



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

BUAP

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**“ELABORACIÓN DE PASTA A PARTIR DE UNA HARINA DE
AMARANTO GERMINADO (*Amaranthus hypochondriacus*) Y SU
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD NUTRICIONAL E ÍNDICE
GLUCÉMICO”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**P R E S E N T A:
JANNY SARAHÍ LAGUNA LEYTE**

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA ELENA RAMOS CASSELLIS**

**CO-DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA LETICIA CALDERÓN FERNÁNDEZ**

Puebla, Pue. Agosto 2024



MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS
ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS

Nombre de la estudiante: **Janny Sarahí Laguna Leyte**

Matrícula: **222470207**

Nombre del director: **Dra. María Elena Ramos Cassellis**

Nombre del codirector: **Dra. María Leticia Calderón Fernández**

Título de la Tesis:

"ELABORACIÓN DE PASTA A PARTIR DE UNA HARINA DE AMARANTO GERMINADO (*Amaranthus hypochondriacus*) Y SU EVALUACIÓN DE LA CALIDAD NUTRICIONAL E ÍNDICE GLUCÉMICO"

Comisión Revisora:

Presidente: **Dra. Addí Rhode Navarro Cruz**

Firma: 

Secretario(a): **Dra. María Lorena Luna Guevara**

Firma: 

Vocal (1): **Dra. María Leticia Calderón Fernández**

Firma: 

Vocal (2): **Dra. María Del Rosario Romero López**

Firma: 

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta la estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado** en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.

Fecha de examen: **12 de septiembre de 2024**

Hora: **14:00 h**

Día de la semana: **Jueves**

Lugar: **FIQ8**



Revisa y Autoriza: Sello de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado - FIQ - ADAM



Oficio: FIQ/SIEP/049/2024

Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza
Director General de Bibliotecas
Presenta

A través de este medio me dirijo a usted para informarle que la tesis con título:

"ELABORACIÓN DE PASTA A PARTIR DE UNA HARINA DE AMARANTO GERMINADO (*Amaranthus hypochondriacus*) Y SU EVALUACIÓN DE LA CALIDAD NUTRICIONAL E ÍNDICE GLUCÉMICO".

ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por lo tanto, se autoriza la impresión de tesis del alumno:

Nombre del alumno	Matrícula	Facultad	Posgrado
Janny Sarahí Laguna Leyte	222470207	Ingeniería Química	Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Z. a 26 de agosto de 2024


Dra. Esmeralda Vidal Robles
Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrados




Dra. María Elena Ramos Cassellis
Directora de Tesis

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



Oficio: FIQ/SIEP/050/2024

Mtro. Ricardo Valderrama Valdez
Director de la Dirección de Administración Escolar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

Reciba un afectuoso saludo y al mismo tiempo me permito presentar a usted a los integrantes del jurado de examen que para obtener el grado de Maestra en Ciencia y Tecnología de Alimentos sustentará la:

Q.F.I. Janny Sarahí Laguna Leyte

perteneciente a la generación 2022 con número de matrícula 222470207 y cuyo tema de tesis es: "Elaboración de pasta a partir de una harina de amaranto germinado (*Amaranthus hypochondriacus*) y su evaluación de la calidad nutricional e índice glucémico".

Dicho jurado está integrado por:

JURADO

Presidente	Dra. Adeli Rhode Navarro Cruz
Secretario	Dra. María Lorena Luna Guevara
Vocal	Dra. María Leticia Calderón Fernández
Vocal	Dra. María del Rosario Romero López

Asimismo, comunico a usted que el alumno cumple con todos los requisitos para poder llevar a cabo su examen de grado, y que los integrantes de este jurado están citados con anticipación para la fecha y lugar indicados a continuación.

FECHA DE EXAMEN: 12 de septiembre de 2024.
HORA: 14:00 horas
LUGAR: Edificio FIQ6/201
DÍA: Jueves

Sin otro particular, me es grato quedar de usted.

Atentamente,
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 26 de agosto de 2024

Dra. Esmeralda Vidal Robles
Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrado

c.c.p. Archivo
E-mail: esmeralda.vidal@correo.buap.mx

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

A G R A D E C I M I E N T O S

Agradezco profundamente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (**CONAHCYT**) por su apoyo, por permitirme culminar mis estudios de Maestría con éxito, motivándome a alcanzar la excelencia académica.

A la **Doctora Cassellis**, por su invaluable apoyo en la realización de esta tesis. Su inteligencia, pasión, experiencia y paciencia han sido fundamentales a lo largo de todo el proceso. Siempre estuvo dispuesta a guiarme y enseñarme con dedicación, haciendo cada paso del camino más claro y manejable. Su compromiso y entusiasmo por su trabajo han dejado una huella significativa en mi investigación y también en mi persona.

A la **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**, por brindar una educación de calidad y apoyo fundamental en mi formación académica y personal. Orgullosa de haber sido parte de esta gran institución que impulsó mi crecimiento.

A la **Doctora Lety Calderón**, mi más sincero agradecimiento por su valiosa orientación, comprensión y sencillez. Su apoyo y las herramientas proporcionadas fueron clave para encontrar soluciones y avanzar en esta investigación.

A **mis profesores** de maestría, por su dedicación, tiempo y compromiso. Por enseñarme a pensar críticamente y encontrar soluciones. Sus clases no solo me proporcionaron información, sino que también me inspiraron a seguir aprendiendo y a cuestionar siempre, enriqueciendo mi formación académica y personal.

A mi esposito Adrián Ávalos, por ser mi compañero en este viaje.

Gracias por cada sacrificio, cada desvelo, cada consejo y cada palabra de aliento. Tu apoyo incondicional y la confianza que me brindaste fueron fundamentales para superar los retos y alcanzar mis metas. Tu amor y dedicación me dieron la fuerza para seguir adelante y lograr este importante objetivo.

A mi **papá**, le agradezco profundamente por sus sacrificios, su tiempo y exigencias que me impulsaron a ser una persona preparada y constante en mi educación básica. Su sustento y enseñanzas para lograr lo que me proponga y superar retos, han sido fundamentales. ¡Admiro tu dedicación y constancia!

A mi honorable comité tutorial, compuesto por la **Dra. Addí Rhode Navarro Cruz**, **Dra. María Lorena Luna Guevara** y la **Dra. María Del Rosario Romero López**, les agradezco por el tiempo dedicado a leer y aportar sus valiosas opiniones. Sus comentarios y sugerencias han sido fundamentales para enriquecer este trabajo de investigación.

A mi **mamá**, le debo un agradecimiento especial por su inmenso esfuerzo en mi educación. Gracias por dar prioridad a mi preparación y procurar mi bienestar diario, tu apoyo ha sido vital para obtener mi licenciatura y de ahí, emprender sola para seguir con mis objetivos académicos. ¡Te aplaudo y valoro profundamente todo lo que has hecho por mí!

ÍNDICE

1.0	INTRODUCCIÓN	9
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.2	HIPÓTESIS	11
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	OBJETIVO GENERAL	11
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4	JUSTIFICACIÓN	12
1.5	ANTECEDENTES	14
1.6	MARCO TEÓRICO	17
1.6.1	AMARANTO	17
1.6.2	GERMINACIÓN	26
1.6.3	TRIGO	32
1.6.4	ALMIDÓN	38
1.6.5	ACTIVIDAD DIASTÁSICA	41
1.6.6	MOLIENDA	43
1.6.7	HARINA Y SUS PROPIEDADES	44
1.6.8	PASTAS	45
1.6.9	EVALUACIÓN DE PASTAS	46
1.6.10	ÍNDICE GLUCÉMICO	46
1.6.11	CALIDAD ALIMENTARIA Y EVALUACIÓN SENSORIAL	47
2.0	METODOLOGÍA	48
2.1	ADQUISICIÓN Y LIMPIEZA DE LA SEMILLA DE AMARANTO	49
2.2	ANÁLISIS SELECTIVO A LA CARACTERIZACIÓN DE SEMILLAS DE AMARANTO	49
2.3	ACONDICIONAMIENTO DE SEMILLAS DE AMARANTO	50
2.4	GERMINACIÓN	51
2.5	SECADO DE AMARANTO GERMINADO	53
2.6	HARINA DE AMARANTO GERMINADO	53
2.7	PRUEBAS BIOQUÍMICAS DE LA HARINA	54
2.8	ELABORACIÓN DE PASTA	56
2.9	EVALUACIÓN DE PASTAS	58
2.10	PASTA FINAL	60
2.10.1	EXTRACTO ETÉREO	61
2.10.2	CENIZAS TOTALES	62
2.10.3	HUMEDAD	62
2.10.4	PROTEÍNA CRUDA	62
2.10.5	AZÚCARES REDUCTORES	63
2.10.6	AZÚCARES TOTALES	63
2.10.7	FIBRA DIETÉTICA	64
2.10.8	CARBOHIDRATOS	64

2.11	EVALUACIÓN DE ÍNDICE GLUCÉMICO.....	64
3.0	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
3.1	PRUEBAS DE CALIDAD	66
3.1.1	CONTENIDO DE IMPUREZAS	66
3.1.2	MIL GRANOS, ÍNDICE DE FLOTACIÓN Y PESO HECTOLÍTRICO	67
3.2	IMPACTO DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GERMINACIÓN	68
3.2.1	EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE REMOJO.....	68
3.2.2	EFFECTO DE LA LUZ Y OSCURIDAD.....	70
3.2.3	EFFECTO DE LA TEMPERATURA.....	73
3.3	CONDICIONES DE SECADO DE AMARANTO GERMINADO	75
3.4	HARINA DE AMARANTO GERMINADO	76
3.4.1	ÍNDICE DE DISTRIBUCIÓN.....	76
3.5	PRUEBAS BIOQUÍMICAS DE HARINA	77
3.5.1	ALMIDÓN DAÑADO.....	77
3.5.2	EFFECTO DEL COLOR.....	78
3.5.3	ACTIVIDAD DIASTÁSICA.....	79
3.5.4	RANCIDEZ	81
3.6	PASTA DE AMARANTO GERMINADO.....	82
3.6.1	CIFRA PELSSENKE	82
3.6.2	FORMULACIÓN DE PASTA.....	84
3.6.3	SECADO DE PASTA.....	85
3.6.4	PRUEBAS CULINARIAS	87
3.6.5	ANÁLISIS SENSORIAL	90
3.6.6	ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA	93
3.6.7	ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL.....	95
3.6.8	ÍNDICE GLUCÉMICO.....	96
4.0	CONCLUSIONES	98
5.0	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
6.0	ÍNDICE DE TABLAS	125
7.0	ANEXOS	126

1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe una preocupación a nivel mundial por la salud y la calidad en la dieta de las personas, debido a que el consumo de alimentos ultraprocesados y con alto contenido calórico se han relacionado con un incremento en las enfermedades no transmisibles como diabetes, sobrepeso, obesidad, hipertensión y otras enfermedades cardiovasculares. Por esta razón, las organizaciones mundiales están en busca de estrategias centradas en dietas sostenibles que tengan como principal objetivo incentivar un estilo de vida saludable en las generaciones presentes y futuras, así como proveer alimentos accesibles, seguros, asequibles, justos, aceptables y ambientalmente responsables (Juul et al., 2021).

El incremento en el consumo de alimentos de alto contenido calórico tiene afectaciones a nivel mundial, pero también impacta a la población mexicana. En nuestro país, el 75.2% de las personas mayores de 20 años presentan sobrepeso u obesidad, una problemática multifactorial que está relacionada, principalmente, al sedentarismo y al desequilibrio alimentario por un aumento en el consumo de alimentos con altos contenidos de grasas saturadas y carbohidratos refinados (Espinoza-Ortega et al., 2021; Loría & Salas, 2014).

A pesar de que México es un país gastronómicamente rico, las políticas alimentarias del modelo económico neoliberal y la promoción de la globalización, han generado un mayor consumo de alimentos menos saludables. Por tales razones, actualmente en México se busca contar con alimentos saludables que contribuyan a la prevención de enfermedades crónicas (Moreno-Altamirano et al., 2014; Espinoza-Ortega et al., 2021).

Dentro de las alternativas, los cereales integrales y pseudocereales son una opción benéfica para reducir el riesgo de enfermedades crónicas, gracias a su aporte nutrimental, pues se componen de carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas y minerales, además de contener sustancias bioactivas como fibra dietética y

polifenoles. No obstante, la ingesta de cereales y pseudocereales aún sigue siendo muy baja, debido al costo y poca aceptabilidad sensorial (Fardet, 2014).

La elaboración de alimentos a base de pseudocereales es una tarea complicada, ya que el reto no es solamente mejorar su aporte nutricional, sino mantener las propiedades reológicas de los productos elaborados con cereales integrales para que el consumidor lo acepte. Por ello, se están implementando estrategias tecnológicas como la germinación de semillas, cuyo proceso puede contribuir al mejoramiento de estas propiedades (Yi et al., 2022; Kissock et al., 2022).

Aunque los cereales y pseudocereales tienen similitudes en función y composición, los pseudocereales (como el trigo sarraceno, la quinua y el amaranto) han destacado por su alto contenido proteico, por no tener gluten (que es ideal para celíacos) y por su importante fuente de fibra dietética y fenoles, lo que les confiere un gran valor nutritivo y varios beneficios para la salud, si se les compara con los cereales; por ello, en la actualidad, están siendo incorporadas en productos de panadería, bebidas fermentadas y otros alimentos (Schoenlechner, 2016).

Los pseudocereales presentan diferentes propiedades, por ejemplo, el trigo sarraceno tiene un alto nivel de fitoquímicos, mientras que la quinua y el amaranto destacan por su calidad proteica y aporte de minerales, lo que aumenta su valor nutricional. Dentro de este grupo de pseudocereales, el amaranto destaca por su alto contenido proteico y de minerales, con respecto a la quinua, aunado a su buena adaptación a climas extremos ante un cambio climático real. Es por ello que el amaranto tiene un gran potencial alimentario, primero, por sus condiciones agronómicas favorables y, segundo, por sus beneficios para la salud, como la disminución del índice glucémico, el cual puede ayudar a contrarrestar los efectos de las enfermedades crónicas relevantes en México y en el mundo. Sin embargo, las alternativas de uso son muy pocas y su consumo real aún no se consolida para su buen aprovechamiento, por ello, es necesario buscar alternativas que promueva la comercialización, revaloración y fortalecimiento alimentario del amaranto como

parte importante de una dieta sostenible en México (Thakur & Kumar, 2019; Jimoh et al., 2018; Martínez Salvador, 2016).

1.2 HIPÓTESIS

La pasta elaborada a partir de harina de amaranto germinado tiene un efecto significativo en la disminución del índice glucémico, además de que cuenta con una buena aceptabilidad sensorial y un alto grado de valor nutricional.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una pasta proveniente de una harina de semilla de amaranto germinado (*Amaranthus hypochondriacus*) y evaluar su calidad nutricional e índice glucémico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir las condiciones óptimas de germinación de semillas de amaranto, al contrastar el rendimiento de la germinación con el crecimiento de la plántula.
- Analizar las propiedades tecnológicas de la harina obtenida a partir del amaranto germinado para seleccionar las mejores condiciones de molienda y tamizado en la elaboración de una pasta.
- Establecer diferentes formulaciones de pasta de amaranto germinado con sémola de trigo y determinar el desempeño de la pasta a partir de pruebas de apariencia y de calidad culinaria.
- Realizar la evaluación sensorial de la pasta, valorándola por medio de un panel de consumidores.
- Evaluar el valor nutritivo de la pasta seleccionada a través de la caracterización de parámetros nutricionales por medio de análisis proximales.
- Determinar la carga y el índice glucémico de la pasta de amaranto germinado.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, se reconocen globalmente 80 especies dentro del género *Amaranthus*, aunque únicamente tres especies (*Amaranthus hypochondriacus*, *Amaranthus cruentus* y *Amaranthus caudatus*) son prevalentes en el consumo y la comercialización, gracias al significativo rendimiento de sus semillas. De estas especies, el *Amaranthus hypochondriacus*, de origen mexicano, destaca por su contenido elevado de fibra y almidón, así como por su bajo contenido de grasas.

El *Amaranthus hypochondriacus* cuenta con importantes características propias del género, como son: el alto contenido en proteínas de buena calidad (presencia de aminoácidos como lisina y metionina), minerales (calcio, hierro, magnesio, fósforo, zinc, cobre y manganeso), vitaminas (tiamina, niacina, riboflavina y piridoxina), compuestos fenólicos, flavonoides, presencia de escualeno y ácidos grasos poliinsaturados, confiriéndole un estatus alimenticio de considerable valor nutricional en comparación con otros pseudocereales y cereales.

Adicionalmente, el consumo de *Amaranthus hypochondriacus* ha demostrado efectos positivos en la salud, tales como la reducción de los niveles de glucosa en sangre postprandial debido a su bajo índice glucémico. Su contenido de fibra y almidón favorece una digestión gradual y completa de nutrientes, contribuyendo a la sensación prolongada de saciedad. Dada la prevalencia de enfermedades crónicas en nuestro país, su incorporación en la dieta no solo promovería una sensación prolongada de saciedad, sino que también podría ayudar en la prevención de condiciones como la diabetes y obesidad, problemas de salud que han experimentado un aumento sostenido, no solo en México, sino a nivel mundial.

A pesar de su destacado valor nutricional, existen procesos que podrían potenciar aún más la composición y características reológicas de las semillas de amaranto, siendo la germinación un área de investigación de gran relevancia. El método de germinación de semillas ha ganado importancia en diversos cereales, pseudocereales y leguminosas, ya que mejora sus propiedades nutricionales al descomponer carbohidratos, proteínas y lípidos, lo que genera un incremento en azúcares simples, aminoácidos libres y ácidos grasos insaturados, ya que los hace

biodisponibles. Además, este proceso contribuye a la disminución de antinutrientes presentes en las semillas, lo que brinda un mayor valor nutricional para la elaboración de productos alimenticios. Aunque existe poca información sobre el germinado de semillas de amaranto, este proceso representa una oportunidad significativa en el ámbito de la investigación para el perfeccionamiento de este pseudocereal.

Debido a que la germinación implica una serie de reacciones enzimáticas, las condiciones no controladas pueden afectar negativamente las propiedades tecnológicas de la harina para su uso en la elaboración de pasta, lo que convierte el uso de amaranto germinado en un desafío adicional. Por tanto, es imperativo considerar los factores que inciden en la actividad enzimática durante el proceso de germinación de semillas destinadas a la producción de productos alimenticios.

En el contexto actual, caracterizado por un ritmo de vida acelerado, la demanda de productos prácticos y saciantes que promuevan la salud, está en constante aumento. Aunque el amaranto se perfila como una opción idónea, la escasa diversidad de productos desarrollados con amaranto, principalmente enfocados en alimentos dulces, plantea un desafío para aquellos que buscan alternativas saludables, especialmente para individuos con diabetes u obesidad. Por lo tanto, la concepción de una pasta a partir de harina de amaranto germinado emerge como una propuesta prometedora para satisfacer las necesidades del consumidor moderno.

La limitada información existente sobre el germinado de semillas de amaranto, así como la carencia de productos innovadores, constituyen puntos centrales en esta investigación destinada a desarrollar un producto salado, de preparación sencilla, con capacidad saciante, vida útil prolongada y, sobre todo, un elevado contenido nutricional que contribuya a prevenir enfermedades asociadas a problemas de sobrepeso y diabetes. La creación de una pasta basada en harina de amaranto germinado se posiciona como una solución integral que satisface estas necesidades específicas.

1.5 ANTECEDENTES

En la región de Mesoamérica, previo a la conquista, el amaranto tuvo un estatus similar al maíz y al frijol, y desempeñó un papel integral como componente culinario, recurso medicinal, medio de intercambio comercial, e incluso como artículo religioso en ceremonias destacadas. No obstante, durante el periodo de colonización, los europeos prohibieron el cultivo de amaranto en virtud de las connotaciones religiosas atribuidas por las culturas mesoamericanas a esta semilla (Martínez Salvador, 2016).

Lamentablemente, desde aquel entonces se experimentó una disminución en el consumo de amaranto, y no fue sino hasta el año 1970 que este cultivo volvió a adquirir relevancia. A partir de ese año se redescubrieron las propiedades de este pseudocereal, entre las cuales destacan especialmente sus proteínas de alta calidad, así como las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón. Este hallazgo condujo a un renovado impulso en la promoción de su cultivo, posicionando nuevamente al amaranto como una opción económica y nutricional (Arendt & Zannini, 2013; Bojórquez-Velázquez et al., 2018; D'Amico & Schoenlechner, 2017).

En la actualidad, la producción de amaranto se centra predominantemente en la elaboración de productos como galletas, natillas, panes, barras de cereal, dulces, botanas, pasteles, panqueques, sopas, aderezos, tortillas, harinas y bebidas. Este enfoque diversificado en aplicaciones alimentarias refleja la versatilidad del amaranto como ingrediente, contribuyendo así a su integración en diversas categorías de productos alimenticios (Iftikhar & Khan, 2019; Jimoh et al., 2018; Martínez Salvador, 2016; Martinez-Lopez et al., 2020).





El amaranto ha adquirido reconocimiento como un alimento nutracéutico y funcional, que destaca por su excepcional calidad proteica y composición nutricional. Este reconocimiento se ha visto respaldado por avances tecnológicos que han contribuido significativamente a optimizar la extracción y aprovechamiento de los componentes saludables en el amaranto (Yi et al., 2022).

Además de los métodos tradicionales como la molienda, reventado y tostado del amaranto, se han desarrollado técnicas como el germinado, la fermentación de masa madre, la extrusión, el horneado no convencional, la micronización, el tratamiento térmico, el plasma frío atmosférico, la alta presión y la aplicación de ultrasonido. Estas metodologías no solo diversifican las formas de procesamiento, sino que también contribuyen al mejoramiento de la funcionalidad inherente a este pseudocereal (Dapčević-Hadnađev et al., 2022).

La inclusión de la germinación de semillas de amaranto en los procesos de producción ha demostrado mejoras notables en las propiedades tanto sensoriales como reológicas de los productos. Un estudio comparativo entre galletas de harina de amaranto germinado, harina de amaranto y harina de trigo, destacó estas mejoras (Chauhan et al., 2015). Otro estudio señaló un aumento en la aceptabilidad de las propiedades reológicas al utilizar harina de amaranto germinado (Guardianelli et al., 2019). Además, se observó una mayor estabilidad oxidativa en purés para bebés, junto con un incremento en ácidos grasos que aportan beneficios durante el proceso de germinación (Jiménez et al., 2020). La germinación también ha demostrado que puede mejorar las características de horneado y la calidad tecnofuncional en productos de panificación (Guardianelli et al., 2022). Estos hallazgos resaltan los beneficios de la germinación de amaranto en diversos aspectos culinarios y nutricionales.

Hasta ahora, no se ha documentado el desarrollo de pastas con amaranto germinado. En contraste, se han empleado métodos avanzados, como la extracción o el uso de almidón modificado de harina de amaranto en concentraciones de hasta el 100%. Sin embargo, es importante señalar que, al prescindir de estas técnicas más complejas, el uso de harina de amaranto en proporciones significativas puede generar modificaciones en la textura y el sabor del producto final (Tabla 1).

Tabla 1. Investigaciones de pastas elaboradas a base de harina de amaranto (2016 - 2024)

Publicación	Composición	Propiedades tecnológicas	Propiedades sensoriales	Observaciones	Referencia
Pasta alternativa libre de gluten para pacientes celiacos	Amaranto 14 % , maíz 49 % y arroz 32 %, carboximetil-celulosa 0.3%, monoglicéridos 0.5 % y albúmina de huevo 5%	Se evaluaron características físicas como sedimentación y grado de absorción	Tuvo una aceptación y agrado bajo al compararlo con la marca comercial	Se evaluó otra pasta sin amaranto, con una mayor aceptación sensorial y contenido proteico (14 %)	Vázquez-Mata et al., 2024
Pasta de amaranto para veganos	Amaranto 15 % , 30% y 50 % , mezclado con trigo serraceno o avena y plátano en polvo (aglutinante)	Menciona pruebas nutricionales con hasta un 50 % de amaranto	El color de la pasta es morado intenso 	Se utiliza un extractor PCE L–Serie	Beitane et al., 2023
Pastas frescas elaboradas con amaranto	100 % de granos de amaranto molidos, agua y alginato de sodio 1.5%	En la proporción 1:6 amaranto:agua durante la cocción no hubo pérdida de calidad debido a la absorción de agua, pérdida de cocción e índice de hinchamiento	Pasta color marrón amarillento, que fueron aceptables. También la pasta mostró buena firmeza. 	El proceso de pasta implicó gelatinización del almidón, extrucción, inmersión en L-lactato pentahidrato de calcio 0.1 M y formación de gel	Lux et al., 2023
Preparación de pasta funcional con amaranto pregelatinizado harina extruida	Harina de amaranto como suplementación del 50% de sémola	La pérdida por cocción aumentó a 9.2 g/100 g, y la absorción de agua mostró una marcada reducción de 80–84%.	La harina de amaranto gelatinizada imitó la textura de la pasta de sémola, pero deterioró la textura de la pasta cocida al aumentar la dureza y reducir la cohesividad	Se recomienda mezclar una cantidad mínima de polisacáridos para obtener pasta con el estado fisicoquímico y textural	Bello-Pérez et al., 2022
Pasta tipo espagueti a partir de orujo de uva y amaranto	Harina de amaranto: harina de orujo (40:60), harina de trigo, huevo y sal	Menciona mayor aportación proteínico con amaranto al 40 %	Se observa pasta moteada y oscura 	Recomienda realizar evaluación sensorial	Rodríguez-Zúñiga et al., 2021
Pasta de espagueti optimizada a partir de amaranto	Harina de amaranto (57%) , sésamo desengrasado (31%) y almidón de sorgo modificado (12%)	Los resultados demostraron viabilidad de desarrollar pasta de espagueti	Arrojó un índice de apariencia del 96.65%, sabor del 94.57% e índice de aceptabilidad 97.37% en relación al control	El almidón innato fue modificado mediante tratamiento con calor y humedad	Fasuan et al., 2021
Pasta de amaranto para celiacos	Harina de amaranto (32%), almidón de maíz (8%), almidón de tapioca (9%) con carboximetil celulosa y almidón pregelatinizado	Los valores de absorción de agua fueron altos (68.2 – 74.4%). Las masas fueron débiles con un tiempo de estabilidad ≤ 3 min	La pasta cocida se describió como amarilla por su intensidad de color, suave al tacto y ligeramente adhesiva al masticar. La aceptabilidad recibió una puntuación de 4.7/9.0	Un aumento amaranto, ocasiona pérdida de firmeza y textura con una sensación demasiado blanda al masticar	García-Caldera 2019
Espaguetis a partir de harina de amaranto y pulpa de papa	Harina de amaranto (25%) , pulpa de papa seca (65%) y pulpa de papa extrusionada (10%), 18.8 mL de agua y 56 g de huevo fresco por 100 g de mezcla	Aumento de masa de un 73% y pérdida de sólidos menor a 70%, contribuyendo a un mayor rendimiento después de la cocción que la harina de trigo	Alta aceptación sensorial y calidad visual 	La papa extrusionada mejora la fluidez de la pasta a través de la extrusora, lo que da una matriz más estable	Bastos et al., 2016

La germinación del amaranto surge como una alternativa atractiva, fácil y económica para explorar. A pesar de las investigaciones revisadas, no se ha explorado plenamente esta vía para la elaboración de pastas. Al optar por la germinación, se abre la posibilidad de obtener beneficios nutricionales sin recurrir a procesos complicados. Además, este enfoque puede conservar la integridad sensorial del producto, lo que abre una oportunidad a la creación de pastas que no solo sean saludables sino también apetecibles para el consumidor (Chauhan et al., 2015).

En el contexto actual del mercado de pastas para sopa en México, donde la sémola de trigo duro es el ingrediente principal en la mayoría de las opciones, se vislumbra una oportunidad innovadora. De las 52 pastas disponibles, ninguna incorpora harina de amaranto germinado, a pesar de los beneficios mencionados. Diez de ellas están enriquecidas con vitaminas y/o minerales, y seis contienen vegetales (PROFECO, 2017). La falta de opciones comerciales que utilicen harina de amaranto germinado subraya una oportunidad para la creación de pastas innovadoras que ofrezcan, no solo variedad, sino también beneficios nutricionales adicionales a los consumidores. Este vacío en el mercado crea un terreno propicio para la introducción de pastas elaboradas a partir de harina de amaranto germinado, una alternativa que, según las investigaciones existentes, pueden brindar innovación y beneficios significativos para la salud de los mexicanos.

1.6 MARCO TEÓRICO

1.6.1 Amaranto

1.6.1.1 Aspectos generales

El amaranto pertenece al orden Caryophyllales, de la familia del amaranto *Amaranthaceae*, subfamilia *Amaranthoideae* y género *Amaranthus*, que comprende 70 especies en todo el mundo, la mayoría de ellas nativas de América y 30 especies provenientes de Europa, Asia, África y Australia.

El amaranto se cultiva anualmente en agroecosistemas del centro y sur de México, y es un cultivo prometedor debido a su valor nutritivo y su potencial en el mercado. El amaranto se posiciona como una fuente de proteínas vegetales, especialmente en condiciones de temporal, que supera en rendimientos a otros cultivos en circunstancias similares. El rendimiento nacional alcanza un promedio de una tonelada por hectárea en estados como Puebla, Morelos, Estado de México, Ciudad de México, Tlaxcala, Oaxaca, Jalisco y Querétaro, que son los principales productores en México (Acosta et al., 2014).

En la actualidad hay tres especies de amaranto que destacan por sus inflorescencias con muchas semillas, estos son *A. cruentus* L., *A. caudatus* L. y *A. hypochondriacus* L. (Figura 1) y son utilizadas en la elaboración de harinas, ensaladas de hojas frescas, alimento para animales y extractos de colorante rojo (Espitia et al., 2010).



Figura 1. Planta de *Amaranthus hypochondriacus* (Espitia et al., 2010)

La familia Amaranthaceae ha experimentado una evolución positiva muy notable en entornos caracterizados por altas temperaturas, escasez de agua y suelos con altos niveles de salinidad. Este contexto ha propiciado el desarrollo de adaptaciones anatómicas y fisiológicas específicas que les permiten sobrevivir y prosperar en tales condiciones. Entre estas adaptaciones se incluye la presencia de tricomas globuliformes que funcionan como estructuras de secreción externa, lo cual contribuye a la eliminación de sales en exceso presentes en el suelo. Asimismo, se ha observado una cutícula gruesa en estas plantas y, en algunas especies, la presencia de espinas. Un aspecto relevante es la adopción de la vía metabólica C4 para la fijación del carbono atmosférico, característica que se ha identificado en la planta de amaranto, miembro destacado de esta familia (Espitia et al., 2010).

Esta estrategia fotosintética C4, presente en el amaranto, implica una concentración selectiva de la captación de dióxido de carbono en células específicas, lo que reduce la pérdida de agua por transpiración y mejora su adaptación a condiciones de alta luminosidad y temperaturas elevadas. Como resultado, la planta exhibe una alta eficiencia en la captación de radiación solar y una notoria capacidad de adaptación a diversos entornos climáticos (Raya Pérez et al., 2018).

Además de sus adaptaciones morfológicas y fisiológicas, la característica metabólica C4 del amaranto le confiere una notable capacidad para resistir la sequía y repeler el ataque de insectos. No menos importante es el reconocimiento de las semillas de amaranto por su contenido proteico significativo, lo que las convierte en una buena fuente de nutrición. El papel crucial de la concentración de clorofila en la fotosíntesis del amaranto ha sido objeto de investigación, lo que resalta la importancia de mantener niveles adecuados de este pigmento para garantizar la eficiencia fotosintética y, por ende, el rendimiento de grano de la planta (Rangel et al., 2021).

1.6.1.2 Usos y consumo

El amaranto se incorpora a productos de panificación como galletas, panqués, pasteles, pan nortño y pan blanco, ya sea en forma de harina blanca refinada o harina integral. Su presencia en estas preparaciones mejora la calidad y sabor de los panes, incluso con niveles de sustitución tan bajos como el 10%. La versatilidad del amaranto se refleja en su uso en una gran diversidad de productos, como sopas, cereales para desayuno, bollos, crepas, tostadas, tortillas, frituras, galletas, empanadas, pastas, botanas, bebidas y confitería.

En las principales zonas productoras de amaranto en Valles Altos de México, el grano se utiliza para elaborar productos locales como la "alegría", palanquetas, galletas, cereal, granola, pulque, harinas, frituras, flan, mazapán, malteadas y salsas instantáneas. Además, forma parte de la dieta diaria de la población en lugares como la Ciudad de México y el estado de Puebla, donde se utiliza en guisados, licuados, agua, atoles, tamales, chiles rellenos, salsa, pastel, croquetas de verdura con amaranto y cereal, entre otros alimentos.

Aunque existen diversas formas de consumir amaranto, se sugiere que su máximo provecho nutritivo se obtiene al emplearlo en productos elaborados con un 100% con amaranto (Bojórquez-Velázquez et al., 2018; D'Amico & Schoenlechner, 2017; Rangel et al., 2010).

A pesar de que el amaranto posee un alto valor nutricional, su explotación ha sido limitada debido a la escasa diversidad de productos disponibles en el mercado. Sin embargo, en la actualidad, se ha visto en el amaranto un aumento en su popularidad, impulsado por su destacado valor nutritivo. Este resurgimiento se debe en parte a la adaptabilidad del cultivo a condiciones adversas y a las propiedades nutricionales de sus semillas. Esta versatilidad ha propiciado su utilización en una variedad de aplicaciones, mismas que abarcan desde la alimentación humana y animal hasta la industria, la medicina y la ornamentación (Iftikhar & Khan, 2019; Martínez Salvador, n.d.; Martínez-López et al., 2020a, 2020b; Moyer et al., 2022).

1.6.1.3 Estructura de la semilla

Los granos de amaranto son semillas pequeñas de 1.0 mm a 1.35 mm de diámetro, de forma lenticular. El color varía desde el blanco hueso hasta beige, marrón, rojo, pardo o negro, que dependerá de la especie y su morfología (Singh et al., 2011).

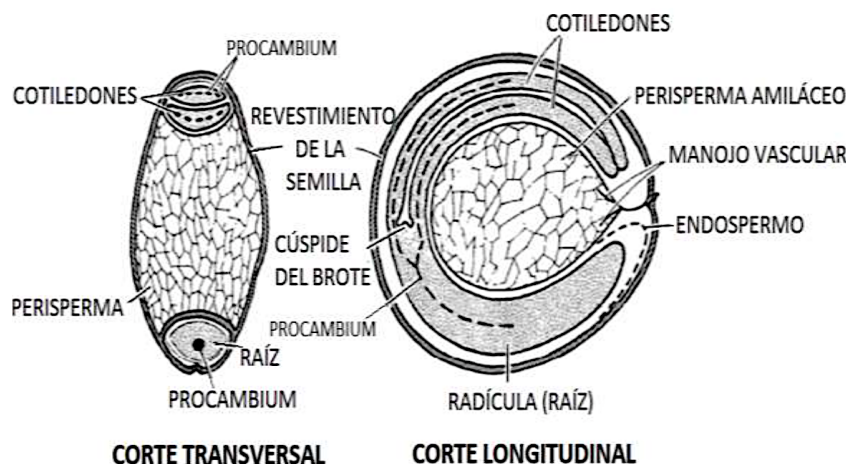


Figura 2. Ilustración de un corte transversal y longitudinal de la semilla de amaranto. Fuente: <https://docplayer.es/213609836-Benemerita-universidad-autonoma-de-puebla.html> (2023).

