

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**“Pastas funcionales adicionadas con maíz
mexicano: caracterización fisicoquímica, térmica y
estructural”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS**

P r e s e n t a:

I.A.G Angélica Manzur Chávez

Director de tesis:

Dr. Apolonio Vargas Torres

Asesores:

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

Dra. Heidi María Palma Rodríguez

Tulancingo de Bravo, Septiembre 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

COORDINACION DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "Pastas funcionales adicionadas con maíz mexicano: caracterización fisicoquímica, térmica y estructural", que desarrolla el estudiante Angélica Manzur Chávez

Asistentes:

Dr. Apolonio Vargas Torres

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

Dra. Heidi María Palma Rodríguez

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por la estudiante, comunicando a la estudiante, Angélica Manzur Chávez, oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. La estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que la estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 1 de septiembre de 2020

Dr. Apolonio Vargas Torres

[Signature]

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

[Signature]

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

[Signature]

Dra. Heidi María Palma Rodríguez

[Signature]



Índice General

Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
Agradecimientos.....	viii
Dedicatoria.....	ix
Resumen.....	x
Abstract.....	xii
1. Introducción.....	1
2. Revisión de literatura.....	3
2.1. Alimento.....	3
2.1.1. Alimentos funcionales.....	3
2.1.2. Alimentos antioxidantes de manera natural.....	4
2.2. Pasta.....	5
2.2.1. Producción y consumo.....	6
2.2.2. Procesos de producción.....	9
2.2.2.1. Extrusión.....	9
2.2.2.1.1. Componentes de un extrusor.....	10
2.2.2.1.2. Extrusión en frío.....	11
2.3. Materias primas para la elaboración de la pasta.....	12
2.3.1. Maíz.....	12
2.3.1.1. Generalidades del maíz.....	12
2.3.1.2. Maíces pigmentados.....	13
2.3.1.3. Composición proximal.....	14
2.3.1.4. Estructura y composición del grano maíz.....	14
2.3.1.4.1. Pericarpio.....	15
2.3.1.4.2. Pedicelo.....	15

2.3.1.4.3. Endospermo.....	15
2.3.1.4.4. Germen	16
2.3.1.5. Producción del maíz.....	16
2.3.2. Trigo	17
2.3.2.1. Estructura y composición de los granos de trigo.....	17
2.3.2.1.1. Endospermo almidonoso	18
2.3.2.1.2. Salvado y Germen	19
2.3.2.2. Composición proximal.....	19
2.3.2.3. Producción del trigo	20
2.4. Principal componente de la pasta (Almidón).....	23
2.4.1. Almidón.....	23
2.4.1.1. Amilosa	23
2.4.1.2. Amilopectina.....	24
2.4.2. Gránulos de almidón.....	25
2.4.3. Cambios estructurales del almidón por tratamiento hidrotérmico.	25
2.4.3.1. Gelatinización.....	25
2.4.3.2. Retrogradación.....	26
2.4.4. Digestibilidad del almidón	27
2.4.4.1. Almidón resistente.....	27
3. Justificación	29
4. Objetivos	30
4.1. Objetivo general.....	30
4.2. Objetivos específicos	30
5. Hipótesis	31
6. Materiales y métodos	32

6.1. Materiales	32
6.2. Métodos	32
6.2.1. Obtención de harina de maíz.....	32
6.2.2. Elaboración de las pastas.....	32
6.2.3. Secado de las pastas	34
6.2.4. Preparación de las muestras	34
6.2.5. Análisis de cocción y calidad de las pastas	35
6.2.5.1. Tiempo óptimo de cocción	35
6.2.5.2. Pérdidas por cocción.....	35
6.2.5.3. Peso cocido.....	35
6.2.5.4. Absorción de agua	36
6.2.5.5. Absorción de agua (AA), Solubilidad de agua (SA) y Poder de hinchamiento (PH)	36
6.2.6. Análisis fisicoquímicos	37
6.2.6.1. Químicos proximales.....	37
6.2.6.1.1. Humedad	37
6.2.6.1.2. Grasa	38
6.2.6.1.3. Proteína	38
6.2.6.1.4. Cenizas	38
6.2.6.2. Espesor	39
6.2.6.3. Densidad aparente.....	39
6.2.6.4. Color	39
6.2.7. Análisis funcionales	40
6.2.7.1. Contenido fenólico Total (CFT) y capacidad antioxidante por (DPPH, ABTS y FRAP)	40
6.2.7.1.1. CFT	40

6.2.7.1.2. DPPH.....	40
6.2.7.1.3. ABTS.....	41
6.2.7.1.4. FRAP	41
6.2.8. Digestibilidad	42
6.2.8.1. Almidón resistente.....	42
Medición de almidón resistente.	43
6.2.9. Análisis térmicos.....	43
6.2.9.1. Análisis de viscosidad rápida	43
6.2.10. Análisis estructurales.....	44
6.2.10.1. Difracción de rayos X	44
6.2.10.2. Microscopia electronica de barrido.....	44
7. Análisis estadístico.....	45
8. Resultados y discusión	46
8.1. Análisis de cocción y calidad de la pastas	46
8.1.1. Tiempo óptimo de cocción.....	46
8.1.2. Peso cocido y % de absorción de agua.....	46
8.1.3. Pérdidas por cocción	48
8.1.4. Absorción de agua (AA), solubilidad de agua (SA) y poder de hinchamiento (PH).....	48
8.2. Análisis fisicoquímicos	51
8.2.1. Químicos proximales	51
8.2.2. Espesor	53
8.2.3. Densidad aparente	54
8.2.4. Color	54
8.3. Análisis funcionales	60

8.3.1. Contenido fenolico total y antioxidantes (DPPH, ABTS y FRAP).....	60
8.4. Análisis de digestibilidad	66
8.4.1. Almidón resistente	66
8.5. Análisis térmicos	68
8.5.1. Análisis de viscosidad rápida.....	68
8.6. Análisis estructurales	73
8.6.1. Difracción de rayos X.....	73
8.6.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB)	75
9. Conclusiones	78
10. Referencias	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Principales países productores de pasta	8
Tabla 2. Composición proximal del maíz	14
Tabla 3. Composición química del grano de trigo fresco y cocido	19
Tabla 4. Países productores de trigo, 2015- 2016	21
Tabla 5. Formulaciones e identificación de las pastas.....	35
Tabla 6. Tiempo óptimo de cocción, peso cocido, pérdidas de cocción y % de absorción de agua de las pastas.....	47
Tabla 7. Absorción de agua (AA), solubilidad de agua (SA), poder de hinchamiento (PH) de las pastas crudas	49
Tabla 8. Químicos proximales de las pastas crudas.....	52
Tabla 9. Espesor de las pastas crudas, secas y cocidas.....	55
Tabla 10. Densidad aparente de las pastas crudas	56
Tabla 11. Valores de L* en la mezcla de harinas, pasta cruda y pasta cocida	57
Tabla 12. Valores de a* en la mezcla de harinas, pasta cruda y pasta cocida	57
Tabla 13. Valores de b* de la mezcla de harinas, pasta cruda y pasta cocida	58
Tabla 14. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante (DPPH, ABTS y FRAP) de las pastas crudas y cocidas.....	64
Tabla 15. Almidón resistente de las pastas crudas y cocidas	67
Tabla 16. Análisis de viscosidad rápida de las pastas crudas (proporción 60% sémola de trigo y 40% harina de maíz)	69
Tabla 17. Análisis de viscosidad rápida de las pastas cocidas (proporción 60% sémola de trigo y 40% harina de maíz)	70
Tabla 18. Porcentaje de cristalinidad de las pastas crudas y cocidas	76

Índice de Figuras

Figura 1. Partes del extrusor de un solo tornillo	11
Figura 2. Estructura del grano de maíz	15
Figura 3. Principales países productores de maíz 1994-2017.....	16
Figura 4. Producción de maíz en los últimos años en México	17
Figura 5. Estructura del trigo	18
Figura 6. Principales estados de México productores de trigo	22
Figura 7. Estructura de amilosa.....	24
Figura 8. Estructura de amilopectina	25
Figura 9. Diagrama del proceso experimental	33
Figura 10. Pastas crudas.....	62
Figura 11. Pastas cocidas	63
Figura 12. Análisis de viscosidad rápida de las pastas crudas.....	72
Figura 13. Análisis de viscosidad rápida de las pastas cocidas	72
Figura 14. Difractogramas de rayos X de las pastas crudas	74
Figura 15. Difractogramas de rayos X de las pastas cocidas	74
Figura 16. Micrografías de las pastas crudas	77

Agradecimientos

A mi director de tesis el Dr. Apolonio Vargas Torres, por compartir sus conocimientos, por brindarme consejos con el fin de ser una mejor profesionista, así como tener la suficiente paciencia y la mejor disposición para concluir de manera satisfactoria este proceso. Pero sobre todo, por dejarme formar parte del equipo de trabajo. ¡Gracias!.

A mi comité de tesis, el Dr. Juan Pablo Hernández Uribe, Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez, Dra. Hedí María Palma Rodríguez. Gracias por compartir sus conocimientos y apoyo para que este proyecto fuera posible.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada en estos dos años, ya que gracias a este apoyo pude concluir con este nivel académico.

A mi familia y amigos, que son personas fundamentales en mi vida.

Dedicatoria

A las personas más importantes en mi vida, a mis padres, hermanas y sobrina; a ti mamá por ser la única persona en creer en mí, por darme tu apoyo, consejos, cariño y amor incondicional, sin ti, no cumpliría cada meta que me propongo. No me alcanza la vida para agradecerte y decirte lo importante que eres para mí. TE AMO, Mamá. A ti Papá, a la persona más fuerte que conozco, porque me has enseñado que para conseguir lo que uno quiere se tiene que trabajar y ser constante, gracias por no dejarme caer. A mis hermanas Nancy y Luna, son mi equipo favorito, sin ustedes mi vida no tendría la misma alegría. A mi adorable y traviesa sobrina Arlet, solo basta para estar un momento contigo para que me recargue de amor. Siempre serán mis personas favoritas, cada día de mi vida la hacen mejor.

A mis amigas, Alejandra, Mareyli, Isabel y Gieraldine, sin ustedes esta etapa no hubiera sido la misma, son personas maravillosas, y lo más satisfactorio que me llevo es su gran amistad. Nunca olvidaré esas pláticas, risas y regaños.

A las personas que se cruzaron en mi camino en esta etapa, dejando un gran aprendizaje.

Si aprendes las lecciones de la vida te irá bien. Si no, la vida simplemente continuará empujándote de aquí para allá.

-Robert T. Kyosak

Resumen

Las pastas son un alimento básico consumido por todo el mundo, ya que cuenta con diversas características que son apreciadas por el consumidor, debido a la facilidad de transportar, cocinar y tener un costo relativamente bajo. El objetivo de este estudio fue elaborar pastas tipo fettuccine, con la proporción 60 % sémola de trigo y 40% harina de maíz pigmentado; obteniendo 3 pastas, la primera con maíz azul (PA), la segunda con maíz rojo (PR) y la tercera con maíz blanco (PB). Tomando como referencia dos controles uno de 100% sémola de trigo (elaborada a las mismas condiciones que las pastas adicionadas con maíz) y un comercial (Barilla). Estas pastas funcionales se caracterizaron fisicoquímicamente, térmica y estructuralmente.

En los análisis de calidad y cocción, los cuales incluyen pérdidas por cocción, peso cocido y tiempo óptimo de cocción, se observaron intervalos de 2.32 a 4.51%, 19.66 a 26.16 g y 9.10 a 18.04 min, respectivamente.

Para la determinación del contenido fenólico total, las pastas adicionadas con maíces pigmentados mostraron valores más altos, PR con 97.86 mg EAG y PA con 79.37 mg EAG. Los resultados de actividad antioxidante determinados por DPPH, ABTS y FRAP, tuvieron la misma tendencia que el contenido fenólico total, ya que las pastas crudas obtuvieron valores mayores específicamente en aquellas que fueron adicionadas con maíz pigmentado. El efecto de cocción redujo los valores en la actividad antioxidante. Sin embargo, estos valores siempre fueron mayores para las pastas que contenían maíces pigmentados.

Por otro lado, respecto al almidón resistente en las pastas crudas adicionadas con maíz no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p < 0.05$), obteniendo un valor de $\sim 0.37\%$. Sin embargo, después de la cocción hubo un aumento de los valores, siendo el tratamiento PCC con 2.47% y PB con 1.65 los que consiguieron los valores más altos.

En las propiedades de pegado, los controles (PCC y PCS) de las pastas crudas mostraron los valores más altos en la viscosidad máxima con 1017.33 y 1873.33 cP, misma viscosidad que se vio reducida después del proceso de cocción y en aquellas pastas que fueron adicionadas con maíz.

De acuerdo con los difractogramas, se pudo observar que tuvieron características de una estructura tipo A, perteneciente a los almidones de cereales. En su porcentaje de cristalinidad, las pastas cocidas obtuvieron un menor porcentaje, no presentando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellas, alcanzando un valor $\sim 11.89\%$. Por otra parte, las pastas crudas fueron las que presentaron un mayor porcentaje de cristalinidad siendo los tratamientos PA, PCS y PCC, los que obtuvieron los valores más altos, con 15.79% , 15.42% , 14.59% , respectivamente. Las micrografías tomadas de la parte interna de las pastas crudas y cocidas mostraron la completa gelatinización del almidón.

Abstract

Pasta is a staple food consumed all over the world, since it has various characteristics that are appreciated by the consumer, due to its ease of transport, cooking and its relatively low cost. The objective of this study was to produce fettuccine type pasta, with a proportion of 60% wheat semolina and 40% pigmented corn flour; obtaining 3 pasta, the first with blue corn, the second with red corn and the third with white corn. Taking as reference two controls, one of 100% wheat semolina (made under the same conditions as pasta added with corn) and a commercial (Barilla). These functional pastes were physicochemically, thermal and structurally characterized.

In the quality and cooking analyzes, which include cooking losses, cooked weight and optimal cooking time, intervals of 2.32 to 4.51%, 19.66 to 26.16 g and 9.10 to 18.04 min, respectively, were observed.

For the determination of the total phenolic content, the pastes added with pigmented corn showed higher values, PR with 97.86 mg EAG and PA with 79.37 mg EAG. The antioxidant activity results determined by DPPH, ABTS and FRAP they had the same trend as the total phenolic content, since the raw pasta obtained higher values specifically in those that were added with pigmented corn. The cooking effect reduced the values in the antioxidant activity. However, these values were always higher for pasta containing pigmented corn.

On the other hand, regarding the resistant starch in the raw pasta added with corn, they did not present significant differences between them ($p < 0.05$), obtaining a value of ~ 0.37%. However, after cooking there was an increase in the values, with the PCC treatment with 2.47% and PB with 1.65 being the ones with the highest values.

In the bonding properties, the controls (PCC and PCS) of the raw pastes showed the highest values in the maximum viscosity with 1017.33 cP and 1873.33 cP, the same viscosity that was reduced after the cooking process and in those pastes that were added with corn.

According to the diffractograms, it was observed that they had characteristics of a type A structure, belonging to the cereal starches. In their percentage of crystallinity, the cooked pasta obtained a lower percentage, showing no significant differences ($p < 0.05$) between them, reaching a value of $\sim 11.89\%$. On the other hand, the raw pastes were the ones that presented a higher percentage of crystallinity, with the PA, PCS and PCC treatments obtaining the highest values, with 15.79%, 15.42%, 14.59%, respectively. Micrographs taken of the inside of the raw and cooked pasta showed complete gelatinization of the starch.

1. Introducción

El color es el primer atributo de calidad de los alimentos evaluados por los consumidores, por lo tanto, es un parámetro importante en la calidad de los alimentos y aceptación del consumidor (Delmoro, Muñoz, Nadal, Clementz, & Pranzetti, 2010). En la industria alimentaria existe una gran diversidad de colorantes, sin embargo algunos de ellos pueden causar ciertas controversias hacia la salud como alergias, provocando que en algunos países su uso sea restringido (Badui Dergal, 2016). Por tal motivo, es importante implementar el uso de colorantes naturales a través de materias primas, por ejemplo, los maíces. Hay estudios que reportan que en América hay aproximadamente 219 razas de maíz (Goodman & Bird, 1977), entre ellos los maíces que presentan diferentes coloraciones. Los cuales pueden ser una fuente importante para impartir color a diferentes alimentos como las tortillas, haciéndolas más atractivas para el consumidor. Otro uso que se le puede dar a los maíces pigmentados es en la elaboración de pastas que como bien se sabe en el mercado hay de diferentes pastas de mezclas y colores, pero la mayoría de estas con colorantes artificiales.

Las pastas son un alimento tradicional, consumido por todo el mundo, ya que cuentan con distintas características apreciadas por el consumidor como su amplia gama de figuras, fácil de almacenar, transportar, manejar, cocinar y tener un costo relativamente bajo (Pollini, Pantò, Nespoli, Sissons, & Abecassis, 2012); además de ser un vehículo ideal para la incorporación de ingredientes alternos que le proporcionen valor agregado. La pasta es elaborada tradicionalmente con harina de sémola de trigo, teniendo un papel importante en la nutrición de la población. No obstante, en la actualidad los consumidores no solo buscan alimentos, sino un producto que además de nutrir posea un efecto benéfico a la salud de los consumidores, como son los alimentos funcionales con capacidad antioxidante.

Un antioxidante tiene funciones de prevención de efectos adversos sobre las funciones fisiológicas normales de los humanos (Coronado, Vega y Leon, Gutierrez, Vazquez, & Radilla, 2015) . Las antocianinas tienen capacidad de conferir actividad antioxidante y son las principales responsables de otorgar pigmentación en los maíces.

Esta diferencia de color se debe a su genética del pericarpio, germen, aleurona y endospermo. Aproximadamente del 86 al 89% del endospermo del maíz es almidón, químicamente el almidón es un polímero de glucosas unidas a través de enlaces α -1-4 y α -1-6, compuesto por dos macromoléculas con diferente estructura amilosa y amilopectina (Whistler & Daniel, 2000). Estudios han reportado diferencias entre almidones principalmente como el tamaño de granulo, relación amilosa-amilopectina y patrones de difracción de rayos X. (Moreno, Herrera, Merino, & Rivas, 2003) demostrando que a mayor contenido de amilopectina habrá una mínima perdida de humedad durante su almacenamiento. Por tal motivo, se puede decir que los diferentes parámetros del almidón le darán diferentes características a los productos terminados.

Por otra parte, tenemos que diversos estudios se ha realizado para sustituir parcialmete o totalmete la harina de trigo en la elaboración de pastas. Donde se ha reportado que la harina de maíz es reconocida por su calidad nutritiva y características adecuadas para la elaboración de distintos productos como la pasta (Hernández-Nava et al., 2009).

El objetivo del presente trabajo de investigación fue desarrollar y caracterizar 3 pastas diferentes tipo fettuccini, a partir de sémola de trigo y 3 variedades de maíz pigmentado (azul,rojo y blanco).

2. Revisión de literatura

2.1. Alimento

Se entiende por alimento, aquel producto que forma parte de la dieta humana que satisface una necesidad fisiológica como la alimentación. De acuerdo con (Kuklinski, 2003), los alimentos son todas las sustancias y productos líquidos, sólidos naturales o procesados, que son capaces de ser utilizados para la nutrición humana o simplemente como alimentos con poco o nulo valor nutritivo, debido a sus aplicaciones, preparación, estado de conservación y características.

2.1.1. Alimentos funcionales

Hay indicios que en Japón a mediados de la década de 1980 se originó el término de “alimentos funcionales”, refiriéndose a los alimentos procesados que contienen ingredientes que ayudan a funciones humanas específicas además de contar con componentes nutritivos (Hasler, 1998). La palabra funcional, se puede referir a que contiene sustancias químicas, que puede reducir los riesgos de contraer enfermedades (Alvídrez-Morales, González-Martínez, & Jiménez-Salas, 2002). Los alimentos funcionales además de ser nutritivos pueden reducir los riesgos de enfermedades, llevando todo esto a tener una mejor salud, los cuales abarcan:

- Alimentos convencionales o alimentos integrales
- Alimentos modificados
- Alimentos médicos
- Alimentos para uso dietético especial

Estos alimentos, deben de ser naturales y no modificados. Sin embargo, uno de los componentes del alimento debe de ser mejorado ya sea por medio del cambio de las condiciones del cultivo o reproducción, entre otras, con el objetivo de incrementar los beneficios a la salud. Los alimentos que por medios biotecnológicos, tecnológicos se le ha eliminado un componente para dar beneficios que de otro modo no estarían disponibles. De igual forma, aquellos alimentos a los que se les

ha realizado modificaciones químicas, enzimáticas o tecnológicas para proporcionar el mismo beneficio (Bultosa, 2016).

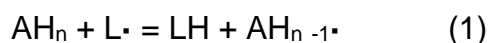
2.1.2. Alimentos antioxidantes de manera natural

En la vida el oxígeno es fundamental e indispensable, no obstante en las mitocondrias diariamente el oxígeno se convierte en porciones variables de especies reactivas de oxígeno (ERO).

