

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



Efecto del grado de molienda sobre la digestibilidad *in vitro*, las propiedades físico-químicas y la textura de un pan de nopal

POR

OSIEL MAGNOL CHAVEZ ALFARO

T E S I S

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

Efecto del grado de molienda sobre la digestibilidad *in vitro*, las propiedades físico-químicas y la textura de un pan de nopal

T E S I S

Presentada por

OSIEL MAGNOL CHAVEZ ALFARO

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

A P R O B A D A

M.C. Haydeé Yajaira López De la Peña
Presidente

Dra. María Hernández González
Vocal

M.P. Francisco Hernández Centeno
Vocal

Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez
Vocal suplente

Dr. José Dueñez Alanís
Coordinador de la División de Ciencia Animal

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México
Junio de 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

Efecto del grado de molienda sobre la digestibilidad *in vitro*, las propiedades físico-químicas y la textura de un pan de nopal

T E S I S


Presentada por

OSIEL MAGNOL CHAVEZ ALFARO

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Fue dirigida por el siguiente comité:



M.C. Haydeé Yajaira López De la Peña
Asesor principal



Dra. María Hernández González
Co-asesor



M.P. Francisco Hernández Centeno
Co-asesor

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Junio del 2021

DEDICATORIAS

La vida me regaló dos grandes padres, Jeú Oridel Chávez Rodríguez y Ana Floricel Alfaro López que a lo largo del tiempo con sus consejos y apoyo incondicional hoy cuentan con un profesionalista más en la familia. Gracias a ellos por ser mis motivos principales de seguir adelante y obtener cada logro obtenido. Porque este es el resultado de la buena educación que me han brindado es que este logro es dedicado a ellos.

También dedico este trabajo a todas aquellas personas que creyeron en mí, que me animaron y apoyaron en todo momento durante todo el trayecto universitario sabiendo que a pesar de altas y bajas nunca me di por vencido, que gracias a Dios el que nos da la vida, la razón de existencia, nunca me abandonó, manteniéndome ferviente y constante.

AGRADECIMIENTOS

La UAAAN se presentó en mis caminos iniciando una carrera en el 2016 que hoy estoy culminando, 5 años que esta gran casa de estudios me brindó y acobijó.

Por ello agradezco principalmente a Dios por haberme dado la oportunidad de existencia, de vivir plenamente. De tener una gran familia que me apoya en todo momento, por regalarme a los mejores padres que haya podido pedir, de brindarme la salud que me mantiene firme, de esta y muchas cosas que al momento me están llevando a concluir una de las etapas más bonitas y anheladas desde la infancia.

Agradezco a la universidad por haberme formado como el profesional que ahora soy, por darme tantas oportunidades en el transcurso de mi carrera de las cuales destaco una estancia en el extranjero la cual me hizo ver el mundo desde otra perspectiva, por estas y muchas más, gracias universidad.

Muchas gracias a una persona muy importante en ésta investigación, la Dra. Haydeé Yajaira López de la Peña que confió en mí y estuvo presente durante todo este trabajo como mi asesor. Siendo una maestra a la que le tengo mucha admiración por los conocimientos que me impartió como alumno y tesista.

También me siento muy agradecido con todos los profesores que me transmitieron su conocimiento, a todos mis amigos Ramiro Hernández Hernández, Juan Daniel García Torres, M. de Lourdes Zarazúa Guerrero, Marlen Tapia Solís, M. Guadalupe Castañeda Castillo, Ana Rosa Montoya Cendejas y compañeros(as) de clases que asimilaron el calor de una familia.

Muchas gracias a todos

CONTENIDO

DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO.....	vi
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	x
RESÚMEN	xi
1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. HIPÓTESIS	15
4. OBJETIVOS	16
4.1 General	16
4.2 Específicos.....	16
5. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
5.1 Nopal.....	17
5.1.1 Origen	17
5.1.2 Usos.....	18
5.1.3 Propiedades.....	19
5.1.4 El nopal como alimento funcional	20
5.1.5 Valor nutritivo	21
5.2 Trigo.....	21
5.2.1 Origen	23
5.2.2 Composición química.....	23
5.3 Harina	24
5.3.1 Harina de trigo	25
5.3.2 Harinas compuestas	26

5.4 Pan.....	26
5.4.1 Tipos de panes	26
5.5 Alimento funcional.....	27
5.5.1 Alimentos funcionales en la actualidad	27
5.5.2 Pan como alimento funcional	28
5.5.3 Fortificación	29
5.6 Nanotecnología	29
5.6.1 Nanopartículas.....	29
5.6.2 Nanopartículas en la industria alimentaria	30
5.6.3 Efecto del tamaño de partículas en alimentos	31
5.7 Textura en los alimentos	32
5.7.1 Análisis de textura en alimentos	32
5.7.2 Parámetros del análisis de textura.....	33
5.8 Digestibilidad.....	35
5.8.1 Importancia de la utilización de pruebas de digestibilidad en alimentos	35
5.8.2 Digestibilidad in vitro	36
5.8.3 Enzimas principales en la digestibilidad.....	36
5.8.3 Digestibilidad del nopal	37
6. MATERIALES Y MÉTODOS	38
6.1 Materiales	38
6.2 Formulación	38
6.3 Características físicas de la masa y rendimiento	39
6.4 Color	40
6.6 Análisis de Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).....	40
6.7 Análisis de textura.....	41
6.7.1 Análisis de compresión de la masa.....	41

6.9 Digestibilidad.....	41
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
7.1 formulación	42
7.2 Características físicas de la masa y rendimiento	42
7.3 Color	44
7.4 Análisis de Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).....	45
7.5 Análisis de textura.....	47
7.5.1 Análisis de compresión de la masa.....	47
7.5.2 APT del pan	48
7.6 Digestibilidad.....	49
8. CONCLUSIONES.....	52
9. LITERATURA CITADA	54
10. ANEXOS	62
10.1 Preparación de reactivos para digestibilidad.....	62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Opuntia ficus-indica, México.....	17
Figura 2. Mermelada de cladodios de nopal y limón	18
Figura 3. Nanopartículas de tuna morada (Kiesling & Metzling, 2018).....	19
Figura 4. Trigo	22
Figura 5. Alimentos funcionales.....	28
Figura 6. Aplicaciones de la nanotecnología en la industria de alimentos (López De la Peña et al., 2016)	30
Figura 7. Analizador de textura Brookfield CT3	33
Figura 8. Diagrama de flujo	38
Figura 9. Pan recién horneado	42
Figura 10. Espectros de FTIR para cada muestra de pan.....	46

NDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor nutritivo del nopal verdura respecto a 100g (Sataloff et al., 2011).....	21
Tabla 2. Variación en la concentración de los principales componentes del trigo (León & Rosell, 2007).....	23
Tabla 3. Composición vitamínica del grano de trigo (mg/kg) (Cultivo et al., 2001).	24
Tabla 4. Composición nutricional de la harina de trigo (por 100 g de producto) (León & Rosell, 2007).	25
Tabla 5. Características de textura en los alimentos (Carretero, 2014).	32
Tabla 6. Características físicas de la masa.....	43
Tabla 7. Medición del color de las muestras	44
Tabla 8. Compresión de la masa	47
Tabla 9. APT pan	48
Tabla 10. Digestibilidad <i>in vitro</i>	50

RESÚMEN

En la presente investigación se evaluó el efecto del grado de molienda de la harina de nopal en la sustitución parcial de harina de trigo para la elaboración de un pan. Los efectos evaluados fueron las características físico-químicas, las propiedades de textura y la digestibilidad del mismo.

Se obtuvieron muestras de pan que incluían harinas de nopal (5%) a diferentes tiempos de molienda: 0, 15, 30, 60, 120 y 240 minutos obtenidos de un molino planetario, harinas incorporadas juntamente con los demás ingredientes del pan, además de un testigo con 100% harina de trigo. En relación a las masas de cada muestra, se observó un incremento en la densidad y gravedad específicas en los panes con nopal y una disminución de las mismas conforme la utilización de harina de nopal a mayor tiempo de molienda así como un mejor rendimiento y además presentando una mayor dureza comparado a la muestra testigo.

Para los análisis del pan, el color de las muestras con 5% de harina de nopal no contó con diferencias significativas. Referente al perfil de textura, utilizar harina a 0' generó un pan mucho más duro a diferencia de las demás harinas con mayor tiempo de molienda presentando panes más suaves y un cambio considerable en la digestibilidad de cada muestra de pan en comparación a la muestra testigo.

1. INTRODUCCIÓN

El pan es uno de los productos que constituye la base de la alimentación desde hace aproximadamente 7000 u 8000 años. Al principio se trataba de una pasta plana, no fermentada, elaborada con una masa de granos machacados groseramente y cocida, muy probablemente sobre piedras planas calientes. Sin embargo se dice que fue en Egipto (3000 años a.c) donde apareció el primer pan fermentado, observando que la masa elaborada el día anterior producía burbujas de aire y aumentaba su volumen, y que, añadida a la masa de harina nueva, daba un pan más ligero y de mejor gusto (Mesas, J. M.1 *; Alegre, 2002).

El pan es un alimento básico que forma parte de la dieta tradicional a nivel mundial, encontrándose en el nivel 1 de la pirámide alimenticia. Constituye la base de la alimentación de la población principalmente en los sectores de nivel socioeconómico más bajo. Actualmente se elaboran distintos tipos de panes los cuales varían principalmente por el tipo de harina utilizada y técnica empleada en su elaboración, algunos ejemplos son: pan de centeno, integral, baguette, pita, molde, entre otros (Melisa Guzmán Cifuentes, 2015).

La fortificación de los alimentos ha sido una práctica común en las sociedades actuales, buscando ofrecer alimentos más nutritivos sobre todo a sectores de la población con problemas de desnutrición. Los productos de panificación, debido a sus características de vida de anaquel (baja actividad de agua, por lo que es menos susceptible a crecimiento microbiano), su bajo costo y formulación, son productos que pueden ser enriquecidos al adicionar otras proteínas, como concentrados o aislados proteicos (Güemes Vera et al., 2009).

Opuntia spp., popularmente conocido en México como nopal, es una planta que pertenece a las cactáceas, que por sus características, es idónea para el desarrollo de las zonas áridas y semiáridas. Es una cactácea con una gran importancia agronómica a nivel nacional, ya que en México existen 3 millones de hectáreas de nopal nativo y alrededor de 233 000 hectáreas de nopal cultivado; de las cuales 150 000 ha son

destinadas al consumo humano (Torres-Ponce, Reyna Lizeth Morales-Corral et al., 2015).

Debido a la corta vida de anaquel del nopal fresco, se han desarrollado también algunas estrategias de preservación de los componentes del mismo, siendo el de mayor aplicación, el nopal deshidratado en polvo. El producto se prepara después de la selección, cortado, deshidratación y molienda de las pencas de nopal, resultando un polvo fino de color verde claro, bajo en humedad, listo para su consumo, con una amplia vida en anaquel. Así, se facilita su manejo y conservan las propiedades funcionales de interés. Pocos alimentos presentan altos niveles de potasio, por lo que el nopal en polvo es una buena fuente de este mineral para la dieta. Su bajo contenido de sodio es especialmente importante para esta aplicación (Torres-Ponce, Reyna Lizeth Morales-Corral et al., 2015).

La principal diferencia entre el nopal y otras fuentes de forraje es la degradabilidad de los nutrientes en el rumen. Mientras que la degradabilidad potencial de los demás forrajes en el rumen frecuentemente alcanza 48 horas, los nutrientes del nopal se degradan entre 6 y 12 horas, de modo que puede asumirse que no existe extracción significativa de nutrientes después de 24 horas (FAO 2003).