La estructura del grano de amaranto se compone de varias capas distintas, con una función esencial en la composición y funcionalidad de la semilla (Figura 2). En primera instancia, encontramos el epicarpio, pericarpio o revestimiento de la semilla, una fina capa única que la envuelve y contiene el pigmento responsable de su color. Esta capa exterior es rica en calcio y magnesio, y aproximadamente el 60% de las cenizas se concentran en esta capa y en la fracción del germen.

El endocarpio, también conocido como germen o embrión, que rodea el perispermo de manera circular, conforma aproximadamente un 25% del peso total del grano. Las células del parénquima del embrión albergan cuerpos proteicos con dimensiones que oscilan entre 3 y 5 μm de diámetro.

En el núcleo de la semilla se localiza el perispermo, una delgada capa del parénquima celular o capa de aleurona. Aunque está firmemente unida a la envoltura de la semilla, puede separarse por abrasión. Su componente principal es el almidón y constituye la mayor proporción de carbohidratos en la semilla de amaranto, principalmente compuesto por amilopectina y un reducido porcentaje de amilosa (entre 5 y 7 %). Finalmente, el endospermo contiene los cuerpos proteicos, caracterizados por un diámetro que varía entre 1.5 y 2.4 μm , según lo indicado por Singh et al. (2011).

1.6.1.4 Composición química de la semilla

El grano de amaranto, catalogado como un pseudocereal, presenta una composición química que se compara con la de los cereales, que incluyen aspectos como proteínas, lípidos, carbohidratos y minerales. Este grano se destaca por contener fibra, minerales esenciales como calcio, fósforo, hierro, zinc, así como vitaminas A, B, C y E. Además, se reconoce por la presencia de tocotrienoles, conocidos por inhibir la síntesis de colesterol, y escualeno. En términos de contenido mineral, el amaranto exhibe cantidades superiores de fósforo, potasio y calcio en comparación con los cereales, aunque el perfil vitamínico se mantiene generalmente similar (Rastogi et al., 2013).

Las semillas de amaranto son conocidas por ser una rica fuente de nutrientes como el almidón (58–66 %), proteínas (13–19 %) de alta calidad nutricional debido a su equilibrio adecuado de aminoácidos esenciales, fibra dietética (14–16 %), lípidos (5–13 %), y una variedad de minerales como calcio, magnesio, hierro, potasio y zinc. Además, son ricas en vitaminas del complejo B, compuestos fenólicos, antioxidantes y betacianinas (Guardianelli et al., 2019).

La Tabla 2 muestra la composición química del amaranto en comparación con otro pseudocereal como es la quinua.

Tabla 2. Composición nutricional de la harina de semillas de amaranto y quinua

Parámetro (%)	Amaranto	Quinua
Humedad	6.33 ± 0.1	4.56 ± 0.1
Proteína	17.54 ± 0.5	19.13 ± 0.6
Lípidos	6.99 ± 0.2	8.76 ± 0.4
Cenizas	2.07 ± 0.0	1.82 ± 0.0
Fibra dietética insoluble	23.07 ± 1.5	23.81 ± 0.5
Fibra dietética soluble	3.17 ± 0.4	4.45 ± 0.9
Fibra dietética total	26.24 ± 1.1	28.26 ± 0.4
Fenólicos (mgGAE/g)	10.51 ± 0.6	11.05 ± 1.0

(Verma et al., 2019)

El análisis de la calidad nutricional de la harina de semillas de amaranto y quinua en este estudio revela que ambas son excelentes fuentes de proteínas (17.54 % y 19.13 %), grasas (6.99 % y 8.76 %) y fibra dietética (26.24 % y 28.26 %). No obstante, es relevante destacar que, en términos comparativos, la harina de semillas de quinua exhibe valores más altos en estos componentes, aunque algunas investigaciones previas han señalado que el amaranto puede superar a la quinua en términos de contenido proteico (Verma et al., 2019).

Adicionalmente, investigaciones anteriores han destacado que los pseudocereales, como el amaranto y la quinua, contienen diversos componentes bioactivos, tales como saponinas, fitoesteroles, escualeno, fagopiritoles y polifenoles. Estos resultados enfatizan la abundancia nutricional en ambos pseudocereales, al tiempo que sugieren que, en ciertos aspectos, el amaranto podría ofrecer ventajas nutricionales comparativas sobre la quinua y también el potencial de aportar beneficios en aplicaciones alimenticias y de salud (Coelho et al., 2022).

A. Carbohidratos

El amaranto presenta un contenido de carbohidratos del 63 %, equiparable al de los cereales, y constituye aproximadamente el 71 % de su grano, siendo el almidón el componente preponderante en un rango de 65-75. La fracción de azúcares (la cual incluye sacarosa, rafinosa, estaquiosa, maltosa e inositol) destaca en el perfil carbohidrato del amaranto, con los dos últimos en proporciones reducidas. La constitución del almidón de amaranto, compuesto principalmente por amilopectina, influye en la liberación gradual y absorción de glucosa en el organismo, lo que previene aumentos postprandiales rápidos de glucosa sanguínea. Comparado con el trigo, el amaranto muestra una notable menor presencia de amilosa, lo cual resulta en propiedades fisicoquímicas distintivas (Serrano et al., 2021).

B. Fibra dietaria

El amaranto presenta un contenido de fibra dietética en la semilla completa que varía entre el 8 % y el 16 %, siendo aproximadamente el 33-44 % de esta fibra de naturaleza soluble. Un análisis de la composición de la fibra insoluble en el grano de amaranto reveló la presencia de glucosa (57 %), arabinosa (22 %), xilosa (9 %), rafinosa (4 %), manosa (2 %) y fructosa (1 %) (Lamothe et al., 2005).

El contenido de lignina en el amaranto es alrededor del 5 %, lo que posiblemente contribuye a una mayor proporción de fibra soluble en comparación con los cereales. Además, la composición de monosacáridos en el amaranto indica que la fibra dietética insoluble carece de xilanos (presentes en los cereales) y se asemeja más a la fibra de tejidos de frutas, verduras, legumbres y semillas. Es importante señalar que, a diferencia de los tejidos hidratados de frutas y verduras, la fibra dietética en las semillas de pseudocereales, como el amaranto, tiende a deshidratarse. Esta riqueza de fibra ha llevado a recomendaciones de consumo de amaranto para personas con diabetes mellitus, ya que se sugiere que puede contribuir a la regulación del azúcar en la sangre (Daniel et al., 2017).

C. Proteínas

El amaranto presenta un alto valor nutricional, especialmente en cuanto a su contenido proteico que oscila entre el 15 % y el 17 %, lo cual ofrece un excelente equilibrio de aminoácidos. Las proteínas en el amaranto se componen principalmente de albúminas, que representa aproximadamente entre el 49 % y el 65 % del total, seguidas en abundancia por las glutelinas (22.4 % - 42.3 %), globulinas (13.7 % - 18.1 %) y prolaminas (1.0 % - 3.2 %). Algunas de las actividades biológicas de estas proteínas incluyen la capacidad para reducir los niveles de colesterol, como se observa con la ingestión de sus semillas o productos extrudidos (Carrillo Terán et al., 2015).

D. Lípidos

El amaranto se destaca por ser un importante fuente de lípidos, con un contenido que varía entre el 5 % y el 9 % (por encima de los cereales), situándose por debajo de la soya, siendo su mayor concentración en el germen de la semilla de amaranto. La fracción lipídica del grano de amaranto abarca una diversidad de componentes, incluyendo triacilglicéridos, diacilglicéridos, monoacilglicéridos, ácidos grasos, fosfolípidos, escualeno, fitoesteroles y tocoferoles (Ogrodowska et al., 2014).

Adicionalmente, el amaranto presenta un contenido lipídico significativo que oscila entre el 6 % y el 8 %. Las semillas albergan triacilgliceroles, fosfolípidos y vitaminas liposolubles, destacando los tocoferoles como elementos principales de la fracción lipofílica. Los ácidos grasos predominantes en las semillas de amaranto son el palmítico, oléico, linoléico (esencial) y esteárico. Además, el amaranto se distingue por ser una fuente rica de escualeno y tocoles como el α -tocoferol, β -tocotrienol y γ -tocotrienol. Se ha observado la presencia de fitosteroles, ceras y alcoholes terpénicos en diferentes especies de amaranto, aunque en proporciones menores (Venskutonis et al., 2013).

E. Vitaminas y minerales

El amaranto es una fuente rica en diversas vitaminas, como las del complejo B (vitamina B6, riboflavina y folato), vitamina C y β -caroteno, además de que contiene varios minerales esenciales, tales como calcio, fósforo, hierro, magnesio, potasio, cobre, zinc y manganeso. Este pseudocereal exhibe concentraciones minerales superiores a las presentes en los cereales convencionales e incluso superiores a las encontradas en la leche materna, con valores notables como 162 mg/100 g de calcio, 455 mg/100 g de fósforo y 10 mg/100 g de hierro. Su consumo como fuente única de alimento puede proporcionar una parte de la ingesta diaria recomendada de micronutrientes esenciales (Gabriel Matías et al., 2018).

1.6.2 Germinación

La práctica de la germinación de semillas, arraigada desde hace tiempo, ha ganado notable popularidad, especialmente en países del Este. En la década de 1980, las semillas germinadas experimentaron un auge que ha continuado en ascenso en los últimos años, no solo por ser un proceso sencillo y rentable, sino también por su capacidad para mejorar la calidad nutricional.

La germinación ha demostrado aumentar la actividad enzimática, con la hidrólisis del almidón, la degradación de proteínas y un incremento en la proporción de fibra insoluble. Este proceso conlleva a la disminución de fitatos y lípidos, mejora la biodisponibilidad de minerales como fósforo, calcio, magnesio, hierro, manganeso, cobre y zinc, además de incrementar la presencia de ácidos fenólicos, vitaminas y almidón resistente (Benincasa et al., 2019; Dapčević-Hadnađev et al., 2022; Thakur et al., 2021; Thakur & Kumar, 2019).

Durante la germinación se producen cambios bioquímicos significativos mediados por la activación de enzimas hidrolíticas clave como la α -amilasa, β -amilasa y proteasas. Estas enzimas descomponen el almidón en azúcares y las proteínas en péptidos solubles y aminoácidos, lo que da al producto propiedades nutricionales, fisicoquímicas y funcionales mejoradas (Cornejo et al., 2019; Chauhan et al., 2022).

En la actualidad, existe un creciente interés en la aplicación de la germinación controlada de semillas para mejorar la calidad nutricional y el perfil sensorial de los alimentos, así como para aumentar la digestibilidad de las proteínas, lo que promueve su aprovechamiento en la industria alimentaria (Guardianelli et al., 2019).

1.6.2.1 Proceso de germinación

Durante el desarrollo de su fase germinativa, se ha constatado la movilización de reservas de almidón, una mayor digestibilidad de las proteínas, alteraciones en la composición de aminoácidos, la hidrólisis de triacilglicéridos con un aumento en la proporción de ácidos grasos saturados y/o insaturados, y una disminución de factores antinutricionales como fitatos y taninos. De manera simultánea, se produce un incremento en la presencia de compuestos bioactivos como fenoles, fitoesteroles, folatos y ácido gamma aminobutírico (GABA). Todo esto confiere a los granos germinados un perfil nutricional mejorado, con nutrientes biodisponibles y elevadas concentraciones de antioxidantes, estableciéndolos así en la categoría de "alimentos funcionales" (Benincasa et al., 2019).

El proceso de germinación, como se ha documentado en diversos granos, exhibe un flujo dinámico y complejo de nutrientes y fitoquímicos durante su desarrollo, que abarca la movilización, degradación y acumulación de sustancias nutritivas (Paucar-Menancho et al., 2017). Este proceso, marcado por la reactivación de la actividad metabólica y el crecimiento activo de los tejidos del embrión, culmina con la ruptura de la cubierta de la semilla y el surgimiento de una plántula, dividiéndose en tres fases fundamentales (Martínez-Núñez et al., 2019; Ishrat et al., 2023).

A. Absorción de agua

La fase inicial del proceso involucra la absorción de agua mediante imbibición. Durante este período, los diversos tejidos que conforman la semilla experimentan una absorción intensiva de agua. Este fenómeno, combinado con un incremento proporcional en la actividad respiratoria, ocasiona el hinchamiento de la semilla y, eventualmente, su ruptura final de la testa. La cantidad de agua que la semilla absorbe está directamente relacionada con factores como su tamaño, la

permeabilidad de la cubierta, la cantidad y disponibilidad de agua, y la composición química (Martínez-Núñez et al., 2019; Ishrat et al., 2023).

B. Actividad metabólica

En la segunda etapa, se inicia la actividad enzimática y el metabolismo respiratorio, que desencadena la translocación y asimilación de las reservas alimentarias en las regiones de crecimiento del embrión. Las semillas almacenan compuestos de reserva, como glúcidos, proteínas y lípidos, y su movilización durante la germinación es un proceso vital que garantiza la supervivencia de la semilla hasta que la plántula alcanza un desarrollo suficiente para realizar la fotosíntesis. Durante esta fase, se observa un aumento en los niveles de metabolitos intermedios y enzimas asociadas con la producción de energía, particularmente en el ciclo de los ácidos tricarbónicos, evidenciado por el incremento en la velocidad de intercambio gaseoso. La absorción de agua disminuye considerablemente e incluso llega a detenerse. La hidrólisis previa del almidón es esencial para obtener la energía necesaria para activar el metabolismo. El proceso se inicia con la liberación de giberelinas por parte del embrión, las cuales inducen la síntesis de enzimas glucolíticas y proteolíticas. La movilización de proteínas proporciona a la semilla aminoácidos, que se convierten en la fuente de energía necesaria en casos de deficiencia de glúcidos (Martínez-Núñez et al., 2019; Ishrat et al., 2023).

C. Crecimiento y división celular

El crecimiento y la división celular son las etapas finales que dan lugar a la aparición de la radícula y, posteriormente, de la plúmula. En la mayoría de las semillas, el agua penetra inicialmente a través del micrópilo, y el primer signo de una germinación es la salida de la radícula (Martínez-Núñez et al., 2019; Ishrat et al., 2023).

1.6.2.2 Factores que influyen en la germinación

El proceso de germinación se ve influenciado por diversos factores (Tabla 3), tanto internas como externas, mismas que llegan a impactar en la viabilidad o en el período en el cual las semillas mantienen su capacidad para germinar.

Tabla 3. Condiciones que afectan la germinación de la semilla de amaranto (2014 - 2024)

Factor	Condición	Resultados	Autor
Remojo y tiempo de germinación	Remojo de 0 - 6 h y germinación de 12 a 72 h	Un remojo de 120 minutos alcanzó una humedad del 41%, necesaria para la activación de enzimas, y se mantuvo estable hasta los 200 minutos. Se observó que la germinación (21–27 °C en poca luz) a las 12 h aumentó el contenido de cenizas, a las 24 h disminuyó el contenido de extracto etéreo, y a las 72 h incrementó el contenido proteico.	Gutiérrez-Cortez <i>et al.</i> , 2024
Temperatura y efecto de luz	De 10 a 30 °C en oscuridad o luz	En oscuridad, la población dos (PL2) germinó mejor a 30°C, PL3 a 25°C, y PL1 tuvo mejor germinación en condiciones de luz tanto a 25°C como a 30°C.	Safavi <i>et al.</i> , 2023
Remojo	7 h	Incrementó significativamente los minerales (excepto el hierro), ácidos grasos (ácido oleico y ácido linoleico), algunos aminoácidos y redujo significativamente los factores antinutricionales (taninos y ácido fítico) del amaranto	Chauhan <i>et al.</i> , 2022
Remojo	Durante 12-18 h	Reducción de componentes antinutricionales, como los inhibidores de enzimas proteolíticas y el ácido fítico, que se solubilizan parcial o totalmente en el agua de remojo	Thakur <i>et al.</i> , 2021
Tiempo de germinación	72 h	Disminución de humedad del 5.04 %, hidrólisis de grasas, aumento del 74.67% en el contenido de fibra y 85% para fibra cruda. Aumento de proteínas (7.01%), de actividad α -amilasa y proteasa, disminución del contenido de almidón, aumento de azúcares simples, aumento de componentes peptídicos y disminución del 29.57 % de ácido fítico	Thakur <i>et al.</i> , 2021
Luz	En presencia de luz y oscuridad por un total de 78 h a 30 °C	Los compuestos fitoquímicos aumentaron significativamente en los granos de amaranto durante la germinación seguida de hidrólisis enzimática secuencial para la semilla de amaranto	Sandoval <i>et al.</i> 2020
Tiempo de germinación	24 h	A las 24 h de germinación se producen cambios favorables en las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del amaranto	Cornejo <i>et al.</i> , 2019
Tiempo de germinación	48 h y 72 h	Un aumento en las temperaturas de gelatinización en el amaranto conforme aumenta el tiempo germinación (48 h). El efecto sobre la temperatura de gelatinización se ha asociado a la actividad de α -amilasas, proteasas, contenido de azúcar, amilosa y proteínas	Cornejo <i>et al.</i> , 2019
Temperatura y tiempo de germinación	30°C, durante 18 y 24 h	La harina de amaranto germinadas durante 18 h a 30 °C presentó 50.4 % de almidón, 1.2 % de fructosa, 4.7 % de glucosa, 2.0 % de sacarosa, 14.6 % de proteína, 5.4 % de lípidos, 10.4% de fibra dietética total, 2.76% de ceniza y 8.8% de humedad	Guardianelli <i>et al.</i> 2019
Luz y tiempo de germinación	Germinación por 48 h en oscuridad	La germinación provocó disminución de lípidos, almidón digerible y un aumento de proteínas y de fibra soluble. También incrementó la retrogradación de las harinas, debido a las modificaciones estructurales que sufren los carbohidratos y las proteínas	Jiménez <i>et al.</i> , 2019
Tiempo de germinación	Se germinaron a tres tiempos (24, 36 y 48 h)	Aumento de la disponibilidad de proteínas del 8% después de 36 h de germinación a 26 °C y a los 22°C por 48 h y disminución del ácido fítico y oxalato. Aumento de taninos conforme aumenta la temperatura y el tiempo de germinación	Najdi-Hejazi, <i>et al.</i> , 2016
Temperatura y tiempo de germinación	30°C por 78 h	Mayor actividad antioxidante y contenido total de fenoles y flavonoides, proteínas y fibra dietética para la harina germinada de amaranto	Perales-Sánchez <i>et al.</i> , 2014
Tiempo de germinación	Periodo largo	Cuanto más largo es el período de germinación, mayor será la actividad diastática, más azúcares reductores y no reductores y menor la viscosidad. Al aumentar el tiempo de germinación habrá mayor producción de α -amilasa y una disminución de la viscosidad (más del 90%) del grano	Kanensi <i>et al.</i> , 2014

A. Genotipo y fuentes de semilla

La calidad nutricional de los granos se ve afectada por el estrés biótico, que incluye la presencia de patógenos y malezas en la planta, así como la escasez de nutrientes debida a diversas prácticas agronómicas o factores ambientales estresantes que afectan a los metabolitos secundarios en el campo. Esta situación puede resultar en la falta de nutrientes esenciales para las enzimas, lo que impide su actividad enzimática y, en última instancia, afecta el desarrollo de la plántula, lo que resulta en una disminución del valor nutricional de la harina (Benincasa et al., 2019).

B. Temperatura de germinación

La temperatura durante el proceso de germinación desempeña un papel crucial al activar las enzimas que conducen a la formación de subproductos, un proceso esencial para el desarrollo de la planta. Las bajas temperaturas tienden a ralentizar la actividad enzimática, mientras que las temperaturas elevadas pueden inactivarla. Generalmente, la temperatura óptima de germinación está estrechamente vinculada a la distribución ecológica de las semillas. Por ejemplo, las semillas de hábitats tropicales tienden a germinar de manera óptima a temperaturas superiores a 25 °C, mientras que aquellas originarias de regiones frías exhiben un mejor rendimiento a temperaturas más bajas, entre 5 °C y 15 °C. En el caso específico del amaranto, la temperatura ideal de germinación se sitúa en torno a los 21 °C. Además, sus condiciones climáticas preferidas son subhúmedas a secas, y puede tolerar niveles de humedad relativa del 4-6 % para su crecimiento (Benincasa et al., 2019).

C. Ciclos de luz/oscuridad

La influencia de la luz en el crecimiento y desarrollo de las plantas es un factor crucial, aun cuando no todas las semillas comparten los mismos requisitos lumínicos. La observación ha revelado que la mayoría de las semillas germinan de manera óptima en condiciones de oscuridad, y la presencia de luz puede incluso inhibir su proceso de germinación. No obstante, algunas semillas requieren luz para iniciar la germinación, pero una vez que han brotado como plántulas, todas dependen de la luz solar para su crecimiento.

En términos de contenido nutricional, se ha constatado que la germinación bajo condiciones de luz y oscuridad no afecta significativamente los niveles de proteínas, lípidos, cenizas y carbohidratos en las semillas germinadas. No obstante, se ha observado que la germinación en oscuridad mejora los efectos antioxidantes, lo cual tiene beneficios para la salud (Kanensi et al., 2014; Van Hung et al., 2020).

En el caso específico del amaranto, se ha informado que su periodo de germinación abarca de 6 a 8 días, lapso durante el cual puede desarrollarse en condiciones de oscuridad. Después de este periodo inicia la etapa de crecimiento, la cual requiere exposición a la luz para su desarrollo completo y que puede extenderse hasta 90 días para alcanzar la madurez (Benincasa et al., 2019).

D. Tiempo de remojo

A medida que la humedad en la semilla aumenta, se observa una reducción significativa en la germinación, que evidencia el deterioro causado por el contenido de humedad y tiene un impacto más pronunciado que la temperatura.

El exceso de agua representa un factor desfavorable para el proceso de germinación, ya que dificulta el acceso de oxígeno al embrión, disminuye la actividad enzimática y, en casos de alta humedad, puede limitar o incluso impedir la absorción de agua por parte de la semilla, lo que evita que se lleve a cabo la germinación (Perales-Sánchez et al., 2014).

E. Tiempo de germinación

Se sabe que prolongar el período de germinación conduce a una reducción en el contenido de almidón y viscosidad, ya que el almidón se descompone en azúcares. La actividad diastásica aumenta con la duración, lo que genera mayores cantidades de azúcares reductores y no reductores. Además, se ha observado un aumento en la actividad proteolítica, lo cual mejora la biodisponibilidad de proteínas, aunque también afecta la viscosidad. En el caso de los lípidos, su contenido disminuye debido a la prolongada acción de las lipasas (Kanensi et al., 2014).

1.6.3 Trigo

La planta y cereal conocido como trigo pertenecen a la familia de gramíneas, presenta una estructura caracterizada por tallos cilíndricos, generalmente huecos y con nódulos intercalados, de los cuales brotan hojas. Toda esta disposición constituye la familia *Triticum*. Se destacan dos grupos principales de trigo: el destinado a la panificación (*Triticum aestivum*) y el utilizado en la producción de pastas (*Triticum durum*). La composición proteica y la fuerza de grano de ambos influyen directamente en la calidad y textura de los productos finales. (Patil et al., 2024, Kroupin et al., 2023 y Ciudad-Mulero et al., 2021).

1.6.3.1 Estructura del grano

El grano de trigo, una estructura compleja con múltiples componentes, desempeña un papel fundamental en la alimentación humana y en la industria alimentaria. En el proceso de molienda, el grano se divide en tres regiones anatómicas principales: el salvado, el germen y el endosperma, cada uno con características únicas que influyen en su procesamiento y en la calidad nutricional de los productos derivados (De la Horra et al., 2012). (Ver Figura 3).

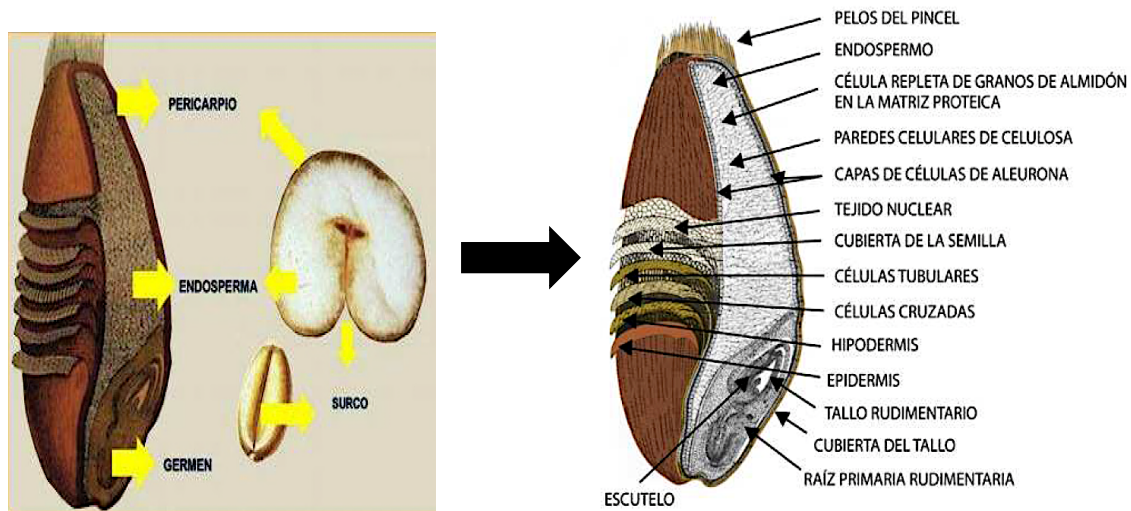


Figura 3. Estructura del grano del trigo (Fuente: Gallardo et al., 2016)

El salvado, que constituye alrededor del 14% del peso del grano, actúa como una capa protectora externa rica en fibra y minerales. Esta capa proporciona una calidad nutricional del grano de trigo. Por otro lado, el germen, que es el 3% del grano, es una reserva de lípidos y nutrientes esenciales, incluyendo proteínas, lípidos y vitaminas (Shewry et al., 2012 y Silventoinen et al., 2021).

El endosperma almidonado o de almacenamiento, es la principal fuente de energía y proteínas. Constituye la mayor parte del grano y es esencial para la producción de harina y otros productos derivados del trigo. La capa más externa del endosperma conocido como aleurona, destaca por su actividad enzimática y con una composición para la sémola de trigo alrededor del 12.9 % de proteínas, 0.4 % de lípidos, 0.8 % de cenizas, 13.5 % de agua y 80 % de carbohidratos (Tetrycz et al., 2019 y Silventoinen et al., 2021).

La presencia de una capa protectora de salvado y su bajo contenido de humedad, garantizan la conservación del grano durante períodos prolongados. Por otro lado, el almidón se acumula en gránulos en una matriz proteica. Estas proteínas se dividen en varias categorías, como albúminas, globulinas, gliadinas y gluteninas, siendo estas últimas las principales formadoras del gluten (Bagulho et al. 2016, Filip et al., 2023 y Jiangtao et al., 2019).

1.6.3.2 Clasificación de tipos de trigo

La clasificación del trigo abarca una diversidad de criterios (Figura 4), entre los cuales se encuentran la temporalidad de siembra (trigo de invierno y de otoño), la dureza del grano determinada por su textura, fragilidad y contenido proteico (duro, blando y durum), la categorización de la harina resultante según su idoneidad para productos específicos en la industria panificadora, y la evaluación de la calidad del gluten. Estas categorías permiten una gestión eficaz de las distintas variedades de trigo y sus aplicaciones en el ámbito alimentario (Plancarte-Martínez et al., 2014).

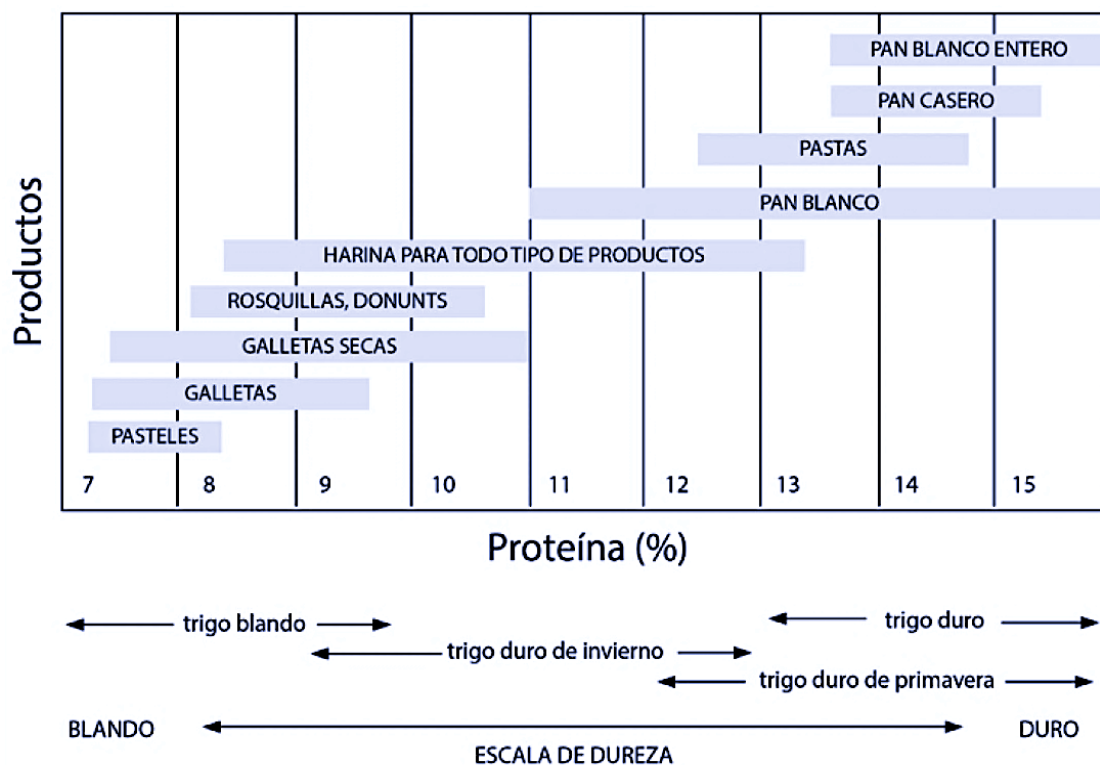


Figura 4. Clasificación de trigos por productos (Tecnología de granos y semillas (2024))

Según los Estándares estadounidenses, las ocho clases principales de trigo utilizadas para inspeccionar y clasificar el trigo incluyen HRW (Harina Roja de Invierno), HRS (Harina Roja de Primavera), SRW (Suave de Invierno), trigo duro, trigo blanco duro, trigo blanco blando, trigo sin clasificar y trigo mixto. Cada una de estas clases se divide en subclases y grados, que se basan en criterios como la pureza del trigo, el porcentaje de granos dañados o con defectos y la presencia de material extraño (Mulik et al, 2011 y Hamli et al., 2017).

En México, las variedades de trigo se clasifican con base en las propiedades y la calidad del gluten (NOM-187-SSA1/SCFI-2002, U.S. Department of Agriculture y FAO 2018), y se dividen en cinco grupos:

- a. Grupo I (trigo fuerte o harina 0). Destaca por su alto contenido proteico y su gluten fuerte y elástico, ideal para panadería.
- b. Grupo II (media fuerza o harina 00). Es un trigo medio fuerte y elástico, adecuado para preparar panes y pasta fresca, mejora trigos débiles. En este grupo también se encuentra harina 000 que retiene bien los gases y se usa para preparar pizza.
- c. Grupo III (débil o suave o harina 0000). El trigo es suave y extensible, utilizado en galletas, tortas, hojaldres y tortillas.
- d. Grupo IV (trigo tenaz). Gluten tenaz y corto, ideal para productos de pastelería.
- e. Grupo V (trigo cristalino o harina de semolina). Gluten tenaz, corto y con carotenos, perfecto para pastas y macarrones.

1.6.3.3 Gluten

El gluten, un complejo de proteínas presente en el trigo, desempeña un papel crucial en la industria alimentaria, especialmente en la producción de pan y otros productos horneados. Este componente, compuesto principalmente por gliadina y glutenina, es responsable de las propiedades viscoelásticas que dan forma y textura a la masa durante el proceso de amasado y horneado.

La gliadina (una prolamina que constituye alrededor del 33% de todas las proteínas de la harina) y la glutenina (clasificada como glutelina y que representa aproximadamente el 16% de la proteína de la harina) son los dos componentes principales del gluten. En la composición de estas proteínas predominan pocos aminoácidos, como la glutamina, la prolina y la cisteína (Figura 5). Estos aminoácidos interactúan entre sí, así como con el agua, que influye en la capacidad del gluten para retener líquido y formar una masa cohesiva (Sivam et al., 2014).

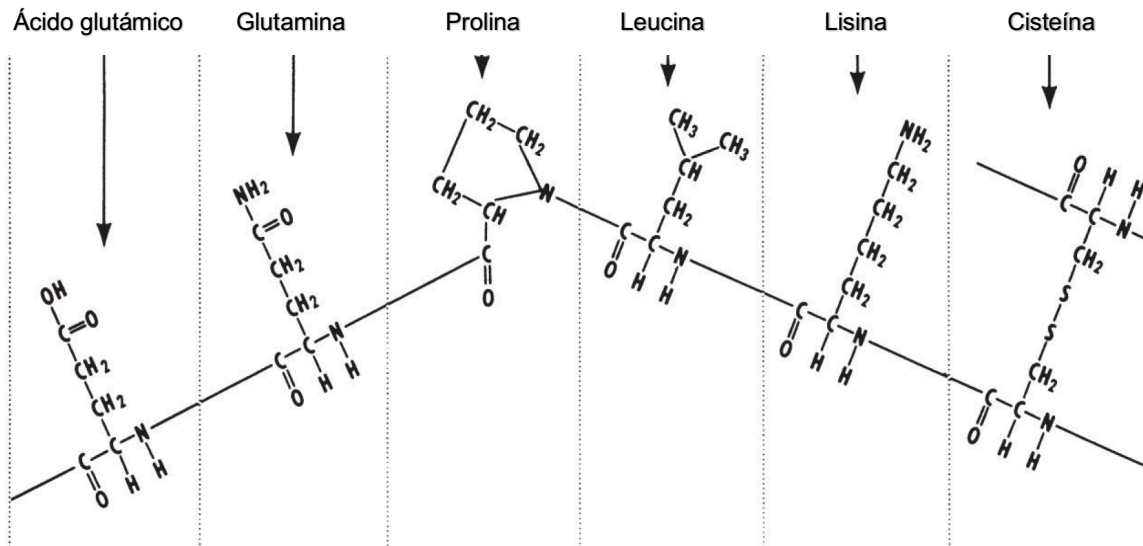


Figura 5. Diagrama esquemático de la estructura de algunos aminoácidos comunes en el trigo, que muestra enlaces con enlaces peptídicos. (Sivam et al., 2014)

La glutamina, que constituye más del 40% de todos los aminoácidos presentes en las proteínas del gluten, tiene la capacidad de unirse al agua, lo que contribuye a la formación de una masa viscosa durante el amasado. Por otro lado, la prolina, presente en cantidades significativas en gliadina y glutenina, influye en la estructura secundaria de la proteína e inhibe la formación de ciertas conformaciones que afectan la elasticidad del gluten (Sivam et al., 2014).

La estructura tridimensional del gluten (Figura 6), determinada por la orientación espacial de los grupos R en las proteínas, es fundamental para su funcionalidad. La gliadina, al hidratarse, adquiere una textura viscosa y extensible, mientras que la glutenina se caracteriza por su elasticidad y resistencia. Estas propiedades viscoelásticas se combinan para formar una red tridimensional al mezclar el gluten con agua y otros componentes de la harina (Li Ye et al., 2023).