A través del estrés oxidativo, hay cambios (alteraciones) en la estructura de cuerpo, llevando a una oxidación de proteínas, peroxidizando lípidos, alterando las membranas celulares y modificando los ácidos nucleicos. Lo que provoca enfermedades tales como: anemia, síndrome metabólico, cardiovasculares, cataratas, cáncer, enfermedades degenerativas del sistema nervioso, así como el envejecimiento y deterioro del sistema inmune. El organismo se protege de variables de especies reactivas de oxígeno a través de un sistema antioxidante endógeno formado por enzimas como (glutación reductasa, glutación peroxidasa, catalasa o superóxido dismutasa) o bien por antioxidantes exógenos que son componentes de las metaloproteínas antioxidantes como los minerales tales como el zinc y el selenio, además de polifenoles, carotenoides, retinol, vitaminas C y E. El consumo de alimentos abundantes en antioxidantes pueden mejorar las defensas antioxidantes del cuerpo y minimizar o prevenir varias enfermedades (Tur & Bibiloni, 2016).

El color es un parámetro importante en los alimentos para conservar su calidad, lo cual ha llevado a las industrias transformadoras de alimentos a utilizar colorantes alimenticios sintéticos como hidroxitolueno butilado y el ácido etilendiamino tetraacético. Debido a la demanda de la etiqueta limpia, ha llevado a la incorporación de antioxidantes de manera natural que derivan de fuentes biológicas, además de ser compuestos que están asociados con la salud (Chen & Xu, 2019). La función de los antioxidantes es la eliminación de radicales libres, trabajando de dos formas, ya sea por la transferencia de átomos de hidrogeno (TAH) o por transferencia de electrones (TE). La reacción antioxidante basada en TE es una reacción redox con

la transmisión de electrones (Ecuación 2), como los carotenoides con $\cdot\text{NO}_2$ y $\cdot\text{CCl}_3\text{OO}$, y los análogos de catequina con radicales peroxilo (OH). Un potencial de reducción de electrones (E°) es un parámetro característico para mostrar la capacidad antioxidante para la transferencia de electrones. Cuanto más baja es E, los antioxidantes naturales transfieren electrones más fácilmente. La TAH, detiene el paso de la propagación de la oxidación lipídica, como mecanismo de los compuestos fenólicos (Ecuación 1) cediendo un hidrógeno a los radicales libres lipídicos. Las entalpías de separación de enlaces (EDE) se usan para entender el principio de TAH. Los EDE más bajos del enlace antioxidante O-H son más fáciles de trasladar hidrógeno, por lo que tienen una reacción de transferencia de hidrógeno más rápida (Chen & Xu, 2019).



Algunos alimentos contienen compuestos fenólicos, tal es caso de algunos vegetales donde están los cereales, semillas y legumbres (avena, soja, sésamo, y café); frutas de color morado, azul y rojo, (betabel, maíz pigmentado, uvas, fresas y ciruelas, zarzamoras); y las hojas de hierbas y arbustos (té, romero y tomillo). Muchos fenólicos naturales son capaces de inhibir las reacciones oxidativas (Chen & Xu, 2019).

2.2. Pasta

Hay indicios que la pasta se originó en China, aunque hay evidencia del uso en Italia durante la civilización etrusca (varios siglos antes de Cristo). Originalmente, la producción de pasta implicaba un proceso por lotes de amasado, corte de la masa y extrusión con prensa manual, seguido de secado al sol. Alrededor del año 1800 aparecieron los primeros dispositivos mecánicos en Italia, y a fines de la década de 1890 se pusieron a disposición equipos que incluían mezcladoras, amasadoras, prensas hidráulicas y gabinetes de secado. No fue sino hasta 1934 que se desarrolló

el primer sistema de prensado continuo (donde la sémola y el agua se convierten en pasta húmeda en un sistema totalmente automatizado) reemplazando el método por lotes de preparación de pasta y hoy en día todas las prensas son del tipo continuo. La palabra "pasta" es italiana para "masa", generalmente se usa para describir productos que se ajustan al estilo "italiano" de alimentos extruidos como espagueti o lasaña. Hay más de 600 formas de pasta, las más populares son espagueti, codo, macarrones, lasaña y conchas. Las pastas se pueden vender frescas (como las que se hacen en el hogar o en el restaurante) o refrigeradas, pero la mayoría de las pastas se deshidratan (con o sin huevos). Hay productos compuestos, como ravioles, canelones, lasaña, entre otros, en los que la pasta se combina con carne y verduras en una salsa a base de tomate, pero los ingredientes para hacer pasta son principalmente sémola de trigo duro y agua (Sissons, 2016).

La pasta se produce principalmente con harina de trigo y agua: también se pueden agregar huevos y/u otros ingredientes opcionales. Los fabricantes de pasta generalmente usan trigo duro molido (sémola), aunque también se utiliza harina de trigo blando y otras harinas de cereales. La pasta que tradicionalmente se consume en Italia se hace exclusivamente con harina de trigo duro, mientras que en otros países, la pasta se elabora con trigo blando u otras harinas de cereales. La pasta de trigo duro está elaborada de sémola de trigo duro (*Triticum turgidum L. var. Durum*) a la que se agrega agua, que permite la modificación del gluten a través del aporte de energía mecánica y térmica para producir pasta. Las proteínas de trigo ayudan a fortalecer la estructura de la pasta. El almidón, es el componente principal de la sémola y la pasta, se presenta en forma de gránulos dispersos dentro de la red de proteínas (Giacco, Vitale, & Riccardi, 2016).

2.2.1. Producción y consumo

La pasta es un alimento antiguo ampliamente consumido en el mundo y representa uno de los alimentos básicos de la dieta mediterránea.

De acuerdo con la Organización Internacional de la Pasta (IPO) demuestra que en 2012, se produjeron alrededor de 13.5 millones de toneladas de pasta deshidratada en el mundo. Entre los países productores de pasta, Italia ocupa el primer lugar con

una producción anual de aproximadamente 3.33 millones de toneladas, seguida de los Estados Unidos (2.00 millones de toneladas), Brasil (1.19 millones de toneladas). Ver (Tabla 1). La Unión Europea produce el 36.4% de la pasta, seguida de América Central y del Sur con el 21.9% y América del Norte con el 16.9%; Asia y Australia son los países con la producción de pasta más baja, es decir, 1.8% y 0.4%, respectivamente.

Italia es el primer país exportador de pasta con alrededor de 1,8 millones de toneladas, seguido de Turquía (436 mil toneladas), Bélgica (137 mil toneladas), Estados Unidos (133 mil toneladas) y China (109 mil toneladas). Italia es el mayor consumidor de pasta per cápita/año del mundo (26 Kg), seguido de Venezuela (13.2 Kg), Túnez (11.1 Kg) y Grecia (10.6 Kg); Suiza (9.2 Kg) y Suecia (9.0 Kg) consume más pasta per cápita que los Estados Unidos (8.8 Kg). Según lo reportado por (Giacco et al., 2016).

Mientras que el consumo de pasta en México, considerando pasta para sopa y pasta corta, es de 4 Kg per cápita al año, informado por la Cámara Nacional de la Industria Molinera del trigo (CANIMOLT, 2016).

Tabla 1. Principales países productores de pasta

País	Millones de toneladas
Italia	3.33
Estados Unidos	2.00
Brasil	1.19
Rusia	1.08
Turquía	1.00

Fuente: Organización internacional de la Pasta (2012)

2.2.2. Procesos de producción

El procesamiento de la pasta consta de tres operaciones principales:

- Hidratación y mezclado: adición de agua a la sémola y amasado de la sémola para la obtención de una masa (formación de una red de gluten)
- Moldeado de la masa mediante extrusión
- Estabilización de las piezas de pasta obtenidas, generalmente mediante el secado.

Esta secuencia de operaciones se desarrolla en una escala industrial automatizada. El proceso de hidratación y mezclado-amasado de sémola produce una masa hidratada homogénea que es esencial para producir pasta de calidad. Para obtener la masa hidratada más homogénea, la sémola y el agua se someten primero a un premezclado de alta velocidad (usando un eje simple o doble, vertical u horizontal) para garantizar un contacto entre las partículas de sémola y las gotas de agua. Luego se lleva a cabo un mezclado adicional a bajo vacío, que elimina las burbujas de aire antes de que la masa pase al proceso de extrusión. Después de mezclar la masa, se transfiere al extrusor para obtener una forma específica (espagueti, macarrones, entre otros). Finalmente, el proceso de secado es uno de los pasos más importantes para la obtención de las pastas, que consiste en la aplicación de aire caliente, haciendo el que material cambie su contenido de humedad de la pasta a un nivel aceptable para la pasta seca. Hoy en día, la mayoría de los procesos de secado de pasta adoptan temperaturas del aire en el rango de aproximadamente 70–100 °C. El objetivo del secado es reducir el contenido de humedad de la pasta del 31% al 12-13%, para que el producto final sea duro, conserve su forma y pueda almacenarse sin estropearse. La pasta seca almacenada a temperatura ambiente es estable durante años (Giacco et al., 2016).

2.2.2.1. Extrusión

La extrusión es un proceso que convierte la materia prima en un producto con una forma deseada al forzar el material a través de una pequeña abertura utilizando presión. El proceso implica una serie de operaciones unitarias, como mezclado,

amasado, moldeado y formado. Muchos productos alimenticios se fabrican mediante cocción por extrusión, un proceso que utiliza energía térmica y presión para convertir los ingredientes de alimentos crudos en productos populares como cereales para el desayuno, pastas, alimentos para mascotas, bocadillos y productos cárnicos (R. P. Singh & Heldman, 2014). En las pastas, este proceso facilita el mantenimiento de la estructura de la pasta durante la cocción. El tornillo sinfín de extrusión forzará la masa a través de un troquel a alta presión, seguido de corte. Los agujeros de la matriz están diseñados para dar a la pasta la forma y el tamaño deseados. La compresión y extrusión se obtienen con diferentes máquinas (Giacco et al., 2016).

2.2.2.1.1. Componentes de un extrusor

En la Figura 1 se muestran los componentes del extrusor

- Barril: es un recinto cilíndrico hueco. El barril puede ser liso o estriado.
- Tornillo: con una raíz gruesa y alavés poco profundos, girando dentro del barril. El alavés del tornillo impulsan el material a lo largo del barril. El espacio entre la punta del tornillo y la superficie del cañón se hace lo más estrecho posible.
- Troquel o matriz: Un elemento de paso restringido, en el extremo de salida de la extrusora. Las funciones del troquel son servir como una válvula de liberación de presión e impartir al extruido la forma deseada, determinada por la sección transversal de la (s) abertura (s). El troquel a veces está precedido por una placa perforada que ayuda a distribuir el material comprimido uniformemente.
- Un dispositivo para cortar el extruido que emerge del troquel, en su forma más simple, consiste en un cuchillo giratorio.
- Diferentes tipos de dispositivos para calentar o enfriar el barril (camisas de vapor o agua, calentadores de resistencia eléctrica, calentadores de inducción). Estos elementos, externos al barril, generalmente se dividen en

segmentos individuales, para ajustar diferentes condiciones de temperatura en diferentes secciones del extrusor.

- Tolva: para alimentación por gravedad o una barrena para alimentación positiva.
- Puertos para inyección de vapor, agua y otros fluidos según sea necesario.
- Puertos para liberación de presión.
- Instrumentos para medir la velocidad de alimentación, temperatura y presión.
- Un accionamiento, generalmente con capacidad de variación de velocidad y control de par (Berk, 2018).

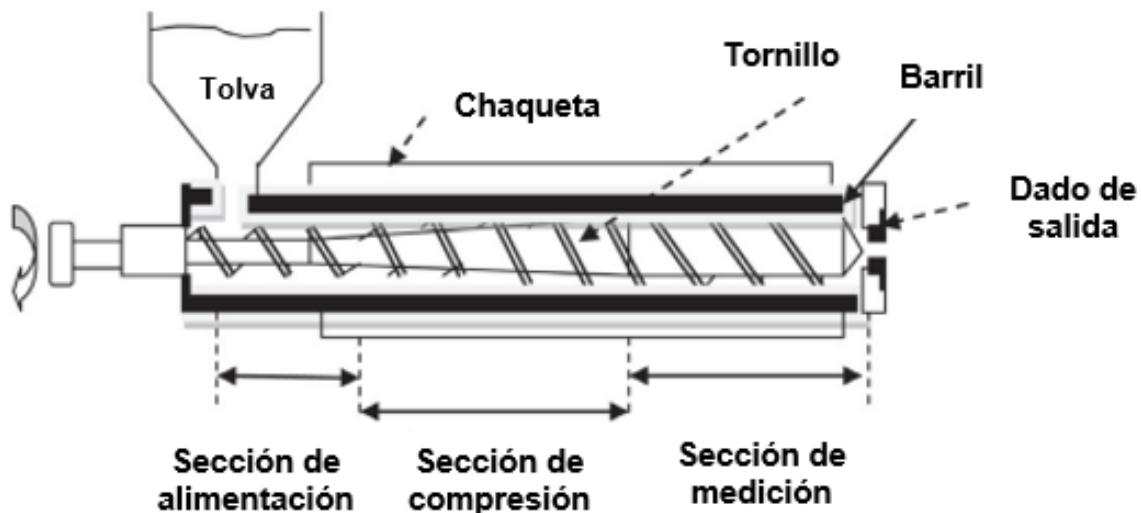


Figura 1. Partes del extrusor de un solo tornillo

2.2.2.1.2. Extrusión en frío

La extrusión en frío se utiliza para producir generalmente pastas, masa para pastelería y algunos productos de confitería, como la goma de mascar. El extrusor tiene un tornillo provisto de alavés que son elementos cortantes y de transporte generalmente el tornillo opera a velocidad dentro de un barril. En la sección de alimentación, la materia prima es mezclada, siguiendo un camino helicoidal por el canal del tornillo. Un dado restringe el flujo de masa y la presión se acumula en el barril. La diferencia de presión provoca un flujo de presión en el espacio entre los tramos del tornillo y la pared del barril. Cada producto debe extruirse a su

temperatura óptima. Las temperaturas que exceden el valor óptimo provocan un incremento en la presión en el barril y producen cambios indeseables en los componentes de los alimentos. La alta presión en la matriz aumenta el consumo de energía y afecta la forma y la calidad de la superficie del producto extruido. La masa mezclada y amasada se presiona a través del troquel. Las fuerzas de corte deben ser lo más pequeñas posible. El material extruido no debe expandirse y debe mantener la forma adquirida en el troquel. La forma del material extruido está determinada por insertos de troquel que producen diferencias de velocidad en la masa que fluye. Para una operación eficiente, el tornillo debe estar lleno de material, por lo que la velocidad de alimentación es una variable importante en la extrusión en frío (Lewicki, 2014).

2.3. Materias primas para la elaboración de la pasta

2.3.1. Maíz

2.3.1.1. Generalidades del maíz

A nivel mundial el maíz, arroz y trigo, son los cereales de mayor importancia ya que aportan nutrientes principales a la dieta humana, especialmente en países de desarrollo debido a su disponibilidad y accesibilidad (García-Lara, Chuck-Hernandez, & Serna-Saldivar, 2019).

El maíz (*Zea mays L.*) pertenece a la familia de las gramíneas Poaceae (Gramineae), tribu Maydeae, es una planta domesticada y es una de las especies alimenticias más productivas. Es el cereal con mayor rendimiento de grano por hectárea, que a su vez hace que tenga un valor económico alto. Su importancia en el mundo no solo se basa en un alimento para el consumo humano, sino que también se utiliza para alimento de animales, materia prima en la industria y de biocombustibles. Dentro de la agricultura, es cultivado y se utiliza como un alimento básico. Sin embargo, en los países desarrollados se utiliza en mayor proporción en la elaboración de alimentos para animales. Del maíz se obtiene una gran diversidad de alimentos, tales como las palomitas de maíz, tortillas, papilla, cereales para desayuno, bocadillos, productos de panadería y harina de maíz. En la actualidad,

los hábitos alimenticios de las personas han cambiado, pasando de comer productos de maíz tradicionales a no tradicionales como cereales para desayuno, comida rápida, bocadillos extruidos, nixtamalizados entre otros (Serna-Saldivar & FL, 2010).

2.3.1.2. Maíces pigmentados

Los maíces pueden diferir en el color. En México se cultivan diferentes variedades que van desde las blancas, amarillas, naranjas, rojas, purpuras, azules y marrones. La diferencia de color se debe a las diferencias genéticas en las estructuras del pericarpio, aleurona germen y endospermo. El pericarpio puede ser incoloro, naranja, rojo cereza, rojo, rojo oscuro, marrón o multicolor. La capa de aleurona puede ser incolora, roja, rojo púrpura, púrpura o marrón, mientras que el germen puede ser incoloro, amarillo, rojo anaranjado o púrpura. El endospermo es incoloro, amarillo, naranja o rojo anaranjado (Coe, Neuffer, & Hoisington, 1988). Los maíces con mayor consumo son los de color amarillo y blancos, mientras los que menos se cultivan son los rojos y azules (García-Lara et al., 2019). Las antocianinas presentes en algunos maíces pertenecen a los polifenoles y se clasifican dentro del grupo de los flavonoides, poseen coloraciones púrpuras, azules y rojos naturales que están asociados con una gama de beneficios para la salud humana, incluida la acción antiinflamatoria, actividad antihipertensiva (reducción de la presión arterial, y una disminución del deterioro cognitivo relacionado con la edad y la pérdida de memoria, además de conferir actividad antioxidante (Hong, Netzel, & O'Hare, 2020), como lo demuestran diversos estudios que han trabajado con maíces pigmentados pero a pesar de ello, se requiere de más investigaciones. Por otra parte, a pesar del que el maíz pertenece a un mismo género, estos pueden presentar diferentes características dependiendo de la raza, tal es el caso de (Paraginski et al., 2016) quienes trabajaron con granos para palomitas con pericarpios rojos, amarillos y blancos, que fueron sometidos a diferentes procesos de expansión, con y sin aceite, determinando que el maíz de color rojo presento mayor contenido de antocianinas, mismas que se ven afectadas dependiendo del proceso de expansión. (Agama-

Acevedo et al., 2005) trabajaron con maíces negros, azules y blancos como referencia, determinando que estos pueden presentar diferentes parámetros, destacando que el blanco presentaba mayor contenido de amilosa con un 27%, los maíces pigmentados presentaron mayor grado de cristalinidad. Estos parámetros son de gran importancia ya que van a conferir diferentes características a los productos terminados.

2.3.1.3. Composición proximal

Su principal componente de los maíces es el almidón con aproximadamente el 71.5%, seguido de las proteínas con 9.91%. La grasa, fibra cruda, cenizas y azúcar los presenta en menor proporción como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición proximal del maíz

Componente químico	Pericarpio (%)	Endospermo (%)	Germen (%)	Total % Base seca
Proteínas	3.7	8.8	18.4	9.91
Grasa	1.0	0.8	33.2	4.78
Fibra cruda	86.7	2.7	8.8	2.66
Cenizas	0.8	0.3	10.5	1.42
Almidón	7.3	87.6	8.3	71.5
Azúcar	0.34	0.62	10.8	2.58

Fuente (Watson & Ramstad, 1987)

2.3.1.4. Estructura y composición del grano maíz

Es necesario y de gran importancia el conocimiento preciso de la estructura del grano de maíz para tener una mejor optimización. Está compuesto por tres partes principales: germen, endospermo y pericarpio (García-Lara et al., 2019). En la Figura 2 se muestra la composición del grano del maíz.

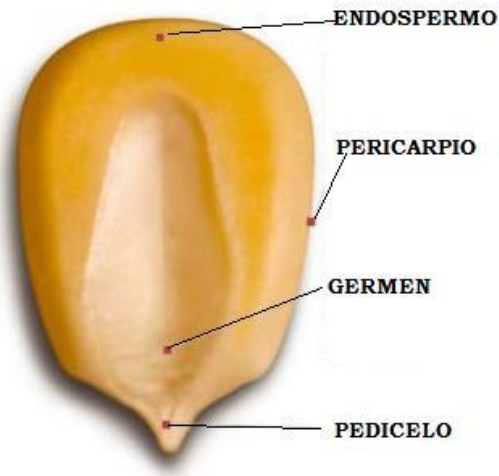


Figura 2. Estructura del grano de maíz

2.3.1.4.1. Pericarpio

El pericarpio está fuertemente adherido al endospermo, siendo una característica de todos los cereales, protege a la semilla conformada por el germen y el endospermo; además de que constituye alrededor del 7% del peso del grano, se subdivide en epicarpio, mesocarpio, y endocarpio y estos tejidos están conformados por células fibrosas ricas en fitoquímicos. La función principal del pericarpio es proteger al grano del estrés abiótico y biótico. El pericarpio o mesocarpio interno está formado por celdas transversales y tubulares que desempeñan un papel crucial para la distribución del agua dentro del núcleo pericarpio (García-Lara et al., 2019).