La digestibilidad constituye un indicador de la calidad de la materia prima que se utiliza como alimento que varía notablemente de una especie a otra. Evaluando la digestibilidad suponemos la determinación de, qué cantidad de un determinado nutriente o sustancia alimenticia desaparece del tracto intestinal o dicho de otra manera, que cantidad de material no se degrada ni se absorbe mientras pasa a través del animal (Pampa, 1999).

2. JUSTIFICACIÓN

A lo largo del tiempo surgen y se van generando nuevas tecnologías y tendencias en los productos alimenticios como la utilización de harinas finas y ultra finas para la elaboración de diversos productos. El pan es uno de los que tiene mayor consumo a nivel mundial por sus características particulares, además de tener un bajo costo.

El uso de harinas compuestas para elaborar pan puede tener ventajas, como la disminución en el uso de la harina de trigo. La utilización de otros compuestos como harinas vegetales o productos hortícolas podría mejorar la calidad nutricional de los productos basados en harina de trigo. Desde el punto de vista nutrimental la adición de estos compuestos incrementa los contenidos de proteínas, aminoácidos esenciales, minerales, fibra dietaria u otros nutrientes que son importantes para el buen funcionamiento de nuestro organismo.

En la actualidad se han desarrollado el uso de diferentes harinas sobre la harina de trigo para la elaboración de pan como es el caso de la harina de nopal. Sin embargo no se han reportado estudios relacionados a la utilización de harinas con diferentes tiempos de molienda y su efecto en la digestibilidad. Si bien se sabe que a menor tamaño de partícula existe una mayor digestibilidad de los nutrientes en el cuerpo. Por lo que la elaboración de un pan bajo estas condiciones seguiría esta misma relación de aprovechamiento de nutrientes además de obtener diferentes características físico químicas y de textura comparado a un pan normal.

3. HIPÓTESIS

H₀: El efecto del grado de molienda incrementará la digestibilidad *in vitro* y afectará las propiedades físico-químicas y de textura del pan de nopal.

H_a: El efecto del grado de molienda no incrementará la digestibilidad *in vitro* ni afectará las propiedades físico-químicas y de textura del pan de nopal.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Utilizar harina de nopal a diferentes tiempos de molienda para generar cambios en la digestibilidad de un producto de panificación.

4.2 Específicos

- 4.2.1 Obtener un pan a partir de la incorporación de harina de nopal a diferentes tiempos de molienda.
- 4.2.2 Caracterizar las propiedades físico-químicas de la masa y del pan de nopal.
- 4.2.3 Evaluar la digestibilidad *in vitro* del pan de nopal

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Nopal

Opuntia, o conocido comúnmente en México como nopal, es una planta perteneciente a la familia de las cactáceas. Está constituida por una serie de tallos o pencas de color verde en algunos casos opaco, con espinas cortas, débiles, blancas o amarillas, sus pencas suelen alcanzar los 30 a 50 cm de ancho y 2 cm de espesor proporcionando una planta de hasta aproximadamente 5 m de altura. Poseen flores y frutos ovalados de color rojo, naranja, verde o amarillo (Ortiz et al., 2013).

Es una especie básica en el consumo de los mexicanos, ya que en torno a este producto giran innumerables actividades económicas del campo y la industria. Además, el nopal puede ser considerado como un alimento funcional, es decir, que mejora la salud de quien lo consume (Evaluation et al., 2010).

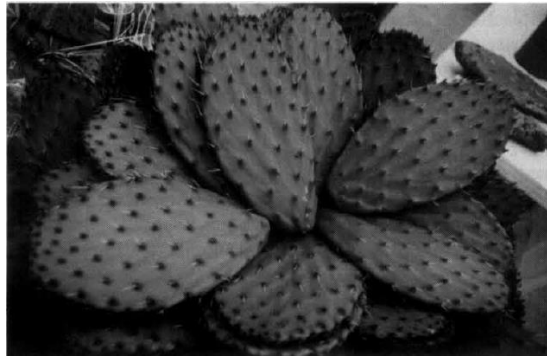


Figura 1. *Opuntia ficus-indica*, México

5.1.1 Origen

Se han formulado hipótesis con evidencias arqueo botánicas indicando el uso de *opuntia spp* por varios grupos étnicos desde hace 8000 años en América. *Opuntia ficus indica* es una de las especies de mayor afluencia de la que se tiene información, nativa de México donde fue domesticada. El proceso de domesticación se orientó a la producción de plantas con cladodios (pencas) sin espinas y frutos grandes y dulces, proceso que se desarrolló en el Altiplano meridional de México. Desde el siglo XVI *O. ficus-indica* era ya un cultivo importante en el centro de México (Reyes-Agüero et al., 2005).

México es el principal productor de nopal a nivel mundial reportando al menos más de 93 especies en todo el territorio nacional ubicadas en zonas desde 1 hasta 2700 m sobre el nivel del mar asociados generalmente a un tipo de vegetación denominado matorral xerófilo cuya vegetación tolera escasas de agua y altas temperaturas (Semillas, 2017).

El nopal como verdura ha sido uno de los principales alimentos consumidos en México por los últimos años. Los estados productores son: el Df, Morelos, Estado de México, Tamaulipas, San Luis Potosí, Baja California, Zacatecas, Michoacán, Aguascalientes, Guanajuato y Puebla, entre otros ocupando el primer lugar en producción el Df. Además de consumo como verdura (nopalitos), en el norte de México se ha utilizado como recurso forrajero de primer orden en gran parte de la industria pecuaria (Lopez Perez, 2018).

5.1.2 Usos

Opuntia ficus-indica como la especie cactácea de mayor importancia en el mundo, cultivada principalmente en toda América para cosechar su fruto y cladodios (pencas) utilizados como forraje. En México comprendiendo más de 10 500 ha de producción destinados a consumo como verdura (cladodios tiernos = nopalitos). Los nopalitos se utilizan para elaboración de preparaciones antidiabéticas, sus flores son usadas para preparar bebidas diuréticas, los frutos son utilizados para preparar jugos, jaleas, miel, mermeladas (Figura 2), harina y pastas además de extraerse aceite de sus semillas (Reyes-Agüero et al., 2005).



Figura 2. Mermelada de cladodios de nopal y limón

El nopal puede ser consumido en fresco, como fruta fresca, jugos, bebidas, concentrados, productos congelados, productos deshidratados, confitados, mermeladas, geles, productos fermentados o en forraje para animales. En la medicina, en elaboración de capsulas para control de peso corporal, prevención y control de la diabetes mellitus, obtención de fibra deshidratada y en productos de belleza o cuidado corporal, entre otros (Alta, 2012).

Se han realizado ciertos estudios enfocándose en la obtención de polvos a partir de la deshidratación tanto del fruto (Figura 3) como de los cladodios de *opuntia ficus-indica* mediante secado por aspersión o congelado-secado para obtener colorantes naturales reportando alta retención de betalainas utilizadas como buenos agentes en microencapsulación en productos alimenticios como en yogurth y refrescos. Y como aditivos que proveen viscosidad a bebidas, pudines, y aderezos para ensaladas son utilizados los hidrocoloides o mucilago presente en cladodios o fruta de opuntia de igual forma funcionando como buen agente encapsulador para compuestos bioactivos como ácido gálico y betalainas (Kiesling & Metzling, 2018).



Figura 3. Nanopartículas de tuna morada (Kiesling & Metzling, 2018)

5.1.3 Propiedades

De acuerdo a investigaciones sobre las propiedades que encierra el nopal como verdura, ha despertado un enorme interés en mercados extranjeros como Europa y Asia por el beneficio que brindan al tratamiento de diversos padecimientos además de ser ricos en vitamina C, minerales y fibra soluble (Maki-Díaz et al., 2015).

Con respecto a las propiedades medicinales, el nopal ha sido utilizado para diferentes formas de consumo, en años recientes se auxilió en trastornos digestivos con el uso de fibra deshidratada, además ha demostrado ser hipoglucemiante controlando los niveles de azúcar en el cuerpo (Sataloff et al., 2011).

Según Rocío Romero Valdovinos, nutrióloga del Hospital General Regional (HGR) número 1 del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) en Tijuana, Baja California, el consumo de nopal es auxiliar para el control de la diabetes e hiperglucemia. Los aminoácidos, fibra y niacina que contiene previenen que el exceso de azúcar en la sangre se convierta en grasa, y por otro lado, actúa metabolizando los ácidos grasos, reduciendo así el colesterol. Además, por contener vitaminas y minerales en conjunto con los 17 aminoácidos, ayudan a eliminar toxinas provocadas por el alcohol y el humo del cigarro. (Rocío, 2018).

5.1.4 El nopal como alimento funcional

El nopal ha sido considerado últimamente como un buen alimento funcional, los frutos y cladodios son una fuente importante de: fibra, hidrocoloides (mucílagos), pigmentos (betalaínas y carotenoides), Ca, K y vitamina C; compuestos que son muy apreciados para una dieta saludable y como ingredientes para diseñar nuevos alimentos (Evaluation et al., 2010).

De acuerdo a estudios realizados, los cladodios de *opuntia spp* contienen compuestos bioactivos, como los polifenoles, que son un gran grupo de metabolitos secundarios que producen las plantas, estos poseen diferentes estructuras químicas que incluyen ácidos fenólicos o fenoles, ácido gálico, ácido cumárico, ácido 3,4-dihidroxibenzoico, ácido 4-hidroxibenzoico, ácido ferúlico, ácido salicílico y flavonoides como isoquercetina, entre otros polifenoles (Tranquilino-Rodríguez et al., 2020).

5.1.5 Valor nutritivo

Los cladodios de nopales en sí no constituyen un alimento completo, sin embargo, al igual que las demás verduras, estos proporcionan algunos elementos nutritivos (Tabla 1) necesarios en la dieta de una persona.

Tabla 1. Valor nutritivo del nopal verdura respecto a 100g (Sataloff et al., 2011)

Proporción comestible	78.00%
Energía	27.00 kcal
Proteínas	0.17 g
Grasas	0.30 g
Carbohidratos	5.60 g
Calcio	93.00 g
Fierro	1.60 mg
Tiamina	0.03 mg
Riboflavina	0.06 mg
Niacina	0.03 mg
Ácido ascórbico	8.00 mg

Dentro de toda la composición química del nopal, principalmente se encuentra un alto porcentaje de agua (90-92.5 %).

5.2 Trigo

Los granos constituyen parte fundamental de la alimentación humana, nos provee sustancias indispensables para nuestra vida como los carbohidratos, grasas, vitaminas y minerales. Estos granos son clasificados como alimentos almidonados puesto que contienen más del 60% almidón, totalmente digestibles en el sistema humano. Los polímeros de almidón, conformados por unidades de glucosa, hacen que los cereales se consideren como los principales aportadores de calorías o energía. El segundo grupo de compuestos más abundantes en el grano es el de las proteínas localizadas en

sus distintas partes anatómicas. Casi todos los cereales contienen de 8 a 16% de proteína (Jueves & Domingo, 2013).



Figura 4. Trigo

El trigo es el cereal perteneciente al género *Triticum*. Siendo uno de los 3 más cultivados globalmente, junto al maíz y arroz y el más consumido por el hombre en la civilización occidental desde la antigüedad. Es principalmente cultivado para el consumo humano, se utiliza para hacer harina, harina integral, sémola y malta, así como gran variedad de productos alimenticios derivados de estos como pan, galletas, cerveza, whiskey, pasta, cereales, aperitivos, etc. (León & Rosell, 2007).

El grano de trigo está constituido de varios tejidos, los cuales se esquematizan en la Figura 5. El germen o embrión, es el órgano reproductivo y de almacenamiento que representa entre el 2 % y 3 % del peso del grano. El endospermo, principal fuente de energía durante la germinación, es la parte anatómica más abundante (81 % a 84 % del peso del grano). El pericarpio (salvado) está constituido por un conjunto de capas que protegen al grano y comprende entre 14 % y 16 % del peso de este último.

