solanum tuberosum* ssp.), variedades Yema de Huevo y Santa Rosa con sabor a mora (*Rubus glaucus*) y taxo (*Passiflora tripartita*). Tra. *Trabajo de Pregrado, Técnica de Ambato. Ecuador*. <http://www.tfd.org.tw/opencms/english/about/background.html%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024%0A>
- Aldave, G. J. (2016). Efectos de la temperatura y tiempo de tostado en los caracteres sensoriales y en las propiedades químicas de granos de cacao procedente de Uchiza, San Martín. *Tesis de Maestría. Universidad Nacional de San Marcos. Perú*, 115.
- Allca, V. (2022). Isoterma de adsorción, propiedades funcionales y vida útil de la harina de chuño blanco de papa andina ccompis (*Solanum tuberosum*) proveniente de la Comunidad de Mollocco – Antabamba. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. Perú*. http://190.119.174.92/bitstream/handle/UNAMBA/1138/T_767.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Andrade, R. D., LEMUS, R., & Pérez, C. E. (2011). Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. *REVISTA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA FARMACÉUTICA*, 18(3), 325–334.

- Arslan-Tontul, S. (2020). Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. *Lwt*, 119(October 2019), 108859. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108859>
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos* (PEARSON (ed.); Cuarta Edi).
- Basilio, J. (2015). Predicción de la vida útil de chifles de plátanos (*Musa paradisiaca*) mediante modelos matemáticos. *Tesis de Posgrado. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú*, 112. <http://190.119.243.88/bitstream/handle/UNALM/1863/J11.B3-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bonilla, A. I., Usaga, J., Cortés, C., & Pérez, A. M. (2024). Effect of thermal treatment on selected bioactive compounds and physicochemical properties of a blackberry-soy-flaxseed beverage. *NFS Journal*, 35(March), 12–15. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2024.100177>
- Briceño, S. M. (2017). efecto de la temperatura en el valor de monocapa de tres tipos de harina de tarwi (*lupinus mutabilis*) variedad criolla mediante la isoterma de gab. *Universidad Nacional de Trujillo*. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9765>
- Brito, T. B., Carrajola, J. F., Gonçalves, E. C. B. A., Martelli-Tosi, M., & Ferreira, M. S. L. (2019). Fruit and vegetable residues flours with different granulometry range as raw material for pectin-enriched biodegradable film preparation. *Food Research International*, 121, 412–421. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.058>
- Bustos, J. D., Corrêa, P. C., Zeymer, J. S., Baptestini, F. M., & Campos, R. C. (2018). Moisture sorption isotherms of quinoa seeds: Thermodynamic analysis. *Engenharia Agrícola*, 38(6), 941–950. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n6p941-950/2018>
- Caiza, D. (2021). *Isotermas de sorción en alimento pulverulentos y ecuaciones de ajuste: una revisión bibliográfica de datos publicados*. 1–61.
- Caruajulca, L. E. (2019). Vida Útil de harina de tres variedades de arveja, (*Pisum sativum* L.)

- sometidas a tres tiempos diferentes de tostado. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca*. Pefile:///C:/Users/Lili_/OneDrive/Documentos/LILI/Maestria/CICLO III/TESIS II/Nunes2020.Pdfrú, 91.
- Cengel, Y. (2011). *Trasferencia de Calor y Masa. Un Enfoque Práctico* (3ra Edició).
- Edel, A., & Rosell, C. (2007). *De Tales Harinas, Tales Panes* (1a ed).
<http://hdl.handle.net/20.500.12324/20246>
- Fennema, O., & Tannenbaum, S. (1996). Introducción a la química de los alimentos. *University of Wisconsin*, 1249. <https://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/4808/3059>
- Figuerola, F., Muñoz, O., & Estévez, A. (2008). La Linaza como fuente de compuestos Bioactivos. *Agro Sur*, 36(2), 49–58.
- Fukui, M., Islam, M. Z., Lai, H. M., Kitamura, Y., & Kokawa, M. (2022). Effects of roasting on storage degradability and processing suitability of brown rice powder. *Lwt*, 161(February), 113277. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113277>
- Galdeano, M. C., Tonon, R. V., De Carvalho, C. W. P., Menezes, N. S., Nogueira, R. I., Leal-Junior, W. F., & Minguita, A. P. S. (2018). Moisture sorption isotherms of raw and extruded wholemeal sorghum flours studied by the dynamic and salt slurry methods. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.20717>
- García, F. A. (2021). Efecto de la temperatura en el valor de monocapa de harina de Tocosh de papa (*Solanum tuberosum*) mediante la isoterma de GAB. *Tesis de Pregado. Universidad Nacional de Trujillo. Perú*, 71.
[http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/13383/Solano Rodriguez%2C Edgar Ivan.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR2Th5ttrMog-9jLUPMMnjofbbsL2L9ZMlzgrRamDxX4V4J4UCgARDCvOFc](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/13383/Solano_Rodriguez%2C_Edgar_Ivan.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR2Th5ttrMog-9jLUPMMnjofbbsL2L9ZMlzgrRamDxX4V4J4UCgARDCvOFc)
- Illy, A., & Rinantonio, V. (2005). *Expresso Coffee: The Science of Quality* (2da edición). Elsevier Science.