2.3.1.4.2. Pedicelo

En el pedicelo llevan productos de la fotosíntesis al núcleo en desarrollo. Cuando se realiza la cosecha del maíz, el pedicelo se separa del núcleo, dejando un extremo afilado. Por lo tanto, la tapa de la punta es la estructura cónica y fibrosa que permanece unida al núcleo.

2.3.1.4.3. Endospermo

El endospermo está compuesto por la capa de aleurona y endospermo almidonoso. El endospermo almidonoso se clasifica en corneo o vítreo y harinoso. Las células de endospermo con almidón están constituidas por una pared celular delgada,

gránulos de almidón incrustados en una matriz de proteína y cuerpos de proteínas de forma esférica.

2.3.1.4.4. Germen

El germen consta de dos partes principales: embrión también conocido como eje embrionario y escutelo. Ocupa el 12% del peso del grano, y un 85% de lípidos (García-Lara et al., 2019).

2.3.1.5. Producción del maíz

El maíz es el cereal más cultivado y consumido, convirtiéndose en el líder mundial superando al arroz y trigo (García-Lara & Serna-Saldivar, 2019). En la Figura 3, se muestran los principales países productores (FAO, 2019).

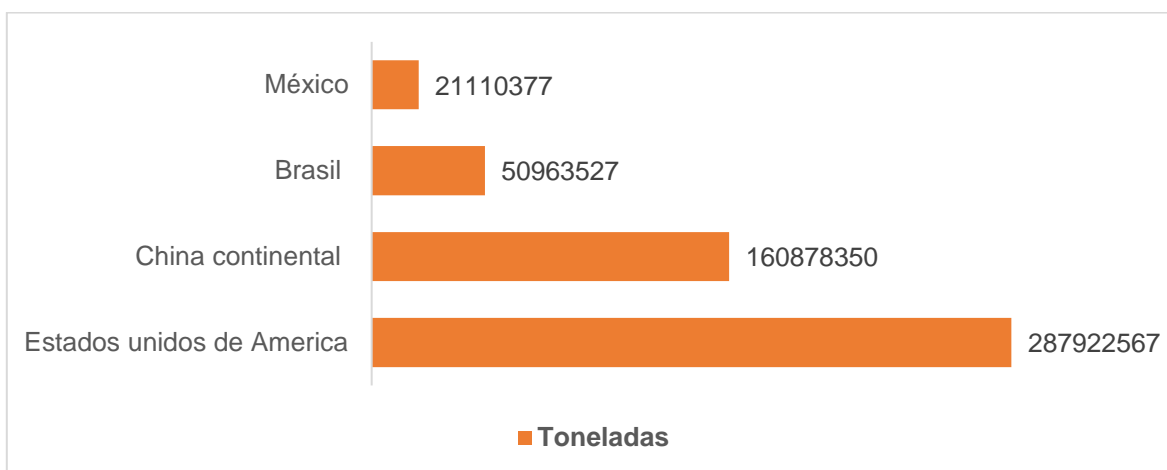


Figura 3. Principales países productores de maíz 1994-2017

En la Figura 4 se muestra la producción de maíz en los últimos años en México, llegando hasta 28, 250,783 y un mínimo de 22, 069,254 de toneladas en el 2016 y 2011 respectivamente. Siendo para México el cultivo más importante, no solo como aporte a la dieta y la economía, sino también representando tradiciones y costumbres (FAO, 2018).

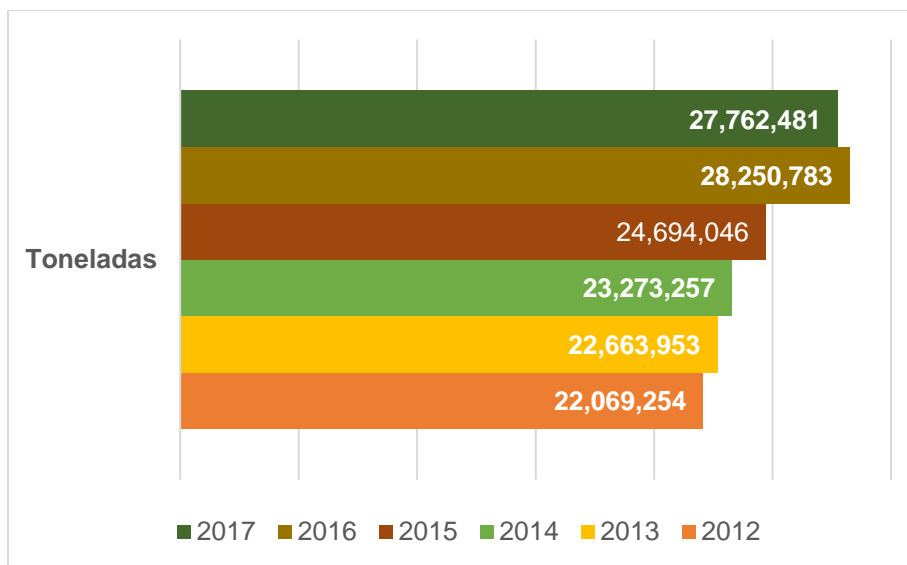


Figura 4. Producción de maíz en los últimos años en México

2.3.2. Trigo

El trigo, normalmente presenta un color ámbar y pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae) en el grupo Triticeae. El cultivo de *Triticeae* fue evidente hace 10000 años en Egipto, Oriente Medio y Turquía. El género *Triticum* incluye trigo común (*Triticum aestivum* L.), trigo de club (*Triticum compactum* Host), espelta (*Triticum spelta* L.) y (*Triticum durum* Desf) (Solah, Fenton, & Crosbie, 2016) . El uso principal del trigo duro (*Triticum durum*) es para la elaboración de pasta, la calidad de la pasta se ha relacionado con las características del grano duro, que, a su vez, están determinadas no solo por el genotipo, sino también por el medio ambiente (clima, nutrición) y manejo de cultivos (De Cindio & Baldino, 2016). Los alimentos a base de trigo son una buena fuente de nutrientes esenciales como carbohidratos y proteínas.

2.3.2.1. Estructura y composición de los granos de trigo

Conocer la estructura nativa de los granos de trigo es de gran importancia para entender los cambios durante su proceso. Tres partes diferentes constituyen la semilla del grano: el endospermo, el salvado y el germen. El núcleo está constituido por casi 80–85% en peso por el endospermo. En el interior, no solo se pueden

encontrar proteínas y almidón, sino también, en menor medida, fibras, vitaminas y minerales (De Cindio & Baldino, 2016). El endospermo es rico en proteínas y enzimas. Las gliadinas, gluteninas, albúminas y globulinas son las principales proteínas presentes. Las gluteninas y gliadinas forman el complejo de gluten, responsable de las propiedades reológicas de la masa. Además, el endospermo contiene aproximadamente el 30% de glutamina y el 10% de prolina, seguido de leucina (6,5%). La harina del endospermo contiene aproximadamente 82% de almidón, que está presente en forma de gránulos de varios tamaños y formas. El almidón es el principal carbohidrato presente en las células endospermáticas. El salvado, tiene capas externas que están integradas principalmente por fibras, como lo son las fibras insolubles pero otros de sus compuestos son los minerales, proteínas y grasas siendo este último propulsor de la rancidez. (De Cindio & Baldino, 2016).

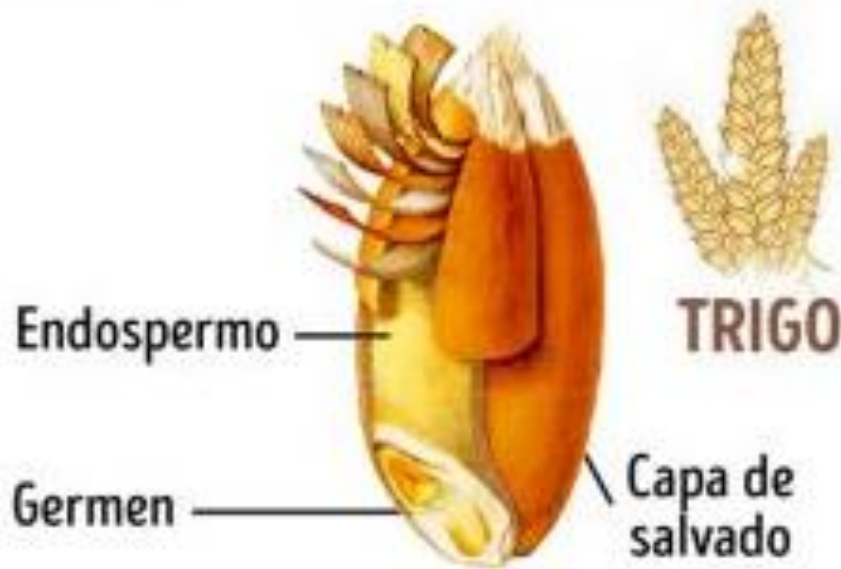


Figura 5. Estructura del trigo

2.3.2.1.1. Endospermo almidonoso

Los cereales contienen alrededor del 80% de endospermo almidonoso, además contiene proteínas entre un 7% y 15%, con vitaminas, minerales asociados y una

gama de lípidos. La proteína, vitamina y contenido mineral son más altos en las capas externas del endospermo (Solah et al., 2016)

2.3.2.1.2. Salvado y Germen

La capa externa de salvado incluye aleurona (porque la mayor parte de la aleurona se elimina durante la molienda) y constituye el 14% del grano. El germen (3–4%) constituye el resto del grano. La capa de salvado es una buena fuente de fibra, principalmente arabinoxilanos (hasta un 3% de harina y hasta un 7% de grano entero), minerales y compuestos fenólicos, como alquilresorcinoles y ácidos fenólicos (Solah et al., 2016).

2.3.2.2. Composición proximal

De acuerdo con (Mühlbauer & Müller, 2020) mencionan que el grano de trigo seco, en su composición química cuenta con agua, proteína, grasa, carbohidratos, fibra y minerales. Teniendo valores más altos en comparación con el grano fresco excepto por el contenido de agua, como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición química del grano de trigo fresco y cocido

Contenido	Fresco (%)	Seco (%)
Agua	20	14
Proteína	10.4	11.2
Grasa	1.7	1.8
Carbohidratos	54.6	58.7
Fibra	12	12.9
Minerales	1.5	1.6

El contenido de proteínas juega un papel importante dentro del trigo. Las proteínas de gluten de trigo son las que se encuentran en las células del endospermo y forman una red viscoelástica continua cuando la harina se mezcla con agua para formar masa, formando geles termofijados. Cuando se combina con almidón, como en los

fideos, la concentración de proteína afectará la firmeza/dureza del gel. El gluten formado por la gliadinas y las gluteninas, proporcionan la estructura a los alimentos (Solah et al., 2016). La proteína influye fuertemente en la textura de los alimentos a base de trigo, pero también puede influir en el color de los alimentos, debido a la diferencia en el color inherente o la contribución a las reacciones enzimáticas o su asociación con los lípidos (Solah et al., 2016).

2.3.2.3. Producción del trigo

Los principales países productores de trigo son Unión Europea, China, India, Rusia y EUA, con 160, 130, 87, 61 y 56 millones de toneladas (Tabla 4). Por otra parte, a pesar de que en México existe una gran producción de trigo duro (*Triticum durum*) alrededor de las 2 millones de toneladas anuales, de las cuales se utilizan solamente alrededor de 720 mil toneladas de trigo para la producción, donde 540 mil toneladas son destinados para la elaboración de pastas. En México, los principales estados productores de trigo son Sonora (43%), Baja California (15%) y Guanajuato (10%), seguido de Sinaloa como se puede ver en la Figura 6 (CANIMOLT, 2016).

Tabla 4. Países productores de trigo, 2015- 2016

País	Millones de toneladas
Unión Europea	160
China	130
India	87
Rusia	61
EUA	56
Canadá	28
Ucrania	27
Pakistán	25
Australia	25
Turquía	20
Irán	15
Kazajstán	14
Argentina	11
Egipto	8
Marruecos	8
Uzbekistán	7
Brasil	6
Afganistán	5
México	4
Siria	4

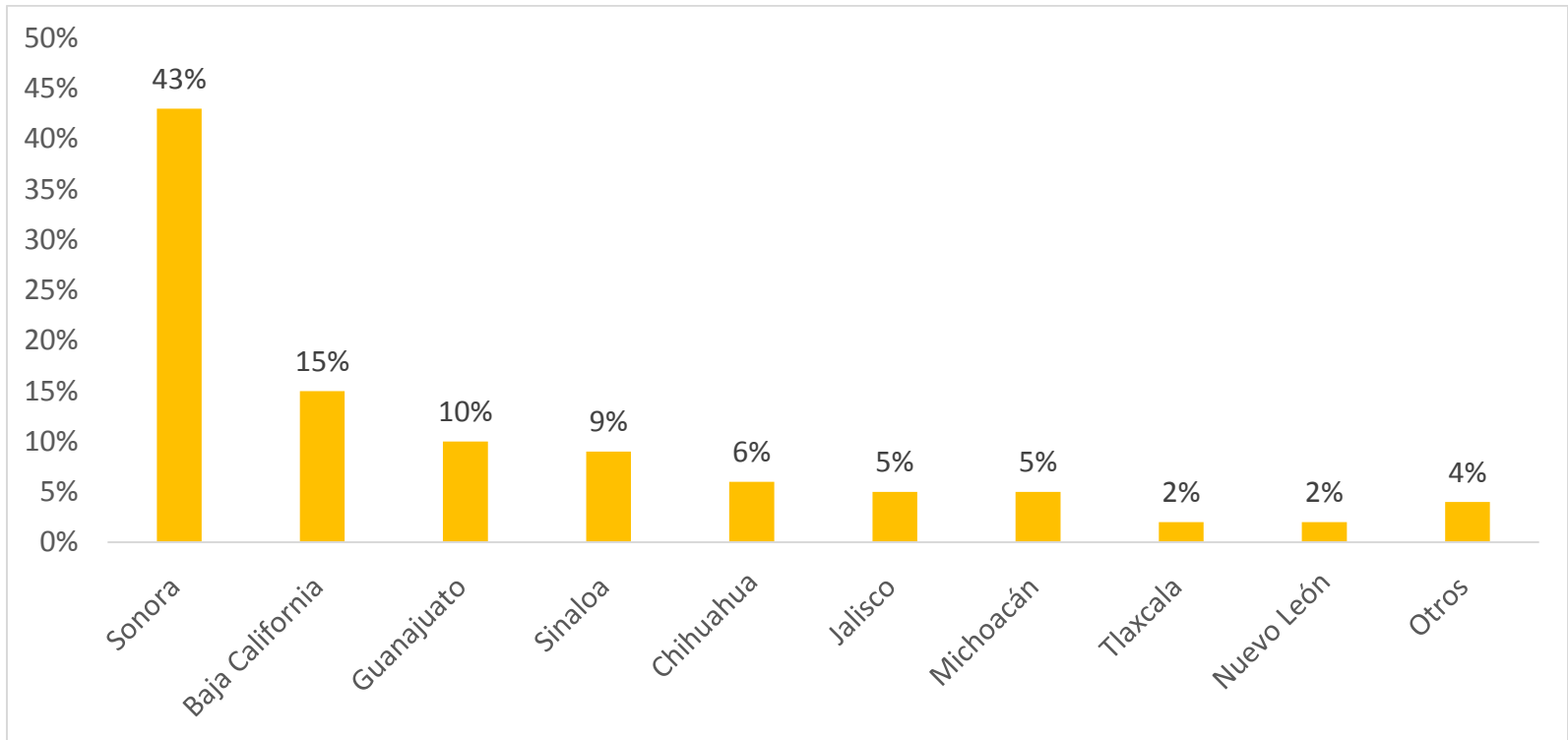


Figura 6. Principales estados de México productores de trigo

2.4. Principal componente de la pasta (Almidón)

2.4.1. Almidón

El almidón es un polisacárido vegetal que se encuentra predominantemente en granos de cereales, raíces, tubérculos y legumbres. La diversidad en la estructura y propiedades del gránulo de almidón es diversa. Incluso los almidones de cereales varían ampliamente en las propiedades. El almidón se encuentra en los gránulos intracelulares y no tiene ninguna función como molécula constructora de estructura en las células vegetales, sino que funciona como un polisacárido de almacenamiento. El almidón se produce en las hojas de las plantas a través de la fotosíntesis en los cloroplastos. Se almacena en estas partes de plantas verdes como pequeños gránulos. Este almidón de asimilación se hidroliza por la noche y se transporta como sacarosa a aquellas partes de la planta que requieren energía o sirven como órganos de almacenamiento de energía (por ejemplo, granos para cereales y raíces para tubérculos). En estos órganos de almacenamiento, el almidón se deposita en amiloplastos como gránulos insolubles en agua. El almidón se acumula gradualmente en estos gránulos y finalmente se usa como fuente de energía durante la germinación. Un amiloplasto puede contener un gránulo de almidón o un grupo de gránulos de almidón. Los rasgos morfológicos de los gránulos de almidón, como el tamaño, la forma y la arquitectura, dependen de su origen botánico. A diferencia de lo que ocurre en las plantas, el almidón funciona como un carbohidrato estabilizador y de estructura importante en la dieta humana (Joye, 2019), siendo uno de los polisacáridos más abundantes obtenidos principalmente de cereales y tubérculos. Se ha utilizado desde hace siglos en aplicaciones alimentarias como agente espesante, aglutinante, edulcorante y emulsificante (Mahmood et al., 2017), está formado por dos polisacáridos de diferente estructura: amilosa y amilopectina.

2.4.1.1. Amilosa

La amilosa es un polímero lineal de residuos de D-glucosa unidos a través de enlaces α -1,4. El rango de peso molecular de la amilosa se encuentra entre 80,000

a 1, 000,00 y varía entre las especies de plantas, las variedades y la madurez del almidón en estudio. La amilosa se puede considerar como un polímero lineal, sin embargo, contiene un número muy bajo de puntos de ramificación α -1,6 (menos del 1.0%). Las ramas laterales de la amilosa son muy largas y de alto peso molecular, por lo que, desde un punto de vista práctico, hace que la amilosa se comporte y pueda considerarse como un polímero lineal no ramificado. Las moléculas de amilosa tienden a adoptar una estructura helicoidal natural. También se sabe que la amilosa interactúa con el yodo, los alcoholes orgánicos y los ácidos grasos. Los complejos formados generalmente se denominan complejos de inclusión helicoidales. En caso de que los ácidos grasos estén encerrados, el complejo formado se conoce como complejo amilosa-lípido (Putseys, Lamberts, & Delcour, 2010).

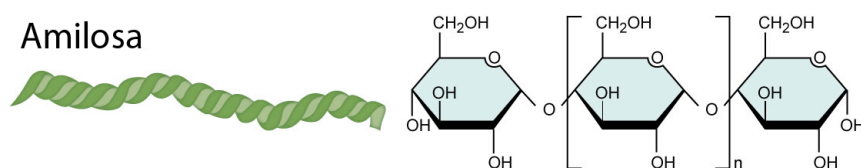


Figura 7. Estructura de amilosa

2.4.1.2. Amilopectina

Los componentes básicos de la amilopectina también son unidades de D-glucosa, pero en este caso una parte considerable de los enlaces son en realidad enlaces α -1,6 (5% –6%), lo que le da a la molécula una estructura ramificada. La amilopectina tiene un peso molecular muy alto (hasta 10^8) y se comporta claramente como una molécula ramificada. Para describir mejor la estructura de la amilopectina, las diferentes cadenas en la amilopectina han sido nombradas A, B y C de acuerdo con su posición en la molécula (Peat, Whelan, & Thomas, 1952). La cadena C contiene el único grupo reductor en la molécula y cada molécula de amilopectina, por lo tanto, solo contiene una cadena C. Las cadenas B son cadenas laterales que llevan cadenas laterales. Las cadenas laterales externas que no llevan puntos de ramificación se denominan cadenas A. La complejidad intrínseca de la estructura

de amilopectina se ha resuelto gradualmente mediante el uso de enzimas hidrolíticas muy específicas (Joye, 2019).