De todo el grano, el endospermo es extraído mediante molienda para obtener harina y semolina, que son utilizadas en las industrias de panificación, galletería y pastas, mientras que el germen y el pericarpio se recuperan como subproductos y solamente un 10 % del salvado producido se destina a la alimentación humana, principalmente como fuente de fibra en pan, galletas, cereales y otros (Chaquilla-Quilca et al., 2018).

5.2.1 Origen

En la actualidad no se sabe con precisión el origen del trigo, más sin embargo es uno de los cultivos presentes desde el comienzo de la agricultura. Investigaciones recientes sostienen que este grano es originario de zonas comprendidas entre Asia Menor y Afganistán. Siendo en estas zonas quizás hace unos 15000 – 10000 años AC, el hombre primitivo se topó con el trigo silvestre probablemente *Triticum monococcum* o *triticum dicoccum* (Cultivo et al., 2001).

5.2.2 Composición química

El trigo cuenta con una composición química que varía de acuerdo a varios factores de por medio como, las condiciones donde se tiene el cultivo, la región o año de cosecha. En la Tabla 2 se muestra la composición química de los granos de trigo y en la Tabla 3 la composición vitamínica del grano.

Tabla 2. Variación en la concentración de los principales componentes del trigo (León & Rosell, 2007).

Composición química del trigo (%)		
Componentes	Mínimo	Máximo
humedad	8	18
almidón	60	68
proteína	7	18
lípidos	1.5	2
fibra cruda	2	2.5
cenizas	1.5	2

Tabla 3. Composición vitamínica del grano de trigo (mg/kg) (Cultivo et al., 2001).

Componente	mg/kg
Tiamina	3.9
Riboflavina	1.2
Ácido pantoténico	10
Niacina	50
Piridoxina	4.5
Colina	1.1
Ácido fólico	0.5
Biotina	0.1

5.3 Harina

Una harina es el resultado de la molienda de un producto previamente seco ya sea cereal, leguminosa o algún otro. Los diferentes tipos de harina se obtienen por las grandes variedades de cereales que se tienen, siendo el trigo la más usual, ingrediente principal del pan pero de igualo forma existen harinas de leguminosas por semillas secas, de frutos y vegetales deshidratados, etc.

Proceso realizado en la mayoría de los granos de los cuales el trigo y maíz son los más comunes. Las harinas se formulan para obtener diferentes productos he aquí oscila el tamaño de partícula específico (*I.b.q. Judith Libertad Chávez González, 2015*). Para que un producto pueda llamarse harina tiene que pasar mediante grandes tamices planos y cualquier material que no logre atravesar ciertos tamices es devuelto para otros procedimientos. Las harinas que se obtienen varían en cuanto a su calidad y cantidad dependiendo del tipo de molino que hayan utilizado para su obtención (*Jimenez & Landa, 2018*).

5.3.1 Harina de trigo

La harina de trigo es el producto obtenido tras la molienda de los granos mediante molinos de rodillos. El grano pasa por una trituration después de haber sido limpiado y acondicionado, por un cribado y purificado tras la trituration y por ultimo una reducción, que básicamente es moler las sémolas y semolinas purificadas convertidas en harina, aquí se reducen las partículas de sémola hasta una finura de harina eliminando unas partículas de salvado y germen que pudieron estar presentes (Del & Sant, 2019). En la Tabla 4 se aprecia la composición nutricional de la harina de trigo haciéndose una comparación tanto de una harina blanca como de una harina integral.

Tabla 4. Composición nutricional de la harina de trigo (por 100 g de producto) (León & Rosell, 2007).

componentes	Harina blanca	Harina integral
Calorías (kcal)	361	339
Proteína (g)	11.98	13.7
Grasa (g)	1.66	1.87
Hidratos de carbono (g)	72.53	72.57
Cenizas (g)	0.47	1.6
Fibra (g)	2.4	12.2
Humedad (g)	13.36	10.26
Calcio (mg)	15	34
Hierro (mg)	0.9	3.88
Magnesio (mg)	25	138
Fosforo (mg)	97	346
Potasio (mg)	100	405
Sodio (mg)	2	5
Zinc (mg)	0.85	2.93
Cobre (mg)	0.18	0.38
Manganeso (mg)	0.79	3.8
Selenio	39.7	70.7
Tiamina (mg)	0.08	0.45
Riboflavina (mg)	0.06	0.37

5.3.2 Harinas compuestas

Cuando hablamos de harinas compuestas nos referimos al tipo de producto que es obtenido por la mezcla de distintas harinas con o sin trigo y estas a su vez se pueden mezclar con otras materias primas de alto valor biológico, con la posibilidad de incluir la adición de proteína suplementaria de diversas fuentes que pueden estar asociados a la cultura alimentaria de un grupo. Este término fue introducido por la FAO desde 1964 con el fin de producir mezclas para producir alimentos a base de trigo, como pan, pastas y galletas.

Las harinas compuestas suelen estar constituidas con materiales vegetales cereales como arroz, cebada, avena, maíz, leguminosas como garbanzos, lentejas y frijol, hortalizas como zanahoria, y plátanos, tubérculos y cualquier vegetal (Umaña et al., 2013).

5.4 Pan

El pan, es el producto horneado que obtenemos gracias a la utilización de una masa de harina de trigo pudiendo incorporar una amplia variedad de ingredientes como harina, agua, sal, azúcar, grasa, emulsificantes, leche, mejorantes, entre otros. Un buen pan debe presentar una corteza crujiente, miga color blanco cremoso, olor y sabor característico además de una buena conservación. Las materias primas que suelen utilizarse siempre tendrán influencia en estas características (Elizabeth & Miguel, 2020).

5.4.1 Tipos de panes

Hoy en día dentro del mercado existen diferentes tipos de panes, como el pan común o blanco, pan especial, pan integral, pan de Viena o francés, pan de molde o americano y pan de cereales:

Pan común o blanco: elaborado a partir de harina de trigo, levadura y agua, al que se le puede añadir ciertos coadyuvantes tecnológicos y aditivos autorizados.

Pan especial: es el que por su composición incorpora algún aditivo o coadyuvante de acuerdo al tipo de harina, por otros ingredientes (leche, huevo, grasas, cacao, etc.), por no llevar sal, por no haber sido fermentado, etc.

Pan integral: por utilizar una harina que ha sido producto de la trituración de un grano completo.

Pan de Viena o francés: es el pan de flama que entre sus ingredientes incluye azúcares, leche o ambos a la vez.

Pan de molde o americano: es el pan de corteza blanca que cuya cocción incluye moldes.

Pan de cereales: es el pan con un porcentaje de otra harina no inferior al 51% que recibe el nombre del cereal como pan de centeno o maíz (Elizabeth & Miguel, 2020).

5.5 Alimento funcional

Un alimento que contiene compuestos biológicamente activos causando efectos beneficiosos y nutricionales básicos en una o varias funciones del organismo y que se traducen en una mejora de la salud o en una disminución del riesgo de sufrir enfermedades, es considerado funcional. Básicamente son alimentos procesados los cuales contienen ingredientes que desempeñan una función específica en las funciones fisiológicas del organismo humano, más allá de su contenido nutricional (Fuentes Berrio et al., 2015).

5.5.1 Alimentos funcionales en la actualidad

Los alimentos funcionales se presentan siempre en forma de un alimento de consumo diario (Figura 7), lo que se pretende es darle una funcionalidad extra al alimento agregándole en forma de fortificación o enriquecimiento principios activos, ciertas sustancias extractos, etc. (y que se denominan nutraceuticos) para convertirlos aún más

importantes por salud. Estos alimentos pueden ser lácteos, derivados de cereales, cárnico, etc. Más no como jarabes, extractos, un comprimido o capsulas que pudiera parecer un medicamento (Beltr et al., 2016).



Figura 5. Alimentos funcionales

5.5.2 Pan como alimento funcional

La formulación de productos alimentarios saludables y el estudio de nuevas materias primas, se presentan como una tarea prioritaria para los profesionales del sector alimentario. Siendo de gran interés el sector de los cereales, granos y semillas, como fuente alimentaria por el alto impacto sobre la sociedad en la actualidad. Principalmente el pan es un claro ejemplo de un alimento prioritario en la dieta de la mayoría de la población y que está siendo utilizado como sustrato de diversos ingredientes funcionales como la fibra o algunos micronutrientes añadidos a las harinas (Umaña et al., 2013).

Todos los productos de panificación, debido a sus características tales como: una buena vida de anaquel (por una baja aw, resultando ser menos susceptibles a crecimientos microbianos), por ser accesibles a toda la población en cuanto a precio y principalmente ser de los alimentos mayormente consumidos en la vida cotidiana de todo el mundo, lo hacen ser productos de mayor interés en cuanto a convertirlos en alimentos funcionales mediante adición o fortificación de compuestos activos (Güemes Vera et al., 2009).

5.5.3 Fortificación

Según la FAO, la fortificación es un proceso que tiene como fin la adición de uno o más nutrientes a un alimento con el fin de mejorar su calidad hacia las personas consumidoras, en general con el objeto de reducir o controlar una carencia de nutrientes.

El realizar una fortificación de alimentos básicos que consumen la mayoría de la personas, es la manera más eficaz de corregir las deficiencias de nutrientes esenciales en dicha población realzando el valor nutritivo del alimento, debido a su cobertura, biodisponibilidad y bajo costo, además la fortificación es socialmente aceptable y no requiere cambios en las practicas dietéticas (Scrimshaw, 2005).

5.6 Nanotecnología

La nanotecnología es el nombre que reciben las ciencias y técnicas que se aplican a un nivel de nanoescala, esto es, unas medidas extremadamente pequeñas “nanos”, que permiten trabajar y manipular las estructuras moleculares y sus átomos.

Esta ciencia se enfoca en la caracterización, fabricación y manipulación de estructuras biológicas y no biológicas más pequeñas que 100 nm. Las estructuras en esta escala han mostrado tener propiedades funcionales novedosas. Consiguientemente, el interés en esta área de investigación, se ha incrementado enormemente en la actualidad (Jaimes et al., 2017).

5.6.1 Nanopartículas

La palabra *nano* significa una billonésima (1×10^{-9}) de un metro o 1/75,000, el tamaño de un cabello humano. Un nanomaterial incluye partículas naturales o sintéticas con al menos de una dimensión menor a 100 nm, mientras que las nanopartículas incluyen al menos dos de sus dimensiones entre 1 y 100 nm.

Las nanopartículas han estado presentes y existido en el planeta por siglos, algunos ejemplos son las partículas de humo o las nanopartículas dentro de las bacterias.

Además, según investigaciones, algunas civilizaciones antiguas ya lo utilizaban aprovechando sus propiedades ópticas y minerales, un ejemplo es la cultura egipcia utilizando nanopartículas de oro como coloides medicinales para conservar la juventud y la buena salud; o en la civilización china, además de utilizarlas con fines curativos, las aplicaba como colorantes inorgánicos en la porcelana (López De la Peña et al., 2016).

5.6.2 Nanopartículas en la industria alimentaria

Tanto el despertar como la inclusión que va generando día tras día el utilizar nanotecnología como nuevas tecnologías ha ido despertando nuevos horizontes de mayor interés, tal es el caso de la industria alimentaria desde el procesamiento y o empaques de ellos entre otros (Figura 6).