- Jia, Y., Yuan, B., Yang, Y., Zheng, C., & Zhou, Q. (2023). Flavor characteristics of peeled walnut kernels under two-steps roasting processes. *Food Chemistry*, 423(December 2022), 136290. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136290>
- Kajla Assistant Professor, P., Sharma Professor, A., Kajla, P., & Sharma, A. (2020). Storage stability of processed flaxseed powder. ~ 100 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(2), 100–104. www.phytojournal.com
- Kauser, S., Hussain, A., Ashraf, S., Fatima, G., Javaria, S., Ul, Z., Kabir, K., Yaqub, S., & Akram, S. (2024). Flaxseed (*Linum usitatissimum*); phytochemistry, pharmacological; characteristics and functional food applications. *Food Chemistry Advances*, 4(June 2023), 100573. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100573>
- Lares, M. del C., Gutiérrez, R., Pérez, E., & Álvarez, C. (2012). Efecto del tostado sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas, composición proximal y perfil de ácidos grasos de la manteca de granos de cacao del estado Miranda, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(2), 439–446.
- León, A. E. (2020). ¿exportar trigo o harina? un análisis desde el punto de vista de la calidad. *Universidad Nacional de Córdoba*, 8(2), 52–56.
- Liu, S. X., Chen, D., & Xu, J. (2022). Physiochemical properties of jet-cooked amaranth and improved rheological properties by processed oat bran. *Future Foods*, 5(July 2021), 100107. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100107>
- Magro Porras, M. A. (2015). Caracterización fisicoquímica , química apartir de la semilla germinada de linaza (*Linum usitatissimum*) mediante autoclavado y tostado. *Tesis de Pregado. Universidad Nacional Del Centro Del Perú. Perú*, 125. <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1296/tesis> harina
2.pdf?sequence=1&isAllowed=y%250Achrome-
extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%253A%252F

%252Frepositorio.uncp.edu.pe%252Fbitstream%252Fhandle%252F20.500.

- Matos, A., & Rajo, R. (2010). Influencia del Tamaño de Partículas en las Isotermas de Adsorción del Harina de Haba (*Vicia faba* L.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1), 51–57. file:///C:/Users/Jackeline/Downloads/368-1882-1-PB.pdf
- Menkov, N. D., Durakova, A. G., & Krasteva, A. (2007). Moisture sorption isotherms of walnut flour at several temperatures. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 18(3), 201–206. <https://doi.org/10.1080/13102818.2004.10817145>
- Ostojich, Z., & Sangronis, E. (2012). Caracterización de semillas de linaza (*Linum usitatissimum* L.) cultivadas en Venezuela. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 62(2), 192–200.
- Pacheco, F., Torres, R., Arvelo, T., & Velasquez, I. (2020). Variación de la actividad antioxidante por efecto del tostado en granos de café (*Coffea arabica*), estado Miranda, Venezuela. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 3(2), 49–56. <https://doi.org/10.22206/cac.2020.v3i2.pp49-56>
- Pérez, A. (2023). Efecto de la temperatura en las isotermas de adsorción de harina de cañihua. *Tesis de Pregrado, Univerdidad Nacional de Trujillo. Perú*, 101.
- Pianesso, D., Adorian, T. J., Mombach, P. I., Dalcin, M. O., Loebens, L., Telles, Y. B., Roballo, S. S., Lovatto, N. M., & Silva, L. P. (2020). Nutritional assessment of linseed meal (*Linum usitatissimum* L.) protein concentrate in feed of silver catfish. *Animal Feed Science and Technology*, 265(May 2018), 114517. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114517>
- Polo, J. V. (2023). Efecto de la Temperatura en el valor de Monocapa y Calor Isotérico en Harina de Jengibre (*Zingiber officinale*) mediante la isoterma GAB. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Trujillo. Perú*.
- Puma, A. S. (2017). Caracterización de flujos de harina de trigo (*Triticum aestivum*) de cada pasaje de molienda en “Molinos e Industrias. *Trabajo de Pregrado, Técnica de Ambato*.