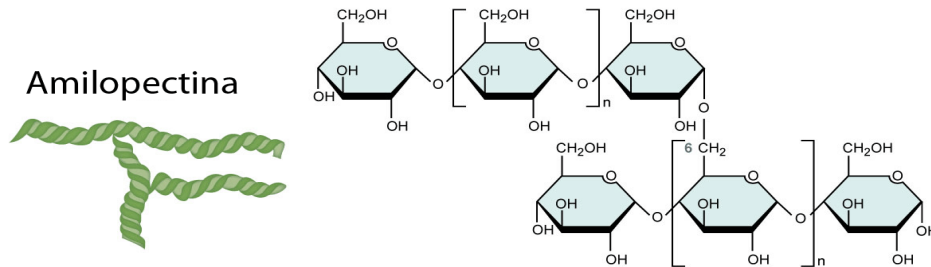


Figura 8. Estructura de amilopectina

2.4.2. Gránulos de almidón

Los gránulos de almidón se sintetizan en el amiloplasto de las células vegetales y se forman por la acción enzimática, que se combinan entre sí para formar una masa semicristalina compacta y ordenada. La región de las moléculas ordenadas continúa creciendo en una dirección radial desde el centro del crecimiento, llamado hilum. Las ramas agrupadas de amilopectina parecen hélices dobles compactas, que a su vez forman regiones pequeñas cristalinas y que se alternan con regiones amorfas. Las moléculas de amilosa y amilopectina de los almidones de cereales no tienen grupos éster fosfato. El gránulo de almidón del maíz común tiene un tamaño de partícula de 2-30 μm , un porcentaje de amilosa aproximado del 28%, se gelatiniza en un rango de temperatura de 75-80°C, y los gránulos del almidón del maíz son una de las fuentes más diversas en forma, ya que regularmente algunos en el centro harinoso del endospermo del grano de maíz son casi esférico y otros son más angulares (BeMiller, 2018).

2.4.3. Cambios estructurales del almidón por tratamiento hidrotérmico.

2.4.3.1. Gelatinización

La gelatinización del almidón es uno de los cambios que ocurre mediante enlaces de hidrógeno, creando una masa viscosa por la ruptura de los gránulos de almidón

y absorción de agua (Arêas, Rocha-Olivieri, & Marques, 2016). Las propiedades exhibidas por el almidón durante la gelatinización están gobernadas por varios factores, incluyendo el tamaño y la forma de los gránulos. Cuando el almidón crudo se calienta en exceso de agua, los gránulos se hinchan, después de que los gránulos se hinchan a un volumen máximo, se revientan dispersando la "sustancia de almidón" formando una dispersión coloidal en agua (Ratnayake & Jackson, 2008). El almidón gelatinizado es mucho más fácil de digerir que el almidón crudo por las hidrolasas en el intestino. La gelatinización resulta del corte de los enlaces de hidrógeno de las dobles hélices entre cadenas paralelas de amilopectina; la reacción no es reversible.

2.4.3.2. Retrogradación

La retrogradación del almidón se produce cuando el almidón gelatinizado se deja a una temperatura baja durante mucho tiempo. Se piensa que es el resultado de un enrollamiento incompleto de cadenas vecinas de almidón gelatinizado. El almidón retrógrado se puede gelatinizar nuevamente mediante calentamiento, lo que indica que la conversión de almidón gelatinizado a almidón retrogradado es reversible. Tanto la gelatinización como la retrogradación del almidón tienen funciones esenciales en la preparación de alimentos y el procesamiento industrial (Fujita, 2017). La retrogradación de la amilosa es un proceso muy rápido, de hecho, la cristalización de la amilosa ya se puede observar unos minutos después de que se completa la gelatinización. Durante el enfriamiento las suspensiones de almidón gelatinizado incrementan la viscosidad, esto se atribuye a la retrogradación de la amilosa. La retrogradación de la amilopectina está relacionada con la capacidad de las cadenas externas de las moléculas para formar dobles hélices. Con el tiempo, podrían formarse dominios cristalinos. Si las cadenas externas de las moléculas de amilopectina se eliminan por hidrólisis enzimática, no pueden participar en la formación de dobles hélices. La retrogradación de amilopectina puede evitarse a través de la formación de complejos con lípidos. En comparación con la amilosa, se

requiere una concentración más alta y un tiempo más largo para la retrogradación de la amilopeptina (Eliasson, 2010).

2.4.4. Digestibilidad del almidón

Los productos alimenticios ricos en almidón pueden clasificarse de acuerdo a su digestibilidad, que generalmente se caracteriza por la velocidad y la duración de la respuesta glucémica. La mayoría de los almidones contienen una porción que se digiere rápidamente y lentamente. El almidón de rápida digestión (ARD), se caracteriza por la liberación de la glucosa después de 20 min; mientras que el almidón de digestión lenta (ADL), la glucosa se libera entre 20 y 120 min de digestión in vitro. El almidón resistente (AR), es el almidón total menos cantidad de glucosa liberada dentro de los 120 minutos de la digestión in vitro (J. Singh, Dartois, & Kaur, 2010). Se ha reportado por (Hoover & Zhou, 2003) que los almidones crudos con alto contenido de amilopeptina se digirieron más rápidamente que los de alto contenido de amilosa.

2.4.4.1. Almidón resistente

El almidón resistente (AR) es la porción de almidón que no es digerida en el intestino delgado por las enzimas humanas, pasa al intestino grueso donde se fermenta parcial o totalmente. En general, se considera que AR es uno de los componentes que conforman la fibra dietética total (FDT). AR tiene la capacidad de modular los niveles de glucosa en sangre postprandiales y puede ser fermentado por la microflora del colon para producir ácidos grasos de cadena corta (AC), que ejercen beneficios positivos para la salud, como un aumento del flujo sanguíneo del colon para aliviar la inflamación del colon y una disminución del riesgo de colon y otros cánceres. Las fracciones ADR y ADL también se agrupan como carbohidratos "glucémicos" o "disponibles", mientras que AR se considera como un carbohidrato "no glucémico" (Z.-H. Lu, Donner, & Liu, 2019). Además de los beneficios potenciales para la salud del almidón resistente, entre sus propiedades fisicoquímicas deseables se encuentran su capacidad de hinchamiento, viscosidad,

formación de gel y unión al agua, lo que lo hace útil en una variedad de alimentos (Fuentes-Zaragoza, Riquelme-Navarrete, Sánchez-Zapata, & Pérez-Álvarez, 2010)

El almidón resistente se puede clasificar en 5 tipos

- AR1: Almidón físicamente inaccesible
- AR2: Gránulos de almidón nativo que resisten la digestión debido a la presencia de cristalinidad
- AR3: Almidón retrogradado (después del procesamiento de los alimentos)
- AR4: Almidones modificados
- AR5: Complejos de lípidos y amilosa (Cummings & Stephen, 2007).

Es sabido que, en los alimentos a base de almidón, el AR se forma principalmente por interacciones intra o intermoleculares en formas de dobles hélices, entre amilopectina y amilosa. Entre ellos, AR3 es almidón retrogradado y se crea cuando la gelatinización es seguida de un período de enfriamiento (Dupuis, Liu, Yada, & safety, 2014). Generalmente se cree que esta fracción AR (AR3) consiste principalmente en amilosa retrogradada. Si el lípido coexiste en el sistema, AR5 (amilosa-lípido complejo) puede formarse en lugar de AR3. AR1 puede existir por efectos de matriz alimentaria y en una cantidad insignificante en alimentos procesados. Un mayor contenido de amilosa en el almidón es generalmente sugestivo de un mayor contenido de AR debido a que las hélices de amilosa se alinean para formar dobles hélices, estabilizadas por puentes de hidrógeno y producen cristales de AR3 fuertemente empaquetados (Dupuis et al., 2014).

3. Justificación

Desde hace tiempo, los colorantes alimenticios se utilizan como medio para incrementar la apariencia a los alimentos. Sin embargo, algunos colorantes artificiales pueden ser tóxicos y provocar enfermedades como alergias. Es por ello la importancia de utilizar materias primas que puedan conferir ese color de manera natural y que a lo largo de su proceso se conserve la mayor parte de ese color. Por lo tanto, la utilización de maíces pigmentados sería una alternativa a este problema. Por otro lado, el interés actual en el desarrollo de nuevos productos, brinda la oportunidad a la industria alimentaria de elaborar alimentos que cumplan con una función más allá de nutrir, como son los alimentos funcionales, por ejemplo, las pastas con antioxidantes a partir de la utilización de maíces pigmentados; además de entender el comportamiento que estas harinas (maíces pigmentados y sémola de trigo) en la elaboración de pastas a través de diversos estudios.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Estudiar el efecto de diferentes variedades de maíz en mezcla con sémola de trigo, sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales, estructurales y térmicas de una pasta tipo fettuccine con actividad antioxidante.

4.2. Objetivos específicos

1. Realizar análisis de calidad a través de pruebas de cocción.
2. Estimar la absorción y solubilidad de agua y poder de hinchamiento de las pastas crudas.
3. Determinar las características fisicoquímicas de la pasta.
4. Evaluar las propiedades funcionales en las pastas crudas y cocidas a través del Contenido Fenólico Total y actividad antioxidante por DPPH , ABTS y FRAP.
5. Determinar el contenido de almidón resistente de las pastas crudas y cocidas mediante la digestibilidad del almidón.
6. Determinar el efecto de cocción sobre las propiedades de viscosidad de las pastas crudas y cocidas.
7. Evaluar las propiedades térmicas y estructurales por microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X a las pastas crudas y cocidas.

5. Hipótesis

1. Las pastas conservaran su color característico de los maíces pigmentados después de haber sometidos al proceso de extrusión y de cocción.
2. La adición de maíces pigmentados provocará que las pastas tengan una mayor capacidad antioxidante en comparación con las elaboradas de 100% sémola de trigo aún después de la cocción, y generará un alimento funcional.
3. Las harinas de los maíces (azules, rojos y blancos) presentarán diferentes parámetros los cuales se verán reflejados en las pastas ya terminadas.

6. Materiales y métodos

6.1. Materiales

El diagrama de bloques general de trabajo se muestra en la Figura 9.

Materia prima

Para la realización de este proyecto consistió en la obtención de los maíces pigmentados con un proveedor local en Tulancingo Hidalgo, mientras que la sémola de trigo se adquirió en la distribuidora “La molienda”, en Pachuca Hidalgo. Se utilizó una pasta tipo fettuccine como control comercial de la marca Barilla.

6.2. Métodos

6.2.1. Obtención de harina de maíz

El maíz azul, rojo y blanco fueron previamente limpiados eliminando granos quebrados y granos de otros colores, una vez limpios se sometieron a molienda utilizando un molino de turbina pulvex (modelo 200, México), la harina fue tamizada hasta obtener un tamaño de partícula de 210 μm a través de una malla (U.S) # 70. Las harinas obtenidas se almacenaron en bolsas de polietileno con cierre hermético, evitando el contacto directo con la luz solar.

6.2.2. Elaboración de las pastas

Se elaboraron tres pastas una con maíz azul, otra con maíz rojo y otra con maíz blanco, siguiendo la siguiente relación de maíz-sémola de trigo (40%/60%), respectivamente. Se obtuvo una pasta control elaborada solamente con sémola de trigo y se adquirió una pasta comercial tipo fettuccine, de la marca Barilla. Para la elaboración de las pastas, la harina de maíz se mezcló con sémola de trigo en una batidora (Marca Kitchen, modelo KSM150PSER), posteriormente a la mezcla se le adicionó agua purificada, hasta alcanzar una humedad del 39% de acuerdo con wheat commission. Una vez alcanzada la humedad, las mezclas se dejaron en reposo por 24h para que toda la humedad se equilibrará en la mezcla, transcurridas las 24h las mezclas de maíz con sémola de trigo se sometieron a extrusión en un extrusor de un solo tornillo (Brabender, K/E 19/25, Alemania).

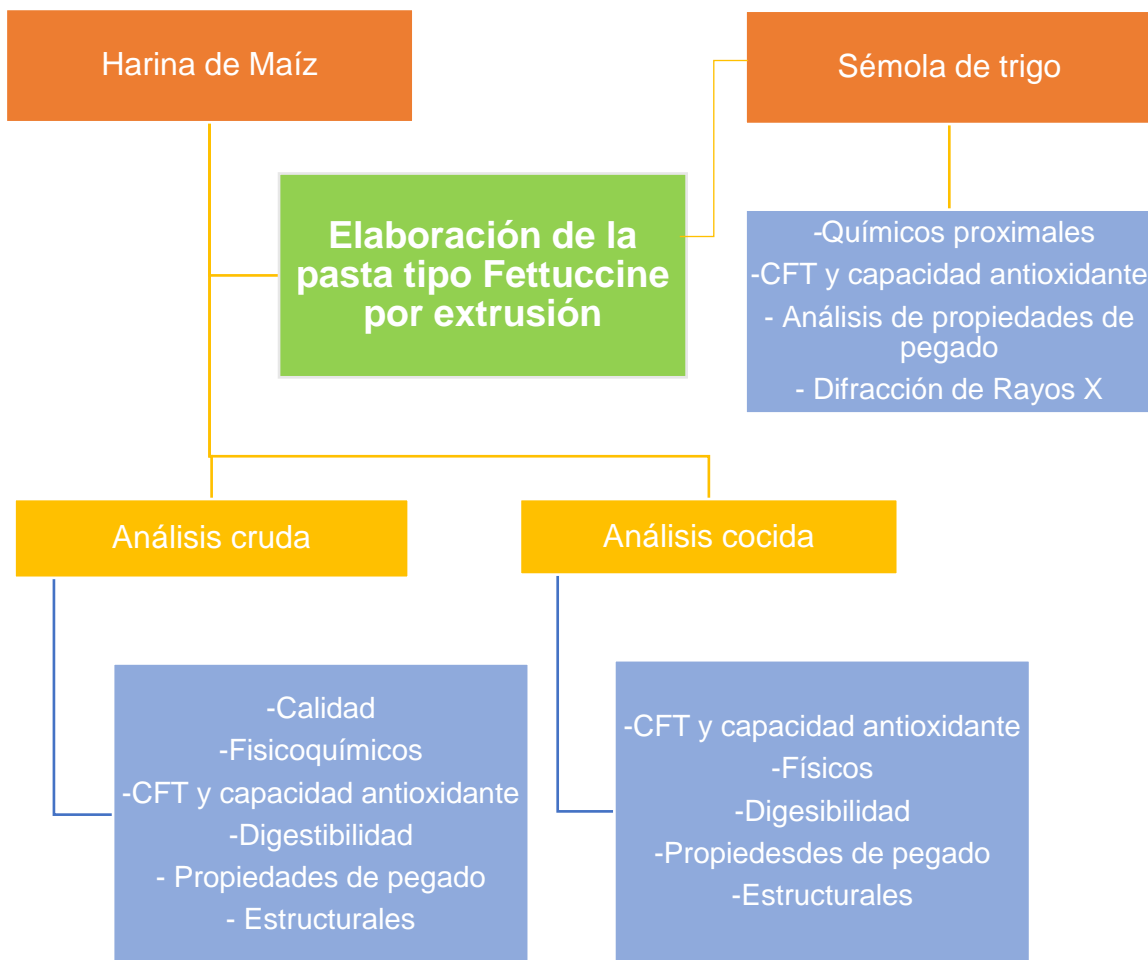


Figura 9. Diagrama del proceso experimental

El extrusor tenía un barril estriado; con tres zonas de calentamiento independiente, las cuales se mantuvieron constantes para todas las mezclas a 50, 60 y 65°C. La velocidad de alimentación se mantuvo a 30 g/min, mientras que la velocidad de tornillo se mantuvo constante a 60 rpm. Se utilizó una matriz de salida para fideos a una temperatura de 65°C. En la Tabla 5 se muestran los códigos para cada una de las pastas.

6.2.3. Secado de las pastas

La pasta una vez extruida se sometió a un deshidratado en un horno de convección (Marca Shel-Lab, modelo 1380FX) a 40°C, durante 19 horas. Después del deshidratado, las pastas fueron almacenadas en bolsas de polietileno con cierre hermético.

6.2.4. Preparación de las muestras

Las pastas crudas, fueron trituradas después de que se sacaron del secador, utilizando un molino de café (Marca Krups, modelo GX410011V), para ser tamizadas con una malla (U.S) # 100 y así obtener un tamaño de partícula de 0.149 mm. Las pastas cocidas, después de la cocción fueron escurridas a temperatura ambiente y llevadas a un un secador por convección (Marca Shel-Lab, modelo 1380FX) a 40° C durante 19 horas. Finalmente, se siguió en mismo procedimiento mencionado anteriormente para las pastas crudas. Estas se utilizaron para estudios posteriores.

Tabla 5. Formulaciones e identificación de las pastas

Pasta	Identificación de la muestra	Formulación
Comercial (Barilla)	PCC	100% sémola de trigo duro
Control sémola	PCS	100% sémola de trigo
Con maíz azul	PA	40% maíz y 60% sémola de trigo
Con maíz rojo	PR	40% maíz y 60% sémola de trigo
Con maíz blanco	PB	40% maíz y 60% sémola de trigo

6.2.5. Análisis de cocción y calidad de las pastas

6.2.5.1. Tiempo óptimo de cocción

Se realizó de acuerdo con el método 66-50 de la AACC (AACC, 2000), con algunas modificaciones, esta prueba se realizó por triplicado. Se pesaron 3 g de pasta con 5 cm de largo. Después de introdujeron en un vaso de precipitado de 100 mL con agua destilada en ebullición, se tomó una pieza cada minuto, llevándola a un porta objetos para poder comprimirla y así poder observar el núcleo de la pasta. El tiempo óptimo de cocción se determinó cuando el color blanco del núcleo desapareció.

6.2.5.2. Pérdidas por cocción

Se determinó de acuerdo con el método 66-50 de la AACC (AACC, 2000), con modificaciones. El agua restante de la cocción de la pasta se recolecto en vasos de precipitados y se llevó a evaporación en una estufa de secado a 110 °C, los sólidos obtenidos se pesaron y se calculó el porcentaje de pérdida por cocción de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Pérdida por cocción} = \frac{\text{Peso del residuo (seco)}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

6.2.5.3. Peso cocido

El peso cocido se realizó por triplicado, pesando 10 g de pasta y siendo llevadas a cocción en 300 mL agua destilada en ebullición durante 8 min. Después fue

escurrida y enfriada a temperatura ambiente para poder ser pesada y obtener el peso cocido.

6.2.5.4. Absorción de agua

La absorción de agua de las muestras de las pasta se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por (Flores-Silva, Rodriguez-Ambriz, & Bello-Pérez, 2015). Donde se utilizaron 10 g de pasta en piezas de 5 cm de largo y cocinadas por 8 min en 300 mL de agua destilada hirviendo. Las pastas se escurrieron y se enjuagaron con 20 mL de agua destilada a temperatura ambiente durante 2 min. Las muestras se pesaron hasta alcanzar temperatura ambiente.

El porcentaje de absorción se determinó de acuerdo a la siguiente fórmula

$$\% \text{ de absorción de agua} = \frac{(\text{Peso pasta cocida y escurrida} - \text{Peso de la pasta cruda})}{\text{Peso de la pasta cruda}} * 100$$

6.2.5.5. Absorción de agua (AA), Solubilidad de agua (SA) y Poder de hinchamiento (PH)

Las determinaciones se realizaron por triplicado de acuerdo con (Anderson, 1969) con algunas modificaciones. En un tubo de polipropileno de 25 mL se pesó 1 g (base seca) de pasta cruda previamente molida y tamizada a un tamaño de partícula de 250 µm malla (U.S) # 60, posteriormente se le adicionó 10 mL a agua destilada, la suspensión se mantuvo en agitación por 30 min a temperatura ambiente. Después, los tubos fueron centrifugados a 3,500 rpm durante 10 min, se decantó el sobrenadante de los tubos y se registró el peso del precipitado húmedo (pellet). El sobrenadante se depositó en crisoles y se llevaron a una estufa de convección (Marca Shel-Lab, modelo 1380FX) a 105°C, hasta llegar a una evaporación completa del agua. Los crisoles se dejaron enfriar por 1 hora en un desecador y se pesaron para obtener el peso de los sólidos solubles (residuo de la evaporación) y así se calculó el SA. Después se decantó el sobrenadante, el sedimento remanente

en el tubo se pesó y se expresó como gramos de agua absorbida por gramo de muestra seca para obtener el AA.

$$AA = \frac{\text{peso del residuo de centrifugación}}{\text{peso de la muestra} * \text{peso del residuo de evaporación}}$$

La solubilidad en agua (SA) se expresó como una relación entre el residuo de la evaporación y el peso seco de la muestra.

$$SA = \frac{\text{peso del residuo de evaporación}}{\text{peso de la muestra}} * 10$$

El poder de hinchamiento (PH) se expresó como la relación entre el peso del gel sobre el peso de la muestra menos el peso de soluble.

$$PH = \frac{\text{Peso del gel}}{\text{Peso de la muestra} - \text{Peso de solubles}}$$

6.2.6. Análisis fisicoquímicos

6.2.6.1. Químicos proximales

Los análisis químicos proximales se realizaron a las pastas crudas por triplicado de acuerdo a (AOAC., 1984), determinando humedad, cenizas, proteína, carbohidratos y extracto etéreo.

6.2.6.1.1. Humedad

El contenido de humedad se determinó por el método de secado por estufa. Este análisis fue por triplicado. Se pesó 3 g de la pasta molida en un crisol previamente sometido en peso constante, los cuales se llevaron a la estufa (Marca Shel-Lab, modelo 1380FX) a una temperatura de 100-110°C por 24 horas. Posteriormente,

fueron pesadas, dejándolas enfriar en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente.