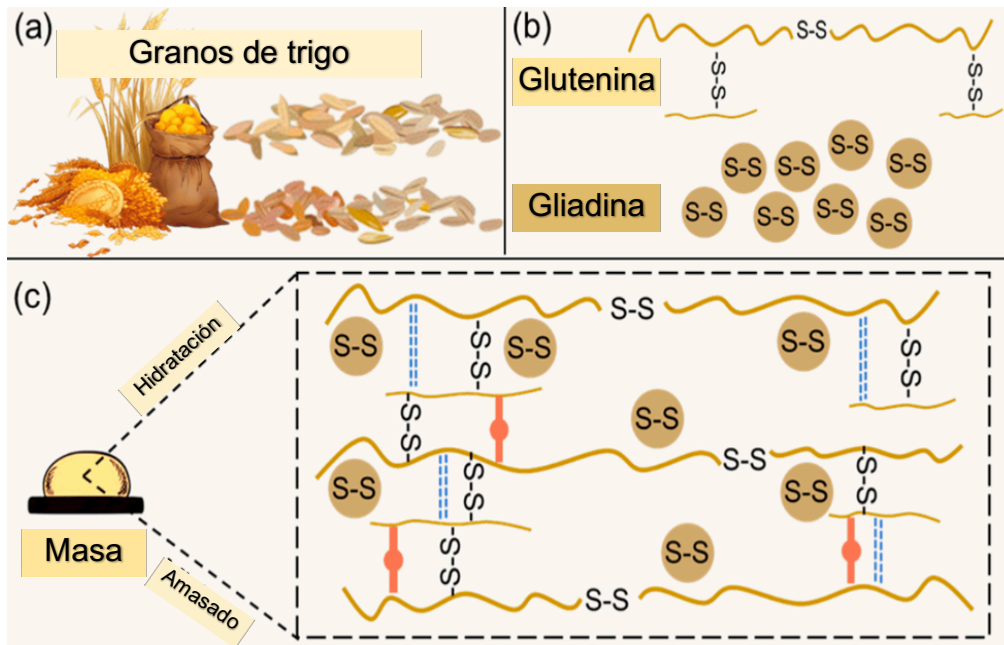


Figura 6. Formación del gluten, donde (a) es el trigo compuesto de gluten, (b) es la estructura de glutenina y gliadina, y (c) la estructura del gluten al formarse la masa (Li Ye et al., 2023)

Esta red proporciona la cohesión necesaria para retener los gases producidos durante la fermentación y el leudado de la masa, lo que permite que el producto se expanda uniformemente antes de ser horneado. La estructura en espiral β de la glutenina, estabilizada por enlaces de hidrógeno, contribuye a su elasticidad y capacidad para recuperar su forma original después de ser estirada (Kłosok et al., 2021 y Li Ye et al., 2023).

La funcionalidad del gluten está estrechamente relacionada con las propiedades físicas de sus componentes, la gliadina y la glutenina. La gliadina se hidrata, adquiere una textura viscosa y puede estirarse fácilmente, lo que se conoce como extensibilidad. Por otro lado, la glutenina hidratada es altamente elástica y ofrece una resistencia considerable al estirarse. La combinación de estas dos proteínas da como resultado el complejo de gluten, que exhibe propiedades viscoelásticas (Figura 7), (Abang-Zaidel et al., 2008, Kłosok et al., 2021 y Pshenichnikova et al., 2024).

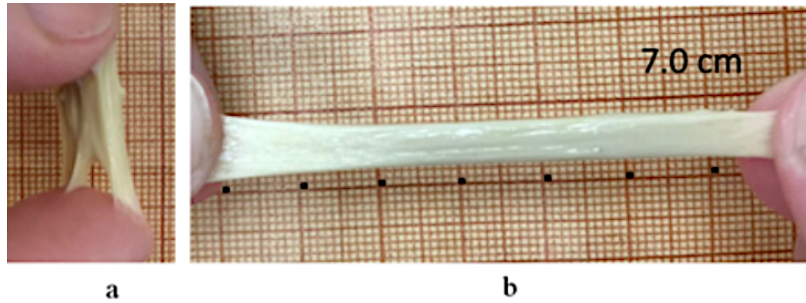


Figura 7. Propiedades viscoelásticas del gluten donde se demuestran la pegajosidad (a) y la extensibilidad (b). Los puntos negros marcan 1 cm de referencia (Pshenichnikova et al., 2024)

Estas propiedades del gluten son fundamentales para la elaboración de productos horneados de alta calidad y consistencia. Desde el pan hasta los pasteles y galletas, el gluten desempeña un papel crucial en la obtención de la textura, la estructura y el volumen adecuados en una amplia variedad de productos alimenticios (Abang-Zaidel et al., 2008 y Kłosok et al., 2021).

1.6.4 Almidón

Las propiedades funcionales del almidón están compuestas por amilosa (25 %) y amilopectina (75 %), y representan aproximadamente el 15 y el 50 % respectivamente del total de la harina. La amilosa (Figura 8A) se encuentra formada por residuos de glucosa unidos a través de enlaces α (1 \rightarrow 4).

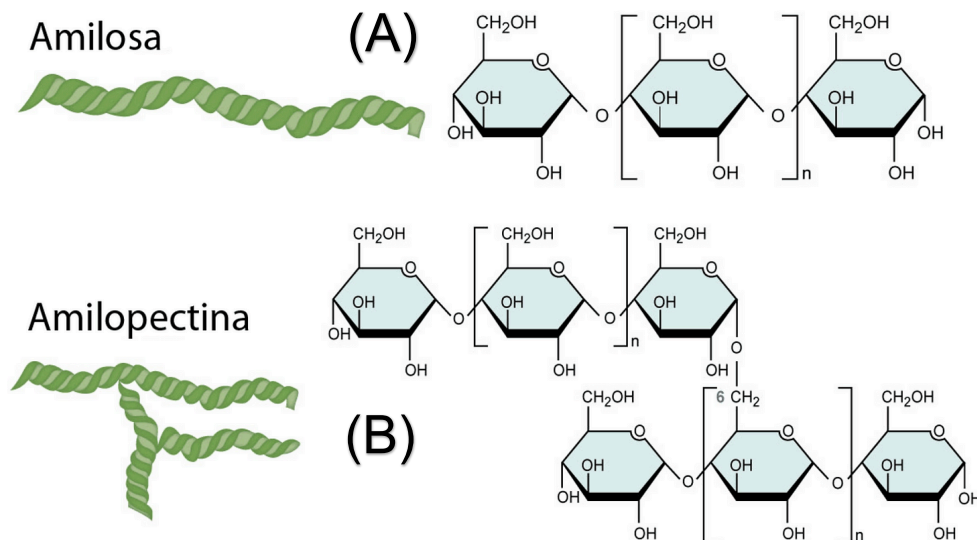


Figura 8. Estructuras de: A) amilosa y B) amilopectina (Concereal et al., 2019)

El grado de polimerización de la amilosa se encuentra entre 500 y 6000 residuos de glucosa y sus cadenas presentan una estructura helicoidal en donde los grupos hidroxilo están orientados hacia el exterior, lo que genera en el interior un ambiente no polar. Por su parte, la amilopectina (Figura 8B) es un polímero altamente ramificado formado por cadenas de residuos de glucosa unidos a través de enlaces α (1 \rightarrow 4) las cuales se encuentran unidas a través de enlaces α (1 \rightarrow 6), lo que da lugar a las ramificaciones (Tayade et al. 2019).

La funcionalidad del almidón se basa en una serie de cambios que ocurren cuando se somete a calor en presencia de agua, debido a su estructura. Al calentarse el almidón en presencia de agua, los gránulos nativos parcialmente cristalinos experimentan un proceso llamado gelatinización (Figura 9).

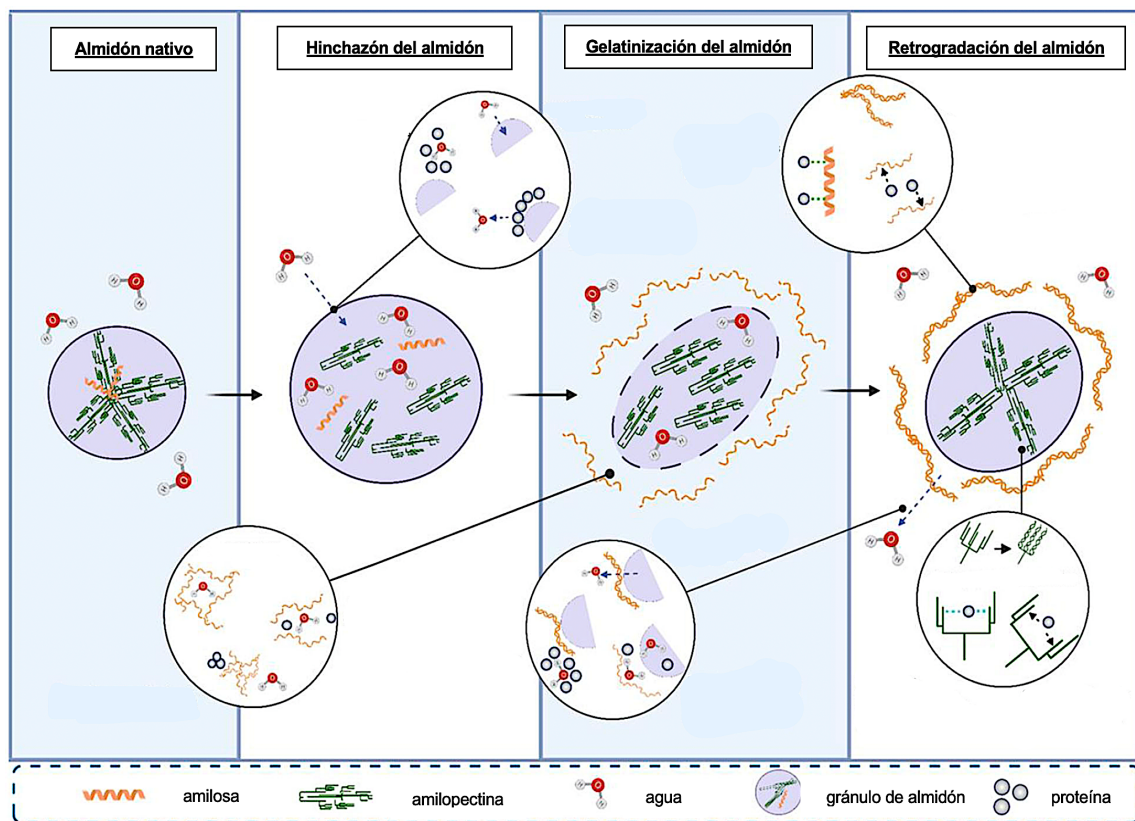


Figura 9. Interacciones proteína-almidón que influyen en la gelatinización y retrogradación (Scott et al., 2023)

Durante la gelatinización, los gránulos pierden su cristalinidad y birrefringencia, lo que los hace más susceptibles a la hidratación y a la formación de un gel. A medida que el calentamiento continúa más allá de este punto, los gránulos de almidón comienzan a descomponerse aún más en amilosa y amilopectina en un proceso conocido como gelificación. Posteriormente, al enfriarse, las moléculas de almidón pueden asociarse nuevamente, lo que da una formación cristalina (retrogradación).

Un aspecto clave de la gelatinización del almidón es su capacidad para retener una mayor cantidad de agua en comparación con su estado nativo. Esta propiedad es fundamental para su funcionalidad en diversos sistemas de productos alimenticios, como su influencia en la textura, apariencia y la estructura de los productos horneados (Scott, et al., 2023 y Prieto Méndez, et al., 2009).

1.6.4.1 Almidón resistente y modificado

El almidón resistente es una fracción del almidón que resiste la digestión enzimática y se fermenta en el colon, ha emergido como una alternativa debido a sus diversos beneficios para la salud y sus propiedades funcionales en la elaboración de alimentos. Este almidón puede formarse de manera natural durante el enfriamiento de alimentos cocidos (retrogradación) o encontrarse en alimentos crudos. Mantiene la estructura nativa del almidón o sufre una retrogradación que lo hace menos accesible a las enzimas digestivas.

La clasificación del almidón resistente se basa en cinco tipos principales: tipo uno (RS1), presente en semillas y no accesible para las enzimas digestivas; tipo dos (RS2), almidón crudo resistente a la hidrólisis enzimática; tipo tres (RS3), almidón retrogradado resultante del enfriamiento de un almidón gelatinizado; tipo cuatro (RS4), modificado mediante reacciones químicas; y tipo cinco (RS5), almidón complejo de amilosa con lípidos. Estos se forman a través de métodos como el tratamiento térmico, químico y enzimático (Kiernan et al., 2023).

Por otro lado, el almidón modificado es aquel que ha sido alterado mediante diferentes métodos (térmicos, químicos o enzimáticos) y que ha transformado sus propiedades físicas y químicas para mejorar los cambios de su solubilidad, viscosidad, estabilidad térmica y resistencia a la retrogradación, principalmente. Este proceso implica la modificación de los grupos hidroxilo laterales de las moléculas de amilosa y amilopectina mediante reacciones como hidrólisis, oxidación, eterificación, esterificación y reticulación. El grado y la naturaleza de la modificación química pueden variar según el reactivo, el tiempo y la temperatura del proceso.

Los almidones modificados pueden ofrecer atributos funcionales que no están presentes en los almidones nativos, proporcionan ventajas económicas y nutricionales en diversas aplicaciones alimentarias, siendo la enzimática la que ha ganado importancia comercial debido a la producción a gran escala de enzimas, como las amilasas, que se utilizan para hidrolizar el almidón y generar productos derivados (Escott-Stump et al., 2013, Ramadan et al., 2020 y Chipón et al., 2022).

1.6.5 Actividad diastásica

La actividad diastásica se define como las enzimas que participan en la hidrólisis del almidón, estas enzimas son la α -amilasa que hidroliza el almidón y produce cadenas de glucosa (dextrinas) y β -amilasa que reduce los extremos no reductores de las cadenas de glucosa, lo que genera maltosa (Visvanathan et al., 2019).

El método enzimático involucra la presencia de actividad de las amilasas en los cereales para el metabolismo del almidón durante el desarrollo de la germinación, lo que nos puede dar un indicio de la maduración del germinado a través de su actividad diastásica, es decir, la actividad hidrolítica del almidón de las enzimas, principalmente las α -amilasa y β -amilasa (Hernández-Carapia et al., 2021).

La α -amilasa se destaca por su capacidad de cortar los enlaces α -1,4 en cualquier parte de una molécula de amilosa o amilopectina, aunque no puede hidrolizar los enlaces α -1,6 ni aquellos α -1,4 que están muy cerca de un punto de ramificación (Figura 10). Estas enzimas pueden reducir el almidón a una serie de fragmentos lineales y ramificados, conocidos como dextrinas, si se le permite actuar durante el tiempo suficiente. Aunque actúa lentamente sobre un gránulo de almidón nativo, la α -amilasa puede hidrolizar rápidamente el almidón gelatinizado.

Las β -amilasa, es otra enzima que hidroliza los enlaces α -1,4. Sin embargo, la β -amilasa tiene una actividad diferente, ya que rompe cada segundo enlace α -1,4, que comienza desde los extremos no reductores del almidón. Esta acción libera maltosa, que está compuesta por dos unidades de glucosa unidas por un enlace α -1,4. La β -amilasa principalmente reduce la amilosa a maltosa y elimina solo las cadenas externas de amilopectina, que produce dextrinas β -límite (Yang et al., 2023 y De Schepper et al. 2022).

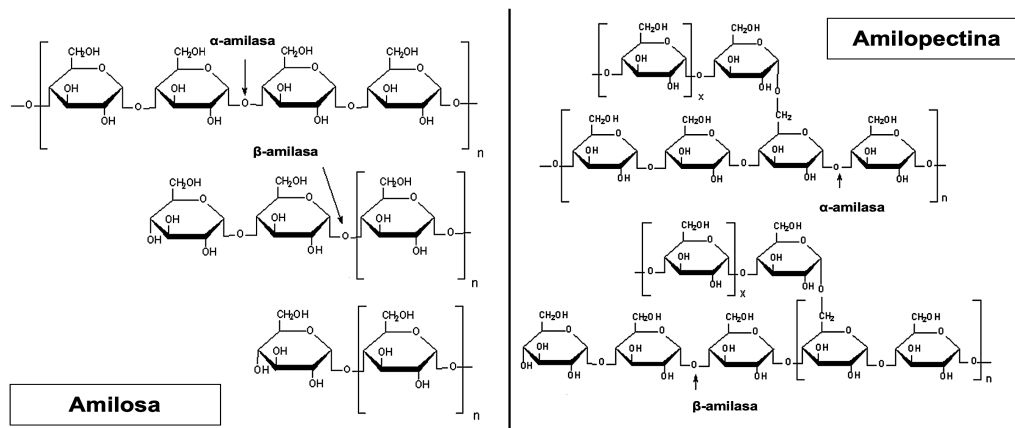


Figura 10. Moléculas de amilosa y amilopectina y su acción de las enzimas amilasas (Merck, Glycobiology - Carbohydrate Enzymes and Proteins)

La medición de la actividad diastásica tiene ventajas importantes: evalúa indirectamente el desarrollo de nutrientes en el germinado, mejora las propiedades funcionales en la germinación, reduce el índice glucémico y mejora las propiedades fisicoquímicas (Ashwar et al., 2016; Muralikrishna & Nirmala, 2005).

1.6.6 Molienda

La dureza del grano tiene un impacto significativo en el proceso de molienda. Esta variación se debe a la fuerza de adhesión entre el almidón y la proteína presentes en el endospermo del grano. En el caso del trigo, estas interacciones entre la proteína y el almidón son particularmente fuertes, lo que da como resultado una mayor dureza. Al moler el trigo blando, las células del endospermo se convierten en harina que consiste principalmente en gránulos de almidón libres y pequeñas partículas que contienen tanto gránulos de almidón como proteínas (gluten), en cambio, los gránulos de almidón del trigo duro se rompen antes de que las interacciones proteína-almidón se rompan o fisuren, lo que se conoce como almidón dañado.

El almidón dañado puede constituir una parte significativa del almidón total de la harina de trigo duro, llega a representar hasta el 8 % o más. Las diferencias en la dureza de la semilla influyen en la operación de los molinos. Semillas de menor dureza requieren un tiempo menor de molienda, lo que resulta en una harina con una distribución de partículas más fina, a diferencia de las semillas más duras. Además, el tamizado puede aumentar el daño al almidón, especialmente con reducciones en el tamaño de partícula, mientras que tamaños mayores, como la sémola, pueden mitigar este efecto.

La producción de almidón dañado durante la etapa de molienda está influenciada por diversos factores, entre ellos se incluyen la variedad del trigo, intensidad de preparación de rodillos, la humedad del grano (una baja absorción es indicador de un bajo contenido de almidón dañado), así como una mayor tenacidad en las masas y una exudación de agua durante la fermentación, que pueden ser indicativos de niveles más altos de almidón dañado (Blazek et al., 2010 y Simsek et al., 2014).

1.6.7 Harina y sus propiedades

La harina es el producto resultante de la molienda del grano de cereal (trigo, arroz, avena, cebada, maíz, etc.) maduro, limpio, entero y seco, el cual puede presentarse con o sin pericarpio, envolturas celulósicas, cáscara u otros constituyentes. La molienda es específica según el uso que se le quiera dar (refinado o integral) y en algunos casos ésta se realiza en húmedo para separar el salvado del germen, pero en la mayoría se hace por molturación en seco (NOM-247-SSA1-2008).

La harina está formada por varias fracciones, la harina de grado directo que es la harina blanca, que a su vez está conformada de harina flor o patente, que contiene menos salvado y germen, y la harina clara, con alto contenido de salvado y minerales. Las otras fracciones están compuestas por salvado, germen y fracciones denominadas cortas que son ricas en germen y salvado. A nivel industrial el proceso de estas harinas y fracciones da lugar al blanqueado, secado, aglomerado y enriquecido para dar cumplimiento a la normatividad.

De acuerdo con NOM-247-SSA1-2008 es necesario evaluar la calidad de las harinas, el contenido de humedad, el aspecto de calidad sanitario, la infestación, la cantidad de hongos, bacterias y contaminantes. También es importante contemplar las especificaciones nutrimentales, con la finalidad de evaluar el aporte de nutrientes, en el que incluyen los contenidos de tiamina, niacina, hierro, riboflavina y calcio. La evaluación de las especificaciones tecnológicas depende de los productos a elaborar con las harinas, cuyas determinaciones a considerar son el color, el contenido de humedad y de cenizas, el tamaño de partícula, pH, acidez, absorción de agua, sedimentación, almidón alterado y calidad de proteína mediante pruebas de gluten húmedo, gluten seco y cifra Pelshenke (Makaw et al., 2013; Montemayor-Mora et al., 2018).

1.6.8 Pastas

Las pastas son el producto de un amasado mecánico elaborado con sémola, semolina, harinas de otros granos o cualquier combinación de mezclas con otras harinas (farinas) que, en conjunto con el trigo, agua y la adición optativa de ingredientes formarán este producto. Aparte de sus componentes, las pastas tienen dos atributos, el primero destaca en su alto contenido de amilopectina que le da el aspecto translúcido y el segundo está relacionado a los pigmentos carotenoides que le da un aspecto ámbar (NOM-247-SSA1-2008 y CODEX CX 249-2006).

La clasificación de la pasta puede basarse en múltiples criterios, y la forma el tamaño son unas de las características más destacadas para su categorización (Figura 11). Entre los tipos más comunes de pasta se encuentran los largos, como spaghetti y fettuccine, que se caracterizan por su forma alargada y delgada; los cortos, como penne y macarrones, que tienen una forma más compacta y son ideales para retener salsas; los tubulares, como rigatoni y ziti, que presentan una forma de tubo y son adecuados para platos al horno; y los especiales, como lasaña y ravioli, que se distinguen por su forma y relleno característicos (Britannica, 2024).

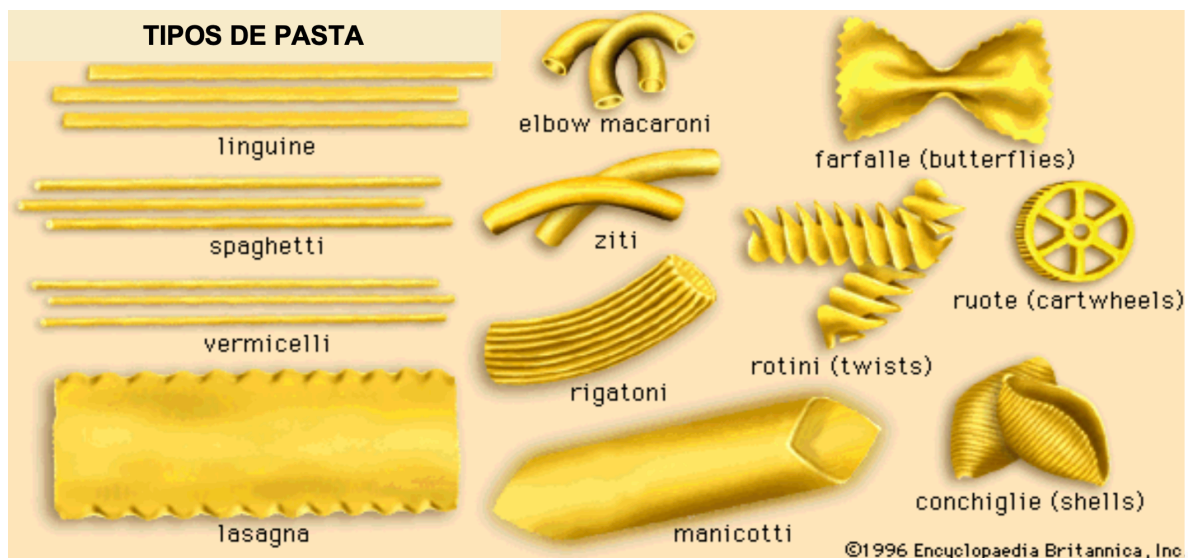


Figura 11. Estilos de pasta (Britannica, 2024)

Además de las diferencias en forma y tamaño, los tipos de pasta también varían en la composición de los ingredientes utilizados en su elaboración. Tradicionalmente, la pasta se hace con sémola de trigo duro y agua, lo que le confiere su distintivo sabor y textura, además de técnicas como el amasado, laminado o extrusión para obtener la forma deseada, mientras que el secado reduce la humedad y prolonga la vida útil del producto. Sin embargo, también existen alternativas sin gluten elaboradas con harinas de arroz, maíz, quinoa u otras semillas y cereales, destinadas a satisfacer las necesidades dietéticas específicas de personas con intolerancia al gluten o celiacía (Conte et al., 2021).

1.6.9 Evaluación de pastas

Se debe considerar una evaluación de pastas para que el producto final sea aceptable al consumidor, para ello, se hacen tres determinaciones. La primera consiste en las pruebas de visualización (percepción de tamaño, imperfecciones, fracturas, color, etc.) y de pigmentación. Las segundas, son las pruebas de calidad culinaria como el tiempo de cocimiento (grado de gelatinización del almidón), porcentaje de sedimentación (refleja un efecto inverso a la calidad del gluten) y el índice de tolerancia al cocimiento (resistencia de la pasta de romperse durante la cocción). En tercer lugar, está la calidad física de las pastas cocidas, donde se evalúa el grado de absorción, el incremento del volumen, la fragilidad y la calidad sensorial de las pastas (pegajosidad, firmeza, abultamiento, adherencia a la lengua, jugosidad y pastosidad) (Cárdenas-Hernández et al., 2016b; FAO, 2006; Kern et al., 2019; Romero & Zhang, 2019).

1.6.10 Índice glucémico

El índice glucémico es el aumento total de los niveles de glucosa en sangre de una persona después de ingerir alimentos. Las dietas que contienen alimentos con un alto índice glucémico se asocian con factores de riesgo de diabetes tipo 2, obesidad, hiperlipidemia y cáncer, sin embargo, una dieta con alimentos de bajo índice glucémico, podrían minimizar el riesgo de estas enfermedades.

Se ha demostrado que los pseudocereales, cereales integrales y algunas leguminosas, son alimentos que favorecen la reducción del índice glucémico por su alto contenido de fibra dietética y almidón resistente, ya que retrasan el vaciamiento gástrico y la absorción de carbohidratos, además de que reducen los tiempos de tránsito intestinal, regulan la saciedad, estimulan la secreción de hormonas gastrointestinales, modulan las respuestas de glucosa e insulina y dan como resultado la reducción del índice glucémico dietético general (Di Cairano et al., 2020; Hajhashemi et al., 2021; Ren et al., 2016).

1.6.11 Calidad alimentaria y evaluación sensorial

Con el avance del conocimiento sobre los componentes químicos de los alimentos y su impacto en la salud del consumidor, se ha generado una mayor conciencia sobre la necesidad de regular y controlar la producción y comercialización de alimentos. El desarrollo de la ciencia de los alimentos ha generado una creciente preocupación en la sociedad occidental por la salud del consumidor y por los fraudes alimentarios. En este contexto, la Organización Mundial para la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) establecieron en 1962 una Comisión Mixta con el objetivo de elaborar el Codex Alimentarius. Este código tiene como objetivo establecer normas internacionales para el comercio de alimentos, lo que garantiza su veracidad y protege la salud de la población (OMS, 2018).

Por otro lado, las pruebas sensoriales y texturales juegan un papel fundamental en la evaluación y aceptación de productos alimenticios en el mercado. Estas pruebas, ya sea que se realicen por un análisis de perfil de textura o por medio de una evaluación a consumidores representativos, tienen como objetivo medir la preferencia y satisfacción hacia un producto, y busca asegurar su aceptación por parte del público consumidor. Dentro de estas pruebas, las hedónicas permiten a los consumidores evaluar el grado de satisfacción general que experimentan con un producto mediante una escala proporcionada por el analista (Leyva-Martínez et al., 2010 y Paucar-Menacho et al., 2016).

2.0 METODOLOGÍA

La Figura 12, muestra las diferentes etapas que se utilizaron para la elaboración de pasta de amaranto germinado.

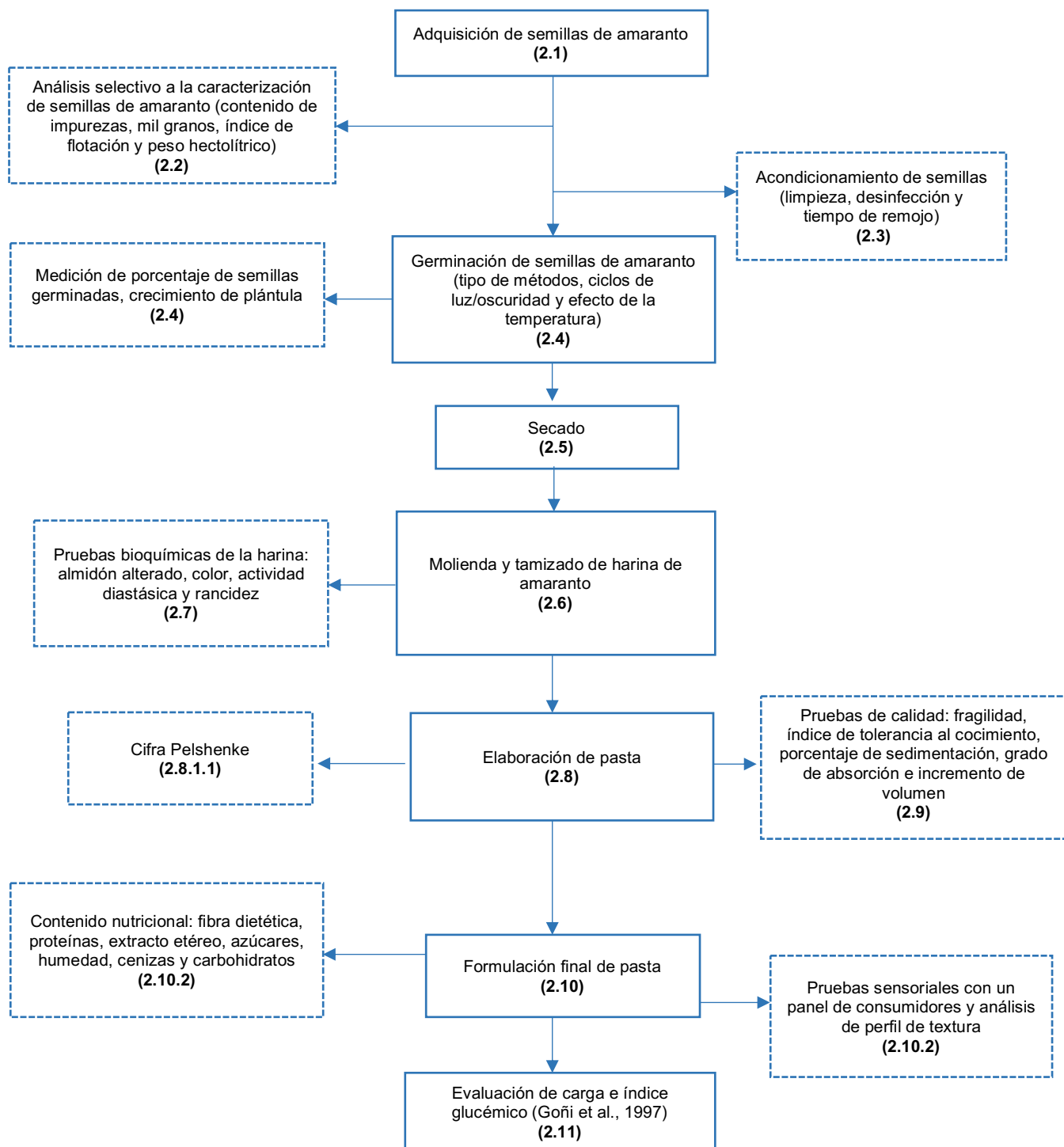


Figura 12. Diagrama general del proceso experimental para la elaboración de pasta de harina de amaranto germinado (*Amaranthus hypochondriacus*).

2.1 Adquisición y limpieza de la semilla de amaranto

La semilla de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) sin reventar se compró a productores locales de la zona de San Lorenzo Teotipilco en Tehuacán, Puebla. Las semillas obtenidas se almacenaron a temperatura ambiente en un lugar cerrado.

2.2 Análisis selectivo a la caracterización de semillas de amaranto

Para la realización de la caracterización de las semillas, se seleccionó una muestra representativa de manera aleatoria. Se aplicó el método de cuarteo, establecido por las normativas NOM-247-SSA1-2008 y NOM-002-SCFI-2011, mediante el cual se fraccionaron las semillas vertidas en cuatro partes de igual proporción (Figura 13) y se obtuvo una muestra final (de 50 gramos), la cual fue destinada para la determinación del contenido de impurezas, el recuento de granos por unidad de masa, la medición del peso hectolítrico e índice de flotación.

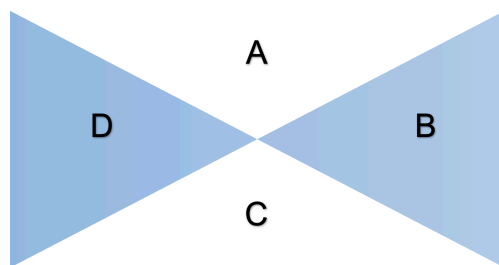


Figura 13. Ejemplo del método de cuarteo

- **Contenido de impurezas**

Se procedió a la separación de insectos, residuos sólidos, granos con pigmentación atípica, así como aquellos afectados por quemaduras u otros deterioros evidentes. Cada categoría de impurezas se sometió a un proceso individual de pesaje mediante una balanza analítica modelo JT5003A de la marca Liberty. La cuantificación se llevó a cabo mediante el cálculo del porcentaje de acuerdo con la ecuación 1 (NTE INEN 2646:2012).

$$\% \text{ Impurezas} = \frac{\text{Peso de impureza} \times 100}{\text{Peso total de la muestra}} \dots (\text{Ec. 1})$$

- **Mil granos**

De acuerdo con Szabóová et al. (2020), se pesaron 50 semillas o granos de amaranto en una balanza analítica y se calculó la relación de peso para 1000 granos con la ecuación 2, y se realizó la prueba por triplicado.

$$\text{Peso de mil granos} = \frac{(1\ 000\ \text{granos}) \times (\text{peso de 50 granos})}{50\ \text{granos}} \dots (\text{Ec. 2})$$

- **Índice de flotación**

El índice de flotación se evaluó según el método de Broa et al. (2019), con adaptaciones. Por triplicado se adicionó en cada vaso 100 mL con agua destilada y se colocó el peso de mil granos (ver punto 2.2.2), se agitó por 30 segundos y se dejó reposar durante 1 hora. Las semillas flotantes se separaron y secaron durante 24 horas para su pesaje. Se reportó el peso seco de las semillas flotantes y el porcentaje que equivalió al peso de mil granos o semillas.

- **Peso hectolítrico**

Tomando las pautas de Temesgen et al. (2017) con modificaciones, por triplicado se llenó una probeta de 25 mL con semillas de amaranto, dejándolas caer desde una altura de 10 cm para su acomodo, luego, se aplicaron doce golpes espaciados a la probeta. Este procedimiento se repitió tres veces con la misma probeta y semillas. El peso hectolítrico, expresado en g/L, se obtuvo al multiplicar el peso de las semillas después del golpeteo por un factor de 40.