<https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298><http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf><http://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005><http://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58><http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>

Ramírez, M., Cruz y Victoria, M. T., Vizcarra Mendoza, M. G., & Anaya Sosa, I. (2014). Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de Harina de Maíz Nixtamalizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(1), 165–178. www.rmiq.org

Reyes, L. G., Sandoval Torres, S., Méndez Lagunas, L. L., & Barriada Bernal, L. G. (2017). Caracterización de polvos (harinas) de Mezquite (*Prosopis laevigata*) para aplicaciones alimentarias. *La Academia Mexicana de Investigación y Docencia En Ingeniería Química A.C.*, May. http://www.biomerieux.com.mx/servlet/srt/bio/mexico/dynPage?open=MEX_IND_FDA_PRD&doc=MEX_IND_FDA_PRD_G_PRD_NDY_62&pubparams.sform=1&lang=es_mx

Riganakos, K. A., & Kontominas, M. G. (1994). GC study of the effect of specific heat treatment on water sorption by wheat and soy flour. *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung Und -Forschung*, 198(1), 47–51. <https://doi.org/10.1007/BF01195283>

Rodríguez, J. O. (2015). Efecto de la temperatura en isotermas de adsorción de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) en hojuelas Effect. *Universida Nacional De Trujillo*, 36. https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández_Chávarry%2CKarla_Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rubio, C. B. (2020). Aplicación de la masa madre de cultivo con tres tipos de harinas(maíz,morocho y garbanzo)para la elaboración de panes en la ciudad de Guayaquil.

- Universidad de Guayaquil*, 1–107. <https://secure.arkund.com/view/77480179-386149-959952>
- Saleh, A. A., Nahla, A., Amber, K., Badawi, N., Aboelenin, S. M., Alzawqari, M. H., Albogami, S., Abdel-Moneim, A. M. E., Soliman, M. M., & Shukry, M. (2022). Effect of dietary incorporation of peanut and linseed meals with or without enzyme mixture on physiological performance of broilers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(6), 103291. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103291>
- Salinas, L. T. (2024). Efecto de la temperatura sobre los parámetros termodinámicos de la isoterma de GAB y calor isostérico en harina de linaza (*Linum usitatissimum*). *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional De Trujillo. Perú*. [https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández Chávarry%2CKarla Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández_Chávarry%2CKarla_Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Silva, R., Baldelli, A., & Pratap-Singh, A. (2023). Characterization of selected dietary fibers microparticles and application of the optimized formulation as a fat replacer in hazelnut spreads. *Food Research International*, 165(December 2022), 112466. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112466>
- Siqueira, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Telis-Romero, J., & Resende, O. (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of Curcuma longa L. flour. *Lwt*, 206(April). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116592>
- Talens, P. (2020). Sorción De Agua Un Alimento. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1–8. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83506/Talens - Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83506/Talens-Determinación-de-la-isoterma-de-sorción-de-agua-un-alimento.pdf?sequence=1)
- Torres, J. M. (2023). Propuesta de una barra de chocolate con linaza y concentrado de proteína de soya adicionada con quínoa inflada. *Tesis de Pregado. Universidad Autonoma de Mexico. Mexico*.

- Velázquez, S. K., Figueira, A. C., Rodríguez-Huezo, M. E., Román-Guerrero, A., Carrillo-Navas, H., & Pérez-Alonso, C. (2015). Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). *Carbohydrate Polymers*, 121, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.068>
- Yachachin, S. L. (2013). Caracterización fisicoquímica del extracto espectorante de Ajo (*Allium sativum* L.), Kion (*Zingiber officinale* L.), Eucalipto (*Eucaliptus globulus* L.) y Linaza (*Linum usitatissimum* L.). *Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Del Perú. Perú*, 10–11.
- Youn, K. S., & Chung, H. S. (2012). Optimization of the roasting temperature and time for preparation of coffee-like maize beverage using the response surface methodology. *Lwt*, 46(1), 305–310. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.09.014>
- Young, H. D., Freedman, R. A., & Ford, A. L. (2016). *Sears and Zemansky's University Physics: With Modern Physics* (Pearson (ed.)).
- Yupanqui, Y. J. (2023). Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga. Perú*. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5198>