6.2.6.1.2. Grasa

Se pesaron de 3 g de pasta seca en cartuchos de celulosa. Se llevó a cabo usando un sistema de extracción (B-811, Büchi, Suiza) y éter de petróleo como disolvente. Los matraces se pusieron a peso constante. Se colocaron dentro del aparato de extracción. Se adicionaron 100 mL de éter de petróleo a los matraces. La extracción se realizó por un periodo de 4 horas. Transcurrido este tiempo los matraces se dejaron secar en la estufa a 50°C hasta que alcanzaron el peso constante. Finalmente, los cartuchos se pesaron para determinar el porcentaje de extracto etéreo, utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de EE} = \frac{\text{Peso del extracto} - \text{Blanco}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

6.2.6.1.3. Proteína

Se pesaron 0.5 g de cada una de las muestras libres de grasa, se colocaron en un matraz Kjeldahl, se agregaron 10 mL de ácido sulfúrico concentrado y mezcla digestora (sulfato de cobre, 0.4 g y sulfato de sodio 3.5 g), se dejó digerir hasta obtener una solución verde claro, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se colocó en el destilador, posteriormente se le agregaron de 10 mL a 15 mL de NaOH al 40%, colocando previamente un matraz con 25 mL de ácido bórico al 4%, mismo que antes fueron introducidas dos gotas de rojo de metilo y verde de bromocresol. El destilado se tituló con ácido clorhídrico HCl 0.10N.

6.2.6.1.4. Cenizas

Se pesaron 3 g de la pasta molida colocándola en los crisoles (a peso constante). Después en un mechero se colocaron las muestras hasta que no se desprendieran

humos, después fueron introducidos a la mufla hasta conseguir que las cenizas tuvieran una tonalidad blanca–gris. Este análisis fue realizado por triplicado.

6.2.6.2. Espesor

Fue realizado por un Mitutoyo Micrómetro Digital, (modelo H-2780) a las pastas recién salidas del extrusor, secas y cocidas. Tomando 5 pastas al azar de cada muestra para hacer un corte de longitud de 5 cm. Las mediciones se hicieron en tres partes a la pasta, en sus extremos y centro para obtener el espesor de las pastas.

6.2.6.3. Densidad aparente

La densidad aparente (DA) fue determinada a las pastas crudas, por triplicado, utilizando el método de desplazamiento de semilla, la semilla utilizada fue de mijo. El cálculo de la densidad aparente de las pastas crudas se encontró dividiendo el peso sobre el volumen ocupado por la pasta. Los resultados son el promedio de 30 mediciones y se expresaron en Kg/m³.

6.2.6.4. Color

Los parámetros de color L*, a* y b* se determinaron en las pastas crudas, cocidas y en las mezclas de harinas antes de ser sometidas al extrusor. La pastas crudas y cocidas se sometieron a molienda y se empacaron en un portamuestras, los parámetros de color se determinaron utilizando un colorímetro triestímulo Hunter Lab (MiniScan Hunter Lab, modelo 45/L Hunter Associates Lab., Ind., USA). Se realizaron 5 determinaciones por tratamiento. El parámetro de color L* indica la luminosidad y toma valores de 0 a 100, donde el cero hace referencia el color negro y cien al color blanco; mientras que el parámetro de color a* va del rojo al verde y b* del amarillo a azul.

6.2.7. Análisis funcionales

6.2.7.1. Contenido fenólico Total (CFT) y capacidad antioxidante por (DPPH, ABTS y FRAP)

Extracción

En tubos corning para centrífuga se pesaron 0.5 g de muestra, posteriormente se adicionaron 10 mL de metanol al 80%, la suspensión se dejó en agitación a temperatura ambiente por 24 horas evitando el contacto directo con la luz, para lo cual los tubos se cubrieron con papel aluminio, después se centrifugaron a 10,000 rpm durante 20 minutos, el sobrenadante se recolectó y el sedimento se desechó.

6.2.7.1.1. CFT

El contenido de fenoles totales (CFT) se determinó utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu, siguiendo la metodología de (Rocchetti et al., 2017) con algunas modificaciones. A 20 μ L de extracto se adicionaron 1.58 mL de agua destilada, 100 μ L del reactivo Folin y 300 μ L de carbonato de sodio, dejándolo en reposo durante 2 horas para después tomar las lecturas de absorbancia a 756 nm en un espectrofotómetro UV-vis (Marca VELAB, modelo VE-5100UV). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico.

6.2.7.1.2. DPPH

La actividad antioxidante por DPPH se determinó de acuerdo a (Brand-Williams, Cuvelier, Berset, & Technology, 1995). Se preparó la solución madre del radical DPPH (2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (Sigma Aldrich St. Louis MO, USA, D9132) disolviendo 2.5 mg del radical con 40mL de metanol, posteriormente se aforo la solución a 50 mL con metanol y se protegió de la luz. Se tomó un alícuota y se midió su absorbancia a 520 nm en un espectrofotómetro (Marca Thermo scientific, modelo GENESYS 10S VIS), la cual fue ajustada 0.5 adicionando metanol puro. Después en tubos protegidos de la luz se depositaron 200 μ L de las muestras extraídas y 2000 μ L de la solución de DPPH. La lectura se midió a los 30 min. El porcentaje de inhibición se calculó con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Actividad antirritical} = 1 - \frac{(\text{Abs de la muestra})}{\text{Abs control}} * 100$$

6.2.7.1.3. ABTS

El ensayo ABTS se realizó de acuerdo a la metodología descrita por (Pastrana-Bonilla, Akoh, Sellappan, Krewer, & chemistry, 2003), se preparó la solución de ABTS^{•+} 7 mM (Sigma Aldrich St. Louis MO, USA A1888), la cual se hizo reaccionar con persulfato de potasio 2.4 mM (KSO₈, Sigma Aldrich St. Louis MO, USA, 216224) en 10 mL con agua destilada (solución madre), la solución se dejó en reposo por un periodo aproximado de 12 horas en refrigeración y protegida de la luz, después se tomó una alícuota de 550 µL y se aforó a 50 mL con etanol puro. Se tomó lectura de la solución a 734 nm, y se ajustó a 0.7 ± 0.02 de absorbancia, la solución fue ajustada con etanol puro o con solución madre según sea el caso. Para el análisis de las muestras se tomaron 10 µL de la muestra y 990 µL de la solución ajustada de ABTS a 0.7 de absorbancia, se dejó en reposo por 6 min y se tomó la lectura final en un espectrofotómetro (Marca VELAB, modelo VE-5100UV). Los resultados fueron expresados como mg equivalentes de trolox/ g de muestra (peso seco).

El porcentaje de inhibición se calculó con la siguiente ecuación

$$\% \text{ de inhibición} = \frac{(\text{Abs muestra } t0 - \text{Abs muestra } t5)}{\text{Abs muestra } t0 - ((\text{Abs disolvente } t0 - \text{Abs disolvente } t5)/\text{Abs disolvente } t0)} * 100$$

6.2.7.1.4. FRAP

El análisis FRAP (Poder antioxidante reductor del hierro) se realizó de acuerdo al método descrito (Benzie & Strain, 1996) con ligeras modificaciones. Éste ensayo mide la capacidad antioxidante de acuerdo con su capacidad para reducir el hierro férrico (Fe⁺³) presente en un complejo con la 2, 4,6-tri (2-piridil)-s-triazina (TPTZ) hasta la forma ferrosa (Fe⁺²).

El reactivo FRAP fue preparado por una mezcla de las siguientes soluciones

- Solución de TPTZ (2,4,6-tripiridil-s-triazina, Sigma Aldrich St. Louis MO, USA, T1253) 10 mM en una solución de ácido clorhídrico 40 mM (la solución de HCl fue preparado en agua destilada)
- Solución de FeCl₃ 0.3 M preparado con agua destilada.
- Buffer de acetato (pH 3.6), se preparó con la mezcla de acetato de sodio y ácido acético en agua destilada.

Posteriormente, las soluciones se mezclaron en base a las siguientes proporciones; 83% de la solución buffer, 8.3% de la solución de FeCl₃ y 8.3% de la solución de TPTZ. Para la determinación de las muestras, se colocaron 250 µL del extracto de la muestra y 1 mL del reactivo de FRAP y se llevó a un volumen de 10 mL con agua destilada en tubos, se dejaron reaccionar por 30 minutos en un baño maría a una temperatura de 30°C. La absorbancia fue leída en el espectrofotómetro (Marca VELAB, modelo VE-5100UV), a una longitud de onda de 593 nm. Los resultados son expresados como mmol Fe (II) presentes en g de muestra.

6.2.8. Digestibilidad

6.2.8.1. Almidón resistente

La determinación del AR se realizó de acuerdo al kit de prueba Megazyme (Método AOAC 2002.02/ Método AACC 32-40.01) 100 mg de la muestra con tamaño de partícula de 149 µm se colocaron en tubos de ensayo con tapón, posteriormente se agregaron 4 mL de α-amilasa pancreática y 1.5 mL de amilogucosidasa (AMG) diluida a cada tubo, los tubos se fueron mezclados y fijados horizontalmente en un baño de agua con agitación a 180 rpm y a 37 °C, durante 16 horas. Se retiraron los tubos del baño de agua e inmediatamente se le agregaron 4 mL de etanol (99% v/v) con agitación vigorosa en un mezclador vortex. Después se centrifugaron a 3,000 rpm durante 10 minutos. El sobrenadante se decantó cuidadosamente en matraces de 100 mL, el sedimento se suspendió con 2 y 6 mL de etanol al 50%, y entre cada suspensión se agitó vigorosamente con un vortex, con posterioridad se centrifugo a 3,000 rpm durante 10 min. Se volvió a decantar los sobrenadantes y se repitió esta etapa de suspensión y centrifugo una vez más.

Medición de almidón resistente.

En los tubos que contenía el sedimento, se introdujo una barra agitadora magnética, y 2 mL de KOH 2M dejándolos en agitación sobre un agitador magnético durante 20 min. Posteriormente, se agregaron 8 mL de tampón de acetato de sodio 1.2 M (pH 3.8) a cada tubo, inmediatamente se le agregó 0.1 mL de AMG, se mezcló bien en un vortex y después se colocaron los tubos en un baño de agua a 50 °C, incubándolos por 30 minutos. Para la medición de las muestras, se centrifugaron directamente los tubos a 1,500 rpm durante 10 min. Para tales muestras, se tomaron alícuotas de transferencia de 0.1 mL depositándoles 3 mL del reactivo goPod y se incubo a 50 ° C durante 20 min, finalmente se midió la absorbancia en espectrofotómetro (Marca Thermo scientific, modelo GENESYS 10S VIS) a 510 nm contra el blanco de reactivo.

6.2.9. Análisis térmicos

6.2.9.1. Análisis de viscosidad rápida

Las propiedades de viscosidad de las pastas crudas y secas se determinaron mediante un Analizador Rápido de Viscosidad (ARV) (marca Pernet Instruments, modelo 4500) junto con el software Termocline para Windows (TCW). Se pesó en el porta muestra 3 g de pasta base seca) y se le adiciono agua destilada hasta obtener un peso total de 25 g. La suspensión se homogeneizó manualmente utilizando la paleta de plástico para evitar la formación de grumos. Se estableció un ciclo programado de calentamiento y enfriamiento durante 15 minutos, donde las muestras se mantuvieron a 25°C durante 2 minutos, se calentaron a 90°C en el minuto 5, se mantuvieron a 90°C durante 6 minutos, y se bajó la temperatura a 25 °C en el minuto 11, y se mantuvieron a 25°C durante 4 minutos. La velocidad de agitación se fijó a 960 rpm durante los primeros 10 s para garantizar la uniformidad de la dispersión, y luego a 160 rpm durante el resto de la medición.

6.2.10. Análisis estructurales

6.2.10.1. Difracción de rayos X

Para de determinación de difracción de rayos X se siguió la metodología descrita por (Aparicio-Saguilán et al., 2014). Los patrones de difracción de rayos X se obtuvieron con un difractómetro Bruker AXS D8 Advance (Bruker AXS, Inc, Madison, WI, EE. UU.) Utilizando radiación CuK α con una longitud de onda de 1.542 Å, operada a 30 mA y 40 kV. Las condiciones de medición fueron de 5 a 60° en el ángulo 2 θ con un intervalo de 0.05°, con una velocidad de barrido de 60 s/°.

El porcentaje de cristalinidad fue determinada de acuerdo con la siguiente ecuación

$$\% \text{ de cristalinidad} = \left(\frac{\text{Área cristalina}}{\text{Área total teta}} \right) * 100$$

6.2.10.2. Microscopia electronica de barrido

Para la obtención de las micrografías de las pastas crudas y cocidas, se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL, modelo JSM-5800LV.

7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una y dos vías con un nivel de confianza del 95%, utilizando el programa Sigma Stat, versión 12.5. Para verificar diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$), se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey.

8. Resultados y discusión

8.1. Análisis de cocción y calidad de la pastas

8.1.1. Tiempo óptimo de cocción

Las características de cocción son factores importantes que determinan la calidad de la pasta. En el tiempo óptimo de cocción, presento un intervalo de 9.10 a 18.04 min, siendo el tratamiento PCC el que obtuvo el tiempo mayor y PB el menor. Los tratamientos PA, PR y PCS tuvieron un tiempo óptimo promedio un de 11 min, no presentado diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ellas. (Ficco et al., 2016b) reportaron valores similares a los obtenidos en este estudio en pastas elaboradas con trigo duro morado.

8.1.2. Peso cocido y % de absorción de agua

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos del peso cocido de las pastas, indicando el peso total después de haber sido sometidas a cocción, los tratamientos que no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ellas fueron las pastas PA, PR y PB, obtenido un valor $\sim 24.2g$, mientras que PCC y PCS mostraron valores de 19.66 g y 26.16 g, respectivamente. Estos datos están directamente relacionados con el % de absorción de agua, ya que las muestras que presentaron un mayor porcentaje de absorción de agua, presentaron mayor peso por cocción. Las pastas adicionadas con maíces pigmentados obtuvieron un porcentaje de absorción del 134.51%; mientras que la pasta control PCS (156.24%), este comportamiento puede estar relacionado con la calidad de las proteínas del gluten (gliadina y gluteína) que se ven afectadas con la adición de otras harinas (Grzybowski, Donnelly, & Chemistry, 1979), permitiendo una un fácil lixiviación de agua en las pastas. PCC presentó el valor más bajo de % de absorción de agua, teniendo un comportamiento adverso a PCS que obtuvo el valor más alto, este resultado puede ser atribuido a las condiciones de proceso de elaboración así como la calidad proteica de la sémola de trigo utilizada para su elaboración de la pasta comercial (Trevisan, Pasini, & Simonato, 2019).

Tabla 6. Tiempo óptimo de cocción, peso cocido, pérdidas de cocción y % de absorción de agua de las pastas

Muestras	Tiempo óptimo de cocción (min)	Peso cocido (g)	Perdidas por cocción (%)	Absorción de agua (%)
PCC	18.04±0.035 ^c	19.66±0.516 ^a	2.32±0.025 ^a	92.11±2.77 ^a
PCS	11.07±0.035 ^b	26.16±0.580 ^c	3.103±0.300 ^b	156.24±8.86 ^c
PA	11.10±0.070 ^b	24.28±0.064 ^b	4.51±0.280 ^c	135.60±2.964 ^b
PR	11.10±0.067 ^b	23.58±0.012 ^b	4.07±0.091 ^c	130.76±2.87 ^b
PB	9.10±0.079 ^a	24.74±0.631 ^b	3.65±0.861 ^c	137.19±4.27 ^b

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

8.1.3. Pérdidas por cocción

El porcentaje de pérdidas por cocción es uno de los parámetros importantes para clasificar a una pasta de acuerdo a su calidad. En este análisis se obtuvo que, la pasta PCC fue la que presentó valores menores de pérdidas por cocción con el 2.32%, seguido de PCS que obtuvo un valor de 3.103%. Sin embargo, las pastas adicionadas con maíz pigmentado no se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ellas, mostraron valores $\sim 4.07\%$, los cuales fueron mayores a las pastas control. (Granito, Pérez, & Valero, 2014) mencionan que las pastas que tienen una pérdida menor al 12% se encuentran dentro del indicador de calidad, por lo tanto podemos decir que las pastas adicionadas con maíces pigmentados cumplen con esta característica. Las diferencias obtenidas entre las muestras adicionadas con maíz con las pastas control puede ser debido a la disrupción de la estructura proteica de la sémola de trigo en mezcla con la proteína de la harina del maíz, disminuyendo la calidad de la red proteica (gluten) durante la cocción (Zhao, Manthey, Chang, Hou, & Yuan, 2005), reflejándose en una mayor pérdida por cocción, como se observa en este estudio. (B. Biernacka, D. Dziki, U. Gawlik-Dziki, R. Różyło, & M. J. L. Siastala, 2017) reportaron un comportamiento similar obtenido en un estudio de pastas adicionadas con fibra de algarroba, en donde, a mayor concentración de fibra de algarroba en las pastas, se obtiene mayor pérdidas por cocción.

8.1.4. Absorción de agua (AA), solubilidad de agua (SA) y poder de hinchamiento (PH)

En la Tabla 7 se puede observar los resultados de absorción de agua (AA), solubilidad de agua (SA) y poder de hinchamiento (PH). La absorción de agua es un indicador de la capacidad que tiene el almidón y sémola de trigo para retener el agua, en este caso no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre todos los tratamientos, obteniendo valores ~ 1.74 , por lo cual podemos decir que en este estudio los diferentes almidones (maíz, trigo) no presentan diferencias en cuanto a su capacidad de absorción de agua.

Tabla 7. Absorción de agua (AA), solubilidad de agua (SA), poder de hinchamiento (PH) de las pastas crudas

Muestras	AA	SA	PH
PCC	1.75±0.163 ^a	7.45±0.140 ^b	2.16±0.120 ^c
PCS	1.75±0.033 ^a	8.96±0.167 ^c	1.92±0.035 ^{a,b}
PA	1.75±0.019 ^a	14.15±0.229 ^d	2.03±0.021 ^{b,c}
PR	1.76±0.034 ^a	15.92±0.3032 ^e	2.10±0.032 ^c
PB	1.78±0.074 ^a	14.17±0.187 ^d	2.07±0.046 ^{b,c}
S	1.65±0.048 ^a	6.24±0.083 ^a	1.76±0.049 ^a

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

Por otro lado, el poder de hinchamiento, se obtuvieron valores de 1.76 a 2.16, para la sémola de trigo el valor mas bajo, mientras que para la pasta control comercial el valor más alto. El PH se vio manifestado cuando las pastas fueron sometidas a cocción, siendo el resultado del hinchamiento de los granulos de almidón y el agua absorbida. Estos resultados no fueron directamente proporcionales en cuanto AA, ya que las pastas no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre todos los tratamientos, por lo que podemos ver que, las pastas que fueron elaboradas con la adición de maíz pigmentado y la pasta control comercial presentaron la mayor capacidad de hinchamiento (Kusumayanti, Handayani, & Santosa, 2015) mencionan que la capacidad de hinchamiento de los granulos de almidón puede estar influenciada por distintos factores tales como morfología, cristalinidad, relación amilosa- amilopectina y la presencia de otros componentes. Un estudio realizado por (Aravind, Sissons, Fellows, Blazek, & Gilbert, 2013) en la elaboración de pasta con la optimización de niveles de almidón resistente II y III, obtuvieron resultados similares a los reportados en este estudio con valores de 2.01 a 1.92.

La solubilidad de agua, PR presentó el valor más alto con 15.92%, seguido las pastas PA y PB, no mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellas. Teniendo un valor $\sim 14.16\%$, mientras que las pastas controles (PCS y PCC) y la sémola de trigo previo a la extrusión presentaron valores más bajos de 8.96%, 7.45% y 6.24, respectivamente.

La SA se usa para indicar la degradación del almidón, y determina la cantidad de polisacárido libre o polisacárido liberado del gránulo en exceso de agua (Rashid et al., 2015). Por lo tanto, se puede decir que hubo una mayor degradación del almidón en las pastas elaboradas con maíz. El aumento de la solubilidad en los productos extruidos se atribuye a la dispersión de las moléculas de amilosa y amilopectina después de la gelatinización (Gomez & Aguilera, 1983). Sin embargo, (Holliger, 1963) también reportó que el contenido de proteínas juega un papel importante en la solubilidad, diciendo que la sustitución de la harina de sémola en la elaboración de espaguetis provocó, una alta solubilidad, como se observa en este estudio.