Dentro del procesamiento de los alimentos existen diferentes formas de utilización de nanopartículas como sabores y colores deseados por la adición de nanocapsulas, las cuales estallan en diferentes frecuencias de microondas; desarrollo de formulaciones a nanoescala de diferentes plantas herbales, por la reducción de hierbas a polvos o nanoemulsiones; refinación de aceites; desarrollo de nanotubos duros de longitud micrométrica hechos de proteínas lácteas para ensamblaje con uso potencial en ingredientes novedosos para viscosidad, gelificación, nanoencapsulación y propósitos deseados; nuevas técnicas para empaques y recubrimientos, entre muchas más aplicaciones (Jaimes et al., 2017).

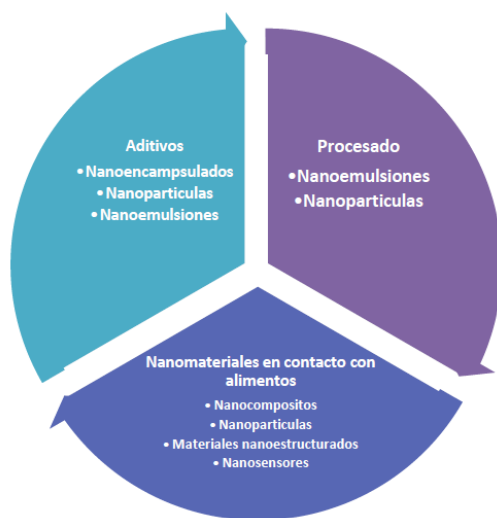


Figura 6. Aplicaciones de la nanotecnología en la industria de alimentos (López De la Peña et al., 2016)

5.6.3 Efecto del tamaño de partículas en alimentos

La reducción de la partícula tiene un gran impacto en la eficacia de la utilización de un alimento. El tamaño de partícula decreciente mejora la digestibilidad de los nutrientes, por lo tanto aumenta la digestibilidad de la proteína, energía y otros nutrientes. Mejorando la digestibilidad, mejora la conversión alimentaria; además, la reducción de tamaño de partícula puede influenciar cuán uniformemente el alimento puede ser mezclado y reduce la cantidad de segregación que ocurre entre el transporte y la distribución del alimento al individuo (Lindemann et al., 2012).

El tamaño de partícula de productos orgánicos de consumo alimenticios va de la mano con la digestibilidad de los nutrientes que estos aportan. A menor diámetro, mayor es la superficie disponible de aprovechamiento para las enzimas digestivas, y por tanto, mayor será la digestibilidad. Particularmente importante para las materias primas proteicas. Varios autores han demostrado que existe una mayor digestibilidad en cuanto a aminoácidos e incluso de la energía. Se tienen investigaciones en harinas de soja, de girasol, colza, etc. (Lizaso, 2015).

Según investigaciones recientes se considera que cuanto menor sea el tamaño de partículas en piensos mejor es el índice de conversión y mayor productividad en aves. Las partículas pequeñas favorecen la velocidad de tránsito, mejoran la digestibilidad de los nutrientes aumentando la superficie de exposición a la acción de enzimas endógenas y ayudan a compactar las partículas en piensos granulados, también mejora el grado de gelatinización del almidón. (Ingredientes et al., 2004).

Un estudio realizado en cerdos demostró que al aplicar una reducción de tamaño de partículas de 400 y 500 μm a los piensos de alimentación que incluyen cereales como maíz, sorgo o trigo demostraron tener mejor digestibilidad al ser consumidos por el animal en cuanto a energía y nutrientes. Al mantener una dieta incluyendo piensos con ingredientes a menor tamaño aumentó de 1 a 2% el rendimiento de las canales sin interferir en características como el porcentaje magro ideal (Lancheros et al., 2020)

5.7 Textura en los alimentos

Con ayuda de nuestros sentidos el ser humano percibe y detecta el mundo que lo rodea, gracias a la vista, el olfato, el gusto, el tacto y el oído. Gracias a los sentidos, todos sabemos que alimentos consumimos día a día, como es la apariencia, la consistencia, el olor, color. Etc. Cualquier características que nos lleve a aceptar o rechazar el producto.

La sensibilidad sensorial del tacto se percibe en la piel y en la lengua. A través de este sentido se detecta en un alimento: la textura, tamaño, forma, viscosidad, adhesividad, untuosidad, dureza, etc. Las características de textura se clasifican en: mecánicas, geométricas y de composición como se muestra en la Tabla 5 (Carretero, 2014).

Tabla 5. Características de textura en los alimentos (Carretero, 2014).

Características de textura	
Mecánicas	comportamiento mecánico del alimento frente a la deformación
Geométricas	relacionados a la forma y orientación de partículas : fibrosidad, granulosidad, cristalinidad, porosidad, esponjosidad, etc.
Composición	presencia de componentes como humedad, granulosidad, harinosidad, etc.

5.7.1 Análisis de textura en alimentos

Las propiedades mecánicas de los alimentos juegan un papel primordial en el comportamiento de ellos durante el procesamiento, almacenamiento, distribución y consumo. La influencia de los distintos componentes en las propiedades mecánicas y en especial de la temperatura y contenido de agua son vitales para elegir el

equipamiento adecuado así como material de envasado del alimento. Al consumir el alimento estamos detectando la textura que se ve afectada cuando no se tienen controlados los factores externos (Castro Montero & de Hombre Morgado, 2007).

En los alimentos, una propiedad física como la textura es de suma importancia para determinar la aceptabilidad del mismo. Para un consumidor le serán preferibles aquellos alimentos que le resulten agradables sensorialmente y la textura siendo un factor que designa calidad al producto. Esta propiedad se puede medir objetivamente (instrumental) y subjetivamente (pruebas sensoriales). Entre los dispositivos de prueba instrumentales, están los texturómetros (ejemplo en la Figura 7), los cuales imitan las condiciones de la masticación y presentan excelentes correlaciones con las evaluaciones sensoriales de textura (Granados et al., 2014).



Figura 7. Analizador de textura Brookfield CT3

5.7.2 Parámetros del análisis de textura

La textura en los alimentos se ha incluido como una de las características para evaluar un alimento y garantizar un producto aceptable. Se ha generado como método descriptivo que contempla todas las características que describen al producto en relación a la textura desde la primera mordida hasta la deglución. El perfil de textura es el mejor método para evaluar textura de los nuevos tipos de alimentos en las primeras etapas de desarrollo dado que es un atributo multiparamétrico, su descripción completa debe abordar la identificación y cuantificación de todas las propiedades de textura de un alimento (Puma Isuiza & Núñez Saavedra, 2018).

Los principales atributos de mayor influencia en el análisis de perfil de textura en un alimento son: dureza, elasticidad, firmeza, masticabilidad, cohesividad, adhesividad y gomosidad.

Dureza. La dureza es considerada como la fuerza máxima que tiene lugar, en cualquier tiempo, durante el primer ciclo de compresión hacia el material. Definida también como la fuerza en g fuerza o newton una porción de producto hasta en un 50 % del espesor original. Esta prueba simula el comportamiento de masticar el alimento dos veces, cada ciclo semeja un ciclo de cerrar y abrir la quijada.

Elasticidad. Este atributo es una medida de cuanto recupera su altura o forma original el alimento luego de ser sometido a una deformación. Básicamente es la altura que el alimento recupera durante el lapso transcurrido entre el final de la primera mordida y el comienzo de la segunda (de manea instrumental correspondido en 2 ciclos de compresión).

Firmeza. Este parámetro es definido como la fuerza que se necesita para obtener una deformación dada, o sea que tan firme está el producto cuando se comprime ligeramente.

Masticabilidad. En términos sensoriales es definida como la fuerza requerida para desintegrar un alimento solido hasta que esté listo para ser deglutido. Siendo el producto de firmeza por posesividad y elasticidad (Sacón et al., 2016).

Cohesividad. Es el cociente entre el área de la segunda compresión (A2) y el área de la primera compresión (A1). Representa la fuerza con la que están unidas las partículas en la masa, límite hasta el cual se puede deformar antes de que se rompa la muestra. Es un parámetro adimensional.

Adhesividad. Es el área del pico negativo después del primer ciclo de compresión (B), representa el trabajo necesario para despegar el émbolo de la superficie del alimento. Se mide en N*s.

Gomosidad. Es el producto de la dureza por la cohesividad. Se expresa en N (Salinas & Directora:, 2013).

5.8 Digestibilidad

La digestibilidad es conocida como la combinación de los procesos de digestión y absorción, íntimamente relacionada con el valor nutritivo de los alimentos. Los procesos digestivos tienen como objetivo proporcionar nutrimentos al organismo y está compuesto por el proceso de ingestión de alimento, la secreción de ácido clorhídrico y de enzimas en el tracto gastrointestinal, la hidrólisis de macromoléculas, la absorción de nutriente y la excreción de productos de deshecho (Parra & Gómez, 2009).

La digestibilidad constituye un indicador de la calidad de la materia prima que se utiliza como alimento que varía notablemente de una especie a otra. Evaluando la digestibilidad suponemos la determinación de, qué cantidad de un determinado nutriente o sustancia alimenticia desaparece del tracto intestinal o dicho de otra manera, que cantidad de material no se degrada ni se absorbe mientras pasa a través del animal. Este es un aspecto relevante en la utilización de los nutrientes, ya que los residuos no digeridos y las excreciones fecales asociadas con la digestión son la única pérdida de mayor relevancia en la utilización de los alimentos, llegando a ser cercano al 40% (Pampa, 1999).

5.8.1 Importancia de la utilización de pruebas de digestibilidad en alimentos

Conocer la digestibilidad de los diferentes alimentos nos permite saber a qué organismos van dirigidos, especies, la interacción entre los nutrientes de la dieta o ingredientes. Son aspectos muy importantes que de lo contrario al no ser considerados se pueden sobrevalorar el valor nutritivo del ingrediente y así cometer errores al balancear una dieta, con efecto directo sobre la salud y el desempeño de los animales que lo consumen. Algunos ingredientes con baja digestibilidad afectan el consumo de alimento, principalmente si se usan de manera inadecuada, comprometen el rendimiento de los animales por desequilibrio en el aprovechamiento de nutrientes contenidos en el alimento (Osorio-carmona et al., 2012).

5.8.2 Digestibilidad in vitro

Las pruebas de digestibilidad in vivo suelen ser costosas además de muy tardadas, y requieren de grandes cantidades de alimento, debido a esto se han desarrollado métodos que estiman la digestibilidad en forma indirecta o conocido como métodos in vitro. Estas técnicas simulan la digestibilidad del tracto digestivo mediante una fermentación anaerobia de un sustrato de la muestra incluyendo la utilización de enzimas digestivas y mezclado con una solución amortiguadora que simula la saliva del rumiante (Ministry of Health, 2011).

5.8.3 Enzimas principales en la digestibilidad

Las enzimas digestivas son moléculas creadas por nuestro cuerpo que se encargan de romper los polímeros presentes en los alimentos en moléculas más pequeñas para que puedan ser digeridas y absorbidas con facilidad. Una de las tres enzimas digestivas importantes son las llamadas amilasas que degradan los almidones y azúcares complejos de la dieta, mediante la ruptura de los enlaces glucídicos, liberando mososacáridos (especialmente glucosa). Existen 3 tipos de amilasas: la ptialina, la amilasa pancreática y la amilasa duodenal (Plameca, 2018).

Las α -amilasa son consideradas como el grupo de enzimas más estudiadas e importantes en el campo de la biotecnología e industrial. La principal acción es remplazar por completo la hidrolisis química del almidón que es el carbohidrato más explotado a nivel mundial. Estas enzimas son imprescindibles en la elaboración de productos alimenticios, combustibles, medicamentos y detergentes. En la industria alimentaria es utilizada en elaboración de pasteles, preparación de digestivos, jarabes, cerveza y panadería (Gómez et al., 2018).