XI. ANEXOS

Anexo 1. Datos experimentales

10 RMP																	
125mic						250m						500m					
5 min		10 min		15 min		5 min		10 min		15 min		5 min		10 min		15 min	
Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)	Wa	Xeq (g H ₂ O/g m.s)
0.129	0.019	0.117	0.014	0.111	0.010	0.126	0.017	0.115	0.01	0.109	0.013	0.123	0.014	0.113	0.016	0.105	0.015
0.239	0.036	0.231	0.03	0.227	0.028	0.237	0.038	0.228	0.026	0.22	0.030	0.235	0.037	0.225	0.031	0.217	0.032
0.36	0.052	0.326	0.045	0.317	0.040	0.343	0.055	0.322	0.044	0.31	0.045	0.34	0.049	0.322	0.046	0.309	0.047
0.562	0.088	0.55	0.08	0.545	0.075	0.559	0.086	0.548	0.078	0.539	0.081	0.556	0.085	0.554	0.082	0.536	0.083
0.767	0.113	0.754	0.105	0.742	0.102	0.765	0.11	0.757	0.104	0.75	0.100	0.762	0.11	0.752	0.107	0.736	0.108
0.849	0.185	0.855	0.175	0.858	0.170	0.84	0.178	0.845	0.173	0.85	0.161	0.844	0.18	0.848	0.175	0.853	0.173
15 RMP																	
0.116	0.011	0.11	0.016	0.103	0.018	0.115	0.01	0.109	0.014	0.099	0.012	0.113	0.01	0.106	0.014	0.096	0.010
0.233	0.029	0.222	0.031	0.213	0.035	0.229	0.027	0.219	0.035	0.21	0.029	0.227	0.028	0.216	0.029	0.205	0.036
0.336	0.038	0.318	0.045	0.307	0.048	0.332	0.042	0.312	0.052	0.304	0.045	0.328	0.043	0.31	0.045	0.299	0.046
0.555	0.078	0.547	0.08	0.533	0.083	0.554	0.078	0.544	0.086	0.53	0.080	0.553	0.079	0.54	0.082	0.526	0.084
0.761	0.102	0.75	0.105	0.731	0.108	0.758	0.103	0.748	0.107	0.728	0.105	0.755	0.104	0.744	0.107	0.724	0.104
0.845	0.169	0.851	0.173	0.859	0.176	0.827	0.168	0.838	0.172	0.849	0.170	0.83	0.167	0.848	0.172	0.853	0.169
20 RMP																	
0.109	0.01	0.103	0.012	0.094	0.010	0.107	0.01	0.1	0.011	0.091	0.011	0.104	0.009	0.096	0.009	0.088	0.009
0.228	0.03	0.212	0.031	0.201	0.027	0.228	0.027	0.209	0.028	0.198	0.031	0.236	0.029	0.205	0.026	0.194	0.026
0.326	0.051	0.307	0.048	0.296	0.045	0.326	0.043	0.302	0.043	0.292	0.043	0.319	0.046	0.298	0.042	0.288	0.042
0.552	0.081	0.535	0.084	0.522	0.080	0.552	0.078	0.533	0.079	0.518	0.082	0.552	0.081	0.527	0.077	0.514	0.077
0.752	0.107	0.741	0.112	0.721	0.106	0.752	0.103	0.738	0.104	0.717	0.108	0.744	0.106	0.733	0.102	0.714	0.102
0.822	0.165	0.83	0.171	0.838	0.173	0.818	0.167	0.827	0.168	0.838	0.175	0.812	0.171	0.822	0.167	0.832	0.167

Anexo 2 Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado y RPM de la harina de linaza de 125 micras.