8.2. Análisis fisicoquímicos

8.2.1. Químicos proximales

La composición proximal de las pastas crudas y de la sémola se muestra en la Tabla 8. El contenido de humedad, se obtuvieron valores de 9.91% a 8.76%. La sémola de trigo alcanza una humedad de 11.75%, misma que se vio reducida después de que fue sometida al extrusor presentando en la pasta control sémola (PCS) una humedad de 8.84%. Las pastas adicionadas con maíces pigmentados presentaron una humedad ~ 8.69%. La pasta control comercial obtuvo un valor mayor en comparación a las demás pastas, esto posiblemente a que fueron sometidas a diferentes condiciones de proceso. En cuanto a las cenizas se puede observar que el valor más alto fue para PR con 1.44% y el más bajo para la sémola de trigo (sin procesar) con 0.95%, teniendo un aumento después de proceso de extrusión (PCS) con un valor de 1.03% (Ficco et al., 2016a) obtuvieron valores superiores a los reportados en este estudio con 1.19% de cenizas en la sémola de trigo. Para la proteína se puede observar que el tratamiento que mostró el valor más alto fue PCS con el 11.57%, mientras que las pastas PCC y PA mostraron los valores más bajos de proteína con 5.16 y 5.18%, respectivamente. La reducción en el contenido de proteína está influenciado por la sustitución de sémola de trigo por la harina de maíz, puesto a que la sémola de trigo tiene un mayor contenido de proteína, en comparación con la harina de maíz. Sin embargo, para la pasta control comercial a pesar de que no tener otro ingrediente adicional obtuvo el menor contenido. Esto se le puede atribuir a los diferentes tipos de sémola utilizados, ya que según a su contenido de proteína, será su calidad, entre menor sea su contenido, le dará una menor estabilidad a los productos ya terminados.

Tabla 8. Químicos proximales de las pastas crudas

Muestras	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteína (%)	Extracto etéreo (%)	Carbohidratos (%)	Fibra cruda (%)
PCC	9.91±0.010 ^d	0.99±0.010 ^{a,b}	5.16±0.010 ^a	0.08±0.010 ^a	83.84±0.010 ^e	0.02±.010 ^a
PCS	8.84±0.020 ^c	1.03±0.020 ^b	11.57±0.010 ^e	0.07±0.010 ^a	78.55±0.010 ^b	NP
PA	8.73±0.020 ^b	1.35±0.015 ^d	5.18±0.010 ^a	0.73±0.010 ^c	83.90±0.100 ^e	0.11±.010 ^c
PR	8.62±0.010 ^a	1.44±0.010 ^e	9.79±0.010 ^c	1.31±0.010 ^e	78.82±0.010 ^c	0.08±.010 ^b
PB	8.76±0.010 ^b	1.12±0.020 ^c	8.30±0.100 ^b	1.14±0.010 ^d	80.55±0.010 ^d	0.13±.010 ^c
S	11.75±0.010 ^e	0.95±0.010 ^a	10.02±0.010 ^d	0.33±0.010 ^b	76.96±0.010 ^a	NP

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa (p <0.05). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

(Ficco et al., 2016a) quienes trabajaron con sémola de trigo morado y amarillo en la elaboración de pasas funcionales mostraron valores de 12.78 y 13.28%, (Khan, Yousif, Johnson, & Gamlath, 2013) reportaron 13.43% proteína en el sémola de trigo para la elaboración de pastas de sorgo con sémola, siendo valores mayores a lo obtenido por esta investigación. (Vasanthan, Gaosong, Yeung, & Li, 2002) Reporto que durante el proceso de extrusión hay un rompimiento de la pared celular por lo que se podría estar liberando compuestos solubles e insolubles como fibras, almidones, proteínas. Lo que explica el mayor contenido de proteínas en PCS.

En el extracto etéreo las pastas adicionadas con maíz (PR, PB y PA) obtuvieron los valores más altos; mientras que PCS, PCC y S los más bajos (Tabla 15) en la elaboración de pastas de sorgo con sémola presento un valor de 0.67%.

En los carbohidratos, los tratamientos PA, PCC y PB obtuvieron los valores más altos, y S, PCS, PR los más bajos, con 83.90, 83.84, 80.55, 76.46, 78.55 y 78.82%, respectivamente. Datos similares obtenidos por (X. Lu et al., 2018) en la elaboración de una pasta con la adición de polvo de champiñones. Para la fibra cruda en los tratamientos PCS y S no estuvo presente. Sin embargo, para las muestras PB y PA presento los valores de 0.13 y 0.11%.

8.2.2. Espesor

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos para el espesor de la pasta cruda, es decir, de las pastas recién salidas del extrusor, las cuales presentaron valores de 1.09 a 1.22 mm, sin embargo en las pastas secas PA, PR y PB no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ellas, obteniendo un valor ~ 1.04 mm mientras que los controles (PCC y PCS) presentando valores de 1.34 y 1.21 mm, respectivamente, no teniendo diferencias significativas entre ellas. En cuanto al espesor de las pastas cocidas tuvo la misma tendencia que el espesor en secas, ya que los controles obtuvieron valores más altos en comparación con las pastas adicionadas con maíces pigmentados observando valores de 2.11 a 1.63 mm, en general, se puede decir que las pastas que están hechas con 100% de sémola de trigo (PCC y PCS) fueron las que presentaron espesores mayores en comparación

con las pastas adicionadas de maíz. Lo que nos indica que al adicionar otros ingredientes a la pasta de sémola de trigo común hace que el espesor disminuya, debido a que esta formada por las proteínas (gliadinas y gluteinas) que son las principales responsables de otorgar rigidez, soporte y estructura a las pastas (Laleg, Cassan, Barron, Prabhasankar, & Micard, 2016). (Hernández-Nava et al., 2009) obtuvieron valores de 1.55 a 1.61 en el diametro de spaguettis, adicionados con almidón de platano verde, maíz y garbanzo, valores mayores a los de este estudio.

8.2.3. Densidad aparente

Los valores de densidad aparente (DA) de las pastas crudas se presentan en la Tabla 10, donde se observa que las pastas que presentaron una mayor DA fueron las PCS y PCC, no mostrando diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ellas; mientras que las pastas adicionadas con maíz pigmentado (PB, PR y PA) obtuvieron valores menores con 970, 922 y 893 Kg/m³, respectivamente. (de la Peña & Manthey, 2017) reportaron una densidad de 0.722 g/cm³ en la pasta control sémola, siendo datos más bajos a lo reportado en este trabajo.

8.2.4. Color

El color en los alimentos es uno de los parámetros más importantes para la aceptabilidad del consumidor. Los parámetros de color L*, a* y b* se determinaron en las harinas antes de ser sometidas a extrusión, en las pastas crudas y en las pastas cocidas, como se muestran en las Tablas 11, 12 y 13.

En la las harinas podemos observar que PA y PR no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$), obteniendo los valores más bajos de luminosidad, mientras que PB obtuvo el valor más alto de L* con 79.35. En las pastas crudas PCC junto con PB, presentaron los valores más altos de L*, no mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellas con 75.89 y 74.02, respectivamente.

Tabla 9. Espesor de las pastas crudas, secas y cocidas

Muestras	Espesor pastas crudas (mm)	Espesor pastas secas (mm)	Espesor pastas cocidas (mm)
PCC	ND	1.34±0.022 ^b	2.11 ±0.059 ^c
PCS	1.22±0.142 ^b	1.21±0.132 ^b	1.85±0.054 ^b
PA	1.09±0.043 ^a	1.03±0.068 ^a	1.63±0.064 ^a
PR	1.09±0.030 ^a	1.04±0.134 ^a	1.69±0.065 ^a
PB	1.16±0.086 ^{a,b}	1.06±0.095 ^a	1.68±0.126 ^a

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

Tabla 10. Densidad aparente de las pastas crudas

Muestras	Densidad aparente (kg/m³)
PCC	1134.56±106.982 ^b
PCS	1063.80±25.380 ^b
PA	893.59±4.440 ^a
PR	922.00±14.142 ^{a,b}
PB	970.83±15.024 ^{a,b}

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

Tabla 11. Valores de L* en la mezcla de harinas, pasta cruda y pasta cocida

L *			
Muestras	<i>Mezcla de harinas</i>	<i>Pasta cruda</i>	<i>Pasta cocida</i>
PCC	ND	75.89±0.376 ^{C,a}	73.53±0.116 ^{C,b}
PCS	72.69±1.689 ^{B,a,b}	70.75±2.499 ^{B,a}	75.06±0.771 ^{D,b}
PA	63.15±1.191 ^{A,b}	65.54±2.426 ^{A,b}	56.08±0.768 ^{A,a}
PR	63.10±1.793 ^{A,b}	67.47±0.277 ^{A,c}	58.66±0.382 ^{B,a}
PB	79.35±1.095 ^{C,b}	74.02±1.060 ^{C,a}	73.10±0.230 ^{C,a}

Análisis de dos vías. Los valores son la media ± desviación estándar, n = 5. Las diferentes letras minúsculas indican las diferencias significativas (p <0.05) de cada fila. Las diferentes letras mayúsculas indican las diferencias significativas (p <0.05) de cada columna. PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo, ND= No determinado.

Tabla 12. Valores de a* en la mezcla de harinas, pasta cruda y pasta cocida

a *			
Muestras	<i>Mezcla de harinas</i>	<i>Pasta cruda</i>	<i>Pasta cocida</i>
PCC	ND	1.91±0.044 ^{C,b}	1.41±0.022 ^{C,a}
PCS	1.67±0.093 ^{B,b}	1.26±0.075 ^{B,a}	1.17±0.057 ^{B,a}
PA	2.26±0.065 ^{C,b}	2.27±0.111 ^{D,b}	2.06±0.057 ^{D,a}
PR	3.37±0.150 ^{D,b}	2.83±0.039 ^{E,a}	2.68±0.062 ^{E,a}
PB	1.06±0.094 ^{A,b}	0.60±0.015 ^{A,a}	0.65±0.037 ^{A,a}

Análisis de dos vías. Los valores son la media ± desviación estándar, n = 5. Las diferentes letras minúsculas indican las diferencias significativas (p <0.05) de cada fila. Las diferentes letras mayúsculas indican las diferencias significativas (p <0.05) de cada columna. PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo, ND= No determinado.

Tabla 13. Valores de b* de la mezcla de harinas, pasta cruda y pasta cocida

b *			
Muestras	Mezcla de harinas	Pasta cruda	Pasta cocida
PCC	ND	19.06±0.569 ^{E,b}	16.18±.080 ^{E,a}
PCS	19.10±0.421 ^{D,b}	13.75±0.453 ^{D,a}	13.67±0.163 ^{C,a}
PA	6.38±0.297 ^{A,b}	5.47±0.324 ^{A,a}	7.84±0.147 ^{A,c}
PR	8.47±0.256 ^{B,b}	7.09±0.049 ^{B,a}	8.92±0.240 ^{B,c}
PB	15.75±0.563 ^{C,c}	12.51±0.178 ^{C,a}	14.62±0.164 ^{D,b}

Análisis de dos vías. Los valores son la media ± desviación estándar, n = 5. Las diferentes letras minúsculas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) de cada fila. Las diferentes letras mayúsculas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) de cada columna. PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo, ND= No determinado.

Con respecto a las pastas cocidas mostraron un cambio en los valores de luminosidad, para el caso de la pastas con maíces pigmentados la luminosidad disminuyó, mientras que en las pastas PCS la luminosidad incrementó, sin embargo, para las pastas cocidas PCS, fue la que presentó el valor más alto (75.06).

Después de los procesos (secado y cocción) de que la pasta fue sometida, hubo algunos cambios en los valores, en general, se puede decir, que las pastas PA y PR cocidas presentaron valores más bajos en L^* en comparación con las pastas crudas y la mezcla de harinas (antes de procesar).

PCS y PCC, obtuvieron los valores más altos después de la cocción y en las harinas, mientras que PB tuvo el valor más alto en las mezclas de harinas, en comparación con las pastas crudas y cocidas, este comportamiento de la disminución del parámetro L^* después de la cocción principalmente en las pastas de maíz azul y rojo puede estar relacionado con el cambio de la estructura de los pigmentos haciéndolos más marrones, y por lo tanto presentando menor luminosidad (Farroni & Buera, 2012).

Los valores de a^* que van de rojo (+) a verde (-), en la mezcla de harinas, las pastas crudas y cocidas en todos los tratamientos mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sí, teniendo la misma tendencia, ya que PR y PA obtuvieron los valores más altos, los cuales nos indican que estos tienden a ser más rojos, esto podría estar relacionado con el alto contenido de antocianinas de los maíces (Moreira, Chenlo, Arufe, Rubinos, & technology, 2015); mientras que los controles (PCC, PCS) y PB fueron los valores más bajos. Por otra parte, el análisis estadístico de cada fila, nos mostrará que las pastas cocidas y crudas presentaron valores más bajos en comparación con las harinas, excepto por PA, que no mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la pasta cruda y la harina como se puede ver en la Tabla 12. Esto se podría atribuirse a que durante el proceso de extrusión y cocción a altas temperaturas provocó cambios en la estructura química de los pigmentos (Farroni & Buera, 2012). Como se puede ver reflejado en este estudio, en los parámetros L^* , a^* y b^* .

En la Tabla 13 se muestran los valores obtenidos para el parámetro de color b^* en harinas, pastas crudas y pastas cocidas. La harina de sémola de trigo y maíz blanco presentaron los valores más altos, esto podría explicarse por el contenido de carotenoides presentes en la sémola de trigo y maíz blanco (Moreira et al., 2015); mientras que las harinas de maíz rojo y azul presentaron los valores más bajos. Con respecto a las pastas crudas y cocidas se observa la misma tendencia que en las harinas. Después de someter a cocción las pastas PA y PR mostraron un incremento en el parámetro de color b^* presentando diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) con respecto a las pastas crudas.

El color de las pastas crudas, así como los cambios que sufrieron las pastas después de la cocción se pueden apreciar en la Figura 10 para pastas crudas y en la Figura 11 para las pastas cocidas.

Algunos estudios realizados por diferentes autores han encontrado resultados diferentes a los reportados por esta investigación, tal es el caso de (Hernández-Nava et al., 2009) que obtuvieron valores de L^* de 80.3 a 83.8 en espaguetis adicionados con almidón de plátano, (B. Biernacka, D. Dziki, U. Gawlik-Dziki, R. Różyło, & M. Siastala, 2017) quienes realizaron pastas de trigo común adicionadas con fibra de algarroba, obtuvieron valores en pastas crudas de L^* de 61.7 a 26.5 valores para a^* 17.3 a 3 para b^* 11.2 a 7.5 y en las cocidas de $L^* = 55.8$ a 38.6, $a^* = 10.7$ a 9 y $b^* = -0.52$ a 0.9. Esta diferencia de color se le puede atribuir a la materia prima, concentraciones y procesos utilizados.

8.3. Análisis funcionales

8.3.1. Contenido fenólico total y antioxidantes (DPPH, ABTS y FRAP)

En el contenido fenólico total (CFT), se puede observar que en las pastas de sémola de trigo adicionadas con maíces pigmentados aumentaron su contenido fenólico, en comparación con los controles, este comportamiento se le puede atribuir a que los maíces pigmentados tienen antocianinas y flavonas C-glicosil (Chatham, Howard, & Juvik, 2020). (Lopez-Martinez et al., 2009) reportaron en el (CFT) en maíces azules, rojos y blancos valores de 343, 465 y 170 mg EAG/100g, respectivamente,

se puede notar que el maíz rojo presentó el valor más alto al igual que en este estudio, como se puede observar en la Tabla 14. El efecto de cocción afecta en contenido fenólico, provocando en este estudio una reducción aproximada del 45%, por otra parte, la sémola de trigo antes del proceso de cocción (S), obtuvo un valor de 45 mg EAG/100g, mismo que se vio afectado después del proceso de extrusión, esto es debido a que diferentes compuestos fenólicos suelen ser termosensibles (Hirawan, Ser, Arntfield, & Beta, 2010). Por lo tanto, al ser sometidos a procesos de energía calorífica, provocó esta reducción en los compuestos fenólicos. Sin embargo, a pesar de esto podemos notar que las pastas adicionadas con maíces pigmentados conservaron mayor contenido de compuestos fenólicos en comparación con los controles, llevando todo esto a que las pastas cuenten con beneficios al organismos después de todos los procesos a las que son sometidas para finalmente ser consumidas.

Con respecto a la capacidad antioxidante medida por DPPH, ABTS y FRAP, en la sémola de trigo (previo a la extrusión) los valores obtenidos fueron de 10.03 $\mu\text{Mol Trolox/g}$, 68.09 $\mu\text{Mol Trolox/g}$ y 0.003 $\mu\text{Mol FRAP/g}$ de muestra base seca, respectivamente. Para las pruebas determinadas por DPPH y FRAP en las pastas se puede ver que DPPH mostró valores más altos en comparación con FRAP, obteniendo valores en pasta la cruda de 19.78 a 9.82 $\mu\text{Mol Trolox/g}$ y de 0.022 a 0.002 $\mu\text{Mol FRAP/g}$, respectivamente.



Figura 10. Pastas crudas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.



Figura 11. Pastas cocidas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

Tabla 14. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante (DPPH, ABTS y FRAP) de las pastas crudas y cocidas

	CFT		DPPH		ABTS		FRAP	
	<i>mg EAG/100g de muestra base seca</i>		<i>μMol Trolox/g muestra base seca</i>		<i>μMol Trolox/g muestra base seca</i>		<i>μMol FRAP/g muestra base seca</i>	
	<i>Pasta cruda</i>	<i>Pasta cocida</i>	<i>Pasta cruda</i>	<i>Pasta cocida</i>	<i>Pasta cruda</i>	<i>Pasta cocida</i>	<i>Pasta cruda</i>	<i>Pasta cocida</i>
PCC	20.00±1.064 ^{a,B}	12.7943±.872 ^{a,A}	14.19±0.521 ^{b,B}	8.67±0.302 ^{a,A}	76.29±3.195 ^{b,B}	55.99±1.864 ^{a,A}	0.002±.000 ^{a,A}	NP
PCS	34.07±3.246 ^{a,B}	7.7800±.875 ^{a,A}	9.82±0.809 ^{a,A}	9.40±0.802 ^{a,A}	71.49±1.976 ^{a,b,B}	54.04±1.130 ^{a,A}	NP	NP
PA	79.37±4.419 ^{c,d,B}	34.5257±.887 ^{b,A}	18.89±0.313 ^{c,B}	13.25±0.615 ^{b,A}	119.91±2.599 ^{d,B}	100.46±3.120 ^{b,A}	0.018±.000 ^{b,B}	0.011±0.0006 ^{c,A}
PR	97.86±8.677 ^{d,B}	41.8200±2.354 ^{c,A}	19.78±0.531 ^{c,B}	9.20±0.534 ^{a,A}	124.41±2.599 ^{d,A}	119.71±3.955 ^{c,A}	0.022±.001 ^{c,B}	0.008±0.0006 ^{b,A}
PB	68.57±4.329 ^{c,B}	20.1280±.885 ^{b,A}	14.97±0.530 ^{b,B}	10.03±0.811 ^{a,A}	105.70±2.121 ^{c,B}	92.83±3.743 ^{b,A}	0.015±.001 ^{b,B}	0.004±0.0000 ^{a,A}

Análisis de dos vías. Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras minúsculas indican las diferencias estadísticas significativas (p <0.05) de las columnas. Las letras mayúsculas indican las diferencias estadísticas significativas (p <0.05) de las filas para cada análisis. PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo. NP= No presente.

Mientras que para las pastas cocidas mostraron valores más bajos en comparación con las crudas como se puede ver en la Tabla 14. No obstante, los tratamientos PA y PR fueron los que presentaron los valores más altos, después de la cocción, el tratamiento PR fue el que obtuvo una mayor reducción, esto podría explicarse a la termosensibilidad de los compuestos (Hirawan et al., 2010) o bien por las interacciones con otros compuestos de la matriz de la pasta que contribuyen a su pérdida (Armellini et al., 2018). El tratamiento que no se vio afectado por la cocción y no presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) fue PCS de la prueba DPPH, en este sentido, algunos autores (Fares, Platani, Baiano, & Menga, 2010) mencionan que el proceso de cocción mejora las propiedades antioxidantes de la pasta de trigo normal, lo que podría explicarse por la liberación de algunos ácidos fenólicos del trigo causado por altas temperaturas, por tal razón PCS en este estudio no presentó diferencia significativa por el efecto de cocción (~ 9.61), por otro lado, PCC mostró un comportamiento inverso a lo reportado, donde se puede observar una reducción de DPPH, esto puede ser debido a que no se cuenta con información total de todos los ingredientes utilizados en esta pasta comercial además de la calidad de trigo utilizado, así como las condiciones del proceso al cual fue llevado.