Otro grupo de enzimas denominado glucoamilasas rompen enlaces glucosídicos generando glucosa a partir de los enlaces terminales no reductores de la cadena de almidón por lo tanto son enzimas sacarificantes. Estas enzimas son incapaces de hidrolizar el almidón por completo a glucosa ya que la ruptura requiere la participación

de una enzima de acción interna, es por eso que en presencia de α -amilasa tiene alta actividad desramificante del almidón (Espitia Rocha, 2009).

5.8.3 Digestibilidad del nopal

Los cladodios de opuntia son altamente digestibles. Los valores in vitro con ovinos varían de 60 a 65 por ciento, 60 a 70 por ciento, 35 a 70 por ciento, para muestras secas, cenizas, proteína cruda y fibra cruda, respectivamente. Estos coeficientes son similares a los obtenidos con forrajes comunes. Dado que el nopal no debe ser usado solo para alimentar animales, la digestibilidad se calcula por diferencia, asumiendo que no hay interacción entre los componentes (FAO, 2003).

La principal diferencia entre el nopal y otras fuentes de forraje es la degradabilidad de los nutrientes en el rumen. Mientras que la degradabilidad potencial de los demás forrajes en el rumen frecuentemente alcanza 48 horas, los nutrientes del nopal se degradan entre 6 y 12 horas, de modo que puede asumirse que no existe extracción significativa de nutrientes después de 24 horas (FAO, 2003).

Opuntia spp se caracteriza por presentar alrededor de 5% de proteína, una elevada concentración de carbohidratos solubles y calcio, además de la digestibilidad in situ a 48 horas de 68%, FDN 47% y FDA 16%, por ser un recurso forrajero valioso, es necesario proponer alternativas para lograr su aprovechamiento integral (Romo et al., 2006).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Se utilizó harina de nopal comercial de la marca Heganatura (nopal deshidratado, 100% puro, sin excipientes ni conservadores) a diferente tamaño de partícula: harina tamaño normal, molida por 15', 30', 60', 120' y 240' (6 muestras diferentes en total), harina de trigo, leche entera, huevos, aceite vegetal, azúcar, polvo para hornear y esencia de vainilla (opcional).

Las muestras de harina de nopal fueron obtenidas a partir de un molino planetario.

Para la obtención tanto del producto como del análisis se utilizó instrumentaría de laboratorio así como parrillas, vasos de precipitado, matraces, tubos, probetas, balanza analítica, estufa de secado, texturómetro, FRX y FTIR.

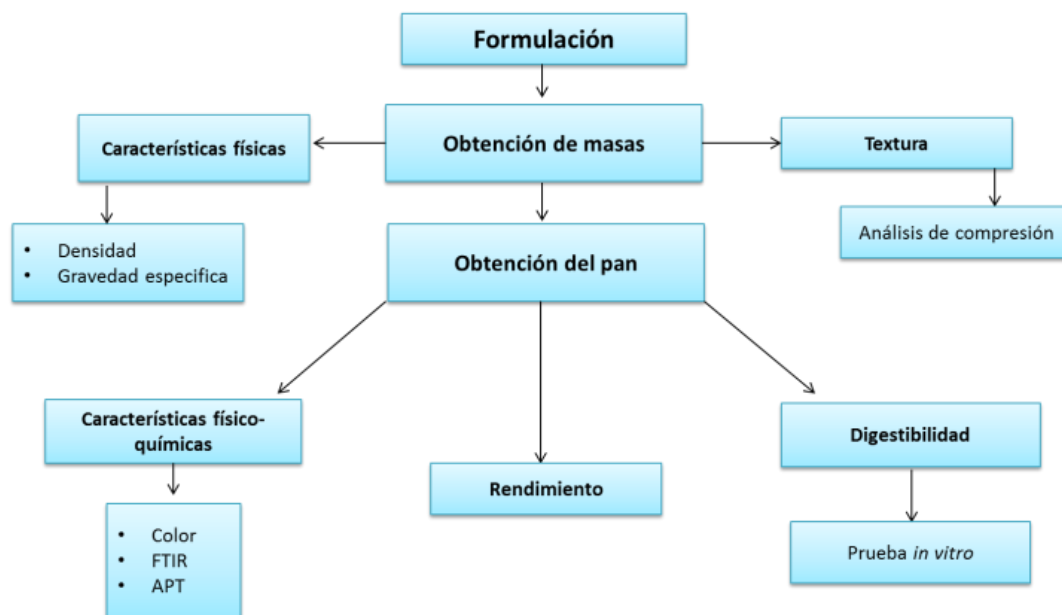


Figura 8. Diagrama de flujo

6.2 Formulación

Para la elaboración de los panes se adicionó 5% de harina de nopal a la mezcla, esto en 6 muestras diferentes: harina a 0, 15, 30, 60, 120 y 240 minutos de molienda.

Además se preparó una muestra testigo sin harina de nopal. Cada mezcla consta de 83.13 g de harina de trigo, 4.37 g de harina de nopal, 52.5 g de leche entera, 43.5 g de huevo, 26.25 g de aceite vegetal 78.5 g de azúcar y 2.625 g de polvo para hornear (1/2 cucharadita de esencia de vainilla opcional).

En un tazón se incorporaron cada uno de los ingredientes (harinas, azúcar, leche, huevo, aceite, polvo para hornear y vainilla) que al final obtendríamos 6 mezclas diferentes en cuanto a las muestras de nopal utilizadas y un control. En seguida con ayuda de un batidor homogenizamos por completo todos los ingredientes para así incorporarlos en los capacillos (checando pesos y volúmenes para un análisis de densidad y textura en la masa obtenida) y moldes respectivos. El proceso de horneado se llevó a cabo en una estufa de secado ECOSHEL 9023A precalentada a 180°C con una duración de horneado no mayor a 22 min. Posteriormente se realizaron los análisis con las muestras a temperatura ambiente.

6.3 Características físicas de la masa y rendimiento

Las características físicas de la masa del pan, incluyen: la densidad, gravedad específica, y rendimiento de la masa según el producto horneado, se midieron por duplicado por cada misma masa de muestra. Para los cálculos se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{ec.1}$$

ρ = densidad, m = masa y v = volumen

$$g. e. = \frac{\text{peso de la masa}}{\text{peso de muestra referente}} \quad \text{ec.2}$$

$g. e.$ = gravedad específica

$$R = \frac{\text{peso del pan}}{\text{peso de la masa}} \times 100 \quad \text{ec. 3}$$

R = rendimiento

Estos análisis se realizaron en el laboratorio de inocuidad y empaques en el departamento de ciencia y tecnología de alimentos de la UAAAN.

6.4 Color

La medición del color se realizó mediante un colorímetro KONICA MINOLITA CR-400. Con el colorímetro solemos medir un espacio de color y matiz basado en el paso de luz a través de filtros que simulan la sensibilidad del ojo humano ante la luz.

Se midió el color de la miga del pan así como la corteza exterior de la parte superior y de las harinas utilizadas. Este análisis se realizó en el laboratorio 1 del departamento de ciencia y tecnología de alimentos de la UAAAN.

6.6 Análisis de Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

Por las siglas FTIR, la espectrometría infrarroja por transformada de Fourier es una técnica que se ha empleada para obtener la huella dactilar molecular de una muestra biológica que absorbe la onda infrarroja de acuerdo a los enlaces químicos y estructurales de las moléculas, proporcionando información de la estructura específica de biomoléculas como lípidos, proteínas, carbohidratos y ácidos nucleicos, a través de una serie de bandas identificables de grupos funcionales en la región electromagnética del infrarrojo medio (Mata-Miranda et al., 2017).

Se tomaron muestras pequeñas de cada una de las 7 muestras de pan y se prosiguió a un análisis de componentes mediante el FTIR. Este análisis se realizó en un Spectro UV-VIS DUAL BEAM (SPLIT) UVS-2700 en el laboratorio de caracterización de materiales en el departamento de ciencia y tecnología de alimentos de la UAAAN.

6.7 Análisis de textura

6.7.1 Análisis de compresión de la masa

Todas las 7 muestras de masas obtenidas de las diferentes formulaciones se analizaron en un texturómetro Brookfield CT3 con un análisis de compresión (1 ciclo) utilizando la sonda TA11/1000, midiendo principalmente la dureza de la masa. Este análisis se realizó en el laboratorio de caracterización de materiales en el departamento de ciencia y tecnología de alimentos de la UAAAN.

6.7.2 APT del pan

El análisis de textura completo se realizó mediante el mismo texturómetro Brookfield CT3 utilizando una sonda TA4/100, cada muestra con 4 repeticiones diferentes. Los principales parámetros medidos fueron dureza, adhesividad, fracturabilidad, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad. Se rebanó la parte superior del pan para obtener un área plana manejando un diámetro de aprox. 6.5 cm y una altura de 4 cm. Este análisis se realizó en el laboratorio de caracterización de materiales en el departamento de ciencia y tecnología de alimentos de la UAAAN.

6.9 Digestibilidad

Se realizó una digestibilidad enzimática in vitro utilizando α -amilasa y amiloglucosidasa según (Wang et al., 2021) Con algunas modificaciones:

Se diluyen 0.3 g de muestra en 10 ml de Buffer de acetato de sodio anhidro como solución amortiguadora (0.2 M – pH=5.2) que se lleva a ebullición por 15 min para después mezclarse con 10 ml de una solución enzimática (290 U/ml de amilasa porcina pancreática y 15 U/ml de amiloglucosidasa). La mezcla se lleva a incubación a 37°C en un baño con agitación. Se toma 0.5 ml de muestra a 0, 20 y 120 min en tubos de ensayo a los que se le adicionan 0.5 ml de reactivo DNS. Los tubos se colocan en baño de agua a 100°C por 5 min. Se enfrían a temperatura ambiente con ayuda de hielo o agua fría para después añadirle 5 ml de agua destilada. Se agita y se realiza la lectura a 540 nm en un espectrofotómetro.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 formulación

Para la elaboración de los panes se adicionó harina de nopal al 5% a la mezcla, esto en 6 muestras diferentes: harina a 0', harina con 15 minutos de molienda, harina con 30 minutos de molienda, harina con 60 minutos de molienda, harina con 120 minutos de molienda y harina con 240 minutos de molienda, además de la muestra testigo sin harina de nopal, proporcionando una masa ligera en cada muestra a la que se le hicieron análisis de compresión y densidad para después hornearse y tener el producto panificado (Figura 9) para sus siguientes pruebas.



Figura 9. Pan recién horneado

7.2 Características físicas de la masa y rendimiento

Las características físicas de las masas obtenidas a partir de la sustitución parcial de harina de trigo con harina de nopal a diferentes tiempos de molienda se presentan en la Tabla 6. La densidad expresada en g/ml, la gravedad específica como valor adimensional y el rendimiento (%) propio de cada masa hasta obtención del pan.

Tabla 6. Características físicas de la masa

Muestra	Densidad (g/ml)	Gravedad Especifica	Rendimiento (%)
T	1.1642	1.16	86.96
0'	1.208	1.2	70.86
15'	1.118	1.11	82.12
30'	1.09	1.09	88.56
60'	1.087	1.08	86.67
120'	1.077	1.07	76.67
240'	1.061	1.06	87.45

Adicionar harina de nopal a la mezcla causó un incremento de la densidad en la masa, comparado con la masa testigo de 1.1642 a 1.208 g/ml. El aumento de este parámetro es debido a la inclusión de fibra soluble (gomas, mucílagos y pectinas) procedente del nopal, que genera una absorción de agua mayor, estudios realizados con productos de maíz nixtamalizados utilizaron una adición del 4% de polvo de nopal notando un incremento en la absorción de agua ocasionando también un aumento en viscosidad aparente mientras que la inclusión de más del 6% muestra una tendencia opuesta (Cornejo-Villegas et al., 2010).