10 RPM y 125 micras											
5 min				10 min				15 min			
Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET
0.129	0.019	0.0246	0.0283	0.014	0.0194	0.0235	0.014	0.111	0.010	0.0159	0.0248
0.239	0.036	0.0363	0.0349	0.03	0.0317	0.0307	0.03	0.227	0.028	0.0285	0.0327
0.36	0.052	0.0483	0.0428	0.045	0.0411	0.0365	0.045	0.317	0.040	0.0377	0.0385
0.562	0.088	0.0743	0.0640	0.08	0.0684	0.0572	0.08	0.545	0.075	0.0659	0.0605
0.767	0.113	0.1298	0.1217	0.105	0.1175	0.1065	0.105	0.742	0.102	0.1110	0.1085
0.849	0.185	0.1786	0.1884	0.175	0.1710	0.1817	0.175	0.858	0.170	0.1675	0.1984
15 RPM y 125 micras											
0.116	0.011	0.0169	0.0195	0.11	0.016	0.0202	0.0244	0.103	0.018	0.0216	0.0280
0.233	0.029	0.0284	0.0282	0.222	0.031	0.0325	0.0313	0.213	0.035	0.0357	0.0331
0.336	0.038	0.0379	0.0353	0.318	0.045	0.0418	0.0371	0.307	0.048	0.0460	0.0379
0.555	0.078	0.0639	0.0570	0.547	0.08	0.0690	0.0580	0.533	0.083	0.0743	0.0569
0.761	0.102	0.1160	0.1097	0.75	0.105	0.1170	0.1066	0.731	0.108	0.1172	0.0991
0.845	0.169	0.1641	0.1708	0.851	0.173	0.1692	0.1796	0.859	0.176	0.1735	0.1894
20 RPM y 125 micras											
0.119	0.014	0.0213	0.0053	0.016	0.0224	0.016	0.0067	0.018	0.0210	0.018	0.0071
0.226	0.031	0.0297	0.0060	0.032	0.0308	0.032	0.0076	0.028	0.0292	0.028	0.0080
0.325	0.047	0.0363	0.0069	0.048	0.0379	0.048	0.0088	0.043	0.0356	0.043	0.0092
0.756	0.082	0.0823	0.0190	0.083	0.0829	0.083	0.0230	0.076	0.0773	0.076	0.0238
0.867	0.107	0.1120	0.0349	0.107	0.1123	0.107	0.0407	0.103	0.1049	0.103	0.0420
0.976	0.172	0.1702	0.1936	0.176	0.1743	0.176	0.1994	0.163	0.1622	0.163	0.1864

Anexo 3. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado y RPM de la harina de linaza de 250 micras

10 RPM y 250 micras											
5 min				10 min				15 min			
Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET
0.126	0.017	0.0251	0.0277	0.115	0.01	0.0172	0.0190	0.109	0.013	0.0188	0.0230
0.237	0.038	0.0371	0.0343	0.228	0.026	0.0289	0.0270	0.22	0.030	0.0319	0.0292
0.343	0.055	0.0475	0.0410	0.322	0.044	0.0380	0.0331	0.31	0.045	0.0413	0.0341
0.559	0.086	0.0747	0.0627	0.548	0.078	0.0654	0.0538	0.539	0.081	0.0689	0.0528
0.765	0.11	0.1287	0.1190	0.757	0.104	0.1182	0.1034	0.75	0.100	0.1142	0.0987
0.84	0.178	0.1699	0.1753	0.845	0.173	0.1680	0.1636	0.85	0.161	0.1558	0.1651
15 RPM y 250 micras											
0.115	0.01	0.0170	0.0185	0.109	0.014	0.0219	0.0258	0.099	0.012	0.0170	0.0224
0.229	0.027	0.0283	0.0281	0.219	0.035	0.0354	0.0333	0.21	0.029	0.0310	0.0302
0.332	0.042	0.0377	0.0362	0.312	0.052	0.0454	0.0393	0.304	0.045	0.0416	0.0362
0.554	0.078	0.0645	0.0604	0.544	0.086	0.0748	0.0618	0.53	0.080	0.0710	0.0565
0.758	0.103	0.1196	0.1166	0.748	0.107	0.1234	0.1136	0.728	0.105	0.1147	0.0995
0.827	0.168	0.1612	0.1649	0.838	0.172	0.1655	0.1776	0.849	0.170	0.1672	0.1807
20 RPM y 250 micras											
0.107	0.01	0.0167	0.0178	0.100	0.011	0.0171	0.0198	0.091	0.011	0.0166	0.0215
0.228	0.027	0.0288	0.0287	0.209	0.028	0.0296	0.0294	0.198	0.031	0.0309	0.0308
0.326	0.043	0.0378	0.0367	0.302	0.043	0.0391	0.0365	0.292	0.043	0.0420	0.0376
0.552	0.078	0.0651	0.0621	0.533	0.079	0.0675	0.0601	0.518	0.082	0.0723	0.0596
0.752	0.103	0.1199	0.1179	0.738	0.104	0.1174	0.1111	0.717	0.108	0.1177	0.1043
0.818	0.167	0.1598	0.1625	0.827	0.168	0.1631	0.1702	0.838	0.175	0.1722	0.1842