Los valores obtenidos para actividad antioxidante por ABTS, fueron superiores a las demás técnicas antioxidantes debido a que el método ABTS mide principalmente a los compuestos hidrosolubles, con lo que confirmamos que los compuestos principales que están otorgando la capacidad antioxidante son las antocianinas ya que son solubles en agua, es por ello esta diferencia de contenidos en comparación con los demás análisis (Gülçin et al., 2010). Las pastas adicionadas con maíz (PA, PR y PB) presentaron una mayor actividad antioxidante, destacando que el tratamiento PR fue el que presentó el valor más alto con $124.41 \mu\text{Mol Trolox/g}$, además de eso también se puede notar que el efecto de cocción no provocó diferencias significativas ($p < 0.05$) en PR crudas y cocidas (Tabla 14). Este comportamiento puede ser debido al complejo amilosa- lípido ya que algunos autores mencionan que este complejo protege a los compuestos fenólicos y al

momento de ser sometidos a cocción el complejo se rompe y hace que haya una liberación de estos compuestos. Por otra parte, se podría atribuir a una hidrólisis en estructura de la pared celular de los maíces pigmentados debido el tratamiento térmico, debido a que rompe los enlaces covalentes en el complejo de los polifenoles lo que resulta una mejor accesibilidad a los compuestos fenólicos; además de una hidrólisis parcial de los polisacáridos (Wang, He, & Chen, 2014), por lo que el proceso de ebullición en las pastas cocidas, podría estar provocando una mayor liberación y estabilidad en la capacidad antioxidante de ABTS.

8.4. Análisis de digestibilidad

8.4.1. Almidón resistente

El almidón resistente (AR) es aquel que no puede ser digerido en el intestino delgado pero puede ser fermentado por la microflora en el colon, reportes indican que el AR presenta una mejor respuesta fisiológica en comparación con la fibra dietética (Jiang, Du, Jiang, Wang, & Du, 2019). En los resultados obtenidos de almidón resistente, en general, se puede decir que las pastas después de haber sido sometidas al proceso de cocción aumentaron su contenido como se puede ver en la Tabla 15. Este aumento concuerda con otros estudios, como lo reportado por (Fares & Menga, 2012) en la elaboración de una pasta adicionada con garbanzo y (Khan et al., 2013) en pastas de sémola de trigo con sorgo. Esto se le atribuye a que durante la cocción, las moléculas de amilosa se reorganizan para formar almidón resistente, cuando la pasta se enfría. La formación de almidón resistente ocurre a partir de una materia prima inicial (con poco almidón resistente), aumentando después de los procesos térmicos, con el gránulo de almidón completamente hidratado, y se cree que esto depende de la relación amilosa / amilopectina, longitud de la cadena del polímero, contenido de lípidos y condiciones de procesamiento, temperatura y contenido de agua (Eerlingen & Delcour, 1995).

Tabla 15. Almidón resistente de las pastas crudas y cocidas

Muestra	Pasta cruda (%)	Pasta cocida (%)	Diferencia
PCC	0.68±0.037 ^{c,A}	2.47±0.025 ^{d,B}	1.79
PCS	0.51±0.050 ^{b,A}	1.34±0.0199 ^{b,B}	0.83
PA	0.39±0.035 ^{a,A}	1.15±0.078 ^{a,B}	0.76
PR	0.39±0.007 ^{a,A}	1.30±0.061 ^{a,b,B}	0.91
PB	0.35±0.026 ^{a,A}	1.65±0.085 ^{c,B}	1.30

Análisis de dos vías. Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras minúsculas indican las diferencias estadísticas significativas (p <0.05) de las columnas. Las letras mayúsculas indican las diferencias estadísticas significativas (p <0.05) de las filas para cada análisis. PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo. NP= No presente.

Por otro lado, en las pastas crudas, las adicionadas con maíces pigmentados no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre ellas, obteniendo un valor $\sim 0.37\%$. Mientras que los controles (PCC y PCS) presentaron valores más altos 0.68 y 0.51, respectivamente.

8.5. Análisis térmicos

8.5.1. Análisis de viscosidad rápida

El análisis de viscosidad rápida de las pastas comenzó con la preparación de una suspensión acuosa que es sometida a diferentes temperaturas para enfriar y calentar la solución bajo cizallamiento constante a través de una propela, midiendo los cambios en la viscosidad en función del tiempo y la temperatura para construir el perfil de viscosidad del almidón (Liu et al., 2019). Las Tablas 16 y 17 se muestran los resultados de la viscosidad pico, viscosidad final y la temperatura de empastado, en general, se puede decir que las pastas cocidas muestran valores menores en comparación con las crudas. Para el pico máximo de viscosidad los valores más altos fueron para los controles (PCC y PCS) 1017.33 y 1873.33 cP, respectivamente.

Para la mayoría de los almidones, la viscosidad máxima está relacionada con capacidad de hinchamiento que presentan los gránulos de almidón (Schoch, 1968); además de estar relacionada con el tamaño de granulo, dado que los gránulos de almidón más grandes ocuparan más espacio dentro de los sistemas de medición, desarrollando pastas más viscosas (S. Singh, Singh, Isono, Noda, & chemistry, 2010).

En la viscosidad final, en las pastas crudas el tratamiento PR, mostró el valor más bajo 859.50 cP, mientras que PCS el más alto para ambas pastas (crudas y cocidas) 3388.50, 576 cP, respectivamente. PA mostró el más bajo valor con 235 cP (pastas cocidas).

Tabla 16. Análisis de viscosidad rápida de las pastas crudas (proporción 60% sémola de trigo y 40% harina de maíz)

Muestra	Viscosidad pico (cP)	Caída de viscosidad (cP)	Viscosidad final (cP)	Tendencia a la retrogradación (cP)	Temperatura de pasta (°C)
PCC	1017.33±20.01 ^c	9.500 ±0.670 ^b	2254.33±51.598 ^c	1244.67±30.924 ^c	89.82±.236 ^c
PCS	1873.33±21.57 ^d	68.500±0.670 ^f	3388.50±81.500 ^d	1460.00±17.000 ^d	88.72±.293 ^b
PA	831.67±1.15 ^b	33.500±0.670 ^d	1252.00±1.000 ^b	453.50±.500 ^b	89.62±.029 ^c
PR	647.67±4.04 ^a	43.333±0.670 ^e	859.50±32.500 ^a	254.00±24.000 ^a	89.63±.104 ^c
PB	809.67±9.07 ^b	17.000±0.670 ^c	1252.00±24.000 ^b	457.50±16.500 ^b	89.03±.202 ^b
S	1233.19±11.50 ^e	-20.00±0.670 ^a	4359.50±34.500 ^e	2120.00±23.000 ^e	83.75±.150 ^a

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa (p <0.05). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

Tabla 17. Análisis de viscosidad rápida de las pastas cocidas (proporción 60% sémola de trigo y 40% harina de maíz)

Muestra	Viscosidad pico (cP)	Caída de viscosidad (cP)	Viscosidad final (cP)	Tendencia a la retrogradación (cP)
PCC	222.50±2.500 ^b	-2.00±.000 ^a	386.00±3.000 ^d	161.50±.500 ^d
PCS	373.00±2.646 ^d	35.00±2.000 ^d	576.00±20.075 ^e	238.00±16.370 ^e
PA	172.33±.577 ^a	10.67±.578 ^{b,c}	235.67±1.528 ^a	74.00±1.000 ^a
PR	197.33±8.327 ^b	13.50±.500 ^c	281.00±1.000 ^b	91.50±.500 ^b
PB	213.67±2.310 ^c	9.33±1.155 ^b	317.00±3.000 ^c	112.67±2.081 ^c

Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo, ND= No determinado.

Los valores bajos de viscosidad final se le puede atribuir a su capacidad limitada para lixiviar la amilosa, como lo demuestra la baja capacidad de hinchamiento y la solubilidad del almidón (Grant et al., 2001). Este comportamiento se pueden observar en las Figuras 13 y 14.

Para la temperatura de empastado en las pastas crudas, las pastas PCS PA y PR, no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ellas, presentado valores de 89.82 a 88.72 °C, por lo que podemos decir que los diferentes almidones (maíz y trigo) tiene las característica similares para la temperatura de cocción puesto a que no hubo mucha diferencia entre ellos. En cuanto a las patas cocidas este parámetro no fue determinado.

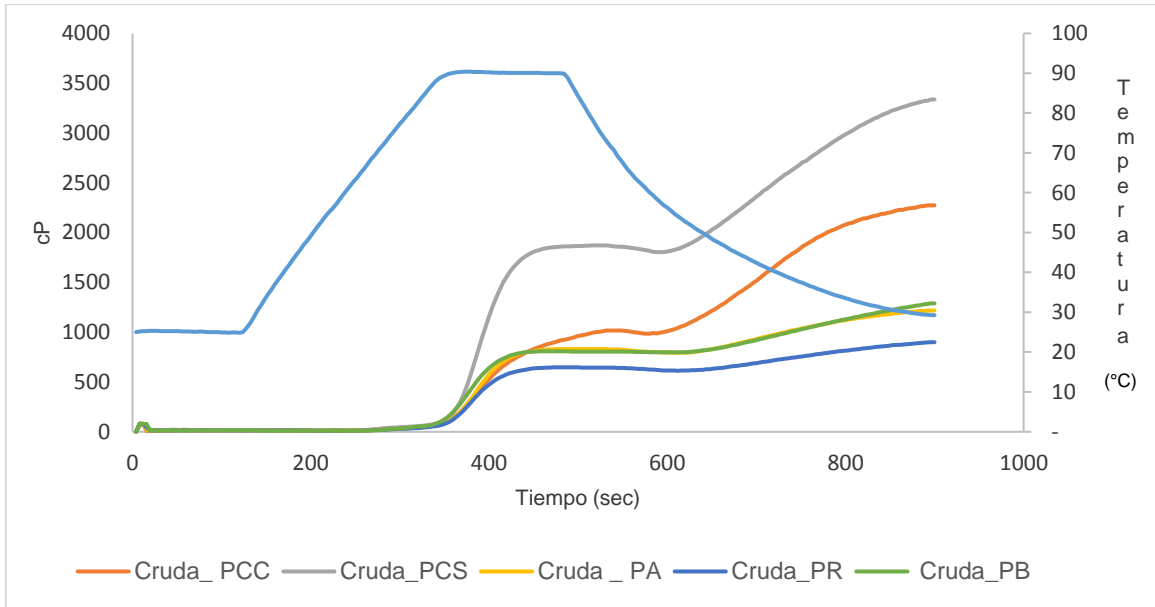


Figura 12. Análisis de viscosidad rápida de las pastas crudas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

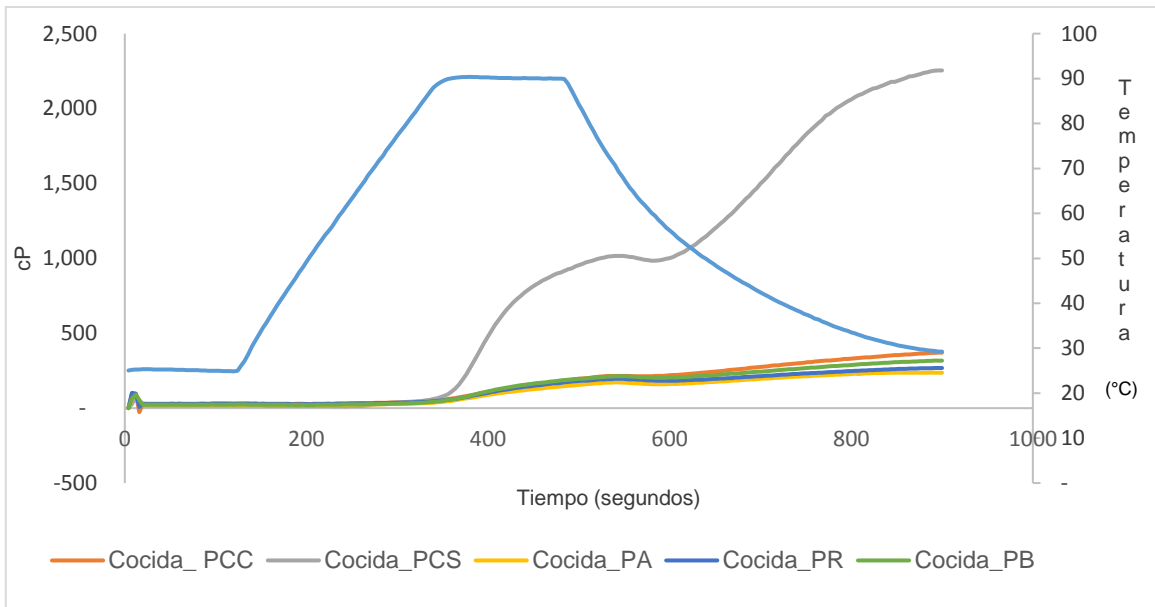


Figura 13. Análisis de viscosidad rápida de las pastas cocidas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

8.6. Análisis estructurales

8.6.1. Difracción de rayos X

Los difractogramas de los diferentes tratamientos obtenidos a través de los análisis de rayos X, se pueden apreciar en las Figuras 14 y 15, en los cuales se observa el comportamiento que obtuvieron las pastas crudas y cocidas, sobre el empaque cristalino de las moléculas de almidón. Todos los almidones de las pastas mostraron el mismo comportamiento según su caso (crudas o cocidas). La presencia de picos alrededor $2\theta = 17$ y 23 , son características de una estructura tipo A, indicando que son de almidones de provenientes de cereales. En las pastas cocidas se puede ver que los picos se amplían en todos los tratamientos, esto muestra una diferencia de la organización de la amilosa y la amilopectina en los gránulos de los almidones y por lo tanto el porcentaje de cristalinidad se reduce.

Este comportamiento se puede identificar en la Tabla 18. Ya que en las pastas cocidas hubo un porcentaje de cristalinidad menor no presentando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellas, obteniendo un valor $\sim 11.89\%$. Por otra parte, las pastas que mostraron mayor cristalinidad fueron crudas en los tratamientos PA, PCS y PCC con 15.79% , 15.42% , 14.59% , respectivamente. Las diferencias en la organización interna del almidón también fueron evidentes en los perfiles de pegado, ya que las pastas que mostraron los picos más altos de viscosidad durante el calentamiento, mostraron mayor cristalinidad. Datos similares se observaron por (Padalino, Caliandro, Chita, Conte, & Del Nobile, 2016) quienes evaluaron pasta de sémola, demostrando que a medida que las temperaturas aumentan, las pastas presentan menor cristalinidad.

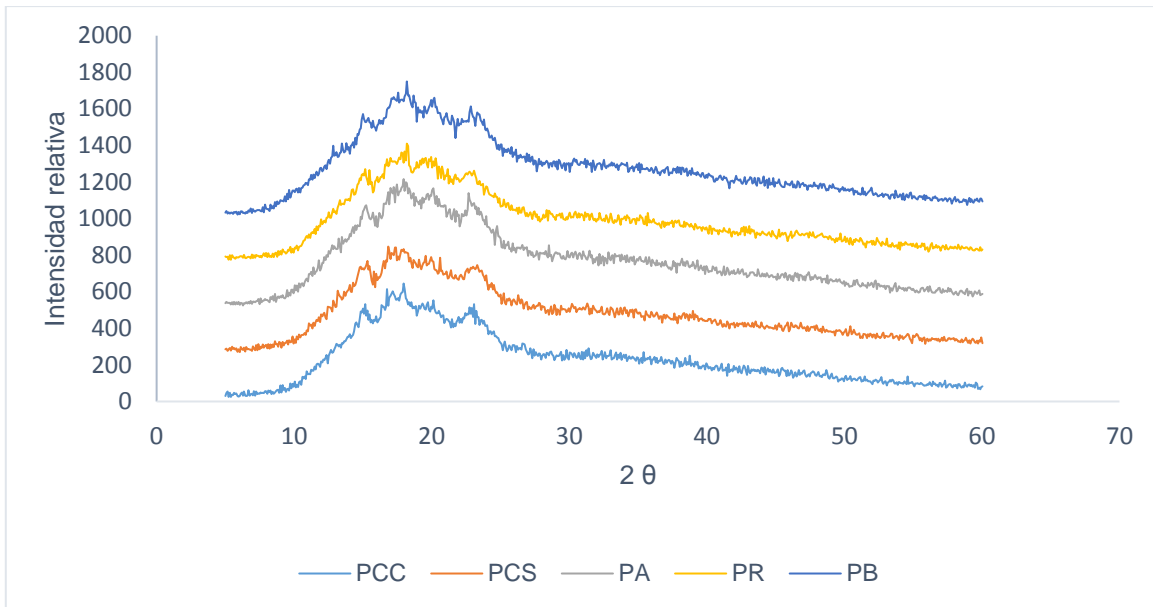


Figura 14. Difractogramas de rayos X de las pastas crudas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

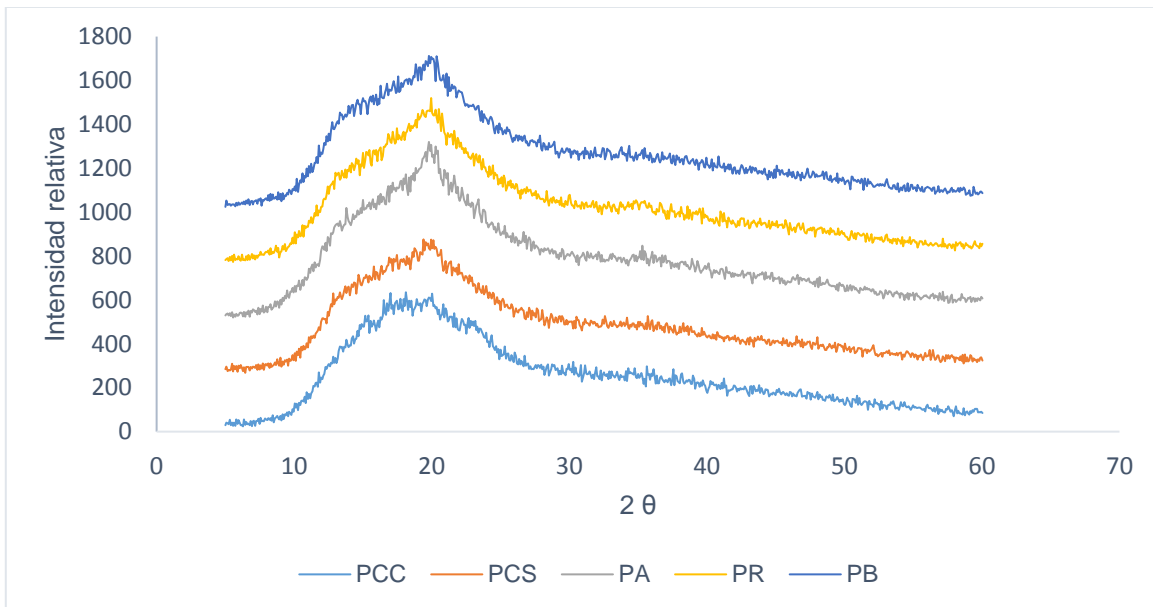


Figura 15. Difractogramas de rayos X de las pastas cocidas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

8.6.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB)

En la Figura 16 se muestran las micrografías de las pastas antes y después del proceso de cocción. En las imágenes a-PCC, a-PCS, a-PA, a-PR, a-PB se observan pequeños gránulos de almidón sin gelatinizar, mientras que en las figuras b-PCC, b-PCS, b-PA, b-PR, b-PB se observa una completa gelatinización del almidón después del proceso de cocción, lo cual atribuye a explicar que el proceso de cocción ayuda al porcentaje de absorción de agua. Similares imágenes de micrografías fueron observadas en un estudio por (Larrosa, Lorenzo, Zaritzky, & Califano, 2015) quienes elaboraron pastas de almidón de maíz y huevo, sometiéndolas a 15 min de cocción.