Sin embargo conforme se utilizó harina de nopal a diferente tiempo de molienda, nuestra masa fue percibiendo una disminución en la gravedad específica, esto se debe a la aireación que se produce durante la etapa de mezclado, mientras se mezclan los ingredientes líquidos y secos, también se agrega aire a la masa. La cantidad de aire mezclada depende del método de mezclado, del orden en que se agregan los ingredientes, de la plasticidad, la consistencia, la emulsificación y las propiedades de las grasas y los aceites, en este caso posibles espumas causadas por la incorporación del huevo (Edoura-Gaena, Roch-Boris, Irène Allais, 2007).

Por otra parte la gravedad específica va de la mano con la densidad de la muestra, siendo una relación de ésta con la densidad de una muestra referente, en este caso el agua. La gravedad específica nos sirve para medir la cantidad de aire incorporado a una masa, si es demasiada alta, presenta un volumen insuficiente de celdas de aire y por lo tanto baja viscosidad de la masa, la torta presentará un volumen reducido y un

grano denso. Por otro lado, si es demasiado bajo (lo que indica que la masa tiene demasiadas celdas de aire y una alta viscosidad), entonces la torta dará como resultado algunos túneles, será frágil y tendrá una corteza que se desmorona (Edoura-Gaena, Roch-Boris, Irène Allais, 2007). En las muestras se vio reflejada esta tendencia, de presentar una gravedad específica alta y con forme se utilizó harina a diferente tiempo de molienda ésta fue disminuyendo o sea que las celdillas de aire se fueron haciendo más presentes en cada muestra.

En cuanto al rendimiento, la muestra con nopal comparado con la muestra testigo presentó un comportamiento menor de 89.96 a 70.86%, no obstante, según la harina utilizada a diferente tiempo de molienda se percibió un mejor rendimiento.

7.3 Color

En la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos de color de cada una de las muestras de pan adicionadas con harina de nopal a diferentes tiempos de molienda al igual que los valores de las harinas utilizadas. Se observan valores de luminosidad (L^*), contribución del color rojo (a^*) y contribución del color amarillo (b^*) medidos en la miga, corteza superior propia de cada muestra de pan y de las siete harinas utilizadas.

Tabla 7. Medición del color de las muestras

Muestra	Harinas empleadas			Muestras de pan			Corteza del pan		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
T	92.32	-0.8	19.48	65.31	-0.8	19.48	53.03	7.92	21.01
0'	72.96	1.75	15.9	65.76	1.92	20.76	55.72	9.19	25.25
15'	72.89	1.78	15.52	65.04	1.69	20.76	54.04	7.37	24.98
30'	72.72	1.76	15.47	65.02	1.48	20.41	52.37	10.05	22.28
60'	72.44	2.32	15.45	64.35	1.35	20.2	51.32	10.55	21.98
120'	71.91	2.03	15.23	63.96	1.57	20.03	50.97	9.3	21.35
240'	71.65	2.2	15.04	63.03	1.81	19.65	50.23	9.96	20.41

La luminosidad medida en la harina testigo fue muy alta (92.32), por lógica, al ser una harina blanca y según las lecturas de a^* y b^* . Por otra parte la lectura en la harina de

nopal presentó una luminosidad de 72.96, mucho más baja que la muestra T y con respecto a a^* y b^* mostrando una tendencia al color verdoso claro. Estos resultados son comparables a los reportados por (Ayadi et al., 2009). Las pequeñas diferencias según el tiempo de molienda no muestran ser significativas por lo que el color percibido a simple vista parece ser el mismo en cada una.

En cuanto al pan, la luminosidad presenta una disminución muy mínima en las cifras según la harina de nopal utilizada a diferentes tiempos de molienda en comparación al T. Aun siendo mínima, no existen diferencias significativas. En el valor a^* se observa un cambio del testigo y la muestra con harina de nopal de -0.8 y 1.92 siendo la muestra con nopal de un tono más beige claro. En cuanto a la utilización de harina a diferente tiempo de molienda no se percibieron diferencias significativas.

La corteza de cada pan tuvo una tendencia más clara en cuanto a luminosidad de 53.03 a 55.72 en comparación con el testigo, el parámetro a^* presentó una congruencia sin diferencias significativas y presentando pequeñas diferencias decrecientes únicamente en L y b^* . Las muestras se observaron con una tonalidad marrón tostado como se muestra en la Figura 9.

El no tener diferencias significativas en casi todas las muestras se compara con (Elizabeth & Miguel, 2020) donde analizaron la sustitución parcial de harina de nopal con harina de trigo en la elaboración de un pan, donde una formulación constituida del 5% de harina de nopal no presentó diferencias significativas en cuanto a los parámetros de color, olor, apariencia en comparación a un pan elaborado de harina de trigo 100%.

7.4 Análisis de Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis de FTIR se llevó a cabo para evaluar las interacciones entre los ingredientes de las muestras evaluadas. Dichos espectros se ven afectados por los procedimientos de preparación, los métodos y el tiempo de cocción. La Figura 10 presenta los espectros FTIR de dichas muestras. La banda correspondiente a 3352 (estiramientos de OH) indican la presencia de agua ligada (Pourfarzad et al., 2018). La región de

2926–2852 cm^{-1} puede atribuirse a los lípidos y también a la formación de complejos lípidos-almidón (Durazzo et al., 2018). Entre los valores de 1800 y 1500 cm^{-1} se localizan las bandas correspondientes a las amidas, las cuales representan la estructura de la red de gluten del pan, la cual es responsable de la elasticidad y flexibilidad de las masas y panes (Sivam et al., 2013). La banda de 1745 cm^{-1} (estiramiento C = O en los fosfolípidos) son característicos de los ácidos grasos(Durazzo et al., 2018). Por otro lado, el pico cercano a 1450 cm^{-1} puede deberse a la cadena lateral de proteínas COO-(Alvarez-Ramirez et al., 2020). La región entre 1200 y 800 cm^{-1} está ligada a la organización molecular de las cadenas de almidón, de las cuales depende la textura de la miga del pan (Gonzalez et al., 2020). La banda localizada en 1150 cm^{-1} se asocia a las vibraciones de estiramientos acopladas de C – O y C – C de las moléculas de los polisacáridos (Pourfarzad et al., 2015). La banda en 720 cm^{-1} representa los grupos C – H de los fosfolípidos.

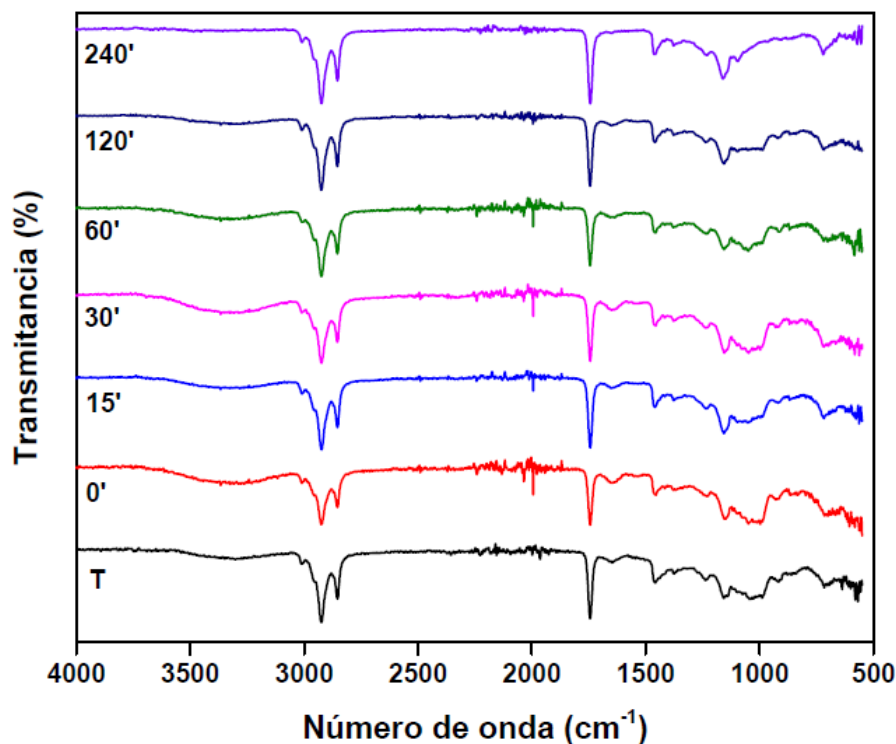


Figura 10. Espectros de FTIR para cada muestra de pan

7.5 Análisis de textura

7.5.1 Análisis de compresión de la masa

En la Tabla 8 se muestran datos obtenidos de cada una de las 7 muestras analizadas expresando valores de compresión, tomando en cuenta el primer trabajo de la dureza terminado (mJ) como parámetro importante en el análisis de textura de las masas antes de ser horneadas.

Tabla 8. Compresión de la masa

muestra	1er trabajo de la dureza terminado (mJ)
T	4.1
0'	5.48
15'	5.48
30'	5.85
60'	5.91
120'	5.44
240'	4.92

La fuerza necesaria para poder comprimir la masa aumentó al agregarle harina de nopal, de 4.1 mJ a 5.48 mJ en comparación con el testigo; todas las muestras que incluían harina de nopal fueron mucho más dura de la muestra T. Estas características son debidas a la adición de otras proteínas vegetales diferentes a las de la harina de trigo que provocan una disminución del contenido de gluten por la sustitución de estas proteínas por otras que no forman la misma estructura del gluten, debilitando la fuerza de las masas, que resultan más duras y adhesivas, pero menos cohesivas así mismo en el pan debido a la competencia por el agua libre con la red de gluten (Paraskevopoulou et al., 2010).

7.5.2 APT del pan

En la Tabla 9 se presentan los valores obtenidos de textura realizado con ayuda de un Texturómetro Brookfield CT3. Fue un análisis de textura completo donde se tomaron como principales parámetros los que se muestran a continuación.

Tabla 9. APT pan

muestra	Dureza (N)	Trabajo en la 1ra fractura (mJ)	Indice de Elasticidad	Gomocidad (N)	Masticabilidad (mJ)	Cohesividad	Adhesividad (mJ)
T	2.999	30.175	0.83	1.3317	18.54	0.48	0.115
0'	12.93939	160.73	0.87	5.729	107.85	0.43	1
15'	10.85967	113.93	0.88	4.9344	86.8	0.44	0.84
30'	9.69228	103.8	0.92	4.591	83.47	0.45	0.76
60'	6.4746	80.93	0.92	4.3556	73.355	0.54	0.58
120'	7.99515	91.8	0.86	3.60027	59.35	0.44	0.47
240'	8.3385	98.13	0.85	2.943	72.38	0.45	0.32

Como se puede observar en la Tabla 9, dureza y el trabajo necesario en la primera fractura de la muestra es de las primeras características importantes que a su vez tienen una relación en cuanto a la fuerza necesaria aplicada al pan. Es evidente el aumento de fuerza que se ejerce sobre la muestra testigo comparada con la primera muestra adicionada con nopal, a pesar de utilizar únicamente el 5% de harina se aumentan casi 10 unidades N fuerza de dureza para poder ser penetrado, de utilizar 2.99 N necesitaríamos 12.93 N en la muestra 0', por lo tanto el trabajo necesario para realizar la primera fractura cuenta con la misma congruencia, de utilizar 30.17 mJ en el testigo a necesitar 160.73 mJ en la muestra 0', pero según la utilización de harina de nopal a diferentes tiempos de molienda vamos disminuyendo la fuerza requerida de penetración y fractura hasta llegar al tiempo 120 donde la fuerza tiende a aumentar ocurriendo lo mismo en el tiempo 240, esto se debe al efecto que ocurre por las fuerzas de Van der Waals y las fuerzas electrostáticas de Coulomb que actúan sobre las partículas de la harina utilizada cuando alcanzan la nanoescala, este efecto provoca una aglomeración de partículas figurando tamaños más grande aunque no sean así

(Krishna & Patel, 2019), característica reflejada a partir de una harina a 120' de molienda haciendo un pan más duro.