2.3 Acondicionamiento de semillas de amaranto

Para la limpieza de semillas de amaranto, se utilizaron tamices No. 10 (2 000 µm) y No. 20 (841 µm), marca MONT INOX para remover objetos extraños y se eliminaron manualmente las impurezas restantes (Chauhan et al. 2022). Posteriormente, se desinfectaron las semillas de acuerdo con el protocolo de Guardianelli et al. (2019) con algunas modificaciones, tratándolas con una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 0.1 % durante 20 minutos, y se realizaron tres enjuagues con agua purificada, se utilizó un escurridor con malla de poro pequeño (< 900 µm) según Perales et al. (2014).

- **Tiempo de remojo**

Para determinar el tiempo óptimo de remojo, se realizó el método conforme a Thakur et al. (2021) con algunas modificaciones, para ello, se colocaron 100 semillas desinfectadas en 20 mL de agua purificada durante cada hora, hasta las 12 y también 24 horas, posteriormente se escurrieron y germinaron en oscuridad en una caja oscura a $21 \pm 2^\circ\text{C}$ y $90 \pm 5\%$ de humedad relativa, monitoreadas con un termohigrómetro Elitech, modelo RC-51H.

Tras este periodo, se midió el crecimiento en centímetros con un Vernier HOOMALL, modelo G244098, y se contó el número de semillas germinadas. Cada intervalo de remojo se hizo por duplicado y se graficaron los datos del porcentaje de germinación (ecuación 3) y crecimiento de plántulas en cm. Se realizó un análisis estadístico con un ANOVA de una vía y se aplicó la prueba de Tukey para comparar los tiempos de remojo, con un intervalo de confianza del 95%.

$$\% \text{ de germinación} = \frac{\text{Número de semillas germinadas} \times 100}{100 \text{ semillas totales}} \dots (\text{Ec. 3})$$

2.4 Germinación

- **Tipos de métodos**

Para evaluar el método de placa (Cornejo et al., 2019), se colocaron 100 semillas de amaranto desinfectadas y remojadas en cajas de Petri de vidrio (100x15 mm) sobre discos de algodón humedecidos con 5 mL de agua purificada. Las semillas se distribuyeron homogéneamente y se almacenaron en oscuridad, al añadir diariamente 500 μL de agua purificada para mantener la humedad.

En el método de frasco (Najdi et al., 2016), se colocaron 100 semillas en frascos de vidrio de 175 mL, se añadieron 20 mL de agua purificada y se cubrieron con una malla plástica (poro 1.6-1.8 mm). Los frascos se agitaron por 30 segundos y se almacenaron boca abajo a 45° en una caja oscura.

Ambos métodos se replicaron cuatro veces durante seis días a un intervalo de temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ y $90 \pm 5\%$ de humedad relativa. Se midió el crecimiento de las plántulas y el número de semillas germinadas cada 24 horas para calcular el porcentaje de rendimiento (ecuación 4). El análisis estadístico se realizó con ANOVA de una vía y se aplicó la prueba de Tukey para comparar los diferentes tiempos de germinación, con un intervalo de confianza del 95% (Tabla 4).

$$\% \text{ de germinación} = \frac{\text{Número de semillas germinadas} \times 100}{\text{número total de semillas}} \dots (\text{Ec. 4})$$

Tabla 4. Diseño experimental de germinación de semillas de amaranto para los métodos de inmersión y placa en condiciones de luz/oscuridad

Tratamiento (X*)	Tiempo (horas)					
	24	48	72	96	120	144
Método de inmersión a condiciones de luz/oscuridad	**Y1					
	**Y2					
	**Y3					
	**Y4					
Método de placa a condiciones de luz/oscuridad	**					
Método de inmersión a condiciones de oscuridad	**					
Método de placa a condiciones oscuridad	**					

Ejemplo del diseño experimental, cuyas variables independientes (X)* son el tiempo o tratamiento y las dependientes o respuesta son el crecimiento de plántula o porcentaje de rendimiento de semillas de cuatro replicas (Y1, Y2, Y3 y Y4)**.

- **Ciclos de luz/oscuridad**

Para determinar el efecto de luz y oscuridad en la germinación con los diferentes métodos (Tabla 4), se desarrolló el diseño experimental, para lo cual se expusieron a una fuente de luz fría LED (5.5 W, 450 lm, a 2.5 m), y en oscuridad total en una caja oscura, durante seis días en un entorno controlado ($21 \pm 2^\circ\text{C}$ y $90 \pm 5\%$ de humedad relativa). Se registró el crecimiento y la germinación cada 24 horas y se realizó el análisis estadístico de las cuatro replicas con ANOVA de una vía con prueba de Tukey para comparar los diferentes tiempos de germinación, con un intervalo de confianza del 95%.

- **Efecto de la temperatura**

Se implementó un protocolo combinado de Perales-Sánchez et al. (2014), Guardianelli et al. (2019), y Najdi et al. (2016), con adaptaciones. Por 6 días se aplicó el método de frasco bajo condiciones de oscuridad, y se realizaron cuatro replicas. Se establecieron tres condiciones de temperatura: $8 \pm 2^\circ\text{C}$ (baja), $21 \pm 2^\circ\text{C}$ (intermedia) y $32 \pm 2^\circ\text{C}$ (alta), con una humedad relativa del $90 \pm 5 \%$. La temperatura se monitoreó con un termohigrómetro Elitech, modelo RC-51H, y un termómetro bimetálico Taylor. Finalmente se registró el crecimiento y el porcentaje de germinación cada 24 horas (ecuación 3), y se analizaron los datos mediante ANOVA de una vía y con prueba de Tukey para comparar las diferentes temperaturas, con un intervalo de confianza (IC) del 95 %.

2.5 Secado de amaranto germinado

Las semillas germinadas pasaron a un proceso de secado en un horno eléctrico de marca Oster, con un flujo de aire continuo de 2 m/s y a temperatura de $40 \pm 5^\circ\text{C}$, conforme a las pautas recomendadas por Marchini et al. (2021). Durante este proceso, cada cinco minutos se monitorearon la humedad relativa y la temperatura mediante un termohigrómetro de marca Elitech, modelo RC-51H; se realizó por duplicado. Por otro lado, se tomaron muestras cada 30 minutos para posteriormente evaluar la actividad de agua al utilizar el equipo AquaLab, modelo S3, por triplicado. El periodo de evaluación se extendió a lo largo de 5 horas y posteriormente se almacenó al vacío con una selladora marca Vacuum Sealer, modelo LP-11S a temperatura ambiente. El análisis estadístico se realizó con ANOVA de una vía y prueba de Tukey con un intervalo de confianza (IC) del 95 %.

2.6 Harina de amaranto germinado

- **Molienda y tamizado**

Las semillas de amaranto germinadas y secas se sometieron a molienda con un molino de café de la marca Hamilton Beach, modelo 80350R. Con referencia a Mykolenko et al., 2020, con algunas modificaciones. Se tomaron 20 g de amaranto germinado a las 48 horas y se varió el tiempo de molienda (30, 60, 90 y 120 s). Una

vez molidas, las muestras se tamizaron con diferentes mallas del número 20, 40, 60, 80 y 100 (abertura de 841, 420, 250, 177 y 149 μm respectivamente), marca MONT INOX. La prueba se realizó por triplicado para cada tipo de malla y tiempo de molienda, y se calculó el porcentaje de retención o índice de distribución de harina que pasó a través de la malla (ecuación 5). El análisis estadístico se realizó con ANOVA de una vía y prueba de Tukey con intervalo de confianza (IC) del 95%.

$$\text{Retención (\%)} = \frac{\text{Peso de harina retenida}}{\text{Peso total de la harina}} * 100 \dots (\text{Ec. 5})$$

2.7 Pruebas bioquímicas de la harina

- **Almidón alterado**

De acuerdo con las pautas de Lamb et al. (2005), se pesaron 20 mg de rojo Congo y se disolvieron en 20 mL de agua destilada, para obtener una mezcla homogénea. Luego, se tomaron 0.5 mL de la solución y se colocaron en un portaobjetos, se cubrió con un cubreobjetos. Se aplicó rojo Congo en el borde del cubreobjetos con una pipeta Pasteur, lo que permite la distribución capilar. Tras 20 minutos, se utilizó una solución de NaCl 1 M para aclarar la solución roja. La muestra se observó al microscopio y se evaluó el porcentaje de gránulos pintados (0, 25, 50, 75 y 100 %) para analizar la interacción con el almidón dañado, teñido de rojo (Figura 14).

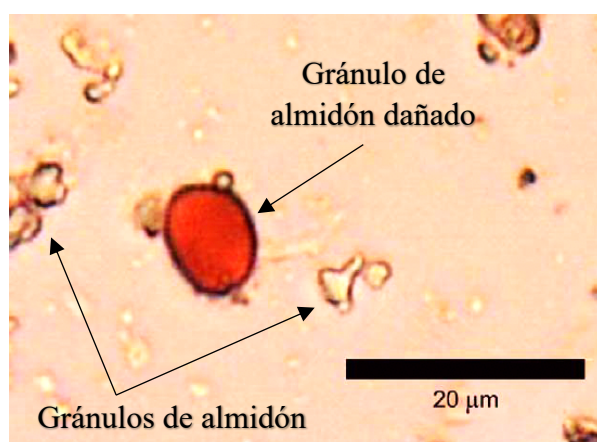


Figura 14. Microscopia de tinción de gránulos de almidón dañado por técnica de rojo Congo, 400 X. (Fuente: Lamb et al., 2005)

- **Determinación de color**

Se tomaron 5 g de muestra de harina de amaranto germinado con tiempos variables de 24 h hasta 144 h, y se colocaron en una caja de Petri para su lectura por medio de un colorímetro PCE TCR 200. Esto se realizó por triplicado, se tomaron lecturas de los parámetros L (Luminosidad), a (variación de verde a rojo) y b (variación de azul a amarillo). Cada parámetro se analizó estadísticamente, incluida la diferencia neta de color (ecuación 6), mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey con un intervalo de confianza del 95 % (Cotovanu et al., 2023).

$$\text{Diferencia neta de color } (\Delta E) = \sqrt{(a - a_0)^2 + (b - b_0)^2 + (L - L_0)^2} \dots (\text{Ec. 6})$$

Donde:

a_0, b_0, L_0 : son valores correspondientes a las semillas sin germinar

a, b, L : son valores correspondientes a los diferentes tiempos de germinación

- **Actividad diastásica**

De acuerdo con el método AOAC 31.154 (AOAC 1980), se pesó por duplicado 1 g de muestra molida (harina con tiempos de germinación de 24 a 144 horas) y se colocó en un tubo, en el cual, se agregaron 0.5 mL de acetato de sodio 1.59 N, 0.3 mL de cloruro de sodio 0.5 M y se ajustó a 5 mL con agua destilada. También se añadieron 0.5 mL de una solución de almidón al 2 % en un tubo eppendorf, y 1 mL de la muestra en otro tubo. Ambos se incubaron en un baño termostático a 40 ± 0.2 °C durante 15 minutos y se transfirió el contenido entre los tubos, se agitó y retornó al baño. Se cronometró y, cada 5 minutos, se extrajeron porciones de 50 μ L que se adicionaron a una solución de yodo 0.0007 N y agua destilada.

La absorbancia se registró a 660 nm. Se repitió el proceso hasta obtener una absorbancia inferior a 0.235. El número de diastasa (ecuación 7) se calculó al dividir 300 entre el tiempo de reacción. El análisis estadístico se efectuó con ANOVA de una vía y prueba de Tukey (IC 95 %).

$$ND = \frac{300}{\text{tiempo en minutos}} \dots (\text{Ec. 7})$$

ND = Actividad de diastasa o índice de diastasa en la escala de Gothe (mL de solución de almidón al 1% hidrolizada por la enzima contenida en 1.0 g de muestra, en 1 hora a 40°C).

- **Rancidez**

Se llevó a cabo una curva de calibración bajo las siguientes condiciones: aceite de soya expuesto a luz (1 W, voltaje 5V), calor (90°C) y oxígeno (bomba XINTM-Oxigenador). Se tomaron muestras de 15 mL cada 30 minutos durante 8 horas y se almacenaron sin oxígeno, en oscuridad a $4 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas.

Se procedió con la reacción de Kreeis, se tomó 1 mL de las muestras de la curva y también de amaranto germinado almacenado a diferentes tiempos. Cada muestra se trató con 1 mL de HCl concentrado, 1 mL de solución de fluoroglucina al 0.1% m/v y 2 mL de etanol 96% m/v, con agitación durante 30 segundos. Las muestras se leyeron por triplicado a 545 nm en un espectrofotómetro UV/Vis JENWAY modelo 6405. La absorbancia obtenida de la curva de calibración sirvió de referencia para la interpolación de las muestras. El análisis estadístico se ejecutó con ANOVA de una vía y prueba de Tukey (IC 95 %).

2.8 Elaboración de pasta

2.8.1 Cifra de Pelshenke

Se llevó a cabo según el método AACCC 56-50 (2000), para ello se pesaron $4 \pm 0.05\text{g}$ de harina por triplicado para cada proporción de sémola de trigo y amaranto germinado (100:0, 85:15, 75:25, 65:35, 55:45, 50:50, 25:75 y 0:100, respectivamente). Se añadieron 2.5 mL de levadura al 10 % m/v y se amasó para formar una bolita. Esta se depositó en vasos de precipitados con 120 mL de agua purificada, atemperados previamente en un baño marca CIVEQ a 30°C . Se registró el tiempo inicial de colocación de la bolita y los tiempos de flotación (t_f) y desintegración (t_d) (Kraus & Šenitková, 2019). Se realizó un análisis estadístico con un ANOVA de una vía y una prueba de Tukey con un IC 95 %.

- **Preparación de masa**

Seleccionada la proporción de sémola de trigo y amaranto germinado, con los datos obtenidos en la cifra Pelshenke, se procedió a la formulación por duplicado de diversas muestras, las cuales se realizaron con el mínimo de ingredientes: agua purificada y/o huevo, con los métodos descritos por investigadores previos (Tabla 5).

Tabla 5. Matriz de formulaciones de la masa

Ingredientes	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5	Método 6
	Alizadeh et al., 2024	Llavata et al., 2019	Ferreira Pessanha et al., 2023	Santos Ribeiro et al., 2018	Bastos et al., 2016	Rodríguez-Zúñiga et al., 2021
Harina (g)	100	100	100	100	100	100
Agua (mL)	14	17	0	50	18.8	12.5
Huevo (g)	10	14.5	60	50	56	70

Después, los ingredientes se combinaron manualmente y la masa reposó durante 120 minutos, cubierta con plástico y a temperatura ambiente. Luego, se evaluó su consistencia al ser laminada con un rodillo en una máquina tradicional para pastas, marca Hamilton Beach, ajustada desde la posición número 7 hasta la 4 (Cárdenas-Hernández et al., 2016b; Gautam & Kumar, 2021). Se seleccionó la mejor masa según criterios cualitativos de elasticidad, resistencia a la rotura y maleabilidad durante el proceso de laminado.

- **Secado de pasta**

Con las indicaciones de Vimercati et al. (2020), se llevó a cabo la selección de temperatura de secado (70, 80, 90 y 100 °C) durante un período de dos horas y se realizó la medición del color por triplicado con el uso del colorímetro PCE TCR 200 para obtener los parámetros L, a, b y ΔE (ver sección 2.7.2).

Además, se evaluó la humedad de la pasta durante el secado a temperatura constante. Se pesaron 15 ± 1 g de pasta por duplicado antes del proceso (peso inicial), se registró el peso cada 30 minutos hasta alcanzar la humedad constante (ecuación 8). El secado se realizó en un horno de turbo convección Oster, modelo digital, con flujo de aire a 2 m/s. El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey con un IC del 95 %.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{Peso inicial de la pasta} - \text{Peso de la pasta seca})}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 8})$$

2.9 Evaluación de pastas

Se llevó a cabo una comparación entre la pasta control (sémola de trigo al 100 %) y cuatro proporciones distintas con harina de amaranto germinado, de acuerdo con los resultados obtenidos de la cifra Pelshenke. Las pruebas de calidad que se realizaron incluyeron la evaluación de la fragilidad, el índice de tolerancia al cocimiento, el incremento de volumen, el grado de absorción y el porcentaje de sedimentación, cuyo análisis estadístico fue realizado mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey con un IC del 95 % para cada parámetro.

- **Fragilidad**

Se procedió a romper un haz de pasta de 50 g, sostenido entre ambas manos, y se estimó la facilidad con la que se produjo la ruptura con un corte limpio, sin astillas ni desmoronamiento. Los cinco puntos de evaluación de la fragilidad variaron desde "mucho muy frágil" (1), lo que indica una fragilidad extrema, "más frágil" (2), "igual al control" (3), "más resistente" (4) hasta "mucho más resistente" (5). Se notó una pasta con una gran resistencia y dificultad para romper (Vasiliu et al., 2009).

- **Índice de tolerancia de cocimiento**

Para obtener el tiempo de cocimiento (t_c), se pesaron 25 g de pasta y se cortaron en trozos uniformes. Se agregaron 500 mL de agua hirviendo y se dejaron pasar 5 minutos antes de inspeccionar con una lupa óptica de aumento de 20x HD.

Posteriormente se contaron los núcleos opacos de almidón no gelatinizado. La inspección se repitió cada dos minutos hasta la desaparición de los núcleos, que marca el tiempo de cocimiento (Gautam y Kumar 2021).

Para el tiempo de desintegración (t_d), se continuó la cocción de la pasta hasta que se observaron al menos tres fragmentos rotos, momento en el cual se registró el tiempo correspondiente. Finalmente se calculó con los datos obtenidos el ITC de conforme a la ecuación 9. (Feijoo, et al., 2017)

$$ITC = t_d - t_c \dots (\text{Ec. 9})$$

Donde:

ITC: es el índice de tolerancia al cocimiento en minutos

t_d : es el tiempo de desintegración de la pasta

t_c : es el tiempo de cocimiento de la pasta

- **Porcentaje de sedimentación**

Se transfirieron 100 mL de agua, recolectada durante el tiempo de cocción de la pasta, a una probeta. La muestra se dejó reposar durante 2 horas. Posteriormente, se evaluó el porcentaje de sedimentación y se calculó la proporción de mililitros ocupados por el sedimento depositado en la probeta (Feijoo, et al., 2017).

- **Grado de absorción**

Se pesaron 25 gramos de pasta seca y se coció en 500 mL de agua durante el tiempo determinado para su cocción. Una vez cocida, se escurrió el agua durante 10 minutos. Pasado este periodo, se volvió a pesar la pasta cocida y escurrida para obtener su peso exacto. Finalmente, se aplicó la ecuación 10 para calcular el porcentaje de absorción correspondiente (Feijoo, et al., 2017).

$$\text{Grado de Absorción (\%)} = \frac{P_{pc} - P_{ps}}{P_{ps}} \times 100 \dots (\text{Ec. 10})$$

Donde:

P_{ps} : es el Peso de la pasta seca o cruda

P_{pc} : es el Peso de la pasta cocida y drenada

- **Incremento de volumen**

Para el volumen de la pasta seca, se colocaron 50 g de pasta cruda en una probeta de 500 mL que contenía 300 mL de agua. Se registró el volumen de desplazamiento de agua de la pasta cruda y se aplicó la ecuación 11.

$$\text{Volumen de pasta seca } (V_{ps}) = \text{Volumen de desplazamiento} - 300 \text{ mL} \dots (\text{Ec. 11})$$

Por otro lado, para obtener el volumen de la pasta cocida, se cocinaron 50 g de pasta durante el tiempo establecido para la cocción. Posteriormente, se escurrió la pasta cocida durante 10 minutos y se colocó en una probeta de 500 mL con 300 mL de agua. Se registró el volumen de desplazamiento para obtener el incremento de volumen, y se aplicó la ecuación 12 (Krawęcka et al., 2021).

$$\text{Volumen de pasta cocida } (V_{pc}) = \text{Volumen de desplazamiento} - 300 \text{ mL} \dots (\text{Ec. 12})$$

Finalmente, se calculó el incremento total de volumen con la ecuación 13.

$$\text{Incremento de volumen } (\%) = \frac{V_{pc} - V_{ps}}{V_{ps}} \times 100 \dots (\text{Ec. 13})$$

2.10 Pasta final

Una vez seleccionada la formulación final de la pasta con la información de las pruebas de calidad, se procedió a evaluar las pruebas sensoriales y de caracterización nutricional de la pasta y se comparó con una pasta de sémola de trigo 100 %, usada como control. El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey con un IC del 95 % para cada parámetro.

- **Pruebas sensoriales**

Se aplicó una escala hedónica de cinco puntos, de acuerdo con el argumento de Russo et al. (2021) y se evaluaron tres factores principales: aceptabilidad, textura y sabor. Las muestras fueron destinadas a un panel de 70 consumidores no especializados, entre 18 y 80 años, cuya distribución se basó en datos estadísticos de consumo de pasta en México. Los participantes fueron provistos de un

cuestionario (ver Anexo 1), con dos códigos diferentes (428 y 369), los cuales representaron la pasta control y la pasta final (Biró et al., 2019).

- **Análisis de perfil de textura (TPA)**

Las pastas fueron cocidas durante 15 minutos en ebullición y luego escurridas durante 10 minutos. Posteriormente, se tomaron 30 g de cada pasta y se colocaron en vasos de precipitados de 50 mL. Cada muestra fue colocada en el texturómetro TA.XT.plus TEXTURE ANALYSER, utilizando un cilindro de compresión SMS P/1, para determinar, con el uso de software Exponent, los parámetros de dureza, fracturabilidad, adhesividad, elasticidad, cohesividad, gomosidad, masticabilidad y resiliencia. Las lecturas se realizaron por triplicado para cada tipo de pasta.

- **Análisis químico proximal**

Para la caracterización nutrimental, se determinó por triplicado el extracto etéreo por el método de Soxhlet (NMX-F-089-S-1978), cenizas totales por calcinación (AOAC 923.03, 1990), contenido de humedad por secado (AOAC 930.15, 2005), proteína cruda por el método micro-Kjeldahl (AOAC 960.52, 1999), azúcares reductores y totales por el método de Fehling (NMX-F-312-1978), contenido de fibra dietética (NMX-F-090-S-1978) y carbohidratos. El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey con un IC del 95 % para cada determinación, comparando la pasta control y la pasta final.

2.10..1 Extracto etéreo

El contenido de grasa libre se determinó mediante el método de Soxhlet (NMX-F-089-S-1978). Se colocaron 4 g de muestra en un cartucho de celulosa para su extracción con el extractor de la marca LAB-LINE MULTIUNIT EXTRACTION HEATER. Se añadieron 140 mL de éter etílico y se calentaron a ebullición por 4 horas. Una vez finalizada la extracción, se retiró el matraz, que había sido previamente llevado a peso constante, y se secó el extracto en la campana. Posteriormente se pesó el extracto para determinar el porcentaje de extracto etéreo (ecuación 14).

$$\% \text{ Grasa} = \frac{(\text{Peso del matraz con extracto etéreo seco} - \text{Peso del matraz vacío})}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 14})$$

2.10..2 Cenizas totales

Se utilizó el método AOAC 923.03 (1990). Se pesaron 2 g de muestra en un crisol (llevado a peso constante) y se calcinó con un mechero hasta la completa eliminación de humos, luego se colocó en una mufla durante 5 horas. Tras el enfriamiento, se colocó en un desecador durante 30 minutos. Finalmente, se procedió a pesar y calcular el porcentaje de cenizas con la ecuación 15.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(\text{Peso del crisol con cenizas} - \text{Peso del crisol vacío})}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 15})$$

2.10..3 Humedad

El contenido de humedad se determinó por el método AOAC 930.15 (2005). Se pesó 1 g de muestra en un crisol a peso constante durante 3 horas a 100°C en la estufa marca ECOSHEL, modelo 9025H. La muestra se secó durante 4 horas a una temperatura de 100°C. Posteriormente, se dejó enfriar en un desecador por 30 min para su posterior pesado y determinación del porcentaje de humedad (ecuación 16).

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{Peso crisol con muestra húmeda} - \text{Peso crisol muestra seca})}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 16})$$

2.10..4 Proteína cruda

De acuerdo con el método AOAC 960.52 (1999), se pesaron 0.03 g de muestra y se introdujeron en un tubo de Kjeldahl con 2.5 g de sulfato de cobre pentahidratado y sulfato de potasio y 10 mL de H₂SO₄ concentrado. Tras precalentar a 360°C, se calentaron hasta la completa destrucción de la materia orgánica. Luego, se enfriaron y posteriormente, se procedió a la destilación con HCl 0.1N; se tituló el exceso de ácido y se calculó el porcentaje de proteína (ecuación 17 y 18).

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(V)(N)(meq)}{M} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 17})$$

Donde:

V: es el volumen gastado de HCl en la titulación

N: es la Normalidad del HCl que equivale a 0.02N

meq: miliequivalentes de nitrógeno que equivale a 0.014

M: es el peso de la muestra en gramos

$$\% \text{ Proteína} = (\text{Nitrógeno})(\text{factor proteico} *) \dots (\text{Ec. 18})$$

*Factor proteico: 5.56 para amaranto y 5.81 para trigo durum (Fujihara et al., 2008)

2.10..5 Azúcares reductores

Los azúcares reductores se cuantificaron mediante el método de Fehling, de acuerdo con el método NMX-F-312-1978. Se añadieron 5 g de muestra seca triturada y 3 mL de acetato de plomo al 5% en un matraz aforado de 100 mL, que se completó con agua destilada. En un matraz Erlenmeyer de 500 mL, se añadieron 5 mL de Fehling A, 5 mL de Fehling B y 200 mL de agua destilada, y se llevó a ebullición. Una vez en ebullición, se tituló con la mezcla preparada con azul de metileno como indicador, hasta observar un vire de la solución. Se anotó el gasto y se realizaron los cálculos correspondientes (ecuación 19).

$$\% \text{ Azúcares reductores} = \frac{(\text{Volumen total})(\text{Factor Fehling}*)(100)}{(\text{Peso de la muestra en g})(\text{Gasto en mL})} \dots (\text{Ec. 19})$$

*Factor Fehling: 0.045 (Cobos, et al., 2017)

2.10..6 Azúcares totales

El método se realizó según la NMX-F-312-1978, con modificaciones. Se pesó 1 g de muestra, se agitó y se aforó a 100 mL con agua destilada. La hidrólisis se realizó con la adición de 10 mL de HCl 0.1 N y calentamiento a 300°C durante 30 min, luego se enfrió y se añadieron 10 mL de NaOH 0.1 N, repitiendo el calentamiento por 30 minutos. La solución hidrolizada se filtró y se tituló de igual manera que los azúcares reductores (ver punto 2.10.3.5).

$$\% \text{ Azúcares totales} = \frac{(\text{Volumen total})(\text{Factor Fehling}*)(100)}{(\text{Peso de la muestra hidrolizada en g})(\text{Gasto en mL})} \dots (\text{Ec. 20})$$

*Factor Fehling: 0.045 (Cobos, et al., 2017)

2.10..7 Fibra dietética

Se realizó de acuerdo con el método oficial NMX-F-090-S-1978, en el cual se gelatinizó 1 g de muestra seca en presencia de α -amilasa termoestable, seguida de una digestión enzimática con proteasa y amiloglucosidasa. Luego, se precipitó la fibra y se añadió 3 volúmenes (20 mL) de etanol al 78 %, 2 volúmenes (10 mL) de etanol al 96 % y 2 volúmenes (10 mL) de acetona. El residuo se filtró y lavó con etanol al 78 %, etanol al 96 % y acetona, y se secó a 105°C durante 12 horas. Se registró el peso y se determinó el contenido de proteína y cenizas del residuo. El contenido de fibra dietética total (FDT) se calculó de acuerdo con la ecuación 21.

$$\% \text{ Fibra dietética total (FDT)} = \frac{R-P-C}{M} \times 100 \dots (\text{Ec. 21})$$

Donde:

R: es el peso del residuo (mg)

P: es el peso de proteína en crisol (mg) = (peso de materia insoluble – peso de la muestra)

C: es el peso de cenizas en el crisol (mg) = (peso de cenizas – peso de la muestra)

M: es el peso de la muestra (mg)

2.10..8 Carbohidratos

Se determinó con la diferencia del porcentaje de proteínas, extracto etéreo, cenizas y fibra dietética total (FDT), y se realizó el cálculo con la ecuación 22.

$$\% \text{ Carbohidratos} = 100 - (\% \text{ Proteína} + \% \text{ Etéreo} + \% \text{ Cenizas} + \% \text{ FDT}) \dots (\text{Ec. 22})$$

2.11 Evaluación de índice glucémico

Se realizó una prueba in vitro para la estimación del índice glucémico, siguiendo las recomendaciones de Ninomiya et al. (2022). Para ello, se pesaron 0.2 g de muestra (pasta de amaranto germinado, pasta de sémola de trigo 100%, pasta comercial de sémola de trigo y pan blanco) y se hidrataron con una solución de glucosa 40 mMol/L durante 30 minutos.

Posteriormente, se colocaron en una membrana de 12000 Da de 10 cm de longitud (previamente hidratada durante 24 horas) y se sumergieron en un matraz con 100 mL de agua desionizada. El matraz se incubó a 37°C con agitación de 90 rpm durante 2 horas, tomando dializados de 2.5 mL cada 15 minutos. Las muestras obtenidas se analizaron con glucosa oxidasa de GOD-POD. Finalmente, se leyeron por triplicado en un espectrofotómetro a 510 nm marca JENWAY® (Granfeldt et al., 1992).

Se evaluó la tasa de digestión de la glucosa en las pastas, considerando tanto la composición del alimento como el proceso de masticación. Esto permitió calcular el índice de retardo glucémico (IRG) de la muestra (ecuación 23), utilizando las áreas bajo la curva (Ballance et al., 2018).

$$IRG = \frac{(\text{Área bajo la curva de la muestra por 120 min})}{(\text{Área bajo la curva del pan blanco por 120 min})} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 23})$$

El área bajo la curva (AUC) de los datos fue obtenida mediante el método del trapecio entre dos puntos (t_1, C_1) y (t_2, C_2), donde t es el tiempo y C es la concentración (mg/dL) para cada intervalo hasta los 120 min (ecuación 24).

$$AUC_{t_1 \rightarrow t_2} = (1/2)(t_2 - t_1) (C_1 + C_2) \quad \dots (\text{Ec. 24})$$

La suma de todas las áreas calculadas para cada intervalo de tiempo es el área bajo la curva total (ecuación 25).

$$AUC_{total} = AUC_{0-15} + AUC_{15-30} + AUC_{30-45} + \dots + AUC_{105-120} \quad \dots (\text{Ec. 25})$$

De acuerdo con el método descrito por Díaz-Osorio et al. (2019) para el cálculo de la predicción del índice glucémico (pIG), se realizó con la ecuación 26 para las diferentes pastas respecto al pan blanco.

$$pIG = (0.862)(IRG) + 8.198 \quad \dots (\text{Ec. 26})$$

3.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Pruebas de calidad

3.1.1 Contenido de impurezas

En Tabla 6, se muestran las impurezas presentes en las semillas o granos de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*). Según la normativa ecuatoriana NTE INEN 2646:2012, se permiten las impurezas en los granos de amaranto para cualquier coloración, en un intervalo del 0.5 % al 2 % y para granos negros el límite es de 0 % a 4 %. Los resultados del estudio mostraron que los porcentajes de impurezas por coloración (≤ 1.555 %) y para granos negros (1.004 %) están dentro de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, lo que indica que el lote cumple con estos criterios.

Por otro lado, la normativa mexicana NOM-247-SSA1-2008 menciona que no debería haber más de 50 fragmentos de insectos en 50 g de producto, además de la ausencia de pelo de roedor y excretas. Los resultados han mostrado cumplimiento de estos requisitos, ya que se registraron 37 fragmentos de insectos y no se detectó la presencia de pelo de roedor ni excretas. Basándose en los requisitos normativos establecidos por ambas normativas, se concluye que este lote de granos de amaranto es adecuado para el consumo humano.

Tabla 6. Clasificación de impurezas durante la limpieza de 50 g de semillas de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*)

Tipo de impurezas	Peso (g)	Impurezas (%)
Insectos (muertos)	0.480*	0.948
Extraños**	0.523	1.033
Piedras	0.545	1.077
Ámbar	0.787	1.555
Negro/brillante	0.508	1.004
Claro/beige	0.633	1.251
Grises	0.648	1.280
Total	4.124	8.148

*Corresponden a 37 fragmentos. **Libre de excretas y pelo de roedor

3.1.2 Mil granos, índice de flotación y peso hectolítrico

Los resultados de las pruebas se registran en la Tabla 7. La prueba de mil granos, registró un valor de 0.920 g, ubicándose dentro del rango superior de 0.65 a 0.97 g, según investigaciones previas (De Book et al., 2021; Szabóová et al., 2020). Este parámetro influye en aspectos vitales como la germinación y el vigor de las plántulas, ya que existe una relación directamente proporcional entre el peso de las semillas y el rendimiento.

Por otro lado, el índice de flotación, indicador de la dureza de las semillas, cuyo valor obtenido fue $3.8 \pm 0.8\%$, se encontró entre 28 a 92% según Vázquez-Rodríguez et al. (2013) y $\leq 12\%$ catalogado como semilla dura, de acuerdo con Broa-Rojas, et al., 2019. El resultado indica que la semilla posee una alta dureza. Un índice bajo implica mayor dureza lo que favorecería su germinación por contener menos aire en el endospermo y mayor cantidad de nutrientes.

En cuanto al peso hectolítrico, registrado en 88.66 ± 1.3 kg/hL, se encuentra en concordancia con investigaciones previas (Temesgen et al., 2017; Eduardo-Espitia et al., 2022), quienes reportaron valores de 90.8 kg/hL y 81.71 kg/hL, respectivamente. Este resultado posiciona a las semillas con una mayor dureza y resistencia a daños mecánicos.

Tabla 7. Pruebas de calidad para semillas de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*)

Prueba	Resultados*
Mil granos (g)	0.920 ± 0.000
Índice de flotación (%)	3.8 ± 0.8
Peso hectolítrico (kg/hL)	88.66 ± 1.3

*El promedio (\bar{x}) de tres replicas con su desviación estándar

3.2 Impacto de factores ambientales en la germinación

3.2.1 Evaluación del tiempo de remojo

El máximo porcentaje de germinación se obtuvo durante las primeras cinco horas de remojo (Figuras 15 y 16), sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el porcentaje de germinación entre la primera y quinta hora de remojo. De igual forma ocurrió para el crecimiento de las plántulas, las cuales tuvieron el máximo desarrollo entre las 2 y 3 horas y tampoco hubo diferencias significativas ($p > 0.05$). Estos resultados coinciden con las observaciones de Gutiérrez-Cortés et al., 2024, quien señala que entre las 2 y 3.3 horas se alcanza un equilibrio ascendente del 40% de humedad, nivel en el cual se activan las enzimas y mejora el rendimiento, manteniéndose constante (posterior a este tiempo) por más de 6 horas.