Tabla 18. Porcentaje de cristalinidad de las pastas crudas y cocidas

Pastas	Pasta cruda (%) cristalinidad	Pasta cocida (%) cristalinidad
PCC	14.59±0.515 ^{a,b,B}	12.32±0.909 ^{a,A}
PCS	15.42±0.846 ^{b,B}	12.16±0.246 ^{a,A}
PA	15.79±0.528 ^{b,B}	11.26±0.120 ^{a,A}
PR	13.43±0.667 ^{a,B}	12.18±0.154 ^{a,A}
PB	13.05±0.617 ^{a,B}	11.56±0.338 ^{a,A}

Análisis de dos vías. Los valores son la media ± desviación estándar, n = 3. Las letras diferentes indican una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). PCC = pasta control comercial, PCS = pasta control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

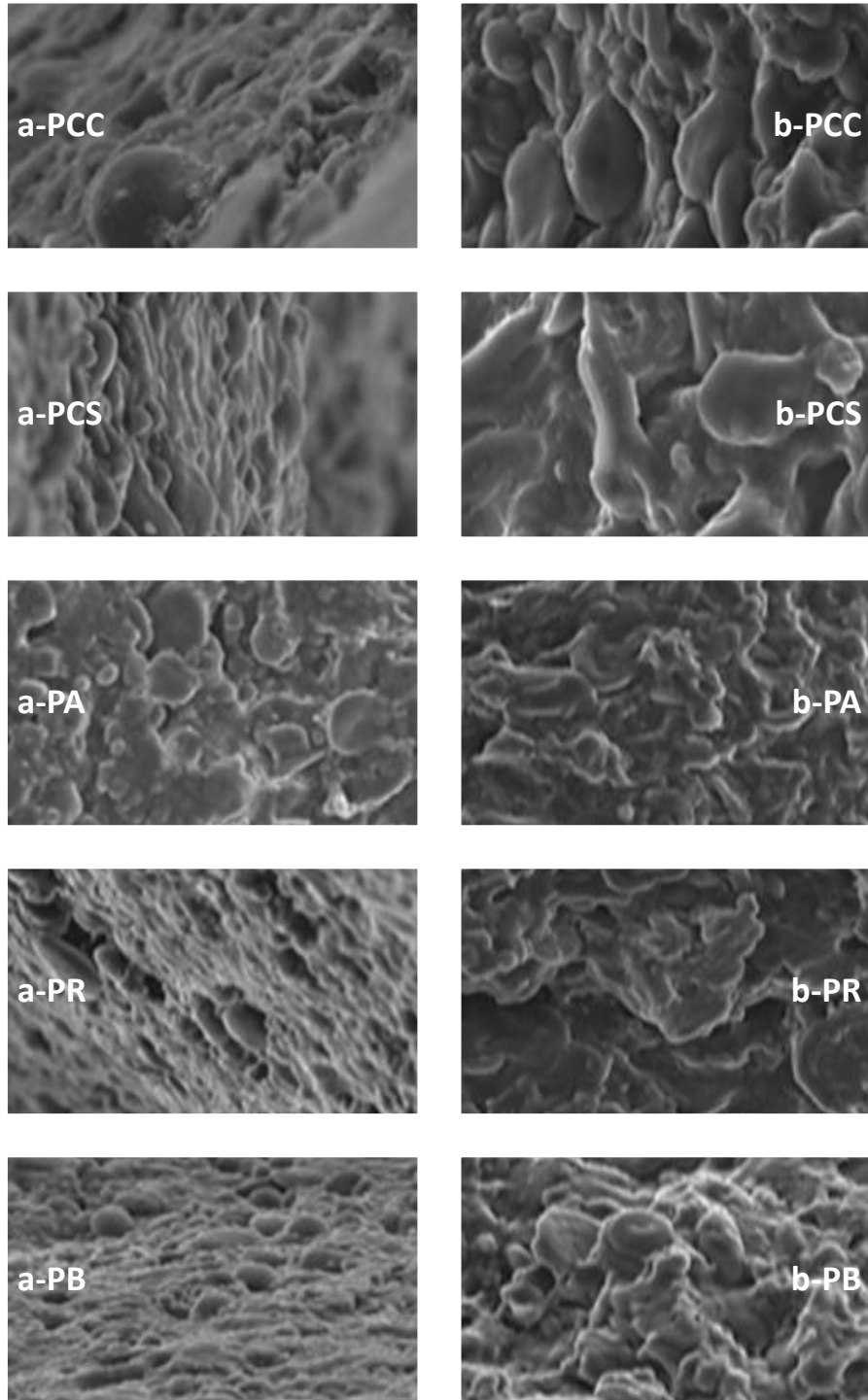


Figura 16. Micrografías de las pastas crudas

PCC = Pasta control comercial, PCS = Pasta de control de sémola, PA = pasta de maíz azul con sémola de trigo, PR = pasta de maíz rojo con sémola de trigo, PB = pasta de maíz blanco con sémola de trigo.

9. Conclusiones

Se obtuvieron 3 pastas funcionales utilizando como materia prima maíces pigmentados (maíz azul, rojo y blanco) y sémola de trigo.

La adición de maíces pigmentados en un 40% a la sémola de trigo para la elaboración de pastas, presentaron características idóneas debido a que no modifica la red proteica desarrollada por el gluten del trigo, lo cual se refleja en los parámetros de calidad, fisicoquímicos y de cocción evaluados. Las pastas obtenidas presentaron pérdidas por cocción menores al 12%, siendo favorables ya que indica que cumplen con uno de los parámetros de calidad.

La inclusión de harina de maíz pigmentado en las pastas incrementa el contenido de almidón resistente después de ser sometidas a cocción, por lo que podrían tener un efecto prebiótico favoreciendo el desarrollo de microflora intestinal.

Las pastas elaboradas con sémola de trigo y maíces pigmentados mostraron actividad antioxidante, aún después de ser sometidas al proceso de cocción, lo cual podría tener un efecto preventivo contra el estrés oxidativo y contra enfermedades asociadas al estrés oxidativo, como cáncer y enfermedades cardiovasculares. Siendo una alternativa a las pastas ya convencionales.

10. Referencias

- AACC. (2000). Approved Methods of Analysis, Method 66-50.01.
- Agama-Acevedo, E., Ottenhof, M. A., Farhat, I. A., Paredes-López, O., Ortiz-Cereceres, J., & Bello-Pérez, L. A. J. A. (2005). Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *39*(4), 419-429.
- Alvídrez-Morales, A., González-Martínez, B. E., & Jiménez-Salas, Z. J. R. s. p. y. N. (2002). Tendencias en la producción de alimentos: alimentos funcionales. *3*(3).
- Anderson, R. J. C. s. t. (1969). Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. *14*, 4-12.
- AOAC. (1984). Official Methods of Analysis of the AOAC. In: Association of Official Analytical Chemists Washington, DC.
- Aparicio-Saguilán, A., Aguirre-Cruz, A., Méndez-Montealvo, G., Rodriguez-Ambriz, S. L., Garcia-Suarez, F. J., Páramo-Calderón, D. E., & Bello-Pérez, L. A. (2014). The effect of the structure of native banana starch from two varieties on its acid hydrolysis. *LWT - Food Science and Technology*, *58*(2), 381-386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.028>
- Aravind, N., Sissons, M., Fellows, C. M., Blazek, J., & Gilbert, E. P. (2013). Optimisation of resistant starch II and III levels in durum wheat pasta to reduce in vitro digestibility while maintaining processing and sensory characteristics. *Food Chemistry*, *136*(2), 1100-1109. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.08.035>
- Arêas, J. A. G., Rocha-Olivieri, C. M., & Marques, M. R. (2016). Extrusion Cooking: Chemical and Nutritional Changes. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 569-575). Oxford: Academic Press.

- Armellini, R., Peinado, I., Pittia, P., Scampicchio, M., Heredia, A., & Andres, A. J. F. c. (2018). Effect of saffron (*Crocus sativus* L.) enrichment on antioxidant and sensorial properties of wheat flour pasta. *254*, 55-63.
- Badui Dergal, S. (2016). *Química de los alimentos*: México, Pearson Educación.
- BeMiller, J. N. (2018). *Carbohydrate chemistry for food scientists*: Elsevier.
- Benzie, I. F., & Strain, J. J. J. A. b. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *239*(1), 70-76.
- Berk, Z. (2018). Chapter 15 - Extrusion. In Z. Berk (Ed.), *Food Process Engineering and Technology (Third Edition)* (pp. 373-394): Academic Press.
- Biernacka, B., Dziki, D., Gawlik-Dziki, U., Różyło, R., & Siastała, M. (2017). Physical, sensorial, and antioxidant properties of common wheat pasta enriched with carob fiber. *LWT*, *77*, 186-192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.042>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.-E., Berset, C. J. L.-F. s., & Technology. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *28*(1), 25-30.
- Bultosa, G. (2016). Functional Foods: Overview. In C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, & J. Faubion (Eds.), *Encyclopedia of Food Grains (Second Edition)* (pp. 1-10). Oxford: Academic Press.
- CANIMOLT. (2016). Reporte estadístico 2015 con información al 2016. *Camara Nacional de la Industria Molinera del Trigo*.
- Chatham, L. A., Howard, J. E., & Juvik, J. A. (2020). A natural colorant system from corn: Flavone-anthocyanin copigmentation for altered hues and improved shelf life. *Food Chemistry*, *310*, 125734. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125734>
- Chen, B., & Xu, M. (2019). Natural Antioxidants in Foods. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 180-188). Oxford: Academic Press.
- Coe, E., Neuffer, M., & Hoisington, D. (1988). *The genetics of corn*: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science

- Coronado, H., Vega y Leon, S., Gutierrez, T., Vazquez, F., & Radilla, C. J. R. C. D. N. (2015). Antioxidants: present perspective for the human health. *42*(2), 206-212.
- Cummings, J., & Stephen, A. J. E. j. o. c. n. (2007). Carbohydrate terminology and classification. *61*(S1), S5.
- De Cindio, B., & Baldino, N. (2016). Pasta: Manufacture and Composition. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 235-241). Oxford: Academic Press.
- de la Peña, E., & Manthey, F. A. J. J. o. F. P. E. (2017). Effect of formulation and dough hydration level on extrusion, physical and cooked qualities of nontraditional spaghetti. *40*(1), e12301.
- Delmoro, J., Muñoz, D., Nadal, V., Clementz, A., & Pranzetti, V. J. I. R. d. i. a. (2010). El color en los alimentos: determinación de color en mieles. (25), 145-152.
- Dupuis, J. H., Liu, Q., Yada, R. Y. J. C. r. i. f. s., & safety, f. (2014). Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: A review. *13*(6), 1219-1234.
- Eerlingen, R., & Delcour, J. J. J. o. C. S. (1995). Formation, analysis, structure and properties of type III enzyme resistant starch. *22*(2), 129-138.
- Eliasson, A. C. (2010). 10 - Gelatinization and retrogradation of starch in foods and its implications for food quality. In L. H. Skibsted, J. Risbo, & M. L. Andersen (Eds.), *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages* (pp. 296-323): Woodhead Publishing.
- Fares, C., & Menga, V. (2012). Effects of toasting on the carbohydrate profile and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour added to durum wheat pasta. *Food Chemistry*, *131*(4), 1140-1148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.080>

- Fares, C., Platani, C., Baiano, A., & Menga, V. J. F. C. (2010). Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat. *119*(3), 1023-1029.
- Farroni, A., & Buera, M. d. P. (2012). Colour and surface fluorescence development and their relationship with Maillard reaction markers as influenced by structural changes during cornflakes production. *Food Chemistry*, *135*(3), 1685-1691. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.114>
- Ficco, D. B. M., De Simone, V., De Leonardis, A. M., Giovanniello, V., Del Nobile, M. A., Padalino, L., . . . De Vita, P. (2016a). Use of purple durum wheat to produce naturally functional fresh and dry pasta. *Food Chemistry*, *205*, 187-195. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.014>
- Flores-Silva, P. C., Rodriguez-Ambriz, S. L., & Bello-Pérez, L. A. J. J. o. f. s. (2015). Gluten-free snacks using plantain–chickpea and maize blend: chemical composition, starch digestibility, and predicted glycemic index. *80*(5), C961-C966.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M. J., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J. A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, *43*(4), 931-942. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.02.004>
- Fujita, N. (2017). Starch. In B. Thomas, B. G. Murray, & D. J. Murphy (Eds.), *Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)* (pp. 106-111). Oxford: Academic Press.
- García-Lara, S., Chuck-Hernandez, C., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Chapter 6 - Development and Structure of the Corn Kernel. In S. O. Serna-Saldivar (Ed.), *Corn (Third Edition)* (pp. 147-163). Oxford: AACC International Press.
- García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Chapter 1 - Corn History and Culture. In S. O. Serna-Saldivar (Ed.), *Corn (Third Edition)* (pp. 1-18). Oxford: AACC International Press.

- Giacco, R., Vitale, M., & Riccardi, G. (2016). Pasta: Role in Diet. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 242-245). Oxford: Academic Press.
- Gomez, M., & Aguilera, J. J. J. o. F. S. (1983). Changes in the starch fraction during extrusion-cooking of corn. *48*(2), 378-381.
- Goodman, M. M., & Bird, R. M. J. E. B. (1977). The races of maize IV: tentative grouping of 219 Latin American races. *31*(2), 204-221.
- Granito, M., Pérez, S., & Valero, Y. J. R. c. d. n. (2014). Calidad de cocción, aceptabilidad e índice glicémico de pasta larga enriquecida con leguminosas. *41*(4), 425-432.
- Grant, L., Vignaux, N., Doehlert, D., McMullen, M., Elias, E., & Kianian, S. J. C. c. (2001). Starch characteristics of waxy and nonwaxy tetraploid (*Triticum turgidum* L. var. durum) wheats. *78*(5), 590-595.
- Grzybowski, R. A., Donnelly, B. J. J. J. o. A., & Chemistry, F. (1979). Cooking properties of spaghetti: factors affecting cooking quality. *27*(2), 380-384.
- Gülçin, I., Bursal, E., Şehitoğlu, M. H., Bilsel, M., Gören, A. C. J. F., & Toxicology, C. (2010). Polyphenol contents and antioxidant activity of lyophilized aqueous extract of propolis from Erzurum, Turkey. *48*(8-9), 2227-2238.
- Hasler, C. M. J. F. T.-C. T. C.-. (1998). Functional foods: their role in disease prevention and health promotion. *52*, 63-147.
- Hernández-Nava, R., Berrios, J. D. J., Pan, J., Osorio-Diaz, P., Bello-Perez, L. A. J. F. S., & International, T. (2009). Development and characterization of spaghetti with high resistant starch content supplemented with banana starch. *15*(1), 73-78.
- Hirawan, R., Ser, W. Y., Arntfield, S. D., & Beta, T. J. F. C. (2010). Antioxidant properties of commercial, regular-and whole-wheat spaghetti. *119*(1), 258-264.

- Holliger, A. J. C. c. (1963). Improved method for testing macaroni products. *40*(3), 231-240.
- Hong, H. T., Netzel, M. E., & O'Hare, T. J. (2020). Optimisation of extraction procedure and development of LC–DAD–MS methodology for anthocyanin analysis in anthocyanin-pigmented corn kernels. *Food Chemistry*, *319*, 126515. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126515>
- Hoover, R., & Zhou, Y. (2003). In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes—a review. *Carbohydrate Polymers*, *54*(4), 401-417. doi:[https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00180-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00180-2)
- Jiang, F., Du, C., Jiang, W., Wang, L., & Du, S.-k. (2019). The preparation, formation, fermentability, and applications of resistant starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.124>
- Joye, I. J. (2019). Starch. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 256-264). Oxford: Academic Press.
- Khan, I., Yousif, A., Johnson, S. K., & Gamlath, S. J. F. R. I. (2013). Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. *54*(1), 578-586.
- Kuklinski, C. (2003). *Nutrición y bromatología*: Omega.
- Kusumayanti, H., Handayani, N. A., & Santosa, H. J. P. E. S. (2015). Swelling power and water solubility of cassava and sweet potatoes flour. *23*(0), 164-167.
- Laleg, K., Cassan, D., Barron, C., Prabhasankar, P., & Micard, V. J. P. o. (2016). Structural, culinary, nutritional and anti-nutritional properties of high protein, gluten free, 100% legume pasta. *11*(9).
- Larrosa, V., Lorenzo, G., Zaritzky, N., & Califano, A. (2015). Dynamic rheological analysis of gluten-free pasta as affected by composition and cooking time.

Journal of Food Engineering, 160, 11-18.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.019>

Lewicki, P. P. (2014). EXTRUSION TECHNOLOGY. In M. Dikeman & C. Devine (Eds.), *Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition)* (pp. 564-569). Oxford: Academic Press.

Liu, S., Yuan, T. Z., Wang, X., Reimer, M., Isaak, C., & Ai, Y. (2019). Behaviors of starches evaluated at high heating temperatures using a new model of Rapid Visco Analyzer – RVA 4800. *Food Hydrocolloids*, 94, 217-228.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.015>

Lopez-Martinez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C.-H., Parkin, K. L., & Garcia, H. S. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT - Food Science and Technology*, 42(6), 1187-1192.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.10.010>

Lu, X., Brennan, M. A., Serventi, L., Liu, J., Guan, W., & Brennan, C. S. (2018). Addition of mushroom powder to pasta enhances the antioxidant content and modulates the predictive glycaemic response of pasta. *Food Chemistry*, 264, 199-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.130>

Lu, Z.-H., Donner, E., & Liu, Q. (2019). 4.47 - Resistant Starches in Foods☆. In M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)* (pp. 556-568). Oxford: Pergamon.

Mahmood, K., Kamilah, H., Shang, P. L., Sulaiman, S., Ariffin, F., & Alias, A. K. (2017). A review: Interaction of starch/non-starch hydrocolloid blending and the recent food applications. *Food Bioscience*, 19, 110-120.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.05.006>

Moreira, R., Chenlo, F., Arufe, S., Rubinos, S. J. J. o. f. s., & technology. (2015). Physicochemical characterization of white, yellow and purple maize flours and rheological characterization of their doughs. 52(12), 7954-7963.

- Moreno, Y. S., Herrera, P. P., Merino, J. C., & Rivas, L. A. Á. J. R. F. (2003). Relación de amilosa: amilopectina en el almidón de harina nixtamalizada de maíz y su efecto en la calidad de la tortilla. 115-121.
- Mühlbauer, W., & Müller, J. (2020). Chapter 3.6 - Wheat (*Triticum L.*). In W. Mühlbauer & J. Müller (Eds.), *Drying Atlas* (pp. 109-115): Woodhead Publishing.
- Padalino, L., Caliandro, R., Chita, G., Conte, A., & Del Nobile, M. A. J. C. p. (2016). Study of drying process on starch structural properties and their effect on semolina pasta sensory quality. *153*, 229-235.
- Paraginski, R. T., de Souza, N. L., Alves, G. H., Ziegler, V., de Oliveira, M., & Elias, M. C. (2016). Sensory and nutritional evaluation of popcorn kernels with yellow, white and red pericarps expanded in different ways. *Journal of Cereal Science*, *69*, 383-391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.05.013>
- Pastrana-Bonilla, E., Akoh, C. C., Sellappan, S., Krewer, G. J. J. o. a., & chemistry, f. (2003). Phenolic content and antioxidant capacity of muscadine grapes. *51*(18), 5497-5503.
- Peat, S., Whelan, W. J., & Thomas, G. J. J. J. o. t. C. S. (1952). Evidence of multiple branching in waxy maize starch. 4536-4538.
- Pollini, C. M., Pantò, F., Nespoli, A., Sissons, M., & Abecassis, J. (2012). CHAPTER 9 - Manufacture of Pasta Products. In M. Sissons, J. Abecassis, B. Marchylo, & M. Carcea (Eds.), *Durum Wheat (Second Edition)* (pp. 161-175): AACC International Press.
- Putseys, J. A., Lamberts, L., & Delcour, J. A. (2010). Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. *Journal of Cereal Science*, *51*(3), 238-247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.011>
- Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. (2008). Chapter 5 Starch Gelatinization. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 55, pp. 221-268): Academic Press.

- Rocchetti, G., Lucini, L., Chiodelli, G., Giuberti, G., Montesano, D., Masoero, F., & Trevisan, M. J. F. R. I. (2017). Impact of boiling on free and bound phenolic profile and antioxidant activity of commercial gluten-free pasta. *100*, 69-77.
- Schoch, T. J. J. C. C. (1968). Preparation and properties of various legume starches. *45*, 564-573.
- Serna-Saldivar, S. J. C. G. P., Processing, & FL, N. A. C. P. B. R. (2010). Physical properties, grading, and specialty grains.
- Singh, J., Dartois, A., & Kaur, L. (2010). Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science & Technology*, *21*(4), 168-180. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.12.001>
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). Chapter 14 - Extrusion Processes for Foods. In R. P. Singh & D. R. Heldman (Eds.), *Introduction to Food Engineering (Fifth Edition)* (pp. 743-766). San Diego: Academic Press.
- Singh, S., Singh, N., Isono, N., Noda, T. J. J. o. a., & chemistry, f. (2010). Relationship of granule size distribution and amylopectin structure with pasting, thermal, and retrogradation properties in wheat starch. *58*(2), 1180-1188.
- Sissons, M. (2016). Pasta. In C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, & J. Faubion (Eds.), *Encyclopedia of Food Grains (Second Edition)* (pp. 79-89). Oxford: Academic Press.
- Solah, V. A., Fenton, H. K., & Crosbie, G. B. (2016). Wheat: Grain Structure of Wheat and Wheat-based Products. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 470-477). Oxford: Academic Press.
- Trevisan, S., Pasini, G., & Simonato, B. (2019). An overview of expected glycaemic response of one ingredient commercial gluten free pasta. *LWT*, *109*, 13-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.013>

- Tur, J. A., & Bibiloni, M. M. (2016). Functional Foods. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 157-161). Oxford: Academic Press.
- Vasanthan, T., Gaosong, J., Yeung, J., & Li, J. J. F. C. (2002). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *77*(1), 35-40.
- Wang, T., He, F., & Chen, G. J. J. o. F. F. (2014). Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review. *7*, 101-111.
- Watson, S. A., & Ramstad, P. E. (1987). *Corn: chemistry and technology*. Retrieved from
- Whistler, R. L., & Daniel, J. R. J. K. o. e. o. c. t. (2000). *Starch*.
- Zhao, Y. H., Manthey, F. A., Chang, S. K., Hou, H. J., & Yuan, S. H. J. J. o. F. S. (2005). Quality characteristics of spaghetti as affected by green and yellow pea, lentil, and chickpea flours. *70*(6), s371-s376.