Los efectos de las fuerzas de van der Waals también se ven reflejados en el índice de elasticidad de manera contraria. Tenemos un pan menos elástico a partir del empleo de harina a 120' de molienda debido a la consistencia más dura causada por las aglomeraciones de la harina.

Por otra parte la gomosidad es el resultado del producto de la dureza por la cohesividad por lo tanto la gomosidad del pan va disminuyendo en cada muestra. De igual forma como se utiliza harina a diferente tiempo de molienda tiende a generar un producto más fácil de masticar.

Siguiendo con la cohesividad, en la primera muestra 0' arroja un resultado de 0.43 siendo menor que la T con 0.48, en comparación con todas las muestras, siguen una relación mínima constante hasta la de 120' con una cohesividad de 0.54 esto debido a la aglomeración de las partículas en la harina empleada. Y en cuanto a la adhesividad del pan adicionado con HN, resultó mayor que la T necesitando mucha más fuerza, de 0.115 mJ a 1 mJ.

Los resultados obtenidos son semejantes a los descritos por (Kim et al., 2012) en la utilización de una variedad de opuntia como fibra en un bizcocho en relación a cada uno de los parámetros de textura analizados.

7.6 Digestibilidad

Desde el punto de vista nutricional, el almidón se puede fraccionar en almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL) y almidón resistente (AR) según su velocidad y grado de digestión *in vitro* (Lv et al., 2019).

Las fracciones de ADR y ADL se han relacionado con la velocidad a la que la glucosa comienza a estar disponible para la absorción en el intestino delgado, mientras que la fracción RS no se absorbe en el intestino delgado de individuos sanos. La fracción ADL

es más deseable que la ADR, ya que ofrece la ventaja de ser digerido lentamente en el intestino delgado e inducir un aumento gradual de la glucosa y la insulina plasmática posprandial (Osorio-Díaz et al., 2004).

Tabla 10. Digestibilidad *in vitro*

Muestra	G₀ (gr/L)	G₂₀ (gr/L)	G₁₂₀ (gr/L)	% ADR	%ADL	%AR	Tamaño de partícula (nm)
T	2.4566	7.3231	9.5878	43.8	20.38	35.82	
0'	4.3637	9.8878	10.8044	49.72	8.25	42.03	218
15'	7.5902	7.7259	9.1685	1.22	12.98	85.8	179
30'	6.2503	8.1245	8.4739	16.87	3.14	79.99	147
60'	6.0448	7.4792	10.8742	12.91	30.55	56.54	107
120'	6.0777	6.9737	9.9618	8.06	26.89	65.04	186
240'	7.6067	7.7382	9.522	1.18	16.05	82.76	157

En los resultados (Tabla 10) se observa que la fracción de ADR en la muestra testigo (T) es la mayor, lo que indica que la glucosa disponible se absorberá de manera más rápida en el intestino delgado (Martinez et al., 2018). Para evitar este fenómeno en este estudio se utilizó harina de nopal con diferente grado de molienda, con la finalidad de modificar la velocidad de digestión de la glucosa. En la muestra de 0 minutos de molienda (harina tal como se adquirió) la fracción de almidón dominante es la ADR, seguida por AR y finalmente ADL. Para las muestras de 15 a 240 minutos de molienda se observó que las fracciones de almidón presentaron un cambio en su distribución, siendo mayor la fracción de AR, seguida por la ADL y finalizando con la de ADR; en todas las muestras estudiadas. Como se mencionó anteriormente la fracción de AR no es absorbida por el intestino, así que una configuración donde el contenido de esta sea demasiado alto no es deseable. De las muestras estudiadas, se considera que la correspondiente a los 60 min de molienda es la más adecuada teniendo un porcentaje de AR del 56.54%, de ADL del 30.55% y ADR del 12.91%.

Las muestras de 0 a 240 minutos de molienda fueron procesadas de la misma manera, la única variable fue el tiempo de molienda, por lo cual los cambios en las fracciones de almidón se atribuyen a los diferentes tamaños de partícula de la harina de nopal

utilizada y las posibles interacciones entre dichas partículas de nopal de escala nanométrica y la amilasa de la harina de trigo. Dichos resultados son similares a los presentados en un estudio donde se utilizó carbón vegetal (50 nm) para la elaboración de pan con una sustitución del 4%, donde debido a la incorporación del mismo, incrementaron el porcentaje de AR hasta en un 74% con respecto a un control (Gonzalez et al., 2020).

Otro aspecto a considerar es que las harinas de fuentes vegetales tienen capacidad de absorción de grasa alta, siendo la de la harina de nopal del orden del 130% (Ayadi et al., 2009). De acuerdo al análisis de FTIR en las muestras se tiene la formación de uniones almidón-lípido que según estudios hechos en tamales de maíz (Armellini et al., 2019), tienen la capacidad de oponerse al ataque de las enzimas digestivas. Esto promueve la formación de fracciones más altas de ADL y AR, lo cual ejerce un efecto hipoglucemiante.

8. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron 7 muestras de masas diferentes para sus respectivos análisis como masa y posteriores después del horneado.
- Las muestras de masas presentaron disminución perceptible en cuanto a densidad y gravedad específica según la utilización de harina de nopal a diferentes tiempos de molienda y un mejor rendimiento en comparación con el testigo hecho con 100% harina de trigo.
- Los parámetros utilizados como escala de medición del color demostraron que las muestras no tienen diferencias muy significativas en cada uno de ellas.
- El análisis de FTIR se llevó a cabo para evaluar las interacciones entre los ingredientes de las diferentes muestras de masas.
- El análisis de compresión de las muestras permitió observar que la masa con harina de nopal tiene valores altos de dureza en comparación con un testigo (100% harina de trigo) y que según el tiempo de molienda de la harina empleada este parámetro fue aumentando.
- El análisis de perfil de textura (APT) nos indicó que el utilizar harina de nopal aumentó los valores de cada parámetro medido en relación al testigo (100% harina de trigo).
- Utilizar harina de nopal a diferentes tiempos de molienda provocó un pan más suave, con menor fuerza para fracturarlo, mayor elasticidad, menor gomosidad, menor fuerza de masticabilidad, mayor cohesividad y menor adhesividad.
- Las pruebas de digestibilidad evaluaron la digestibilidad de almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL) y almidón resistente (AR) según

su velocidad y grado de digestión *in vitro* en cada una de las muestras de pan con nopal comparadas a un testigo 100% harina de trigo.

- Al incluir harina de nopal a diferentes tiempos de molienda se modificaron las fracciones de almidón en las muestras de pan teniendo niveles altos de almidón resistente lo cual da un efecto hipoglucemiante a las panes de nopal en comparación con la muestra testigo con 100% harina de trigo.

9. LITERATURA CITADA

- Alta, M. (2012). *La grandeza del nopal, Identidad y orgullo nacional*.
- Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J., Carrera-Tarela, Y., Garcia, A., & Roldan-Cruz, C. (2020). Effects of candelilla wax/canola oil oleogel on the rheology, texture, thermal properties and in vitro starch digestibility of wheat sponge cake bread. *Lwt*, 130, 109701. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109701>
- Armellini, R., Peinado, I., Asensio-Grau, A., Pittia, P., Scampicchio, M., Heredia, A., & Andres, A. (2019). In vitro starch digestibility and fate of crocins in pasta enriched with saffron extract. *Food Chemistry*, 283, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.041>
- Ayadi, M. A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., & Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*, 30(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.01.003>
- Beltr, R., Heredia, D. E., & Europa, E. (2016). *Nutrición*. 30, 3–5.
- Carretero, M. (2014). Gastronomía: Análisis sensorial. *Ciudad de México, México*, 3–71. https://investigacion.upaep.mx/micrositios/assets/analisis-sensorial_final.pdf
- Castro Montero, E., & de Hombre Morgado, R. A. (2007). Parámetros mecánicos y textura de los alimentos. *Universidad de Chile*, 1–157. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/121381/ParamMecTexAlim07.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chaquilla-Quilca, G., Balandrán Quintana, R. R., Mendoza-Wilson, A. M., & Mercado-Ruiz, J. N. (2018). Propiedades y posibles aplicaciones de las proteínas de salvado de trigo. *CienciaUAT*, 12(2), 137. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v12i2.883>
- Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortéz, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M., Herrera, G., & Rodríguez-García, M. E. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *Journal of Food Engineering*, 96(3), 401–409.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.014>

Cultivo, E. L., Trigo, D. E. L., & Resultados, A. (2001). El Cultivo Del Trigo. Algunos Resultados De Su Producción En Cuba. *Cultivos Tropicales*, 22(4), 55–67.

Del, S. E. U., & Sant, N. (2019). *La harina*.

Durazzo, A., Kiefer, J., Lucarini, M., Camilli, E., Marconi, S., Gabrielli, P., Aguzzi, A., Gambelli, L., Lisciani, S., & Marletta, L. (2018). Qualitative analysis of traditional Italian dishes: FTIR approach. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10114112>

Edoura-Gaena, Roch-Boris, Irène Allais, G. T. y J.-B. G. (2007). Influencia de las condiciones de aireación en las propiedades físicas y sensoriales de la masa para pasteles aireada y las galletas. ". *Revista de Ingeniería de Alimentos* 79.3.

Elizabeth, C. C. K., & Miguel, G. G. L. (2020). Universidad técnica de cotopaxi. *Universidad Técnica de Cotopaxi*, 1, 101. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>

Espitia Rocha, L. C. (2009). Determinación de la concentración de alfa y beta amilasas comerciales en la producción de etanol a partir almidón de cebada empleando. *Javerianaeduco*, 1–114. <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis206.pdf>

Evaluation, N., Functional, A. S., By, F., Of, M., & Option, R. (2010). *Evaluación del nopal verdura como alimento funcional mediante opciones reales*.

FAO. (2003). *El nopal (opuntia spp) como forraje*. Estudio FAO. <http://www.fao.org/3/y2808s/y2808s00.htm#Contents>

Fuentes Berrio, L., Acevedo Correa, D., Chantré, C. A., & Gelvez Ordoñez, V. M. (2015). Alimentos Funcionales: Impacto Y retos Para El Desarrollo Y Bienestar De La Sociedad Colombiana. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 140. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(13\)140-149](https://doi.org/10.18684/bsaa(13)140-149)

Gómez, M. B., Cárdenas, O. N., Santa, C., Carpio, C., & Román, G. (2018). Purificación Parcial y Caracterización de Alfa Amilasa de granos germinados de *Chenopodium*

quinoa (Quinoa). *Revista ECIPeru*, 52–58.
<https://doi.org/10.33017/reveciperu2013.0007/>

Gonzalez, M., Reyes, I., Carrera-Tarela, Y., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2020). Charcoal bread: Physicochemical and textural properties, in vitro digestibility, and dough rheology. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 21(May), 100227. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100227>

Granados, C., Acevedo, D., Cabeza, A., & Lozano, A. (2014). *Análisis de Perfil de Textura en Plátanos Pelipita , Hartón y Topocho Texture Profile Analysis in Bananas Pelipita , Hartón and Topocho*. 25, 35–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000500006>

Güemes Vera, N., Totosaus, A., Hernandez, J. F., Soto, S., & Bolaños, N. A. (2009). Propiedades de textura de masa y pan dulce tipo “concha” fortificados con proteínas de suero de leche. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 29(1), 70–75.

I.b.q. judith libertad chávez gonzález. (2015).