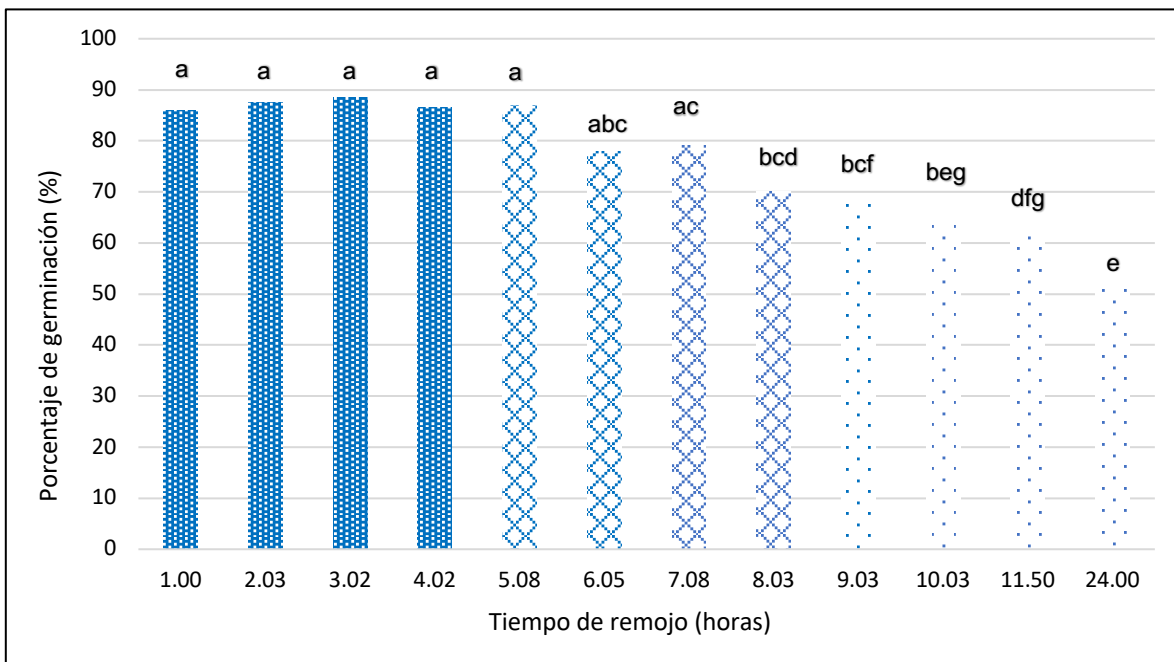


Figura 15. Tiempo de remojo y su relación con el porcentaje de germinación de semillas de amaranto. Comparación de distintos tiempos de remojo en porcentaje de germinación. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para dos replicas por cada tiempo de remojo. Letras diferentes en las barras indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)

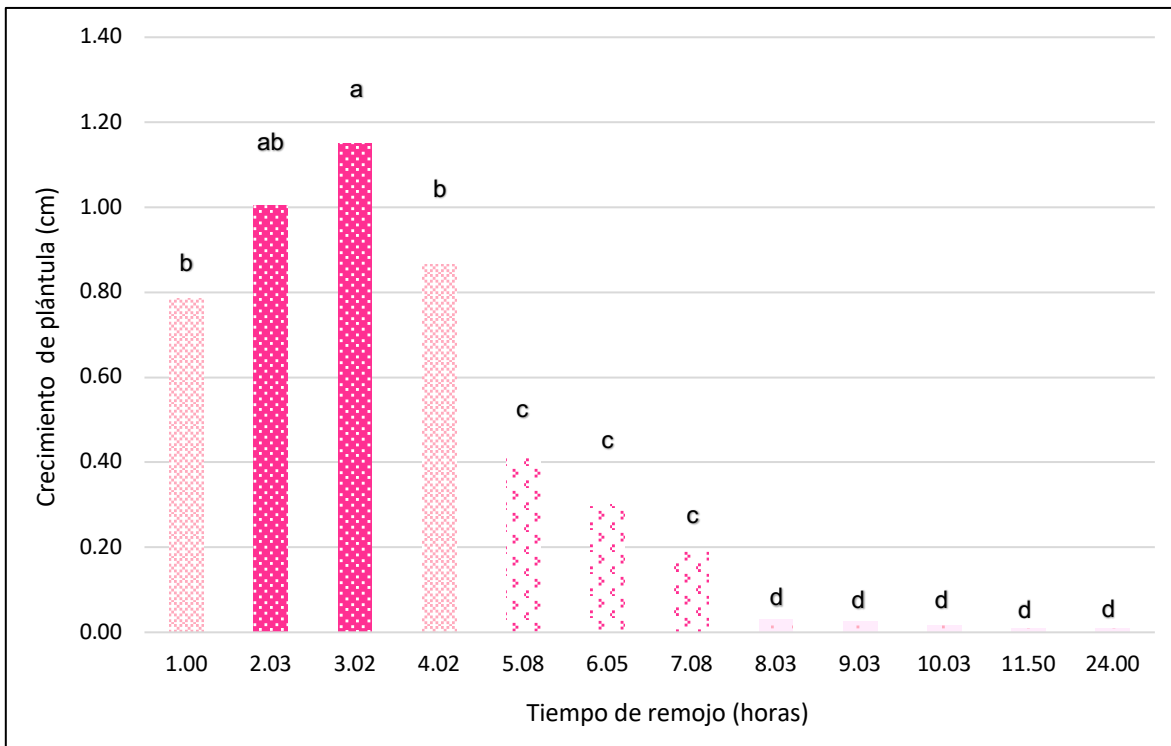


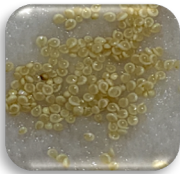





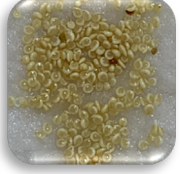

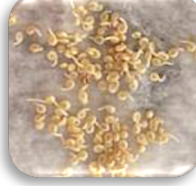



Figura 16. Tiempo de remojo y su relación con el crecimiento de la plántula durante la germinación. Comparación de distintos tiempos de remojos con el crecimiento de la plántula. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para dos replicas por cada tiempo de remojo. Letras diferentes en las barras indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)

La Tabla 8 ilustra el impacto del tiempo de remojo en el desarrollo de la plántula. Se observó que, a medida que se prolonga la exposición, es decir, a partir de las 4 horas, la plántula comienza a experimentar un crecimiento insuficiente. Esta situación se atribuye a la dificultad para que el embrión reciba oxígeno, lo que reduce la actividad enzimática y obstaculiza la germinación. Por otro lado, exposiciones más breves (menor a una hora), no promovieron un crecimiento óptimo ni el desarrollo completo de todas las semillas, ya que impidieron la absorción adecuada de agua, lo que afectó negativamente la activación enzimática completa del proceso de germinación (Perales et al., 2014, Dabija et al., 2022 y Gutiérrez-Cortés et al., 2024).

Tabla 8. Diferentes tiempos de remojo, después de 72 horas de germinación

Tiempo de germinado (horas)	Germinado	Tiempo de germinado (horas)	Germinado	Tiempo de germinado (horas)	Germinado
1.00		5.08		9.03	
2.03		6.05		10.03	
3.02		7.08		11.50	
4.02		8.03		24.00	

3.2.2 Efecto de la luz y oscuridad

Se muestra una diferencia significativa ($p < 0.05$) en los cuatro métodos evaluados a las 24 horas de germinación en comparación con los otros tiempos (Figura 17). El método de placa bajo condiciones de luz/oscuridad presentó diferencias significativas contra los demás tratamientos durante todo el periodo de germinación. Además, el método de inmersión bajo luz/oscuridad mostró diferencias significativas con los métodos en condiciones de oscuridad a partir de las 72 horas. Por otro lado, los métodos de inmersión y de placa en condiciones de oscuridad no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) desde las 48 hasta las 120 horas. Sin embargo, la gráfica indica que el método de inmersión en oscuridad tiene un mayor porcentaje de germinación en todos los tiempos evaluado.

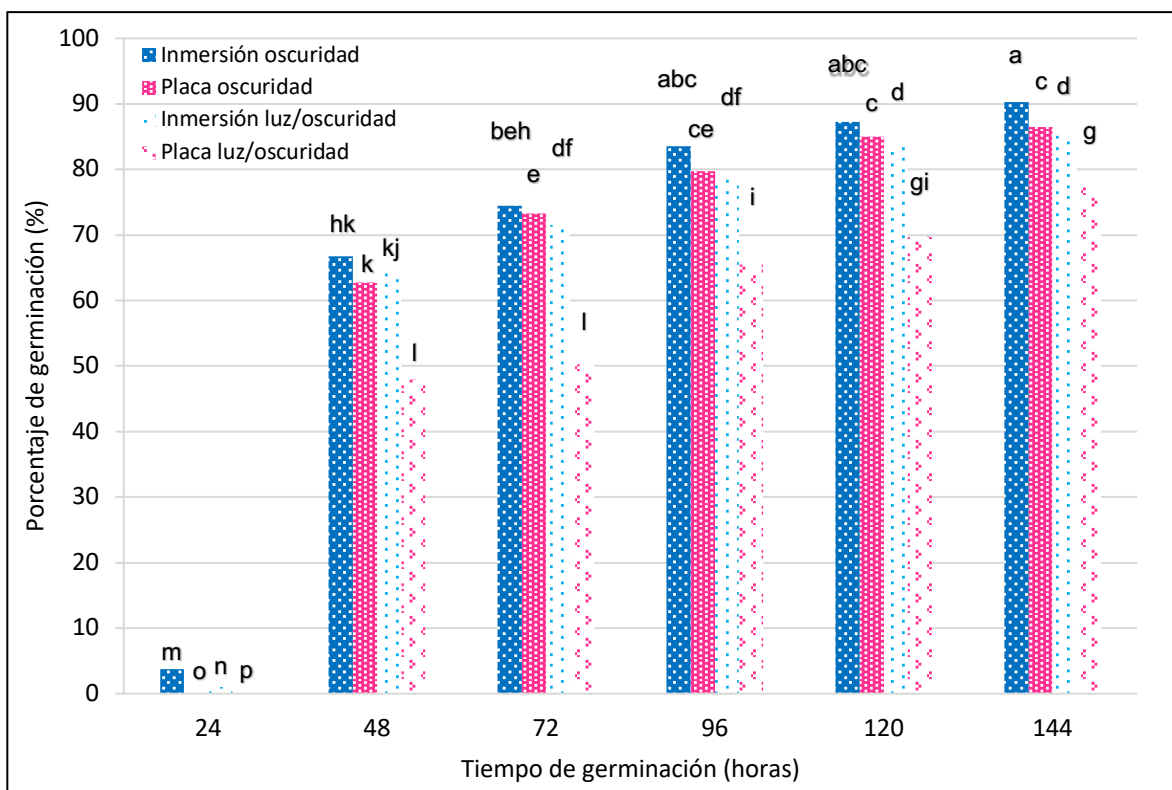


Figura 17. Efecto de los diferentes métodos de germinado en el porcentaje de germinación. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para cuatro replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Por otro lado, en la Figura 18 se observa una diferencia significativa ($p < 0.05$) en el crecimiento de la plántula entre los métodos de inmersión y placa bajo condiciones de luz/oscuridad en comparación con las condiciones de oscuridad para ambos métodos a partir de las 72 horas. Los métodos de inmersión y placa en condiciones de oscuridad mostraron un mayor crecimiento de la plántula, sin embargo, entre estos métodos, no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) desde las 48 horas hasta las 120 horas, pero se destacó el método de inmersión en oscuridad ya que presentó el mayor crecimiento en comparación con los otros métodos evaluados.

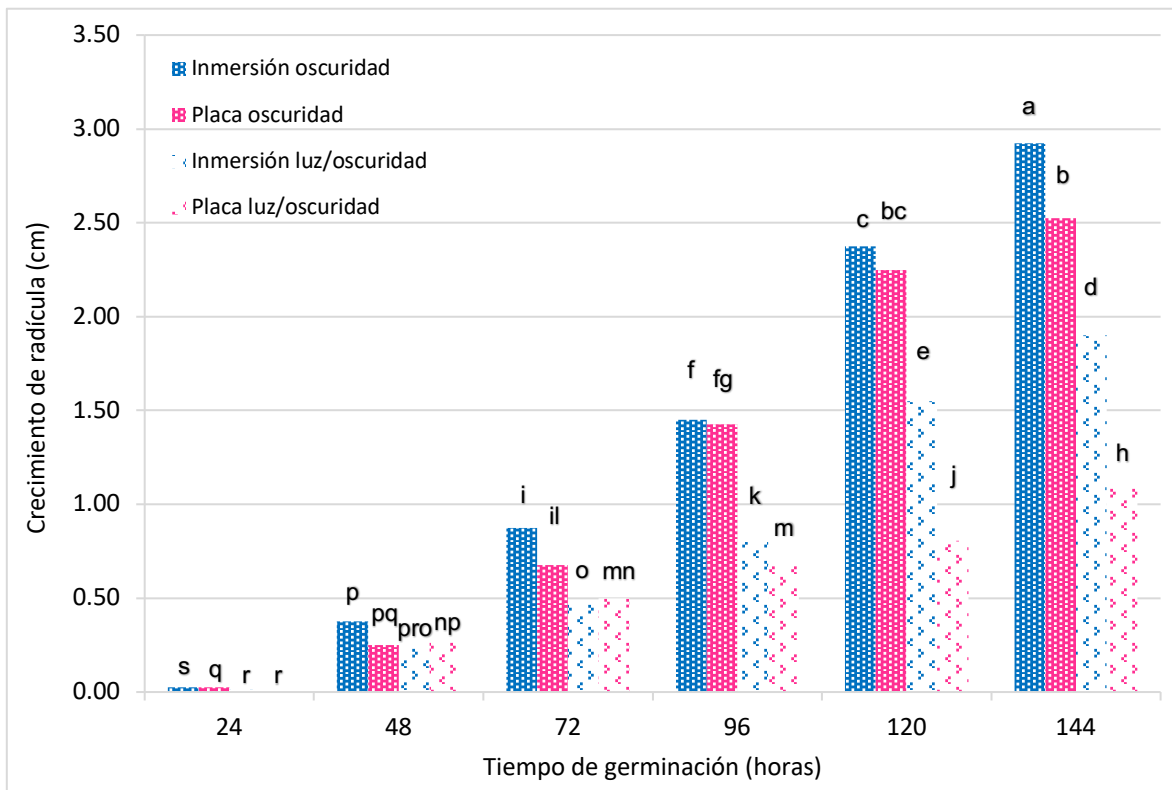


Figura 18. Efecto de los diferentes métodos de germinación en el crecimiento de la plántula. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para cuatro replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Estos hallazgos fueron consistentes con las observaciones de Valdez-Eleuterio, et al. (2015), quienes informaron un porcentaje de germinación cercano al 100 % para el amaranto bajo condiciones de oscuridad, en contraste con menos del 80 % en condiciones de luz, debido a que existe una mejor absorción de agua en ausencia de luz, lo que favorece una activación enzimática más eficiente y reduce la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Además, investigaciones previas realizadas por Kanensi et al. (2014) y Van Hung et al. (2020) sugieren que la germinación del amaranto en presencia o ausencia de luz no afecta significativamente el contenido de proteínas, lípidos, carbohidratos y minerales de las semillas germinadas, pero resaltan los efectos antioxidantes mejorados en condiciones de oscuridad. Por ello, los resultados obtenidos en este estudio han probado la eficacia del método de inmersión en oscuridad para promover tanto el porcentaje de germinación como el crecimiento de la plántula de manera significativa en comparación con otros métodos evaluados.

3.2.3 Efecto de la temperatura

Se ha observado una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) tanto en el porcentaje de germinación como en el crecimiento de la plántula al evaluar tres temperaturas diferentes, como se detalla en las Figuras 19 y 20. La temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ favoreció tanto el rendimiento como el crecimiento durante la germinación, mientras que a temperaturas bajas ($8 \pm 2^\circ\text{C}$) se evidenció una disminución significativa en ambos aspectos. Los resultados anteriores concuerdan con las conclusiones de Guo, et al., (2003) y Loonatl, et al., (2013), quien sostiene que las temperaturas óptimas de germinación del *Amaranthus hypochondriacus* se encuentran entre los 22 y 28°C , y que la rapidez de maduración aumenta cuando las temperaturas alcanzan el límite superior de este intervalo y que su crecimiento se ralentiza a partir de los 17°C .

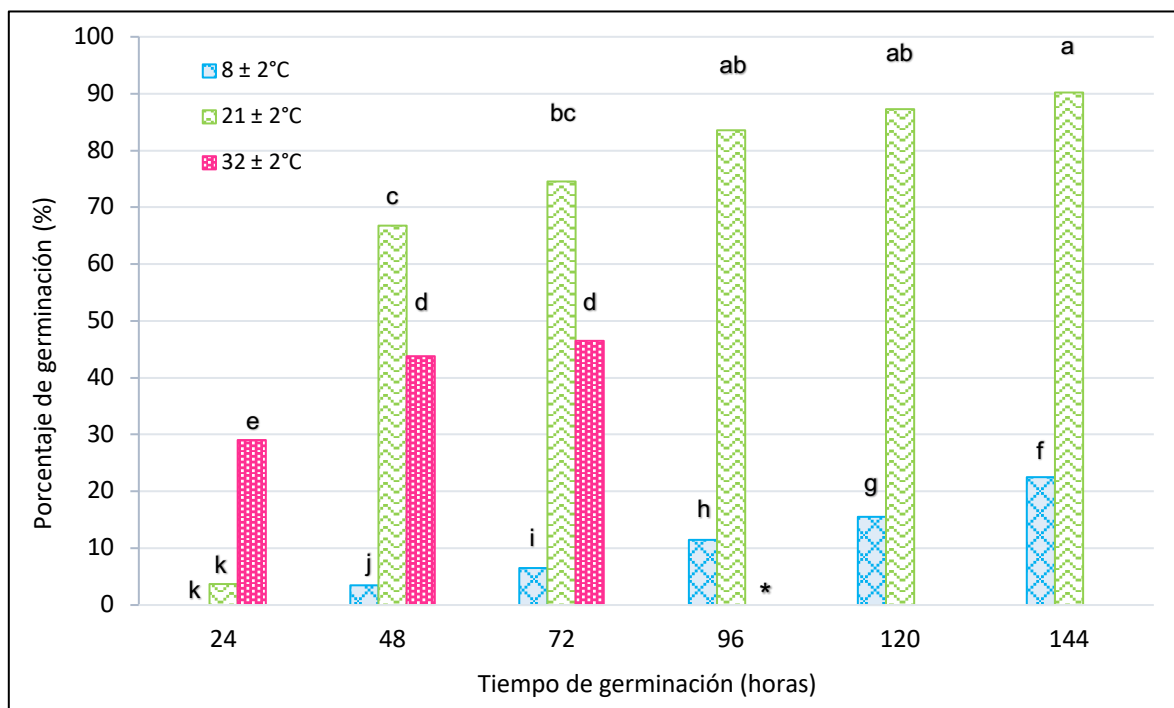


Figura 19. Efecto de la temperatura en el porcentaje de germinación. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para cuatro replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). *Sin registro de datos por crecimiento del hongo *Aspergillus* a partir de las 96 a temperatura de $32 \pm 2^\circ\text{C}$.

Por otro lado, en temperaturas altas ($32 \pm 2^\circ\text{C}$), aunque se aceleró el crecimiento, este se vio afectado negativamente por el desarrollo microbiano a las 72 horas. De acuerdo con Reale et al., (2023), durante la germinación de las semillas, puede ocurrir el crecimiento de diversos géneros de hongos, especialmente *Aspergillus*, cuya temperatura óptima de crecimiento es de 37°C , siendo visibles los micelios a las 48 horas de incubación.

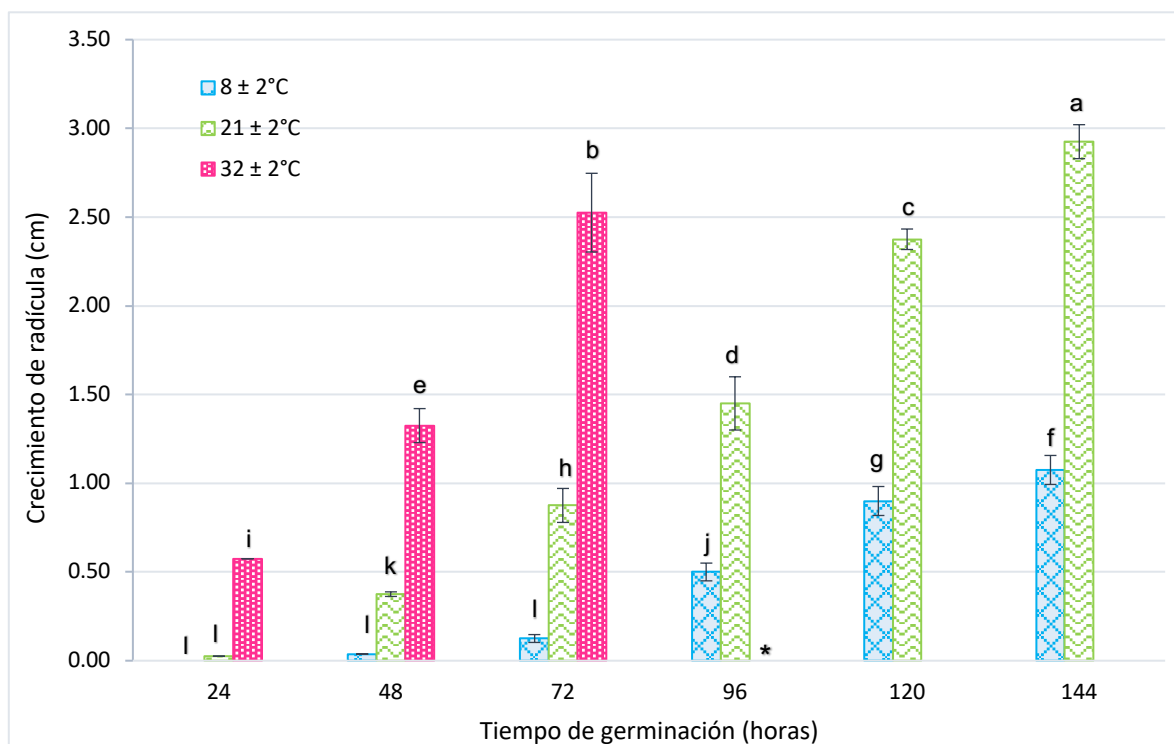


Figura 20. Efecto de la temperatura en el crecimiento de la plántula. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para cuatro replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). *Sin registro de datos por crecimiento del hongo *Aspergillus* a partir de las 96 a temperatura de $32 \pm 2^\circ\text{C}$.

En consecuencia, es crucial mantener condiciones de temperatura adecuadas durante el proceso de germinación, ya que estas pueden impactar significativamente tanto en el porcentaje de rendimiento como en el crecimiento de la plántula.

3.3 Condiciones de secado de amaranto germinado

Los resultados obtenidos de las condiciones de secado (Figura 21) señalan que, después de 170 minutos de secado a la temperatura de 40°C (valor recomendado para evitar degradación de nutrientes, de acuerdo con Jimoh et al. (2023) y Suiane de Moraes et al. (2022)), la estadística indica que no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) de variabilidad de la humedad relativa a partir de este tiempo. Esta estabilización en la humedad relativa sugiere que el proceso de secado alcanza un equilibrio a partir de ese punto, lo que permite que parte de la humedad presente en las distintas formas del germinado como el agua vacuolar, citoplasmática y extracelular, se libere, contribuyendo así a una mayor eficacia en el proceso de secado.

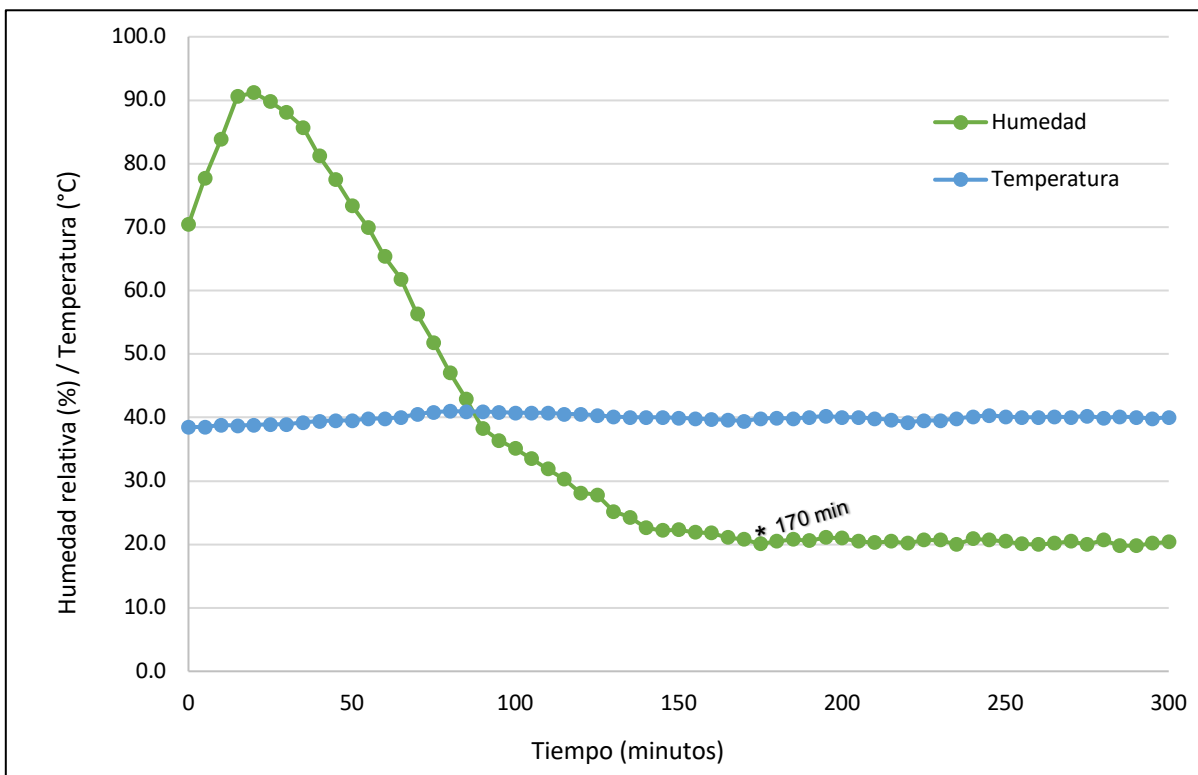


Figura 21. Efecto de la humedad relativa durante cinco horas a temperatura constante de 40 °C por secado en turbo convección. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para dos replicas en cada tiempo. El asterisco significa que a partir de ese tiempo no existen diferencias significativas, dada por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

La Tabla 9 complementa los resultados anteriores, ya que muestra que a los 180 minutos se alcanzó una actividad de agua de 0.552 ± 0.002 , la cual se mantuvo por debajo de este valor hasta los 300 minutos. Estos datos revelaron que la actividad de agua permaneció por debajo del umbral crítico de proliferación microbiana (0.6), equivalente al 10 y 12% de humedad del alimento, a lo largo de todo el proceso de secado, lo que indicó un adecuado control de la humedad para prevenir la contaminación microbiológica y una eficiencia de secado a los 180 min (Giuseppe-Rizzello et al., 2009).

Tabla 9. Comportamiento de la actividad de agua a diferentes tiempos de secado

Tiempo de secado (min)	Actividad de agua*
0	0.957 ± 0.001^a
30	0.931 ± 0.002^b
60	0.849 ± 0.001^c
90	0.729 ± 0.002^d
120	0.634 ± 0.001^e
150	0.616 ± 0.001^f
180	0.552 ± 0.002^g
210	0.550 ± 0.001^g
240	0.547 ± 0.002^{gh}
270	0.543 ± 0.003^h
300	0.541 ± 0.002^h

*Promedio final (\bar{x}) de tres repeticiones con su desviación estándar (DE). Letras diferentes en la columna de actividad de agua, indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

3.4 Harina de amaranto germinado

3.4.1 Índice de distribución

Se evidencia en la Tabla 10 que, a medida que se incrementa el tiempo de molienda, se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre cada intervalo temporal, y a partir de la malla No. 60, tanto la molienda a 90 s como a 120 s no exhibió diferencias significativas ($p \geq 0.05$) con la sémola de trigo cristalino. En relación con el número de malla, se apreció una diferencia significativa ($p < 0.05$) desde la malla No. 20 hasta la malla No. 80 en todos los tiempos de molienda.

Tabla 10. Porcentajes de harina retenidos en las diferentes mayas Tyler en 100 g de muestra a diferentes tiempos de molienda

No. Malla	Apertura de malla (µm)	Porcentaje de harina retenida a diferentes tiempos (%)				
		Sémola de trigo*	Amaranto germinado			
			30 s	60 s	90 s	120 s
20	841	0.00 ± 0.00 ^{Ea}	10.2 ± 0.09 ^{Eb}	1.06 ± 0.02 ^{Ec}	0.09 ± 0.00 ^{Ed}	0.12 ± 0.00 ^{Ed}
40	420	4.07 ± 0.03 ^{Da}	46.42 ± 0.04 ^{Db}	20.45 ± 0.16 ^{Dc}	6.06 ± 0.07 ^{Da}	3.52 ± 0.04 ^{Dd}
60	250	34.18 ± 0.18 ^{Da}	63.02 ± 0.08 ^{Cb}	42.84 ± 0.08 ^{Cc}	23.14 ± 0.25 ^{Cd}	18.31 ± 0.15 ^{Cd}
80	177	76.68 ± 0.13 ^{Ca}	84.63 ± 0.09 ^{Bb}	75.28 ± 0.34 ^{Ba}	68.56 ± 0.09 ^{Bc}	66.14 ± 0.12 ^{Bc}
100	149	98.09 ± 0.20 ^{Ca}	98.63 ± 0.07 ^{Ba}	97.6 ± 0.23 ^{Aa}	98.07 ± 0.09 ^{Aa}	98.25 ± 0.09 ^{Aa}

*Se usa como control la harina de sémola de trigo cristalino sin moler. Letras diferentes mayúsculas corresponden al análisis estadístico para cada tipo de malla (filas) y letras minúsculas es al análisis de los diferentes tiempos de molienda (columnas), cuyas letras indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

3.5 Pruebas bioquímicas de harina

3.5.1 Almidón dañado

Al complementar la información con el índice de distribución (ver sección 3.4.1) y la Figura 22 sobre el almidón dañado, se notó que hay un incremento tanto en el tiempo de molienda como en el número de mallas, lo que resultó en un aumento significativo del porcentaje de almidón dañado.

Se recomienda emplear una malla No. 40 con un tiempo de molienda de 90 s, ya que esto asegura una granulometría uniforme, favorece una mayor calidad sensorial en términos de textura, sabor y apariencia visual del producto final, debido a su capacidad para absorber el agua de manera homogénea, facilitar una cocción uniforme, además de garantizar un porcentaje de almidón dañado menor al 15 %.

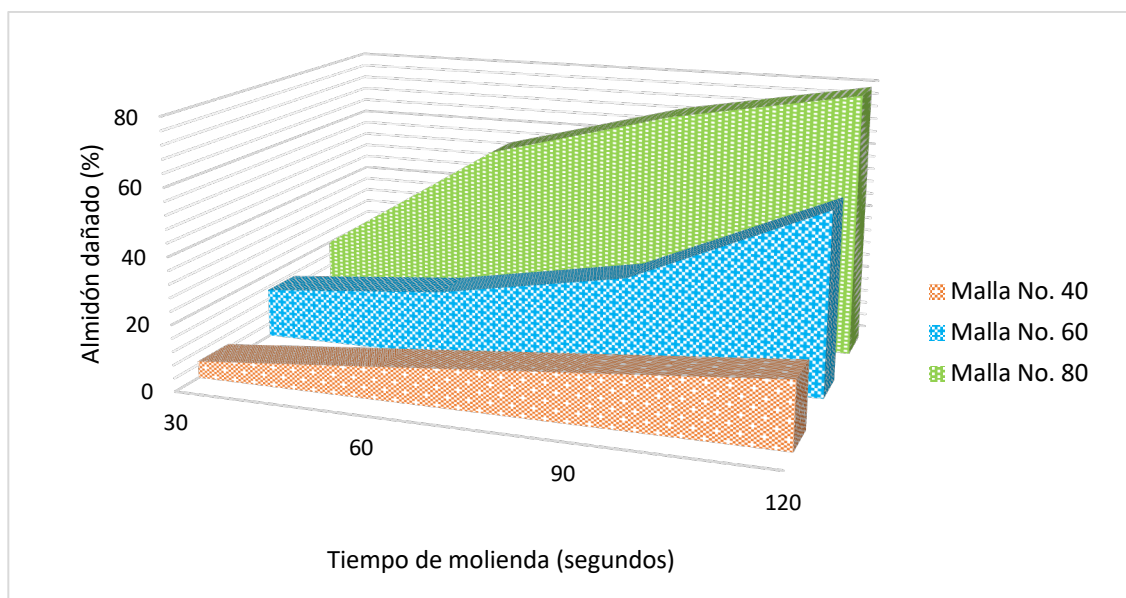


Figura 22. Porcentaje de almidón dañado bajo la influencia del tiempo de molienda y tamizaje a diferentes aberturas de malla, por la técnica de rojo Congo.

3.5.2 Efecto del color

Se observó (Tabla 11) que a partir de las 24 horas de germinación ya existe una diferencia significativa ($p < 0.05$) de los parámetros L^* a^* b^* en comparación con las semillas sin germinar, pero el color no varió significativamente entre las 24, 48 y 72 horas en todos los parámetros, excepto en el parámetro b^* a las 72 horas.

Tabla 11. Cambios en el color Hunter durante la germinación de semillas de amaranto.

Tiempo de germinación de amaranto (h)	Parámetros (escala Hunter)			Diferencia de color (ΔE)
	L	a	b	
0	66.58 \pm 1.01 ^e	11.95 \pm 0.09 ^a	25.16 \pm 0.63 ^a	0.00 (control) ^a
24	83.00 \pm 0.30 ^a	9.10 \pm 0.04 ^{de}	12.56 \pm 0.12 ^e	20.90 \pm 0.41 ^b
48	82.19 \pm 0.21 ^a	8.74 \pm 0.20 ^{de}	13.40 \pm 0.26 ^e	19.81 \pm 0.36 ^b
72	81.47 \pm 0.33 ^{ab}	8.93 \pm 0.26 ^e	15.04 \pm 0.36 ^{cd}	18.26 \pm 0.17 ^b
96	80.03 \pm 0.66 ^b	9.39 \pm 0.14 ^{cd}	16.25 \pm 0.29 ^c	16.34 \pm 0.61 ^c
120	76.36 \pm 0.96 ^c	9.65 \pm 0.32 ^{bc}	18.14 \pm 0.68 ^b	12.26 \pm 1.64 ^{cd}
144	74.21 \pm 0.02 ^d	10.05 \pm 0.01 ^b	18.89 \pm 0.02 ^b	10.06 \pm 0.27 ^d

Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para tres replicas en cada tiempo. Letras diferentes para cada parámetro y ΔE (columnas), indican diferencias significativas con Tukey ($p \leq 0.05$).

A partir de las 96 horas, se observaron diferencias más notables en el color, atribuidas a la presencia de betacianinas, especialmente la amarantina, que confirió la coloración roja y afectó principalmente el parámetro a^* . De acuerdo con Khanda (2009), estos resultados indican que la germinación aumentó la luminosidad de las muestras y realzó los colores rojos y, en menor medida, amarillo, siendo la tonalidad roja más prominente a partir de las 96 horas según el parámetro a^* .

El proceso de germinación también presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) en los colores de las semillas de amaranto, lo cual se reflejó en la diferencia de color (ΔE). Al comparar las semillas sin germinar (tiempo cero) con cada etapa de germinación, se obtuvo un valor ΔE descendente, siendo estadísticamente significativo a partir de las 96 horas, cuyo comportamiento fue similar a lo reportado por Karaoğlu et al. (2022). Esta disminución en ΔE se debió a la reducción de la luminosidad y al aumento en la intensidad del color rojo y, en menor medida, del amarillo, cuando comenzó el crecimiento de la plántula, es decir, a las 48 horas. Este contraste se evidencia de manera visual en la Figura 23, donde se aprecia una tonalidad que se intensifica a medida que aumenta el tiempo de germinación.