Anexo 4. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB yBET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado y RPM de la harina de linaza

de 500 micras

10 RPM y 500 micras											
5 min				10 min				15 min			
Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET
0.1230	0.0140	0.0225	0.0256	0.1130	0.0160	0.0204	0.0244	0.105	0.015	0.0194	0.0253
0.2350	0.0370	0.0346	0.0333	0.2250	0.0310	0.0328	0.0318	0.217	0.032	0.0337	0.0320
0.3400	0.0490	0.0450	0.0404	0.3220	0.0460	0.0424	0.0379	0.309	0.047	0.0441	0.0374
0.5560	0.0850	0.0723	0.0627	0.5540	0.0820	0.0708	0.0603	0.536	0.083	0.0735	0.0575
0.7620	0.1100	0.1266	0.1191	0.7520	0.1070	0.1197	0.1102	0.736	0.108	0.1183	0.1023
0.8440	0.1800	0.1736	0.1827	0.8480	0.1750	0.1708	0.1807	0.853	0.173	0.1698	0.1846
15 RPM y 500 micras											
0.113	0.01	0.0171	0.0193	0.106	0.014	0.0184	0.0232	0.096	0.010	0.0185	0.0241
0.227	0.028	0.0290	0.0288	0.216	0.029	0.0316	0.0308	0.205	0.036	0.0332	0.0309
0.328	0.043	0.0388	0.0364	0.31	0.045	0.0418	0.0368	0.299	0.046	0.0444	0.0363
0.553	0.079	0.0667	0.0603	0.54	0.082	0.0711	0.0580	0.526	0.084	0.0740	0.0556
0.755	0.104	0.1193	0.1145	0.744	0.107	0.1188	0.1064	0.724	0.104	0.1154	0.0967
0.83	0.167	0.1608	0.1668	0.848	0.172	0.1681	0.1803	0.853	0.169	0.1656	0.1825
20 RPM y 500 micras											
0.104	0.009	0.0169	0.0181	0.096	0.009	0.0158	0.0179	0.088	0.009	0.0147	0.0187
0.236	0.029	0.0309	0.0307	0.205	0.026	0.0281	0.0281	0.194	0.026	0.0281	0.0284
0.319	0.046	0.0391	0.0380	0.298	0.042	0.0374	0.0355	0.288	0.042	0.0386	0.0354
0.552	0.081	0.0689	0.0657	0.527	0.077	0.0652	0.0594	0.514	0.077	0.0676	0.0572
0.744	0.106	0.1230	0.1209	0.733	0.102	0.1154	0.1104	0.714	0.102	0.1118	0.1008
0.812	0.171	0.1638	0.1667	0.822	0.167	0.1622	0.1678	0.832	0.167	0.1641	0.1741

Anexo 5. Panel fotográfico



Selección de linaza



Tostado de la linaza



**molienda de los granos
de linaza**



Pesado de muestras



**soluciones acuosas de sales saturadas
para acondicionadas para el
experimento**



Lectura de la actividad de agua

Anexo 6. Pasos en statistica para obtener el valor monocapa

Ingresar los datos experimentales en la hoja de trabajo

1. Preparar una hoja con dos columnas una que contenga la A_w experimental y la otra columna con x_{eq} (humedad en equilibrio) experimental.
2. Abrir la pestaña statistics, luego Advans Models, posteriormente Nolinear Estimation y hacer click en User-specified regression. Custom los function, en el recuadro escribir el modelo GAB y BET y oprimir el botón ok.
3. Definir variable dependiente (X_{eq}) e independiente (A_w).
4. Definir los parámetros de estimación (x_m , c y k) para GAB y (x_m y c) para BET.
5. Oprimir el botón summary y finalmente dar lectura los parámetros obtenidos.
6. En Microsoft Office Excel, 2016 se reemplazó los parámetros en las ecuaciones 1 y 2 para obtener la X_{eq} de GAB y de BET.
7. Las isothermas de GAB y de BET se construyeron insertando un gráfico de dispersión, se seleccionó para el eje X la A_w y para el eje Y la X_{eq} .
8. La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E) calculados según las ecuaciones (3) y (4).

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (c - 1) \cdot a_w)} \dots\dots\dots \text{BET (1)}$$

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 + (c - 1) \cdot K \cdot a_w)} \dots\dots\dots \text{GAB (2)}$$

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{(Y - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$(\%)E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \dots\dots\dots (4)$$