Ingredientes, P. D. E., Terminados, P., & Monog, E. N. (2004). *FE*. 1995, 277–324.

Jaimes, M. J. del C., Ríos, D. I. C., & Severiche, S. C. A. (2017). Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria de alimentos. *Revista Alimentos Hoy*, 25(41), 51–76.
<http://www.alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/viewFile/448/366%0Ahttp://alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/download/448/366%0D>

Jimenez, C., & Landa, Y. (2018). *Propiedades Nutricionales Y Funcionales De Las Distintas Harinas Utilizadas Para La Elaboración De Un Pan De Alto Valor Nutricional*. 1–26.
[http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/4235/3/PROPIEDADES NUTRICIONALES Y FUNCIONALES DE LAS DISTINTAS HARINAS UTILIZADAS EN LA ELABORACION DE UN PAN DE ALTO VALOR NUTRICIONAL.pdf](http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/4235/3/PROPIEDADES_NUTRICIONALES_Y_FUNCIONALES_DE_LAS_DISTINTAS_HARINAS_UTILIZADAS_EN_LA_ELABORACION_DE_UN_PAN_DE_ALTO_VALOR_NUTRICIONAL.pdf)

Jueves, A., & Domingo, A. (2013). *Composición Química de los Cereales*. 1–5.

Kiesling, R., & Metzging, D. (2018). Origen y taxonomía de *Opuntia ficus-indica*. In *Ecología Del Cultivo, Manejo Y Usos Del Nopal*.

- Kim, J. H., Lee, H. J., Lee, H. S., Lim, E. J., Imm, J. Y., & Suh, H. J. (2012). Physical and sensory characteristics of fibre-enriched sponge cakes made with *Opuntia humifusa*. *LWT - Food Science and Technology*, 47(2), 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.011>
- Krishna, S., & Patel, C. M. (2019). Preparation of coconut shell nanoparticles by wet-stirred media milling. *Materials Letters*, 257, 126738. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126738>
- Lancheros, J. P., Espinosa, C. D., & Stein, H. H. (2020). Effects of particle size reduction, pelleting, and extrusion on the nutritional value of ingredients and diets fed to pigs: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 268, 114603. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114603>
- León, A., & Rosell, C. (2007). Trigo. In *De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica*. https://digital.csic.es/bitstream/10261/17118/1/libro_panificacion-2007.pdf
- Lindemann, M. D., Cromwell, G. L., Cox, R. B., Rentfrow, G., Peters, J. C., Mahan, D. C., Martin, R. E., Mahan, D. C., Hill, G. M., Link, J. E., Jolliff, J. S., FAO, INTA, NRC, S.2, J. M. P., y Peducassé, C. A. ., Ilisz, I., Aranyi, A., Pataj, Z., & Péter, A. (2012). Monitoreo de granulometría de maíz y sorgo en raciones para cerdos. *Journal of Animal Science*, 89(9), 277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpba.2012.01.020>http://www.ciap.org.ar/ciap/Sitio/Archivos/MONITOREO_DE_GRANULOMETRIA_DE_MAIZ_Y_SORGO_EN_RACIONES_PARA_CERDOS.pdfhttp://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13298
- Lizaso, J. (2015). *Tamaño de partícula. Comunidad Profesional porcina*.
- López De la Peña, H. Y., López Badillo, C. M., Múzquiz Ramos, E. M., Hernández Centeno, F., & Hernández González, M. (2016). Nanopartículas : aplicaciones actuales y futuras en la industria alimentaria López De la Peña, H. Y., López Badillo, C. M., Múzquiz Ramos, E. M., Hernández Centeno, F., & Hernández González, M. (2016). Nanopartículas : aplicaciones actuales y futuras en la. *Ciencia Cierta*, 48, 1–9.
- Lopez Perez, G. L. (2018). *Producción De Cuatro Variedades De Nopal Verdura Bajo*

Macrotúnel. 1–55.

- Lv, Y., Zhang, L., Li, M., He, X., Hao, L., & Dai, Y. (2019). Physicochemical properties and digestibility of potato starch treated by ball milling with tea polyphenols. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.028>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31–51.
- Martinez, M. M., Li, C., Okoniewska, M., Mukherjee, I., Vellucci, D., & Hamaker, B. (2018). Slowly digestible starch in fully gelatinized material is structurally driven by molecular size and A and B1 chain lengths. *Carbohydrate Polymers*, 197(April), 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.021>
- Mata-Miranda, M. M., Guerrero-Robles, C. I., Rojas-López, M., Delgado-Macuil, R. J., González-Díaz, C. A., Sánchez-Monroy, V., Pérez-Ishiwara, D. G., & Vázquez-Zapién, G. J. (2017). Principal components by FTIR spectroscopy as innovative characterization technique during differentiation of pluripotent stem cells to pancreatic cells. *Rev. Mex. Ing. Bioméd*, 38(1), 225–234. <https://doi.org/10.17488/RMIB.38.1.17>
- Melisa Guzmán Cifuentes. (2015). Formulación y caracterización de pan de molde con adición de ingredientes funcionales. *Universidad de Chile*, 0(2), Pág. 78-115-115. <https://doi.org/10.5354/0717-8883.1983.23025>
- Mesas, J. M.1 *; Alegre, M. T. . (2002). *El pan y su proceso de elaboración*.
- Ministry of Health, R. of I. (2011). Digestibilidad in vitro de opuntia a diferentes tiempos. *Phys. Rev. E*.
- Ortiz, Á. V., Cristina, I., Astudillo, P., & García, J. M. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 137–144.
- Osorio-carmona, E., Giraldo-carmona, J., & Narváez-solarte, W. (2012). Metodologías

para determinar la digestibilidad de los alimentos utilizados en la alimentación canina Methodologies to determinate the digestibility of foods used in feeding dogs. *Vet Zootec*, 6(1), 87–97. [http://200.21.104.25/vetzootec/downloads/MVZ6\(1\)_9.pdf](http://200.21.104.25/vetzootec/downloads/MVZ6(1)_9.pdf)

Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Carmona-García, R., Tovar, J., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. (2004). Resistant starch and in vitro starch digestibility of cooked “ayocote” bean (*Phaseolus coccineus*). *Interciencia*, 29(9), 510–514.

Pampa, U. N. de La. (1999). *Evaluación de Alimentos a través de los diferentes Métodos de Digestibilidad*. Church 1974, 94–106.

Paraskevopoulou, A., Provatidou, E., Tsotsiou, D., & Kiosseoglou, V. (2010). Dough rheology and baking performance of wheat flour-lupin protein isolate blends. *Food Research International*, 43(4), 1009–1016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.01.010>

Parra, J. S., & Gómez, A. Z. (2009). Importancia De La Utilización De Diferentes Técnicas De Digestibilidad En La Nutrición Y Formulación Porcina Importance of the Use of Different Digestibility Techniques in Pig Nutrition and Food Formulation. *Rev.MVZ Córdoba*, 14(1), 1633–1641. <http://www.scielo.org.co/pdf/mvz/v14n1/v14n1a12.pdf>

Plameca. (2018). *Enzimas digestivas: ¿Qué son? ¿Para que sirven? ¿Cómo ingerirlas?*

Pourfarzad, A., Ahmadian, Z., & Habibi-Najafi, M. B. (2018). Interactions between polyols and wheat biopolymers in a bread model system fortified with inulin: A Fourier transform infrared study. *Heliyon*, 4(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01017>

Pourfarzad, A., Habibi Najafi, M. B., Haddad Khodaparast, M. H., & Khayyat, M. H. (2015). Serish inulin and wheat biopolymers interactions in model systems as a basis for understanding the impact of inulin on bread properties: a FTIR investigation. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 7964–7973. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1939-4>

Puma Isuiza, G., & Núñez Saavedra, C. (2018). Determinación del perfil de textura sensorial de dos muestras experimentales de hot-dog de pollo (*Gallus gallus*)

- obtenidas por Ingeniería Kansei Tipo II. *Determinación Del Perfil de Textura Sensorial de Dos Muestras Experimentales de Hot-Dog de Pollo (Gallus Gallus) Obtenidas Por Ingeniería Kansei Tipo II*, 79(1), 210–217. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1165>
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R., & Hernández, H. M. (2005). Notas sistemáticas y una descripción detallada de *Opuntia ficus-indica* (L.) mill. (Cactaceae). *Agrociencia*, 39(4), 395–408.
- Rocío, R. V. (2018). *Nopal, auxiliar en la diabetes y la hiperglucemia*. <http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/265>
- Romo, M. M., Estrada, G. T., Haro, I. M., Solís, I. C., & Cruz-Vázquez, C. (2006). Digestibilidad in situ de dietas con harina de nopal deshidratado conteniendo un preparado de enzimas fibrolíticas exógenas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(7), 1173–1177. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2006000700014>
- Sacón, E., G, R., Dueñas, A., Alcívar, U., Zambrano, J., & López, N. (2016). Evaluación de las propiedades elásticas y mecánicas de una masa de pan con sustitución de harina de camote (*ipomoea batata*). *Centro Azúcar Vol*, 43(4), 42-49. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v43n4/caz05416.pdf>
- Salinas, B. M. V., & Directora: (2013). *ESTUDIO DE LA CALIDAD PANADERA , SENSORIAL Y INULINA Trabajo de Tesis Doctoral*.
- Sataloff, R. T., Johns, M. M., & Kost, K. M. (2011). El nopal: propiedades y paquetes tecnológicos para su producción. *SAGARPA*.
- Scrimshaw, N. S. (2005). La fortificación de alimentos: una estrategia nutricional indispensable. . . *An Venez Nutr*, v.18.
- Semillas, S. N. de I. y C. de. (2017). *Nopal (opuntia spp), Generalidades de la red nopal*. <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/nopal-opuntia-spp>
- Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Perera, C. O., & Waterhouse, G. I. N. (2013). Application of FT-IR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and polyphenols. *Food Research International*, 50(2), 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.039>

- Torres-Ponce, Reyna Lizeth Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. de L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal* Nopal: semi-desert plant with applications in pharmaceuticals, food and animal nutrition. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Mex. Cienc. Agríc*, 66, 1129–1142.
- Tranquilino-Rodríguez, E., Martínez-Flores, H. E., Rodiles-López, J. O., Dios Figueroa-Cárdenas, J. De, & Pérez-Sánchez, R. E. (2020). Optimization in the extraction of polyphenolic compounds and antioxidant activity from *Opuntia ficus-indica* using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(6), 1–12. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14485>
- Umaña, J., Alvarez, C., Lopera, S. M., & Gallardo, C. (2013). Caracterización de harinas alternativas de origen vegetal con potencial aplicación en la formulación de alimentos libres de gluten. *Alimentos Hoy*, 22(29), 33–46. <https://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/230>
- Wang, Z., Zhang, M., Liu, G., Deng, Y., Zhang, Y., Tang, X., Li, P., & Wei, Z. (2021). Effect of the degree of milling on the physicochemical properties, pasting properties and in vitro digestibility of Simiao rice. *Grain & Oil Science and Technology*, 4(2), 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.04.002>

10. ANEXOS

10.1 Preparación de reactivos para digestibilidad

1. Solución amortiguadora de acetato de sodio (0.2 M- pH=5.2): se prepara una solución Buffer A (5.78 ml de ácido acético glacial disuelto en 500 ml de agua desionizada) y una solución Buffer B (8.21 g de acetato de sodio anhidro disuelto en 500 ml de agua destilada). Se mezclan 21 ml de la solución buffer A con 79 ml de la solución buffer B y se aforan a 200 ml para obtener los valores de pH requeridos.
2. Solución enzimática: mezclar en 200 ml de agua destilada 7.25 g de amilasa porcina pancreática y 11.54 ml de amiloglucosidasa.