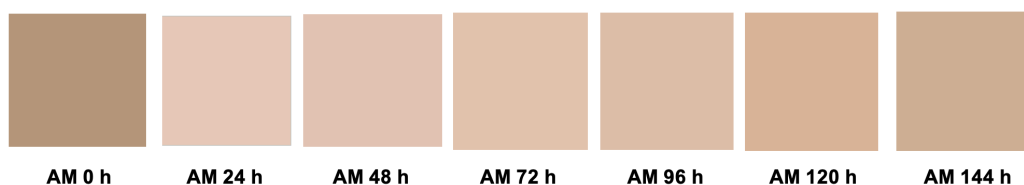


Figura 23. Tonalidades obtenidas de la escala Hunter durante la germinación de amaranto. AM significa amaranto germinado a diferentes tiempos dados en horas.

3.5.3 Actividad diastásica

En la Figura 24 se nota que a medida que progresa el tiempo de germinación, el índice de diastasa experimenta un aumento, lo que muestra una diferencia significativa ($p < 0.05$) desde las semillas sin germinar hasta una germinación de 96 horas. Estos resultados eran predecibles, ya que las enzimas responsables de degradar los carbohidratos se activan durante el proceso de germinación para suministrar los sustratos necesarios requeridos por la nueva plántula.

Estos hallazgos concuerdan con lo mencionado por Kanensi et al. (2013), quienes informaron que la actividad diastásica aumenta a medida que se prolonga el tiempo de germinación, lo que indica de manera indirecta una disminución en el contenido de almidón en el grano de amaranto al aumentar el tiempo de germinación.

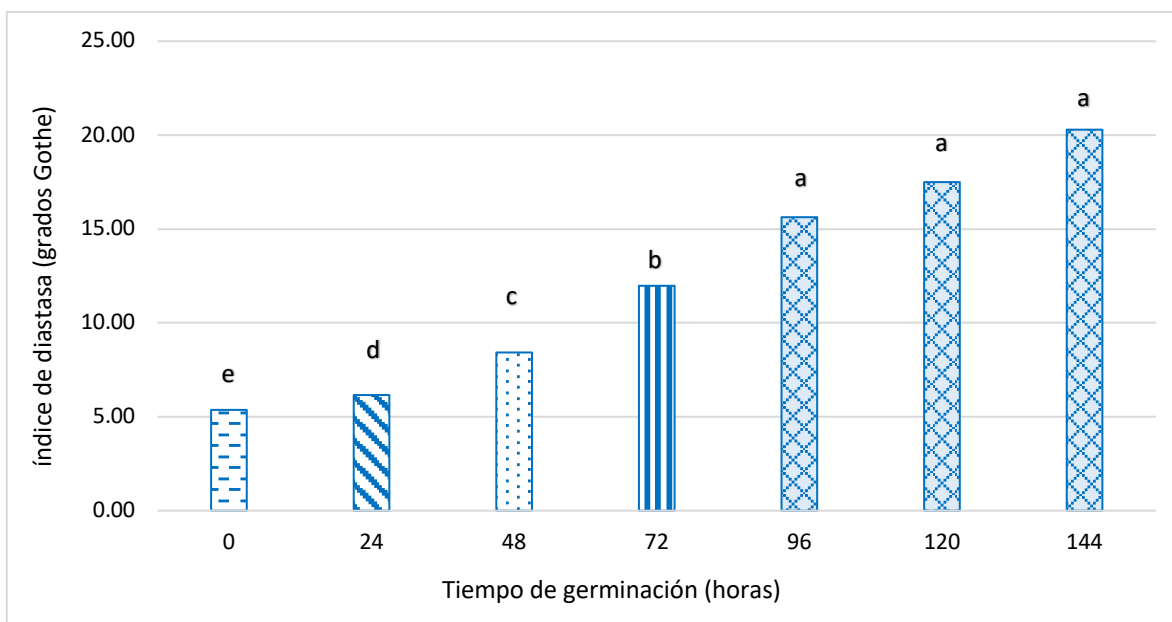


Figura 24. Comportamiento de la actividad diastásica a diferentes tiempos de germinación (0 h a 144 h). Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para dos replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

De acuerdo a la investigación de Cornejo et al. (2019), la germinación durante las primeras 24 horas conlleva a cambios positivos en las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del amaranto, mientras que Jiménez et al. (2019) y Najdi Hejazi et al. (2016) menciona que a partir de las 48 horas se presenta una disminución en los niveles de lípidos y antinutrientes y un aumento en las concentraciones de proteínas y fibra soluble, gracias a la actividad diastásica.

Por otro lado, los resultados de la actividad diastásica han evidenciado una diferencia significativa desde las 24 hasta las 96 horas, y la aceptabilidad del color se hizo evidente antes de las 72 horas de germinación. En concordancia con las directrices de Casquete, et al. (2017) y Fernando et al. (1985), que señalan que a partir de las 48 horas se inicia la producción de aflatoxinas en condiciones de

germinación de la plántula, se establece la germinación a las 48 horas como el momento óptimo para la producción de harina germinada de amaranto.

3.5.4 Rancidez

Los resultados obtenidos respecto a la rancidez (Figura 25), mostraron que la muestra rancia tenía una concentración significativa ($p < 0.05$) de aldehído epidrínico, lo que indica un alto grado de rancidez. Por otro lado, las muestras de harina almacenadas a diferentes tiempos mostraron un aumento progresivo significativo en la concentración de aldehído epidrínico y esto es esperable, pues a medida que pasa el tiempo, la concentración de aldehído epidrínico aumenta debido a la continuación de la oxidación lipídica (Kumar et al., 2022).

Sin embargo, fue interesante observar que las muestras recién molidas almacenadas durante dos y siete meses mostraron una concentración significativa más baja de aldehído epidrínico en comparación con las muestras almacenadas como harina, pertenecientes al mismo período de tiempo. Esto sugiere que la planta seca conserva en gran medida su estructura celular intacta, lo cual actúa como una barrera natural contra la oxidación y la degradación. Al convertir la planta en harina, esta estructura se rompe, al exponer más componentes internos como grasas, que pueden oxidarse y volverse rancios (Al-Taher et al., 2023).

Por otro lado, diversos estudios reportaron una vida útil de 16 meses para las semillas con una viabilidad del 70% (Adam et al., 2017), de 25 días a cuatro meses para amaranto reventado (Islas-Rubio et al., 2014) y de tres meses para la harina de amaranto (Jiménez et al., 2020); transcurrido este tiempo, la calidad del producto comienza a disminuir. Al comparar los resultados obtenidos, se observó que el amaranto germinado presenta un mayor tiempo de vida útil (siete meses) cuando se almacena como germinado y se produce la harina al momento de su uso. Además, el amaranto germinado mostró una mejor estabilidad oxidativa post-germinación, posiblemente debido a la presencia de antioxidantes y la disminución de ácidos grasos durante este proceso, según lo informado por Jiménez et al., (2020).

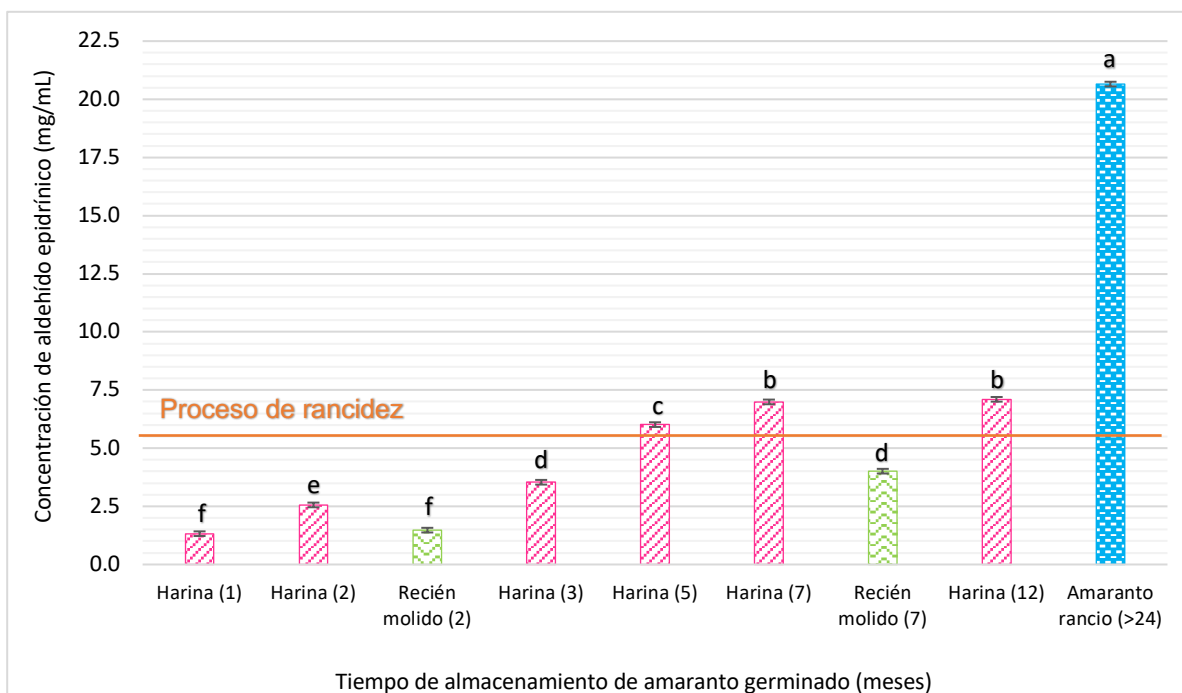


Figura 25. Influencia de la rancidez a partir de la formación de aldehído epidrínico en diferentes muestras almacenadas al vacío. La muestra “Rancio” es el amaranto reventado con sabor característico a rancidez. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para tres replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

3.6 Pasta de amaranto germinado

3.6.1 Cifra Pelshenke

En relación con la prueba de Pelshenke (Figura 26), se observó que el tiempo de flotación disminuyó significativamente ($p < 0.05$) desde la proporción 85:15 hasta la proporción 50:50, en comparación con la sémola de trigo cristalino. Este fenómeno se debió a que, al aumentar la proporción de harina de amaranto, se incrementó el aporte de carbohidratos a las levaduras, lo que favoreció una fermentación más rápida y, consecuentemente, permitió que la masa flotara en un tiempo menor (Hernández-García, et al., 2022). Sin embargo, a partir de la proporción 25:75 y con 100% de harina de amaranto, hubo diferencia significativa ($p \geq 0.05$) en comparación con el control, y esto fue porque, a pesar de que el amaranto proporciona más carbohidratos para la fermentación, la red de gluten no es suficiente o no existe, lo que retrasa el tiempo de flotación.

En cuanto al tiempo de desintegración, también se observó una tendencia en este tiempo a medida que aumentaba la proporción de amaranto. Este resultado estuvo influenciado por la presencia de gliadinas (que aportan extensibilidad) y gluteninas (que dan elasticidad a la masa) (Pérez, et al., 2010). Al disminuir la proporción de estas proteínas en la sémola de trigo, la masa perdió fuerza y, aunque el almidón (que es el componente principal en el amaranto) proporcionó cierta fuerza a la masa, no fue suficiente, lo que ocasionó una disminución en el tiempo de desintegración, con una diferencia significativa ($p < 0.05$) a partir de la proporción 85:15.

Con los resultados obtenidos, se seleccionó la proporción 65:35 que es una proporción intermedia con diferencias significativas tanto en el índice de flotación como en el de desintegración, el cual, a pesar de tener un tiempo menor, es importante resaltar que la masa sólo está formada de harina y agua, por lo que adicionar otro ingrediente presente en la pasta como el huevo, ayudaría a mejorar las características de fuerza de la masa.

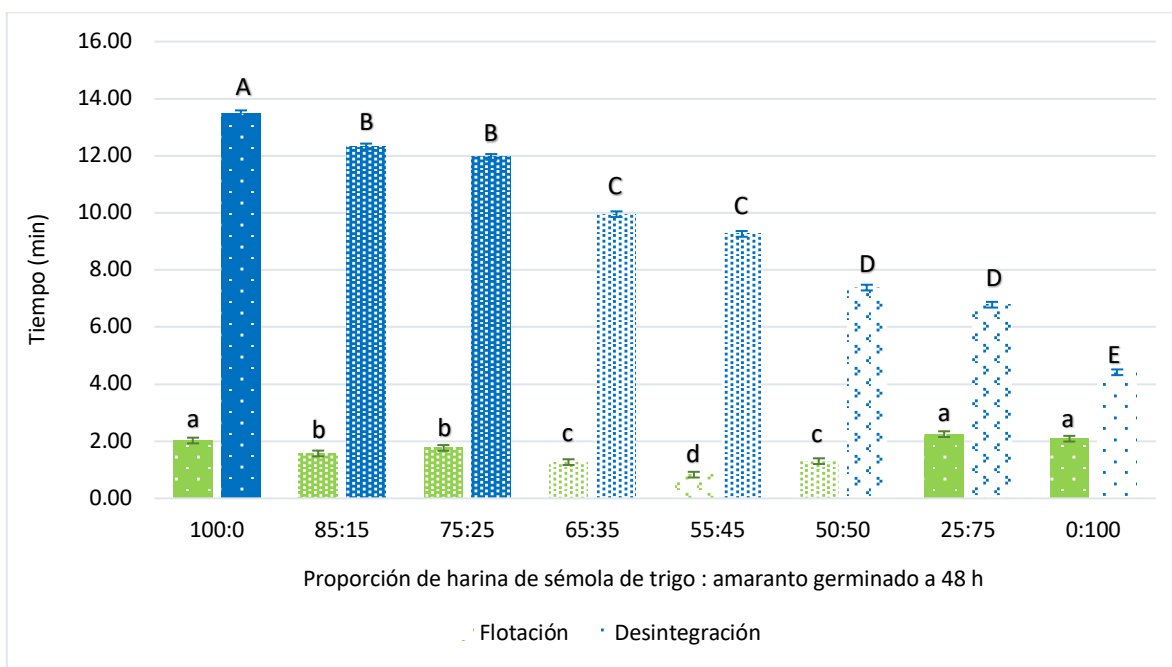








Figura 26. Comportamiento de la fuerza de la masa a través de la cifra Pelshenke sobre diferentes proporciones de harina de sémola de trigo cristalino y harina de amaranto germinado. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para tres replicas en cada tiempo. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

3.6.2 Formulación de pasta

La Tabla 12 muestra las formulaciones que emplearon una proporción relativamente baja de agua y huevo, como el método 1 (14 % de agua y 10 % de huevo) y el método 2 (17 % de agua y 15 % de huevo), con características de masa seca y dificultades en la manipulación. Esto se debió a la ausencia de humedad para hidratar la harina, lo que no permitió el desarrollo completo del gluten y dio como resultado una masa menos elástica y menos maleable.

Tabla 12. Matriz de formulaciones de pasta de sémola de trigo con harina de trigo:amaranto germinado 63:35

Ingredientes	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5	Método 6
Agua (%)	14	17	0	50	19	12.5
Huevo (%)	10	15	60	50	56	70
Apariencia						
Consistencia	Poco seca	Poco seca	Seca	Adhesivo	Normal	Normal
Maleabilidad	Se estira, pero los bordes son irregulares en cada laminación	Se estira, pero los bordes son irregulares en cada laminación	Al estirar se rompe, falta elasticidad	Se queda pegado en el equipo	Maleable y elástico	Elástico pero se rompe en la última laminación

Por otro lado, el método 3, que consistió en emplear únicamente el 60 % de huevo sin agua, resultó en una masa extremadamente seca que no podía estirarse adecuadamente. Las proteínas del huevo, aunque presentes en abundancia, no pudieron sustituir completamente el papel del gluten, especialmente en la ausencia de agua. Como resultado, la masa careció de la elasticidad necesaria, mostrando una textura seca y poco maleable. Esto ocurrió porque las proteínas del huevo no lograron interactuar adecuadamente con las proteínas de la harina sin la presencia de agua (Sahin et al., 2024 y Alizadeh et al., 2024).

En contraste, en el método 6 (12.5 % agua y 70 % huevo), aunque se logró un buen laminado sin irregularidades en la masa, la proporción de huevo fue alta en comparación con el agua, afectando la formación adecuada del gluten al competir por el agua necesaria para la hidratación de las proteínas del trigo, interferir directamente en la red de gluten, y coagularse prematuramente, lo que redujo la elasticidad y cohesión de la masa, y que resultó en una estructura más débil y menos elástica.

Finalmente, el método 5, que utilizó una proporción de 19 % de agua y 56 % de huevo, produjo una masa con características óptimas para la elaboración de pasta y esto coincide con lo reportado por Sahin et al., (2024), quien dijo que se debe añadir entre un 18 y un 25 % de agua para conseguir una masa adecuada. Esta formulación permitió obtener una masa suave y maleable que se estiraba uniformemente durante el laminado, dado que el agua proporcionó la humedad necesaria para la formación de gluten y la plasticidad de la masa, mientras que el huevo contribuyó con proteínas adicionales y emulsificantes que mejoraron la estructura y la elasticidad de la masa, siendo la formulación de elección (Sahin et al., 2024 y Alizadeh et al., 2024).

3.6.3 Secado de pasta

Se observa en la Tabla 13 que el parámetro L^* , que representa la luminosidad, disminuyó a medida que aumentaba la temperatura de horneado, lo que indica que a partir de 80°C la pasta adquiere una tonalidad más oscura. Por otro lado, el parámetro a^* aumentó, lo que sugiere un cambio hacia tonos más rojizos, mientras que el parámetro b^* disminuyó, orientándose hacia una tonalidad azul, este comportamiento se asemejó a lo que reportó Islas-Rubio et al. (2014) para una pasta a base de amaranto. Estas variaciones en los parámetros de color resultaron en un cambio hacia tonos más café o marrón durante el horneado (Figura 27); se mostró una diferencia significativa ($p < 0.05$) desde los 80°C, volviéndose más pronunciada con el aumento de la temperatura. A una temperatura de 70°C no se observó una diferencia significativa ($p > 0.05$) respecto al control.

Estos cambios en los parámetros de color pueden atribuirse a la reacción de Maillard que ocurre a partir de los 80°C, que desencadena reacciones químicas entre los aminoácidos y los azúcares reductores presentes en la pasta. Esta reacción es responsable de la formación de compuestos que contribuyen al color dorado o marrón y al aroma característico de los alimentos horneados.

Tabla 13. Cambios de color a diferentes temperaturas de secado de pasta de sémola de trigo

Temperatura (°C)	Parámetros (escala Hunter)			Diferencia de color (ΔE)
	L	a	b	
0*	90.05 \pm 0.63 ^a	7.11 \pm 0.28 ^a	16.76 \pm 0.13 ^a	0.00 (control) ^d
70	86.67 \pm 1.00 ^a	7.34 \pm 0.41 ^a	15.45 \pm 0.55 ^b	3.71 \pm 1.44 ^d
80	74.82 \pm 1.54 ^b	9.20 \pm 0.37 ^b	13.06 \pm 0.65 ^c	15.82 \pm 2.02 ^c
90	65.49 \pm 2.72 ^c	10.69 \pm 0.35 ^c	12.66 \pm 0.47 ^c	25.16 \pm 3.13 ^b
100	59.51 \pm 0.66 ^d	11.55 \pm 0.36 ^d	12.89 \pm 0.31 ^c	31.10 \pm 4.31 ^a

Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para tres replicas en cada tiempo. *Corresponde a la masa antes de cocer. Letras diferentes para cada parámetro y ΔE (columnas), indican diferencias significativas con Tukey ($p \leq 0.05$).

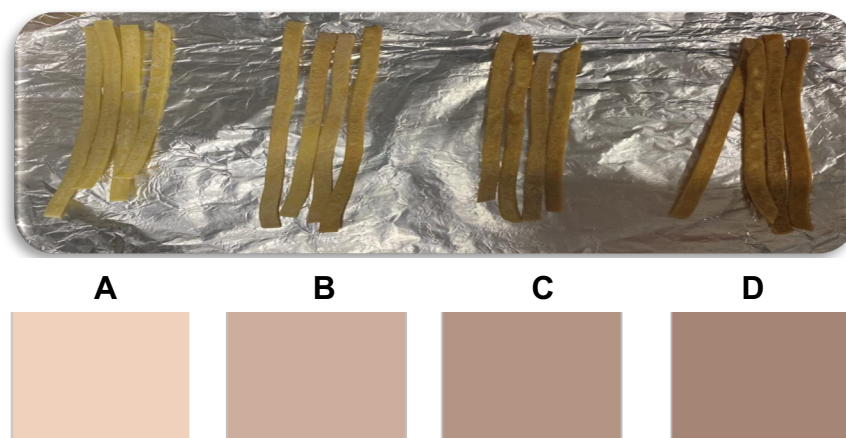


Figura 27. Cambio de coloración de pasta de trigo al hornear a distintas temperaturas en un periodo de dos horas. Dónde “A” corresponde a 70 °C, “B” a 80°C, “C” a 90 °C y “D” a 100 °C

Dado que a 70°C no se observó una diferencia significativa en la coloración, se analizó el comportamiento de la humedad en la pasta de sémola de trigo a esta temperatura durante cinco horas (Figura 28). Los resultados indicaron que la humedad se mantuvo constante a partir de las 2.5 horas, lo que sugiere que, a este tiempo, el proceso de horneado logró la eliminación de la humedad de la pasta; esto indica que alcanza un equilibrio en la pérdida de agua, lo que lo hace adecuado para lograr una pasta con la textura y consistencia deseadas (Costa-Vimercati et al., 2020).

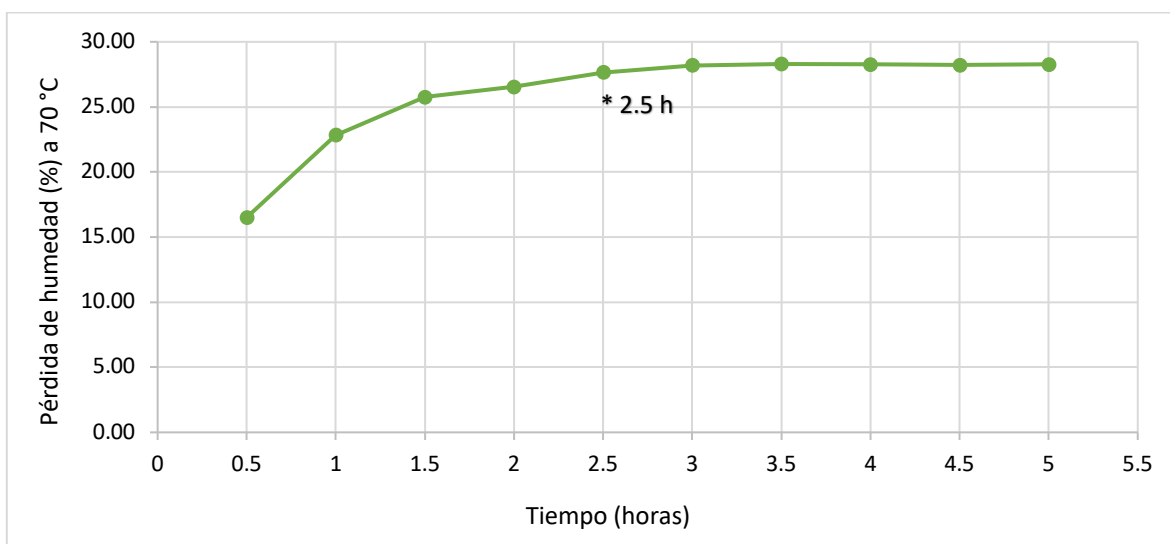


Figura 28. Efecto de la humedad durante el secado de pasta de amaranto germinado en un horno por turbo convección a 70 °C. *No existe diferencia significativa a partir de este tiempo. Los resultados son las medias (\pm DE, desviación estándar) para dos replicas en cada tiempo.

3.6.4 Pruebas culinarias

La Tabla 14 muestra los resultados de pruebas de calidad realizadas en diferentes proporciones de sémola de trigo (ST) y harina de amaranto germinado (HAG). En cuanto a la fragilidad de la pasta, se observó una disminución en la fragilidad a medida que aumentaba la proporción de harina de amaranto germinado, con diferencia significativa ($p < 0.05$) a partir de la proporción de 45 %. En cuanto al grado de absorción, existieron diferencias significativas entre la pasta control, las pastas al 35 % y 40 %, y las pastas al 45 % y 50 % de harina de amaranto germinado.

Esto pudo deberse a que la presencia de harina de amaranto germinado disminuyó la red proteica del gluten en la pasta, lo que afectó su capacidad para retener la humedad y su resistencia estructural. Además, los gránulos de almidón presentes en el amaranto tuvieron la capacidad de retener agua, liberándola lentamente durante el proceso de secado. Sin embargo, a pesar del grado de absorción, la temperatura de secado favoreció tanto a la pasta control como a las mezclas con harina de amaranto germinado hasta la proporción 40 %. A partir de la proporción 45 %, hubo diferencia significativa en la fragilidad, lo que sugiere una interacción compleja entre la composición de la pasta y el grado de absorción (Larrosa et al., 2016).

Tabla 14. Pruebas de calidad para 100 g de pasta a diferentes proporciones de harina de trigo y de amaranto germinado

Harina de amaranto germinado (%)*	Pruebas de calidad					
	Fragilidad	Grado de absorción (%)	Tiempo de cocimiento (min)	Índice de tolerancia al cocimiento	Porcentaje de sedimentación	Incremento de volumen (%)
0	3 ^a	154.89 ± 0.46 ^a	33.01 ± 3.21 ^a	104.47 ± 4.40 ^a	6.00 ± 0.00 ^a	158.89 ± 0.44 ^c
35	3 ^a	175.63 ± 0.38 ^b	18.98 ± 0.45 ^b	63.69 ± 0.84 ^b	3.67 ± 0.58 ^b	172.96 ± 0.67 ^b
40	3 ^a	176.73 ± 0.50 ^b	17.32 ± 0.56 ^b	48.34 ± 4.06 ^c	3.00 ± 0.00 ^{bc}	178.33 ± 0.72 ^b
45	2 ^b	184.49 ± 3.24 ^c	12.33 ± 0.63 ^c	40.29 ± 0.84 ^d	2.67 ± 0.58 ^{bd}	217.13 ± 0.24 ^a
50	2 ^b	189.37 ± 3.79 ^c	12.29 ± 1.10 ^c	39.06 ± 2.36 ^d	2.33 ± 0.58 ^{cd}	225.00 ± 0.00 ^a

*La harina de amaranto germinado se combina con la sémola de trigo cristalino para alcanzar el 100 %. Los resultados son las medias (± DE, desviación estándar) para tres replicas. Letras diferentes para cada prueba de calidad (columnas), indican diferencias significativas por cada prueba, analizado con Tukey ($p \leq 0.05$).

En relación con el tiempo de cocimiento, existió diferencia significativa entre la pasta control y la pasta a partir del 35 % de amaranto germinado, además, se observó una tendencia de disminución del tiempo de cocción a medida que aumentaba la proporción de harina de amaranto germinado. Según Namrata et al. (2021) y Rodríguez-Huezo et al., 2022, el tiempo de cocción debe estar entre 8 y 15 minutos, y esta variación, al adicionar amaranto, puede atribuirse principalmente al contenido de fibra, que reduce el tiempo de cocción.

Rodriguez-Huezo et al. (2022) señala que la sémola de trigo contiene un 1.96 ± 0.25 % de fibra, mientras que Thakur et al., 2021 informa que la harina de amaranto germinado (48 horas) presenta un 5.35 ± 0.15 % de fibra, lo cual explica este efecto. Sin embargo, todos los porcentajes probados con harina de amaranto germinado se encontraron dentro de los parámetros aceptados de cocción, pero con una diferencia significativa al usar amaranto a partir de una proporción de 45 %.

Por otro lado, el índice de tolerancia al cocimiento mostró una reducción gradual al aumentar la proporción de harina de amaranto germinado, con diferencias significativas ($p < 0.05$) en cada proporción hasta llegar a 45 %, donde la disminución fue similar a la observada entre 45 y 50 %. Este fenómeno se puede atribuir a la presencia de fibra soluble en el amaranto germinado, la cual debilita la matriz del gluten y facilita la penetración del agua en la masa de la pasta, lo que acelera su cocción, según lo señalado por Rodriguez-Huezo et al. (2022).

Este efecto se reflejó en la prueba de incremento de volumen, donde se observó un aumento significativo en el porcentaje conforme aumentó la proporción de amaranto germinado. Esto se debió a la rápida saturación de la masa de pasta con agua, provocada por la presencia de fibra soluble, gracias a la formación de canales y poros que permitieron un mejor transporte de agua (Rodriguez-Huezo et al. 2022).

Sin embargo, se observó un efecto contrario en la prueba de porcentaje de sedimentación, donde existió una disminución del sedimento a medida que aumentó la cantidad de amaranto germinado. Este fenómeno puede estar relacionado con las propiedades específicas de la harina, que contribuyen a la formación de una pasta con mayor volumen, lo que resulta en una menor cantidad de partículas de sedimentación (Islas-Rubio et al., 2014 y Sánchez-Sandoval et al., 2018).

Los resultados de las pruebas de calidad sugirieron que la proporción 40 % favorece diversas características de la pasta, comparadas con otras de proporción mayor en donde se observó una afectación de la textura de la pasta cocida, haciéndola más suave.

3.6.5 Análisis sensorial

En términos de textura (Figura 29) se observó que ambas pastas son percibidas mayormente como “Normal” (56 % amaranto, 66 % trigo, sin diferencias significativas). Asimismo, hay aproximadamente un tercio de la población (33.33 %) que percibió a la pasta elaborada con amaranto como “Dura”, lo cual se contrasta con la pasta elaborada con trigo con apenas un 14.29 %, lo que resulta en una diferencia significativa. Aun así, no debemos perder de vista que el grueso de la población se concentró en una percepción de textura “Normal”.



Figura 29. Textura de pasta evaluada por un panel de 70 consumidores no expertos. El asterisco (*) indica diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en cada nivel de textura.

En cuanto al agrado general (Figura 30), la población mostró un grado de aceptación fuerte, ya que entre el 63 % (trigo) y 56 % (amaranto) mencionaron que el producto “les gusta” o “les gusta mucho”. Si aislamos estos dos niveles, el amaranto destacó con una diferencia significativa contra el trigo en “Me gusta”. Por su parte, el trigo destacó de manera significativa en “Me gusta mucho” con 21.43 % vs 4.44 % del amaranto. Es importante destacar que cerca de 31 % de la población (tanto de los que probaron amaranto como de los que probaron trigo) no indicó gusto o disgusto (o sea, se mantuvieron neutrales), mientras que solo el 4 y 13 % (trigo y amaranto, respectivamente) mencionaron “Me desagrada”. Nadie en el panel de consumidores mencionó “Me desagrada mucho”.

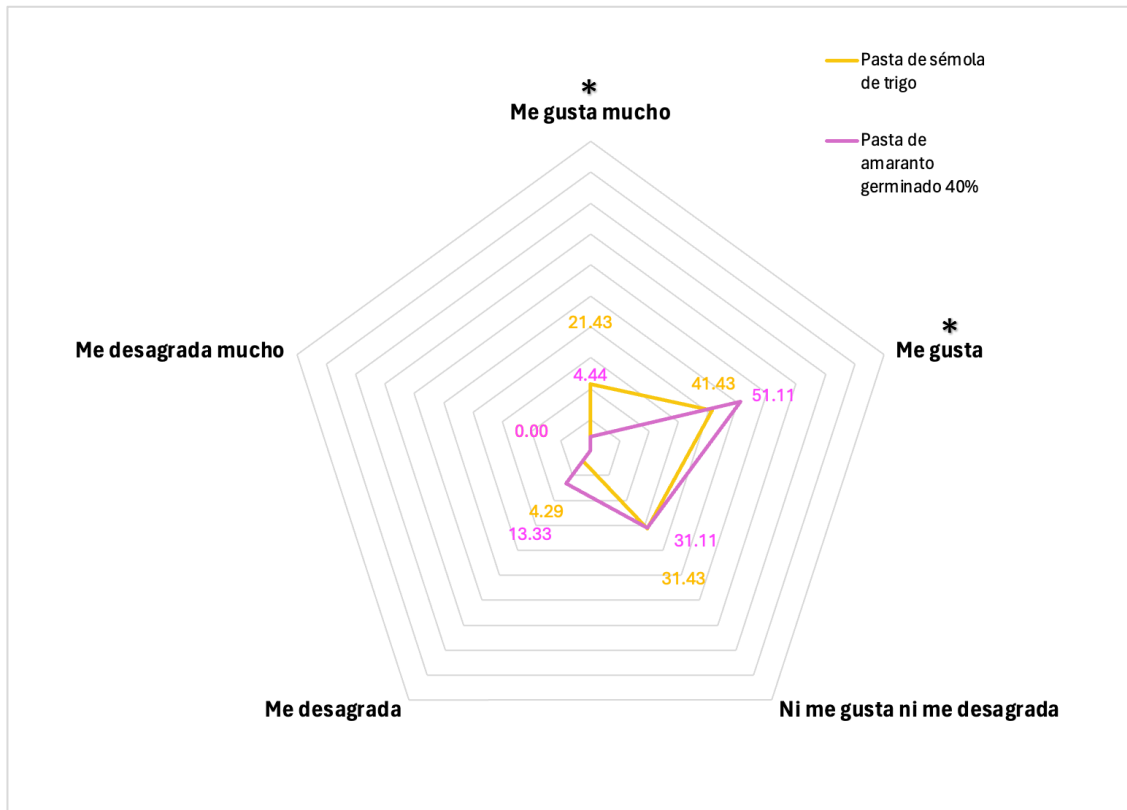


Figura 30. Nivel de agrado de un panel de 70 consumidores no expertos. El asterisco (*) indica diferencias significativas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en cada nivel de agrado.

De los diferentes sabores que los panelistas detectaron en ambas preparaciones (Figura 31), la gran mayoría mencionó “Ninguno”, pero con una diferencia significativa ya que fue el 97 % para el trigo y 43 % para el amaranto. En la preparación de amaranto, la población detectó un sabor “diferente o nuevo” (sin poder especificar cuál era) con 20 %, y un sabor “vegetal” con 18 %, ambos sabores con diferencia significativa vs el trigo.

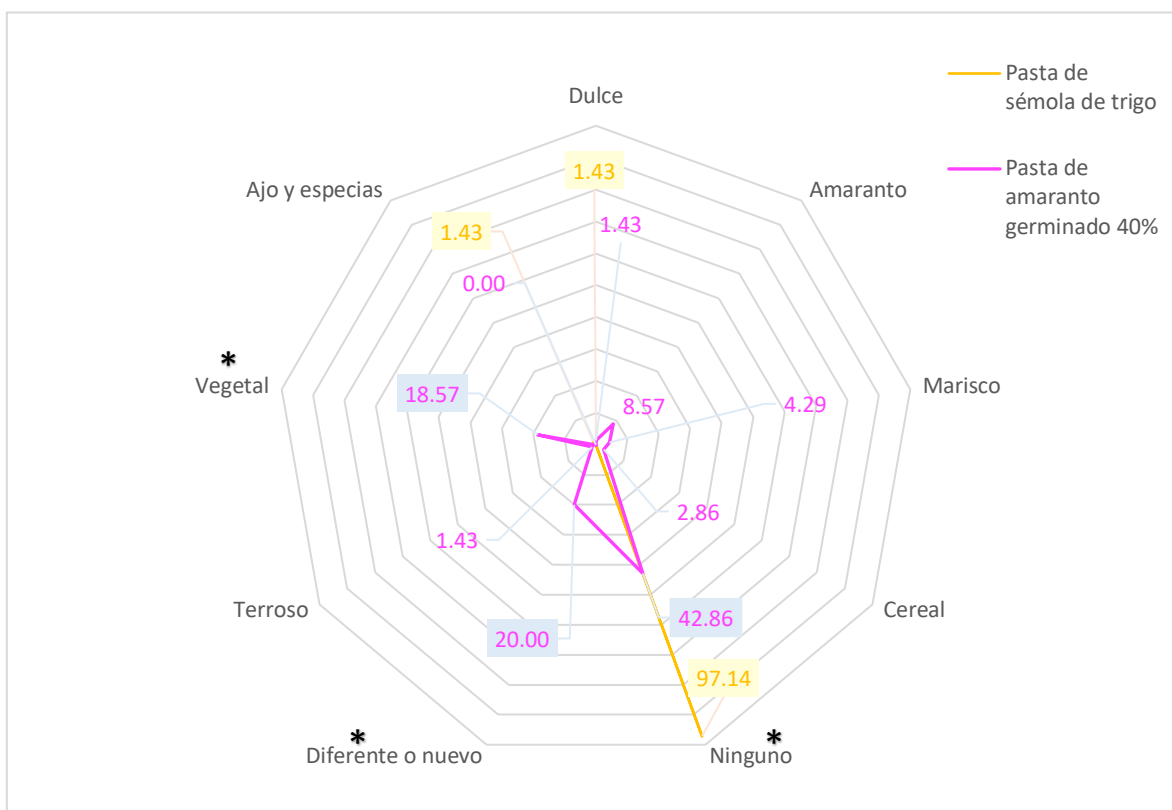


Figura 31. Detección de sabores dado por un panel de 70 consumidores no expertos. El asterisco (*) indica diferencias significativas con Tukey ($p \leq 0.05$) en cada tipo de sabor.

Por lo anterior, se escogió la preparación de pasta con un 40 % de amaranto y 60 % de trigo, ya que tuvo un alto grado de aceptación en gusto, casi no causó rechazo en los consumidores, se percibió con una textura normal y un sabor nuevo y diferente.

3.6.6 Análisis de perfil de textura

En la Tabla 15 se presentan las características texturales de la pasta formulada con un 40% de amaranto germinado en comparación con la pasta de sémola de trigo cristalino utilizada como control. Los resultados indicaron que no existen diferencias significativas en términos de fracturabilidad y masticabilidad entre ambas muestras. La fracturabilidad de ambas pastas fue nula, lo cual es esperable dado que estos productos, al estar cocidos, no exhiben esta propiedad.

Los resultados de masticabilidad fueron de 239.251 ± 2.394 para la pasta de amaranto germinado y 240.270 ± 6.476 para la pasta de sémola de trigo, lo que demostró una similitud notable entre ambas, y que no hubo pérdida de sólidos durante la cocción, lo cual es coherente con los datos presentados en la Tabla 14, donde se observa un menor porcentaje de sedimentación para la pasta con amaranto germinado al 40 % respecto del control. Este parámetro es fundamental dado que está relacionado con la capacidad de la estructura para recuperarse elásticamente y muestra una reducción cuando el almidón se disuelve en el agua de cocción, según investigaciones realizadas por Milde et al. (2021), lo cual indica que la pasta de amaranto tiene una buena cohesión de la pasta y su masticabilidad es comparable a la del control (Bolarinwa et al., 2021).

Tabla 15. Características texturales de calidad de la pasta cocida

Características	TIPO DE PASTA	
	Amaranto germinado 40%	Sémola de trigo 100 %
Dureza (g)	257.001 ± 4.395^b	339.764 ± 9.064^a
Fracturabilidad (g)	0.000 ± 0.000^a	0.000 ± 0.000^a
Adhesividad (g.s)	-3.053 ± 0.880^b	-18.497 ± 1.353^a
Elasticidad	1.020 ± 0.000^a	0.927 ± 0.023^b
Cohesividad	0.858 ± 0.031^b	0.945 ± 0.041^a
Gumosidad	157.865 ± 3.258^a	138.508 ± 3.177^b
Masticabilidad	239.251 ± 2.394^a	240.270 ± 6.476^a
Resiliencia	0.315 ± 0.023^b	0.377 ± 0.006^a

Datos expresados como las medias (\pm DE, desviación estándar). Letras diferentes para cada característica textural (fila), indican diferencias significativas por cada tipo de pasta, analizado con prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Por otro lado, existieron diferencias significativas en los demás parámetros mostrados en la Tabla 15. La dureza de la pasta de amaranto germinado tuvo un valor significativo menor (257.001 ± 4.395 g) respecto al control, lo que indicó que la pasta de amaranto fue más fácil de masticar. Esto se complementa con los datos de cohesividad de la pasta de amaranto de 0.858 ± 0.031 , aunque los valores de cohesividad fueron menores con respecto al control, su capacidad para mantenerse unida y el valor de dureza obtenido fueron suficientes para ofrecer una textura "Normal", como se evaluó en la prueba sensorial (ver Figura 29) y sin desintegrarse durante el consumo (Kultys et al., 2022).

En términos de adhesividad, la pasta de amaranto germinado también exhibió un valor significativamente menor (-3.053 ± 0.880 g·s) en comparación con la pasta de sémola de trigo. Esta característica contribuye a una sensación menos pegajosa en la boca sin la adhesión a la superficie bucal durante la masticación, lo que podría ser percibido positivamente por los consumidores (Milde et al., 2021).

Finalmente, la pasta de amaranto mostró diferencias significativas mayores en la elasticidad (1.020 ± 0.000) en comparación con la pasta control, a pesar de que mostró una resiliencia ligeramente inferior (0.315 ± 0.023). Esta característica aseguró una masticación satisfactoria sin llegar a ser excesivamente gomosa, a pesar de sus valores superiores de gomosidad (157.865 ± 3.258), lo que indicó que la pasta de amaranto mostró una eficaz capacidad para recuperar su forma original tras la deformación, destacando su capacidad para mantener una textura agradable y consistente durante el consumo (Chen et al., 2022 y Pessanha et al., 2023).

3.6.7 Análisis químico proximal

La composición química de la pasta de amaranto germinado al 40 % y la pasta de sémola de trigo 100 % se presenta en la Tabla 16. Se observaron diferencias significativas en todos los parámetros analizados. El contenido de humedad fue menor en la pasta de amaranto germinado (5.14 ± 0.22) en comparación con la pasta de sémola de trigo (7.02 ± 0.30), lo cual puede contribuir a una mayor vida útil en condiciones secas. El extracto etéreo también mostró diferencias, siendo ligeramente menor en la pasta de amaranto (20.33 ± 0.28) que en la de trigo. De acuerdo con lo reportado por Benincasa et al., 2019, la germinación disminuye los compuestos lipídicos, dándole un valor menor a la pasta, sin embargo, existen otros compuestos liposolubles como pigmentos y vitaminas que minorizan la diferencia de valor respecto al control.

Tabla 16. Composición nutricional de diferentes pastas (g/100 g)

Composición (%)	TIPO DE PASTA	
	Amaranto germinado 40%	Sémola de trigo 100 %
Humedad	5.14 ± 0.22^b	7.02 ± 0.30^a
Extracto etéreo	20.33 ± 0.28^b	21.84 ± 0.09^a
Fibra	7.77^a	4.44^b
Cenizas	1.42 ± 0.06^a	0.9 ± 0.13^b
Proteínas	17.08 ± 2.77^a	12.65 ± 2.80^b
Carbohidratos	53.41^b	60.18^a
Azúcares reductores	19.15 ± 2.30^a	5.40 ± 0.08^b
Azúcares totales	85.35 ± 5.45^b	181.50 ± 1.84^a

Datos expresados como las medias (\pm DE, desviación estándar). Letras diferentes para cada componente (fila), indican diferencias significativas por cada tipo de pasta, analizado con prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto a los carbohidratos, la pasta de trigo mostró un contenido superior (60.18) frente a la de amaranto (53.41). Los azúcares reductores y los azúcares totales presentaron diferencias significativas, siendo los azúcares reductores mayores en la pasta de amaranto (19.15 ± 2.30) en comparación al control, mientras que los azúcares totales fueron más altos en la pasta de trigo (181.50 ± 1.84) frente a la de amaranto (85.35 ± 5.45). Esta relación de datos coincide con lo reportado por Dolores-Jiménez et al. (2019).

Por otro lado, la pasta de amaranto mostró una diferencia significativa en el contenido de fibra con un 7.77 % en comparación con el 4.44 % de la pasta de trigo. Este resultado sugiere una ventaja en términos de aporte de fibra dietética, alineándose con lo informado por Chauhan et al. (2015), quienes señalaron que el contenido de fibra aumenta de manera significativa cuando el amaranto se somete a un proceso de germinación en comparación con su estado no germinado.

Además, la pasta de amaranto exhibió un contenido de cenizas mayor (1.42 ± 0.06), lo que puede reflejar una mayor presencia de minerales, mientras que el contenido proteico también fue significativamente mayor en la pasta de amaranto (17.08 ± 2.77) que en la de trigo (12.65 ± 2.80), destacando su valor nutricional en términos de aporte proteico. De hecho, la pasta de amaranto germinado ofrece más proteínas que otras pastas preparadas con los mismos ingredientes pero utilizando pseudocereales, como la pasta con quinoa al 30 % que contiene 14.90 g de proteína y 2.86 g de fibra (Aztaíza et al., 2010), y la pasta de amaranto al 50 % con 16.5 g de proteína (Islas-Rubio et al., 2014). Incluso supera el contenido proteico de las semillas de amaranto que contienen 12.29 g de proteína (Valadez-Vega et al., 2022).

Estos resultados han destacado las ventajas nutricionales de la pasta de amaranto germinado como una alternativa saludable, especialmente en términos de fibra y proteína, con un perfil de humedad que puede favorecer su almacenamiento.

3.6.8 Índice glucémico

La Figura 32 muestra que la pasta de amaranto germinado tuvo un comportamiento menor en comparación con la pasta de sémola de trigo, la pasta de sémola de trigo comercial y el pan blanco. Esta diferencia reflejó una menor cantidad de glucosa de la pasta de amaranto, lo que implica que su consumo controla los niveles de glucosa en sangre.

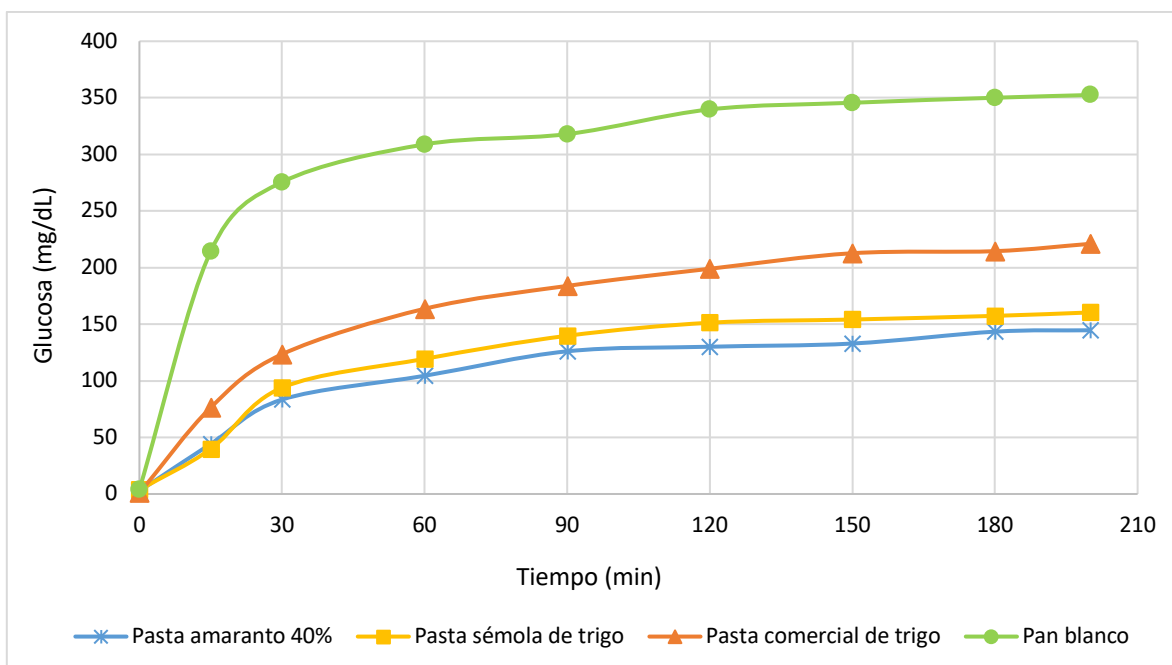


Figura 32. Cinéticas de hidrólisis del almidón de pan blanco (como referencia) y de los diferentes tipos de pasta. El área bajo la curva (AUC) indica diferencias significativas con Tukey ($p \leq 0.05$) para todos los tratamientos.

Lo anterior se complementa con la Tabla 17, donde se observa que el índice glucémico estimado (eIG) para la pasta de amaranto germinado al 40 % tuvo una diferencia significativa menor de 39.80 ± 0.18 , que en la pasta de sémola de trigo 100 % (43.78 ± 0.08) y la pasta de sémola de trigo comercial (56.56 ± 0.02). Este menor índice glucémico sugirió que la pasta de amaranto tiene un impacto más bajo en los niveles de glucosa en sangre, lo que es beneficioso para el control glucémico y la prevención de picos de azúcar en la sangre.

Tabla 17. Comportamiento glucémico de diferentes pastas

Tipo de pasta	Área bajo la curva* (mg/dL)	Índice de hidrólisis (IH)	Índice glucémico estimado (eIG)
Amaranto germinado 40%	22,398.99	36.66 ± 0.21	39.80 ± 0.18^c
Sémola de trigo 100 %	25,215.66	41.27 ± 0.10	43.78 ± 0.08^b
Sémola de trigo comercial	34,278.28	56.11 ± 0.03	56.56 ± 0.02^a

*Se toma como referencia el área bajo la curva del pan blanco, con un valor promedio de 61,092.93 mg/dL. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas para la predicción del índice glucémico, analizado con prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)

En términos de fibra dietética (Tabla 16), la pasta de amaranto germinado mostró un contenido significativamente mayor (7.77) en comparación con la pasta de sémola de trigo, lo que contribuye a una digestión más lenta y una liberación gradual de glucosa en el torrente sanguíneo, ayudando a mantener niveles de glucosa más estables. Aunque el contenido de azúcares reductores en la pasta de amaranto germinado fue significativamente mayor (19.15 ± 2.30) que en la pasta de sémola de trigo (5.40 ± 0.08), los azúcares totales fueron menores (85.35 ± 5.45) en comparación con el control (181.50 ± 1.84).

Los azúcares reductores, como la glucosa y la fructosa, mejoraron la apariencia y el sabor de la pasta debido a su capacidad de caramelización, contribuyendo al color durante la cocción. Estos azúcares, aunque se absorben más rápidamente, se encuentran en una matriz de fibra dietética que ralentiza su absorción, mitigando el impacto inmediato en los niveles de glucosa en sangre. La menor cantidad de azúcares totales en la pasta de amaranto también contribuye a una menor carga glucémica general. Además, la actividad diastásica presente en el amaranto germinado a las 48 h (Figura 24) también contribuye a la degradación de almidones complejos en azúcares simples, facilitando su digestión y absorción lenta, lo cual es favorable, ayudando a mantener niveles de glucosa en sangre más estables y evitando picos glucémicos.

4.0 CONCLUSIONES

- El lote de semillas de amaranto obtenido en la región de Tehuacán, Puebla, fue evaluado conforme a la normativa vigente y demuestra cumplir con los parámetros de calidad establecidos en las pruebas correspondientes.
- Las condiciones que resultaron en altos porcentajes de germinación y crecimiento de la plántula se obtienen mediante un remojo de 3.02 horas, utilizando el método de inmersión bajo condiciones de oscuridad, a una temperatura de $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante un período de germinación de 48 horas.

- La harina con malla No. 40 y con 90 segundos de molienda, se comporta de manera similar a la sémola de trigo y presenta un bajo rendimiento de almidón dañado y una tonalidad significativamente más clara a las 48 horas de germinación.
- Las semillas germinadas sin moler se conservan en condiciones de vacío en un desecador, por 7 meses sin presentar rancidez.
- Las condiciones optimizadas para elaborar la pasta final, son: utilizar harina de amaranto germinado al 40 %, con un 19 % de agua y un 56 % de huevo, horneada a 70°C durante 2.5 horas, cumplieron con las pruebas de calidad establecidas.
- La pasta elaborada con un 40 % de amaranto germinado, tiene un alto grado de aceptación en gusto, siendo percibida con una textura normal y un sabor novedoso y diferente.
- La pasta de amaranto germinado al 40 % presenta de manera significativa una menor dureza, adhesividad, cohesividad y resiliencia y mayor elasticidad y gomosidad, sin significancias en la fracturabilidad y masticabilidad, lo que sugiere una sensación de firmeza y que es fácil de masticar.
- La pasta de amaranto germinado al 40 % destaca por su alto contenido de proteínas, fibra y minerales, junto con menores azúcares totales y carbohidratos, ofreciendo un perfil nutricional mayor respecto a la pasta de sémola de trigo.
- La pasta de amaranto germinado al 40 % tiene un índice glucémico significativamente menor respecto a la pasta de sémola de trigo artesanal y comercial.

5.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abang Zaidel, D. N., Chin, N. L., Abdul Rahman, R., & Karim, R. (2008). Rheological characterisation of gluten from extensibility measurement. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 549–556. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.005>
- Acosta, E. H., Gallegos, E. G., Luis, J., & Téllez, R. (2014). Caracterización de suelos cultivados con amaranto y algunos aspectos agronómicos de la planta* Characterization of soils cultivated with amaranth and some agronomic aspects of the plant. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 421–431
- Adam, O., Anthony, O., Olabisi, O., Oluwaseyi, A., & Mary, A.-A. (2017). The Effect of Storage Environments and Duration on Seed Germination of Amaranth (*Amaranthus cruentus*). *Journal of Experimental Agriculture International*, 19(4), 1–7. <https://doi.org/10.9734/jeai/2017/38439>
- Ahmed, I. A. M., Makawi, A. B., & Mustafa, A. I. (2014). Characterization and improvement of flour of three Sudanese wheat cultivars for flat bread making Characterization and improvement of flours of Sudanese wheat cultivars for flat bread making. *Scientific Research Reports*, 1(1), 1–10. <https://www.researchgate.net/publication/264311294>
- Al-Taher, F., & Nemzer, B. (2023). Effect of Germination on Fatty Acid Composition in Cereal Grains. *Foods*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/foods12173306>
- Alizadeh, S., Ahmadi-Dastgerdi, A., Reisi, S., Ebrahimi Tirtashi, F., Zokaei, M., & Tahriri, S. (2024). Effect of Semolina Replacement with Amaranth Flour on Quality Characteristics of Functional Pasta. *Journal of Food Quality*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/3091944>
- AOAC International. Official Methods of Analysis of AOAC International. Methods 930.15, 2001.11, 2020.07 and 985.29. AOAC International: Gaithersburg, MD.
- AOAC. 1980. Official Methods of Analysis 13th ed. p. 526. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.

- Arendt, E. K., & Zannini, E. (2013). Amaranth. In *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries* (pp. 439–473). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857098924.439>
- Ashwar, B. A., Gani, A., Shah, A., Wani, I. A., & Masoodi, F. A. (2016). Preparation, health benefits and applications of resistant starch - A review. In *Starch/Staerke* (Vol. 68, Issues 3–4, pp. 287–301). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/star.201500064>
- Astaíza M., Ruíz L., & Elizalde A. (2010). Elaboración de pastas alimenticias enriquecidas a partir de quinua (*Chenopodium quinoa* wild.) y zanahoria (*Daucus carota*). *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 8(1), 43–53
- Ávila Miramontes, J. A., Ávila Salazar, J. M., Rivas Santoyo, F., & Martínez Heredía, D. (2014). El cultivo del trigo. Sistemas de Producción en el noroeste de México. In *DIVISION DE CIENCIAS BIOLOGICAS Y DE LA SALUD DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA* (pp. 1–104)
- Ayala-Cordero, Gabriela, Terraza, Teresa, López-Mata, Lauro, & Trejo, Carlos. (2004). Variación en el tamaño y peso de la semilla y su relación con la germinación en una población de *Stenocereus beneckeii*. *Interciencia*, 29(12), 692-697. Recuperado en 17 de mayo de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442004001200007&lng=es&tlng=es
- Bagulho, A. S., Monho, A., Almeida, A. S., Costa, R., Moreira, J., Pais, I., Scotti, P., Coutinho, J., & Maçãs, B. (2016). Technological value of blends (bread wheat flour and durum wheat semolina) for bread manufacture. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(6), 389–397. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-04-339>
- Ballance, S., Knutsen, S. H., Fosvold, Ø. W., Fernandez, A. S., & Monro, J. (2019). Predicting mixed-meal measured glycaemic index in healthy subjects. *European Journal of Nutrition*, 58(7), 2657–2667. <https://doi.org/10.1007/s00394-018-1813-z>
- Bastos, G. M., Soares Júnior, M. S., Caliarí, M., de Araujo Pereira, A. L., de Moraes, C. C., & Campos, M. R. H. (2016). Physical and sensory quality of gluten-

- free spaghetti processed from amaranth flour and potato pulp. *LWT*, 65, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.067>
- Beitane, I., & Marisheva, A. (2023). The Potential of Amaranth as a Basic Raw Material for the Production of Pasta for a Vegan Diet. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063944>
 - Bello-Pérez, L. A., Cabello-Vazquez, J. A., Carmona-Garcia, R., Patiño-Rodríguez, O., & Alvarez-Ramirez, J. (2022). Preparation of Functional Pasta Supplemented with Amaranth Pregelatinized Extruded Flour. *Frontiers in Food Science and Technology*, 2. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.881714>
 - Benincasa, P., Falcinelli, B., Lutts, S., Stagnari, F., & Galieni, A. (2019). Sprouted grains: A comprehensive review. *Nutrients*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/nu11020421>
 - Biró, B., Fodor, R., Szedljak, I., Pásztor-Huszár, K., & Gere, A. (2019). Buckwheat-pasta enriched with silkworm powder: Technological analysis and sensory evaluation. *LWT*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108542>
 - Blazek, J., & Copeland, L. (2010). Amylolysis of wheat starches. II. Degradation patterns of native starch granules with varying functional properties. *Journal of Cereal Science*, 52(2), 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.06.011>
 - Bojórquez-Velázquez, E., Velarde-Salcedo, A. J., de León-Rodríguez, A., Jimenez-Islas, H., Pérez-Torres, J. L., Herrera-Estrella, A., Espitia-Rangel, E., & Barba de la Rosa, A. P. (2018). Morphological, proximal composition, and bioactive compounds characterization of wild and cultivated amaranth (*Amaranthus* spp.) species. *Journal of Cereal Science*, 83, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.09.004>
 - Bolarinwa, I. F., & Oyesiji, O. O. (2021). Gluten free rice-soy pasta: proximate composition, textural properties and sensory attributes. *Heliyon*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06052>
 - Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "pasta". *Encyclopedia Britannica*, 13 May. 2024, <https://www.britannica.com/topic/pasta>, visitada 2024
 - Broa Rojas, Elizabeth, Vázquez Carrillo, María Gricelda, Estrella Chulím, Néstor Gabriel, Hernández Salgado, José Hilario, Ramírez Valverde, Benito, & Bahena

- Delgado, Gregorio. (2019). Physicochemical characteristics and quality of the protein of pigmented native maize from Morelos in two years of cultivation. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(3), 683-697. Epub 30 de marzo de 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.481>
- Burlingame, B., Lawrence, M., Macdiarmid, J., Dernini, S., & Oenema, S. (2022). IUNS sustainable diets task force. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.007>
 - Cárdenas-Hernández, A., Beta, T., Loarca-Piña, G., Castaño-Tostado, E., Nieto-Barrera, J. O., & Mendoza, S. (2016). Improved functional properties of pasta: Enrichment with amaranth seed flour and dried amaranth leaves. *Journal of Cereal Science*, 72, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.09.014>
 - Carrillo Terán, W. I., Vilcacundo, R., & Carpio, C. (2015). Compuestos Bioactivos Derivados De Amaranto Y Quinoa Bioactive Components Derived From Amaranth And Quinoa. *Actualización En Nutrición*, 16(1), 18–22
 - Casquete, R., Benito, M. J., Córdoba, M. de G., Ruiz-Moyano, S., & Martín, A. (2017). The growth and aflatoxin production of *Aspergillus flavus* strains on a cheese model system are influenced by physicochemical factors. *Journal of Dairy Science*, 100(9), 6987–6996. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12865>
 - Chauhan, A., Kumari, N., Saxena, D. C., & Singh, S. (2022). Effect of germination on fatty acid profile, amino acid profile and minerals of amaranth (*Amaranthus* spp.) grain. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(3), 1777–1786. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01292-7>
 - Chauhan, A., Saxena, D. C., & Singh, S. (2015). Total dietary fibre and antioxidant activity of gluten free cookies made from raw and germinated amaranth (*Amaranthus* spp.) flour. *LWT*, 63(2), 939–945. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.115>
 - Chen, J., Sun, H., Mu, T., Blecker, C., Richel, A., Richard, G., Jacquet, N., Haubruge, E., & Goffin, D. (2022). Effect of temperature on rheological, structural, and textural properties of soy protein isolate pastes for 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110917>

- Chipón, J., Ramírez, K., Morales, J., & Díaz-calderón, P. (2022). Rheological and Thermal Study about the Gelatinization of Different Starches (Potato, Wheat and Waxy) in Blend with Cellulose Nanocrystals. *Polymers*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/polym14081560>
- Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C. A., Ramos-Pacheco, B. S., Taípe-Pardo, F., Peralta-Guevara, D. E., & Solano Reynoso, A. M. (2019). Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista ION*, 31(2), 67–81. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018005>
- Ciudad-Mulero, M., Matallana-González, M. C., Callejo, M. J., Carrillo, J. M., Morales, P., & Fernández-Ruiz, V. (2021). Durum and bread wheat flours. Preliminary mineral characterization and its potential health claims. *Agronomy*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy11010108>
- Cobos, D., Germano, L., Malovini, E., & Paladino, S. (2017). ¿Es posible determinar azúcares reductores en vinos por el método Fehling Causse Bonnans, sin utilizar acetato neutro de plomo? Is it possible measure reducing sugar in wines by Fehling Causse Bonnans method, without using neutral lead acetate? (Vol. 49, Issue 1)
- Coelho, L. M., Faria, C., Madalena, D., Genisheva, Z., Martins, J. T., Vicente, A. A., & Pinheiro, A. C. (2022). Valorization of Amaranth (*Amaranthus cruentus*) Grain Extracts for the Development of Alginate-Based Active Films. *Molecules*, 27(18). <https://doi.org/10.3390/molecules27185798>
- Concereal. Importancia y Consecuencias de la Falta de Control del “Almidón Dañado” en la Industria Panificadora. 2019 Barcelona. Disponible en: [<https://concereal.net/wp-content/uploads/2019/10/sdmatix-ix-jornadas-calidad-y-seguridad-alimentaria.pdf>], visitada el 03/11/2023
- Conte, P., Piga, A., Del Caro, A., Urgeghe, P.P., Fadda, C. (2021). Italian Dried Pasta: Conventional and Innovative Ingredients and Processing. In: Boukid, F. (eds) *Cereal-Based Foodstuffs: The Backbone of Mediterranean Cuisine*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69228-5_4

- Cornejo, F., Novillo, G., Villacrés, E., & Rosell, C. M. (2019). Evaluation of the physicochemical and nutritional changes in two amaranth species (*Amaranthus quitensis* and *Amaranthus caudatus*) after germination. *Food Research International*, 121, 933–939. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.022>
- Coțovanu, I., Stroe, S. G., Ursachi, F., & Mironeasa, S. (2023). Addition of Amaranth Flour of Different Particle Sizes at Established Doses in Wheat Flour to Achieve a Nutritional Improved Wheat Bread. *Foods*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/foods12010133>
- D’Amico, S., & Schoenlechner, R. (2017). Amaranth: Its Unique Nutritional and Health-Promoting Attributes. In *Gluten-Free Ancient Grains: Cereals, Pseudocereals, and Legumes: Sustainable, Nutritious, and Health-Promoting Foods for the 21st Century* (pp. 131–159). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100866-9.00006-6>
- Dabija, A., Ciocan, M. E., Chetrariu, A., & Codină, G. G. (2022). Buckwheat and Amaranth as Raw Materials for Brewing, a Review. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(6), 756. <https://doi.org/10.3390/plants11060756>
- Daniel, R., Torrez, G., Enrique, R., Duran, G., del Pilar, M., Gonzales, P., Loredo, M., Miranda, A., Luis, J., & Dávalos, G. (2017). Evaluación del aporte nutricional del amaranto (*amaranthus caudatus linnaeus*), quinua (*chenopodium quinoa willd*) y tarwi (*lupinus mutabilis sweet*) en el desayuno. *Revista Con-Ciencia*, 2(5), 15–28
- Dapčević-Hadnađev, T., Tomić, J., Škrobot, D., Šarić, B., & Hadnađev, M. (2022). Processing strategies to improve the breadmaking potential of whole-grain wheat and non-wheat flours. *Discover Food*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00012-w>
- De Bock, P., Daelemans, L., Selis, L., Raes, K., Vermeir, P., Eeckhout, M., & Van Bockstaele, F. (2021). Comparison of the Chemical and Technological Characteristics of Wholemeal Flours Obtained from Amaranth (*Amaranthus* sp.), Quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Buckwheat (*Fagopyrum* sp.) Seeds. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(3), 651. <https://doi.org/10.3390/foods10030651>

- De la Horra, A. E., Seghezze, M. L., Molfese, E., Ribotta, P. D., & León, A. E. (2012). Quality indicators for wheat flour: Industrial quality index and its relationship predictive trials. *AgriScientia*, 29(2), 81–89. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v29.n2.3886>
- De la Olán, M. O., Espitia Rangel, E., López Sánchez, H., Villaseñor Mir, H. E., Peña Bautista, R. J., & Herrera Hernández, J. (2012). Calidad física de grano de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 271–283
- De Moraes, M. S., de Melo Queiroz, A. J., de Figueirêdo, R. M. F., de Matos, J. D. P., da Silva, L. P. F. R., do Nascimento Silva, S., Gregório, M. G., de Oliveira, A. P., Quirino, D. J. G., & de Andrade, R. A. (2022). Germinated pumpkin flours: Antioxidant potential, phenolic compounds, minerals, morphology, and thermal analyses. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.17069>
- de Schepper, C. F., Buvé, C., van Loey, A. M., & Courtin, C. M. (2022). A kinetic study on the thermal inactivation of barley malt α -amylase and β -amylase during the mashing process. *Food Research International*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111201>
- Di Cairano, M., Condelli, N., Caruso, M. C., Marti, A., Cela, N., & Galgano, F. (2020). Functional properties and predicted glycemic index of gluten free cereal, pseudocereal and legume flours. *LWT*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109860>
- Díaz-Osorio, A., Martínez-Castaño, M., Contreras-Calderon, J., & Gallardo-Cabrera, C. (2019). Glycemic Index in vitro, Phenolic Content and Antioxidant Activity of a Snacks made with unripe banana (*Musa paradisiaca*) and Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Flours. *Informacion Tecnologica*, 30(5), 111–120. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500111>
- Eduardo, Espitia Rangel, Hernández, Luisa Fernanda Sesma, Ramos, Miriam Gabriela Valverde, Molina, Lucila González, López, Diana Escobedo, & Delgado, Miriam Jazmín Aguilar. (2021). Does amaranth have the agronomic potential to be a global phenomenon like quinoa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*,

12(8), 1459-1471. Epub 02 de mayo de 2022. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2897>

- Escott-Stump, S., Mahan, K.L., Raymond, J.L. (Eds.), 2013. Krause's Food & the Nutrition Care Process. Elsevier
- Espinoza-Ortega, A., Martínez-García, C. G., Rojas-Rivas, E., Fernández-Sánchez, Y., Escobar-López, S. Y., & Sánchez-Vegas, L. (2021). Consumer and food changes in Mexican households during maximal contingency in the COVID-19 pandemic. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100357>
- FAO. (2006). CODEX ALIMENTARIUS. CXS249-2006. NORMA PARA LOS FIDEOS
- Fardet, A. (2014). How can both the health potential and sustainability of cereal products be improved? A French perspective. In *Journal of Cereal Science* (Vol. 60, Issue 3, pp. 540–548). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.07.013>
- Farzaneh, V., Ghodsvali, A., Bakhshabadi, H., Zare, Z., & Carvalho, I. S. (2017). The impact of germination time on the some selected parameters through malting process. *International Journal of Biological Macromolecules*, 94, 663–668. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.052>
- Fasuan, T. O., Anyiam, C. C., Ojokoh, L. O., Chima, J. U., Olagunju, T. M., Okpara, K. O., & Asadu, K. C. (2021). Optimized spaghetti pasta from amaranth, partially deoiled sesame and modified sorghum starch composite: bioactive, nutritional and physico-functional characterization. *Nutrition & Food Science*, 51(6), 974–988. <https://doi.org/10.1108/NFS-09-2020-0360>
- Feijoo, J. C., Calderón, C. S., & Mora, E. M. (2017). Raúl Díaz Torres Universidad de Guayaquil (Guayaquil-Ecuador). In *REVISTA CIENTÍFICA Revista Cumbres* (Vol. 4). <http://investigacion.utmachala.edu.ec/revistas/index.php/Cumbres>
- Fernando, T., & Bean, G. (1985). Production of Aflatoxins on Amaranth Seeds by *Aspergillus* Spp. *Food Chemistry*, 17(1), 33–39
- Filip, E., Woronko, K., Stępień, E., & Czarniecka, N. (2023). An Overview of Factors Affecting the Functional Quality of Common Wheat (*Triticum aestivum* L.).

- In International Journal of Molecular Sciences (Vol. 24, Issue 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ijms24087524>
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (2018). <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC184632/>
 - Fujihara, S., Sasaki, H., Aoyagi, Y., & Sugahara, T. (2008). Nitrogen-to-protein conversion factors for some cereal products in Japan. *Journal of Food Science*, 73(3). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00665.x>
 - Gabriel Matías, L., Hernández Hernández, R. B., Vicente Peña, C., Torres López, G., Martínez Espinoza, V. A., & Ramírez Pacheco, L. (2018). Usos actuales y potenciales del Amaranto (*Amaranthus* spp.) Current and potential uses of Amaranth (*Amaranthus* spp.). *Journal of Negative and No Positive Results*, 3(6), 423–436. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.2410>
 - Gallardo, A. E. (2016). Efecto de aditivos sobre el comportamiento tecnológico en trigos de diferentes calidades. Universidad Nacional del Litoral
 - García-Caldera, N., & Velázquez-Contreras, F. (2019). Amaranth Pasta in Mexico: A Celiac Overview. *Journal of Culinary Science and Technology*, 17(2), 146–154. <https://doi.org/10.1080/15428052.2017.1405862>
 - Gautam, N., & Kumar, S. (2021). Fortification Of Pasta With Amaranth Leaf Powder And Defatted Soy Flour: Effects On Physical, Cooking And Sensory Characteristics. In *Journal of Advanced Scientific Research* (Vol. 12, Issue 3). <http://www.sciensage.info>
 - Giuseppe Rizzello, C., Coda, R., de Angelis, M., di Cagno, R., Carnevali, P., & Gobbetti, M. (2009). Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extract from *Amaranthus* spp. seeds during storage of gluten-free and wheat flour breads. *International Journal of Food Microbiology*, 131(2–3), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.025>
 - Granfeldt Y, Björck I, Drews A, Tovar J. An in vitro procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products. *Eur J Clin Nutr*. 1992 Sep;46(9):649-60. PMID: 1396482
 - Guardianelli, L. M., Salinas, M. v., & Puppo, M. C. (2019). Hydration and rheological properties of amaranth-wheat flour dough: Influence of germination of

- amaranth seeds. Food Hydrocolloids, 97. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105242>
- Guardianelli, L. M., Salinas, M. v., & Puppo, M. C. (2022). Quality of wheat breads enriched with flour from germinated amaranth seeds. Food Science and Technology International, 28(5), 388–396. <https://doi.org/10.1177/10820132211016577>
 - Guo, P., & Al-Khatib, K. (2003). Temperature effects on germination and growth of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*), Palmer amaranth (*A. palmeri*), and common waterhemp (*A. rudis*). Weed Science, 51(1), 869–875
 - Gutiérrez-Cortez, E., Hernandez-Becerra, E., Zubieta-Otero, L. F., Gaytán-Martínez, M., Barrón-García, O. Y., & Rodríguez-García, M. E. (2024). Physicochemical changes in *Amaranthus* spp grains, flour, isolated starch, and nanocrystals during germination and malting. Food Chemistry, 451. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139395>
 - Hajjhashemi, P., Azadbakht, L., Hashemipour, M., Kelishadi, R., Saneei, P., & Esmailzadeh, A. (2021). Whole grain intake favorably affects blood glucose and serum triacylglycerols in overweight and obese children: A randomized controlled crossover clinical trial. Nutrition, 87–88. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2021.111200>
 - Hamli, S., Kadi, K., Addad, D., & Bouzerzour, H. (2017). Phytochemical Screening and Radical Scavenging Activity of Whole Seed of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) and Barley (*Hordeum vulgare* L.) Varieties. In Jordan Journal of Biological Sciences (Vol. 10, Issue 4)
 - Hermosillo 140, R., & Saltillo, C. (n.d.). CP 25100. 2 Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro #1923
 - Hernández-Carapia, M. Á., Escalona-Buendía, H. B., & Verde-Calvo, J. R. (2021). Influence of temperature and germination time on diastatic power of blue and red maize (*Zea mays* L.) malts. Emirates Journal of Food and Agriculture, 33(1), 56–66. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2021.v33.i1.2352>
 - Hernández-García, Y., Melgar-Lalanne, G., Téllez-Medina, D. I., Ruiz-May, E., Salgado-Cruz, M. de la P., Andrade-Velásquez, A., Dorantes-Álvarez, L., López-Hernández, D., & Santiago Gómez, M. P. (2022). Scavenging peptides,

- antioxidant activity, and hypoglycemic activity of a germinated amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) beverage fermented by *Lactiplantibacillus plantarum*. *Journal of Food Biochemistry*, 46(7). <https://doi.org/10.1111/jfbc.14139>
- Iftikhar, M., & Khan, M. (2019). Amaranth. In *Bioactive Factors and Processing Technology for Cereal Foods* (pp. 217–232). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6167-8_13
 - Iñarrairaegui Bastarrica, M., Letamendia, A. A., Zozaya Urmeneta, J. M., Rodríguez Gutiérrez, C., Castán Martínez, B., Amat Villegas, I., & Beloqui Pérez, R. (2004). OBSERVACIONES CLÍNICAS Enfermedad inflamatoria intestinal y amiloidosis. *Gastroenterol Hepatol*, 27(4), 260–263
 - Ishrat, M., Bababode Adesegun, K., Basharat, D., & Vikas, N. (2023). *Advances in Plant Sprouts Phytochemistry, Biofunctionalities (Primera)*
 - Islas-Rubio, A. R., Calderón de la Barca, A. M., Cabrera-Chávez, F., Cota-Gastélum, A. G., & Beta, T. (2014). Effect of semolina replacement with a raw: Popped amaranth flour blend on cooking quality and texture of pasta. *LWT*, 57(1), 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.014>
 - Islas-Rubio, A. R., Calderón de la Barca, A. M., Cabrera-Chávez, F., Cota-Gastélum, A. G., & Beta, T. (2014). Effect of semolina replacement with a raw: Popped amaranth flour blend on cooking quality and texture of pasta. *LWT*, 57(1), 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.014>
 - Jiménez, D., Lobo, M., Irigaray, B., Grompone, M. A., & Sammán, N. (2020). Oxidative stability of baby dehydrated purees formulated with different oils and germinated grain flours of quinoa and amaranth. *LWT*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109229>
 - Jiménez, D., Miraballes, M., Gámbaro, A., Lobo, M., & Samman, N. (2020). Baby purees elaborated with andean crops. Influence of germination and oils in physico-chemical and sensory characteristics. *LWT*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108901>
 - Jiménez, M. D., Lobo, M., & Sammán, N. (2019). 12th IFDC 2017 Special Issue Influence of germination of quinoa (*Chenopodium quinoa*) and amaranth

- (Amaranthus) grains on nutritional and techno-functional properties of their flours. *Journal of Food Composition and Analysis*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103290>
- Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Man, H. C., Jahari, M., & Onwude, D. I. (2023). Recent Advances in the Drying Process of Grains. In *Food Engineering Reviews* (Vol. 15, Issue 3, pp. 548–576). Springer. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7>
 - Jimoh, M. O., Afolayan, A. J., & Lewu, F. B. (2018). Suitability of Amaranthus species for alleviating human dietary deficiencies. In *South African Journal of Botany* (Vol. 115, pp. 65–73). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.01.004>
 - Kanensi, O. J., Ochola, S., Gikonyo, N. K., & Makokha, A. (2013). Effect of Steeping and Germination on the Diastatic Activity and Sugar Content in Amaranth Grains and Viscosity of Porridge. *Journal of Agriculture and Food Technology*, 3(1), 1–7. www.textroad.com
 - Karaoğlu, M. M., Reis, G. S., & Bedir, Y. (2023). The effects of malt flours obtained from different cereals on flour and bread quality. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(4), 497–509. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3104>
 - Kern, C., Bähler, B., Hinrichs, J., & Nöbel, S. (2019). Waterless single screw extrusion of pasta-filata cheese: Process design based on thermo-rheological material properties. *Journal of Food Engineering*, 260, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.015>
 - Khandaker, L., Ali, M. B., & Oba, S. (2009). Influence of cultivar and growth stage on pigments and processing factors on betacyanins in Red Amaranth (*Amaranthus tricolor* L.). *Food Science and Technology International*, 15(3), 259–265. <https://doi.org/10.1177/1082013209341119>
 - Kiernan, D. P., O'Doherty, J. v., & Sweeney, T. (2023). The Effect of Prebiotic Supplements on the Gastrointestinal Microbiota and Associated Health Parameters in Pigs. In *Animals* (Vol. 13, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ani13193012>

- Kłosok, K., Welc, R., Fornal, E., & Nawrocka, A. (2021). Effects of physical and chemical factors on the structure of gluten, gliadins and glutenins as studied with spectroscopic methods. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26020508>
- Kraus, M., & Šenitková, I. J. (2019). Sustainability assessment of rainwater harvesting. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 19, 499–504. <https://doi.org/10.5593/sgem2019V/6.3>
- Krawęcka, A., Sobota, A., Pankiewicz, U., Zielińska, E., & Zarzycki, P. (2021). Stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a functional component in durum wheat pasta production: Impact on chemical composition, in vitro glycemic index, and quality properties. *Molecules*, 26(22). <https://doi.org/10.3390/molecules26226909>
- Kroupin, P. Y., Bepalova, L. A., Kroupina, A. Y., Yanovsky, A. S., Korobkova, V. A., Ulyanov, D. S., Karlov, G. I., & Divashuk, M. G. (2023). Association of High-Molecular-Weight Glutenin Subunits with Grain and Pasta Quality in Spring Durum Wheat (*Triticum turgidum* spp. durum L.). *Agronomy*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy13061510>.
- Kultys, E., & Moczowska-Wyrwisz, M. (2022). Effect of using carrot pomace and beetroot-apple pomace on physicochemical and sensory properties of pasta. *LWT*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113858>
- Kumar, R. R., Singh, N., Singh, S., Vinutha, T., Krishnan, V., Goswami, S., Kumar, B., Jat, S. L., Yogeesh, L. N., Singh, S. P., Mishra, G. P., Tara Satyavathi, C., Sachdev, A., & Praveen, S. (2022). Nutritional supremacy of pearl- and foxtail millets: assessing the nutrient density, protein stability and shelf-life of flours in millets and cereals for developing nutri-stable foods. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 31(4), 837–852. <https://doi.org/10.1007/s13562-021-00761-2>
- Lamb, J., & Loy, T. (2005). Seeing red: The use of Congo Red dye to identify cooked and damaged starch grains in archaeological residues. *Journal of Archaeological Science*, 32(10), 1433–1440. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.03.020>

- Lamothe, L. M., Srichuwong, S., Reuhs, B. L., & Hamaker, B. R. (2015). Quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) and amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) provide dietary fibres high in pectic substances and xyloglucans. *Food Chemistry*, 167, 490–496. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.022>
- Larrosa, V., Lorenzo, G., Zaritzky, N., & Califano, A. (n.d.). Mathematical modeling of the drying process of gluten-free pasta according to temperature and relative humidity (Vol. 11). <http://ojs.latu.org.uy/REVISTADELLABORATORIOTECNOLÓGICODELURUGUAY>
- Lin, J., Gu, Y., & Bian, K. (2019). Bulk and Surface Chemical Composition of Wheat Flour Particles of Different Sizes. *Journal of Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5101684>
- Lizárraga, G., Martínez, A., Romero, C., Mariñes, S., Rodríguez, C., & León, O. (2016). Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Pasta Tipo Tallarín A Base De Harina De Amaranto (*Amaranthus tricolor*), Sémola Y Salvado De Trigo (*Triticum aestivum*) (Vol. 1, Issue 1)
- Loonatl, T. A., van den Heever, E., & Hammes, P. (2013). Effect of temperature on the germination of grain Amaranth. *Plant Grond*, 20(3), 152–164. www.newcrops.uq.edu.au/newslettlncln1169.htm
- Loría, E., & Salas, E. (2014). Sobrepeso e integración económica en México. *Overweight and Economic Integration in Mexico*, 389, 3–18. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(14\)72171-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0185-0849(14)72171-1)
- Lux, T., Spillmann, F., Reimold, F., Erdös, A., Lochny, A., & Flöter, E. (2023). Physical quality of gluten-free doughs and fresh pasta made of amaranth. *Food Science and Nutrition*, 11(6), 3213–3223. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3301>
- Makaw, A. B., Mustafa, A. I., & Mohamed-Ahmed, I. A. (2013). Characterization And Im Provem Ent Of Flours Of Threesudanese W Heat Cultivars For Loaf Bread Making
- Marchini, M., Marti, A., Folli, C., Prandi, B., Ganino, T., Conte, P., Fadda, C., Mattarozzi, M., & Carini, E. (2021). Sprouting of Sorghum (*Sorghum bicolor* [L.]

- Moench): Effect of Drying Treatment on Protein and Starch Features. *Foods*, 10(407), 1–17. <https://doi.org/10.3390/foods>
- Martínez Salvador, L. (2016). Seguridad alimentaria, autosuficiencia y disponibilidad del amaranto en México. In *Revista Problemas del Desarrollo* (Vol. 186, Issue 47). <http://probdes.iiec.unam.mx>
 - Martínez-Lopez, A., Millan-Linares, M. C., Rodriguez-Martin, N. M., Millan, F., & Montserrat-de la Paz, S. (2020). Nutraceutical value of kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). In *Journal of Functional Foods* (Vol. 65). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103735>
 - Martínez-Núñez, M., Ruiz-Rivas, M., Vera-Hernández, P. F., Bernal-Muñoz, R., Luna-Suárez, S., & Rosas-Cárdenas, F. F. (2019). The phenological growth stages of different amaranth species grown in restricted spaces based in BBCH code. *South African Journal of Botany*, 124, 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.035>
 - Merck, *Glycobiology - Carbohydrate Enzymes and Proteins*. Disponible en: <https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/technical-documents/technical-article/protein-biology/enzyme-activity-assays/carbohydrate-analysis>, visitada 2024
 - Milde, L. B., Rivero, D. A., Chigal, P. S., Zubreski, E., Chade, M., & Brumovsky, L. A. (2021). Changes in the physical, textural and chemical properties of the enriched pasta elaborated with cassava starch. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100396>
 - Montemayor-Mora, G., Hernández-Reyes, K. E., Heredia-Olea, E., Pérez-Carrillo, E., Chew-Guevara, A. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2018). Rheology, acceptability and texture of wheat flour tortillas supplemented with soybean residue. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4964–4972. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3432-3>
 - Moyer, T. B., Schug, W. J., & Hicks, L. M. (2022). *Amaranthus hypochondriacus* seeds as a rich source of cysteine rich bioactive peptides. *Food Chemistry*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131959>

- Mulik, K., & Koo, W. W. (2011). Substitution between U.S. and Canadian Wheat by Class. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 59(4), 417–433. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2011.01221.x>
- Muralikrishna, G., & Nirmala, M. (2005). Cereal α -amylases - An overview. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.12.002>
- Mykolenko, S., Zhygunov, D., & Rudenko, T. (2020). Baking properties of different amaranth flours as wheat bread ingredients. *Food Science and Technology*, 14(4). <https://doi.org/10.15673/fst.v14i4.1896>
- Najdi Hejazi, S., Orsat, V., Azadi, B., & Kubow, S. (2016). Improvement of the in vitro protein digestibility of amaranth grain through optimization of the malting process. *Journal of Cereal Science*, 68, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.11.007>
- Ninomiya, K., Ina, S., Nakamura, H., Yamaguchi, Y., Kumagai, H., & Kumagai, H. (2022). Evaluation of the amount of glucose adsorbed on water-soluble dietary fibres by the analysis of its diffusion rate through a dialysis membrane. *Food Hydrocolloids*, 129, 107626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107626>
- NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - Cereales – Parte I: maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado – Especificaciones y métodos de prueba
- NOM-002-SCFI-1993. Norma Oficial Mexicana (1993). Productos preenvasados contenido neto tolerancias y métodos de verificación
- NOM-247-SSA1-2008. Norma Oficial Mexicana (2008). Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba
- NORMA Oficial Mexicana NOM-187-SSA1/SCFI-2002, Productos y servicios. Masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración y

establecimientos donde se procesan. Especificaciones sanitarias. Información comercial. Métodos de prueba

- Norma, V., García-Zepeda, R., Belén, O., & Morales-Guerrero, J. (2024). Gluten-free pasta as an alternative in the diet of patients with celiac disease. *Journal of Food Science*, 89. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17035>
- NTE INEN 2646:2012. Norma Técnica Ecuatoriana (2012). Granos y cereales. grano de amaranto. Requisitos e inspección
- Ogródowska, D., Zadernowski, R., Czaplicki, S., Derewiaka, D., & Wronowska, B. (2014). Amaranth seeds and products - The source of bioactive compounds. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 64(3), 165–170. <https://doi.org/10.2478/v10222-012-0095-z>
- OMS. Organización Mundial de la salud. Alimentación sana. 2018, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet>, visitada 2024.
- Onyango, C., Luvitaa, S. K., Lagat, K., Hüsken, A., Smit, I., & Schmidt, M. (2022). Utilisation of Amaranth and Finger Millet as Ingredients in Wheat Dough and Bread for Increased Agro-Food Biodiversity. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(7), 911. <https://doi.org/10.3390/foods11070911>
- Osei-Kwarteng, M., Ayipio, E., Moualeu-Ngangue, D., Buck-Sorlin, G., & Stutzel, H. (2022). Interspecific variation in leaf traits, photosynthetic light response, and wholeplant productivity in amaranths (*Amaranthus* spp. L.). *PLoS ONE*, 17(6 June). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270674>
- Patil, P., Shrivastav, S. P., Kulbhushan, P., Landge, R., & Gurjar, D. (2023). Genetic Variability, Heritability, Genetic Advance and Divergence Analysis in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian Journal Of Agricultural Research*, Of. <https://doi.org/10.18805/ijare.a-6036>
- Paucar-Menacho, L. M., Salvador-Reyes, R., Guillén-Sánchez, J., & Mori-Arismendi, S. (2016). Effect of partial substitution of wheat flour by soybean meal in technological and sensory characteristics of cupcakes for children of school age. *Scientia Agropecuaria*, 07(02), 121–132. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.02.05>

- Perales-Sánchez, J. X. K., Reyes-Moreno, C., Gómez-Favela, M. A., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., Valdez-Ortiz, A., & Gutiérrez-Dorado, R. (2014). Increasing the antioxidant activity, total phenolic and flavonoid contents by optimizing the germination conditions of amaranth seeds. *Plant Foods for Human Nutrition* (Dordrecht, Netherlands), 69(3), 196–202. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0430-0>
- Pérez-Ramírez, I. F., Sotelo-González, A. M., López-Echevarría, G., & Martínez-Maldonado, M. A. (2022). Amaranth Seeds and Sprouts as Functional Ingredients for the Development of Dietary Fiber, Betalains, and Polyphenol-Enriched Minced Tilapia Meat Gels. *Molecules* (Basel, Switzerland), 28(1), 117. <https://doi.org/10.3390/molecules28010117>
- Pérez, C., & Luzuriaga, Ó. (2010). Caracterización de la Harina de Semillas de Amaranto *Amaranthus Caudatus* para Elaboración de Pan en Mezclas con Harina de Trigo. *Química Central*, 01(01), 61–70
- Pessanha, K. L. F., Santos, M. B., de Grandi Castro Freitas-Sá, D., Takeiti, C. Y., & Carvalho, C. W. P. (2023). Impact of whole millet extruded flour on the physicochemical properties and antihyperglycemic activity of gluten free pasta. *Journal of Food Science and Technology*, 60(6), 1738–1748. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05714-2>
- Prieto Méndez, J., Rubio Hinojosa, C. U., Román Gutiérrez, A. D., Marzo, M. A. M., González Ramírez, C. A., & Prieto García, F. (2009). Degradación física del almidón de cebada (*Hordeum sativum* Jess). Correlación entre la gelatinización y el tamaño de gránulos *Ciencias del Agro y del Mar. MULTICIENCIAS*, 9, 115–125
- PROFECO. (2017). Laboratorio PROFECO reporta pastas para sopa. *Revista del Consumidor*, 480, 32–44
- Pshenichnikova, T. A., Shchukina, L. v., & Börner, A. (2024). The phenotypic characterization of Rivet wheat accessions (*Triticum turgidum* L. ssp. *turgidum*) for grain quality and other agronomic properties. *Genetic Resources and Crop Evolution*. <https://doi.org/10.1007/s10722-024-01909-4>

- Ramadan, M. F., & Sitohy, M. Z. (2020). Phosphorylated Starches: Preparation, Properties, Functionality, and Techno-Applications. In *Starch/Staerke* (Vol. 72, Issues 5–6). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/star.201900302>
- Rangel Eduardo, E., Fernanda Sesma Hernández, L., Gabriela Valverde Ramos, M., González Molina, L., Escobedo López, D., & Jazmín Aguilar Delgado, M. (2021). Tiene el amaranto el potencial agronómico para ser un fenómeno mundial como la quinua. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), 1459–1471.
- Rangel, E. E., Sánchez, M. C., López, E. D., la Olán M, D. O., Valencia, R. P., & Trejo, M. G. (2010). Conservación y Uso de los Recursos Genéticos de Amaranto en México (Primera). SAGARPA
- Rastogi, A., & Shukla, S. (2013). Amaranth: A New Millennium Crop of Nutraceutical Values. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(2), 109–125. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.517876>
- Raya-Pérez, J. C., & Aguirre-Mancilla, ; C L. (2007). Aparición Y Evolución De La Fotosíntesis C4. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 14(1), 45–50
- Reale, A., Messia, M. C., Pulvento, C., Lavini, A., Nazzaro, S., & di Renzo, T. (2023). Microbial and Qualitative Traits of Quinoa and Amaranth Seeds from Experimental Fields in Southern Italy. *Foods*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/foods12091866>
- Reglamento Técnico Mercosur Sobre “Asignación De Aditivos y Sus Concentraciones Máximas Para La Categoría De Alimentos 6: Cereales y Productos De/O A Base De Cereales.” (2012). *Alimentos Farináceos-Cereales, Harinas y Derivados*. IN GMC, CAPÍTULO IX (pp. 1–115)
- Ren, X., Chen, J., Wang, C., Molla, M. M., Diao, X., & Shen, Q. (2016). In vitro starch digestibility, degree of gelatinization and estimated glycemic index of foxtail millet-derived products: Effect of freezing and frozen storage. *Journal of Cereal Science*, 69, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.03.007>
- Rica Leyva-Martínez, C., & Manuel, R. (2010). *Agronomía Mesoamericana*. 21, 281–288. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43720093007>

- Rivera Leiva, A. F., Hernández-Fernández, J., & Ortega Toro, R. (2022). Active Films Based on Starch and Wheat Gluten (*Triticum vulgare*) for Shelf-Life Extension of Carrots. *Polymers*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/polym14235077>
- Rodríguez-Huezo, M. E., Valeriano-García, N., Totosaus-Sanchez, A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2022). The effect of the addition of soluble fibers (polydextrose, corn, pea) on the color, texture, structural features and protein digestibility of semolina pasta. *Applied Food Research*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100187>
- Rodríguez-Zúñiga, A., Feregrino-Pérez, A. A., Juárez-García, M., García-Trejo, J. F., Mancillas-Medina, J., Ávila-Ontiveros, M., Leyva-Maldonado, A., & Ramírez-García, J. F. (2021). Evaluación proximal y contenido de antioxidantes de una pasta tipo espagueti a partir de orujo de uva y amaranto. *Investigación y Ciencia*, 1(82), 15–23
- Romero, H. M., & Zhang, Y. (2019). Physicochemical properties and rheological behavior of flours and starches from four bean varieties for gluten-free pasta formulation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100001>
- Safavi, M., Rezvani, M., Zaefarian, F., Golmohammadzadeh, S., & Sindel, B. M. (2023). Seed germination requirements of *Amaranthus retroflexus* L. populations exposed to environmental factors. *Botany*, 101(4), 99–111. <https://doi.org/10.1139/cjb-2022-0077>
- Sahin, O. I., Dundar, A. N., & Saricaoglu, F. T. (2024). Chapter 5 - Understanding the gluten-free pasta structure: Impact of ingredients and processes. In A. Gull, G. A. Nayik, & C. Brennan (Eds.), *Development of Gluten-Free Pasta* (pp. 111–134). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13238-4.00002-2>
- Sandoval D Y Vázquez Chávez, S. (2018). Características de pasta precocida elaboradas con fibra Characteristics of pre-cooked paste made with fiber. In Sánchez Sandoval y Vázquez Chávez (Vol. 3)
- Sandoval-Sicairos, E. S., Domínguez-Rodríguez, M., Montoya-Rodríguez, A., Milán-Noris, A. K., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2020). Phytochemical

- Compounds and Antioxidant Activity Modified by Germination and Hydrolysis in Mexican Amaranth. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(2), 192–199. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00798-z>
- Schmitt, M. R., Skadsen, R. W., & Budde, A. D. (2013). Protein mobilization and malting-specific proteinase expression during barley germination. *Journal of Cereal Science*, 58(2), 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.05.007>
 - Schoenlechner, R. (2016). Properties of pseudocereals, selected specialty cereals and legumes for food processing with special attention to gluten-free products. *Bodenkultur*, 67(4), 239–248. <https://doi.org/10.1515/boku-2016-0019>
 - Scott, G., & Awika, J. M. (2023). Effect of protein–starch interactions on starch retrogradation and implications for food product quality. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 22, Issue 3, pp. 2081–2111). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13141>
 - Segurondo Loza, R., & Cortez Quisbert, V. (2020). Determinación de la rancidez en aceites usados en el proceso de frituras en establecimientos de expendio de comida rápida. *Revista Con-Ciencia*, 2(8), 113–126
 - Sepuuya, G., Katongole, J., & Tumuhimbise, G. A. (2018). Contribution of instant amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.)-based vegetable soup to nourishment of boarding school adolescents. *Food Science and Nutrition*, 6(6), 1402–1409. <https://doi.org/10.1002/fsn3.664>
 - Serrano, G. P., Alberto, J., & Ortega, A. (2021). Amaranto, lípidos y su efecto en las dislipidemias. *Publicación Semestral*, 10(19), 160–172. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/ICSA/issue/archive>
 - Shewry, P. R., Lafiandra, D., & Bedo, & Z. (2012). Improving the nutritional quality and health benefits of wheat
 - Silventoinen, P., Kortekangas, A., Ercili-Cura, D., & Nordlund, E. (2021). Impact of ultra-fine milling and air classification on biochemical and techno-functional characteristics of wheat and rye bran. *Food Research International*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109971>
 - Simsek, S., Ohm, J. B., Lu, H., Rugg, M., Berzonsky, W., Alamri, M. S., & Mergoum, M. (2014). Effect of pre-harvest sprouting on physicochemical

- properties of starch in wheat. *Foods*, 3(2), 194–207. <https://doi.org/10.3390/foods3020194>
- Singh, N., & Singh, P. (2011). Amaranth: Potential Source for Flour Enrichment. *Flour and Breads and Their Fortification in Health and Disease Prevention*, 101–111. doi:10.1016/b978-0-12-380886-8.10010-8
 - Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Quek, S. Y., & Perera, C. O. (2010). Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: A review. *Journal of Food Science*, 75(8). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01815.x>
 - Sudha, M. L., & Leelavathi, K. (2012). Effect of blends of dehydrated green pea flour and amaranth seed flour on the rheological, microstructure and pasta making quality. *Journal of Food Science and Technology*, 49(6), 713–720. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0213-z>
 - Szabóová, M., Záhorský, M., Gažo, J., Geuens, J., Vermoesen, A., D'Hondt, E., & Hricová, A. (2020). Differences in Seed Weight, Amino Acid, Fatty Acid, Oil, and Squalene Content in γ -Irradiation-Developed and Commercial Amaranth Varieties (*Amaranthus* spp.). *Plants (Basel, Switzerland)*, 9(11), 1412. <https://doi.org/10.3390/plants9111412>
 - Tayade, R., Kulkarni, K. P., Jo, H., Song, J. T., & Lee, J. D. (2019). Insight Into the Prospects for the Improvement of Seed Starch in Legume-A Review. *Frontiers in plant science*, 10, 1213. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01213>
 - Tecnología de granos y semillas. Disponible en: <https://tecgranosysemillas.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/05/sin-tc3adtulo.png>, visitada en 2024
 - Temesgen, A. and Bultosa, G., 2017. Physicochemical characteristics and nutrient composition of three grain amaranth species grown in Hirna, Eastern Ethiopia. *East African Journal of Sciences*, 11(1), pp.17-26
 - Teterycz, D., Sobota, A., Kozłowicz, K., & Zarzycki, P. (2019). Substitution of semolina durum with common wheat flour in egg and eggless pasta. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 18(4), 439–451. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2019.0722>

- Thakur, P., & Kumar, K. (2019). Nutritional Importance and Processing Aspects of Pseudo-cereals Role of advanced technologies in food processing View project Finite options View project Nutritional Importance and Processing Aspects of Pseudo-cereals. In *Journal of Agricultural Engineering and Food Technology* (Vol. 6, Issue 2). <http://www.krishisanskriti.org/Publication.html>
- Thakur, P., Kumar, K., Ahmed, N., Chauhan, D., Eain Hyder Rizvi, Q. U., Jan, S., Singh, T. P., & Dhaliwal, H. S. (2021). Effect of soaking and germination treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.). *Current Research in Food Science*, 4, 917–925. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.11.019>
- Tomei, P. A., de Campos Serra, B. P., & Mello, S. F. (2021). Differences in the Use of 5- or 7-point Likert Scale: An Application in Food Safety Culture. *Organizational Cultures*, 21(2), 1–17. <https://doi.org/10.18848/2327-8013/CGP/v21i02/1-17>
- U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. Production supply and distribution en línea: <https://fas.usda.gov/data/mexico-mexico-update-nom-187-regarding-some-products-derived-wheat-and-corn>
- Valadez-Vega, C., Lugo-Magaña, O., Figueroa-Hernández, C., Bautista, M., Betanzos-Cabrera, G., Bernardino-Nicanor, A., González-Amaro, R. M., Alonso-Villegas, R., Morales-González, J. A., & González-Cruz, L. (2022). Effects of Germination and Popping on the Anti-Nutritional Compounds and the Digestibility of *Amaranthus hypochondriacus* Seeds. *Foods*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/foods11142075>
- Valdez-Eleuterio, G., Uscanga-Mortera, E., Kohashi-Shibata, J., García-Nava, R., Martínez-Moreno, D., Torres-García, J., & García-Esteva, A. (2015). Tamaño De Semilla, Granulometría Del Sustrato Y Profundidad De Siembra En El Vigor De Semilla Y Plántula De Dos Malezas. Publicado Como ARTÍCULO En *Agrociencia*, 49(1), 899–915
- Van Hung, P., Hoang Yen, N. T., Lan Phi, N. T., Ha Tien, N. P., & Thu Trung, N. T. (2020). Nutritional composition, enzyme activities and bioactive compounds of

- mung bean (*Vigna radiata* L.) germinated under dark and light conditions. LWT, 133. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110100>
- Vasiliu, M., & Navas, P. B. (2009). Propiedades de cocción, físicas y sensoriales de una pasta tipo fetuchine elaborada con sémola de trigo durum y harina deshidratada de cebollín (*Allium fi stulosum* l.) cooking, physical and sensory properties of a fettuccine type pasta made with a mixture of durum wheat semolina and dehydrated welsh onion (*Allium fi stulosum*) FLOUR (Vol. 21)
 - Vázquez-Rodríguez, J. A., Amaya-Guerra, C. A., Báez-González, J. G., Núñez-González, M. A., & Figueroa-Cárdenas, J. D. (2013). Study of the fortification with bean and amaranth flours in nixtamalized maize tortilla. *CyTA - Journal of Food*, 11(sup1), 62–66. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.753644>
 - Venskutonis, P. R., & Kraujalis, P. (2013). Nutritional Components of Amaranth Seeds and Vegetables: A Review on Composition, Properties, and Uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(4), 381–412. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12021>
 - Verma, A. K., Rajkumar, V., & Kumar, S. (2019). Effect of amaranth and quinoa seed flour on rheological and physicochemical properties of goat meat nuggets. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 5027–5035. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03975-4>
 - Vimercati, W. C., da Silva Araújo, C., Macedo, L. L., Maradini Filho, A. M., Saraiva, S. H., & Teixeira, L. J. Q. (2020). Influence of drying temperature on drying kinetics, energy consumption, bioactive compounds and cooking quality of pasta enriched with spinach. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13571>
 - Visvanathan, R., Jayathilake, C., Liyanage, R., & Sivakanesan, R. (2019). Applicability and reliability of the glucose oxidase method in assessing α -amylase activity. *Food chemistry*, 275, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.114>
 - Yang, T., Li, H., Li, L., Wei, W., Huang, Y., Xiong, F., & Wei, M. (2023). Genome-wide characterization and expression analysis of α -amylase and β -amylase genes

- underlying drought tolerance in cassava. *BMC Genomics*, 24(1).
<https://doi.org/10.1186/s12864-023-09282-9>
- Ye, L., Zheng, W., Li, X., Han, W., Shen, J., Lin, Q., Hou, L., Liao, L., & Zeng, X. (2023). The Role of Gluten in Food Products and Dietary Restriction: Exploring the Potential for Restoring Immune Tolerance. In *Foods* (Vol. 12, Issue 22). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/foods12224179>
 - Yi, C., Qiang, N., Zhu, H., Xiao, Q., & Li, Z. (2022). Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains. In *Food Research International* (Vol. 160). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111681>
 - Zheng, Y., Liu, S., Xie, J., Chen, Y., Dong, R., Zhang, X., Liu, S., Xie, J., Hu, X., & Yu, Q. (2020). Antioxidant, α -amylase and α -glucosidase inhibitory activities of bound polyphenols extracted from mung bean skin dietary fiber. *LWT*, 132.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109943>

6.0 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Investigaciones de pastas elaboradas a base de harina de amaranto (2016 - 2024)	16
Tabla 2. Composición nutricional de la harina de semillas de amaranto y quinua	23
Tabla 3. Condiciones que afectan la germinación de la semilla de amaranto (2014 - 2024)	29
Tabla 4. Diseño experimental de germinación de semillas de amaranto para los métodos de inmersión y placa en condiciones de luz/oscuridad	52
Tabla 5. Matriz de formulaciones de la masa	57
Tabla 6. Clasificación de impurezas durante la limpieza de 50 g de semillas de amaranto (<i>Amaranthus hypochondriacus</i>).....	66
Tabla 7. Pruebas de calidad para semillas de amaranto (<i>Amaranthus hypochondriacus</i>).....	67
Tabla 8. Diferentes tiempos de remojo, después de 72 horas de germinación	70
Tabla 9. Comportamiento de la actividad de agua a diferentes tiempos de secado	76
Tabla 10. Porcentajes de harina retenidos en las diferentes mayas Tyler en 100 g de muestra a diferentes tiempos de molienda	77
Tabla 11. Cambios en el color Hunter durante la germinación de semillas de amaranto.....	78
Tabla 12. Matriz de formulaciones de pasta de sémola de trigo con harina de trigo:amaranto germinado 63:35.....	84
Tabla 13. Cambios de color a diferentes temperaturas de secado de pasta de sémola de trigo	86
Tabla 14. Pruebas de calidad para 100 g de pasta a diferentes proporciones de harina de trigo y de amaranto germinado	88
Tabla 15. Características texturales de calidad de la pasta cocida.....	93
Tabla 16. Composición nutricional de diferentes pastas (g/100 g).....	95
Tabla 17. Comportamiento glucémico de diferentes pastas	97

7.0 ANEXOS

ANEXO 1. Escala hedónica de cinco puntos para la evaluación de pastas

ANÁLISIS SENSORIAL DE PASTA						
Edad: _____ años		Sexo: _____				
Se me ha proporcionado información detallada sobre los productos, incluyendo la presencia de gluten y huevo. ¿Consiento voluntariamente participar en la evaluación sensorial?					SI <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Pruebe por favor las muestras que se le da, colocando su respuesta en la casilla correspondiente al número de muestra.						
Por favor, marque con una "X" en la escala que mejor describe su nivel de agrado						
Muestra	Me gusta mucho	Me gusta	Ni me gusta ni me desagrada	Me desagrada	Me desagrada mucho	
428						
369						
Por favor, marque con una "X" lo que mejor describe la textura o consistencia de la pasta						
Muestra	Muy dura	Dura	Normal	Suave	Se deshace	
428						
369						
Además del sabor característico de la salsa de jitomate, ¿puedes detectar algún otro sabor adicional en la pasta? Si es así, por favor especifícalo en la casilla correspondiente.						
Muestra	Sabor					
428						
369						
¿Quieres añadir algún comentario? _____						
!!!Muchas gracias por tu participación!!!						