



UNIVERSIDAD  
**SAN IGNACIO**  
**DE LOYOLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Carrera de Ingeniería Agroindustrial y Agronegocios**

**OBTENCIÓN DE HARINA NIXTAMALIZADA DE MAÍZ  
MORADO (ZEA MAYS L.) POR EXTRUSIÓN**

**Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial y  
Agronegocios**

**ROLANDO VINCES GUILLEN**

**VALERIA ZAVALA BUSTAMANTE**

**Asesor:**

**Fausto Cisneros Zevallos**

**Lima – Perú**

**2020**

## Índice de contenido

Introducción	4
Problema de investigación	5
Planteamiento del problema	5
Formulación del problema	6
Justificación de la investigación	6
Marco referencial	7
Antecedentes	7
Marco teórico	11
Generalidades sobre el maíz	11
Estructura del maíz	12
Composición y valor nutricional del maíz	13
Carbohidratos	13
Cambios fisicoquímicos estructurales en el Almidón	16
Proteínas	18
Lípidos, vitaminas y minerales	19
Antocianinas y otros compuestos fenólicos	19
Composición proximal maíz morado	21
Proceso tradicional de nixtamalización	22
Harinas nixtamalizadas industriales	22
Proceso de Extrusión	23
Funcionamiento básico del extrusor	24
Clasificación de extrusores	27
Extrusor de un tornillo	28
Extrusor de dos tornillos	29
Elaboración de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión	30
Cambios de los componentes en la Extrusión	31
Influencia de la extrusión en la calidad microbiológica	36
Evaluación del grano de maíz morado	37
Índice de flotación y peso en hectolitro del grano	37
Evaluación de la masa de harina nixtamalizada de maíz	39
Análisis del perfil de textura (TPA)	39
Equipo Analizador de Textura	39
Cohesividad	40
Adhesividad	40

Interpretación cohesividad y adhesividad TPA	41
Rapid Visco Analyzer (RVA)	42
Interpretación de las curvas de pasta del RVA	43
Objetivos e hipótesis	46
Objetivo general	46
Objetivos específicos	46
Hipótesis	46
Método	47
Abastecimiento de materia prima	47
Maíz morado orgánico variedad Canteño	47
Cal Hidratada / Hidróxido de Calcio (Ca (OH) <sub>2</sub> )	47
Harina nixtamalizada marca MINSA	48
Análisis de la materia prima	48
Análisis químico	48
Análisis físico	49
Preparación harina de maíz morado	49
Preparación harina de maíz nixtamalizada comercial	50
Procesamiento para la obtención de harina nixtamalizada de maíz morado	50
Acondicionamiento de la harina de maíz morado	50
Nixtamalización por extrusión de la harina de maíz morado	51
Diseño Experimental	53
Evaluaciones fisicoquímicas	54
Contenido de Humedad	54
Prueba Rapid Visco Analyzer (RVA)	54
La capacidad de absorción de agua (CAA)	54
Evaluación adhesividad y cohesividad	54
Análisis Estadístico	54
Resultados y Discusión	55
Conclusiones	70
Recomendaciones	71
Referencias	72
Anexos	80

## Introducción

La harina nixtamalizada de maíz es la materia prima utilizada en la elaboración de productos como tortilla *chips*, tortillas de maíz y tacos. El incremento de la popularidad de estos aperitivos entre los consumidores ha generado un crecimiento importante en la industria de *snacks* a nivel mundial. Las dos compañías productoras más grandes de harina nixtamalizada de maíz ubicadas en México expandieron operaciones hacia Estados Unidos, Centro América y Europa (Bello Peres, Osorio Díaz, Agama Acevedo, Nuñez Santiago, & Paredes Lopez, 2002). La estabilidad de su vida útil durante almacenamiento, los requerimientos mínimos para su procesamiento y la reducción de costos comparados con el manejo directo de las mazorcas de maíz son las ventajas prácticas que la industria valora para utilizar la harina nixtamalizada (Milán-Carrillo, Gutierrez-Dorado, Cuevas-Rodríguez, Garzon-Tiznado, & Reyes-Moreno, 2004).

Todos los métodos de nixtamalización se basan en un proceso térmico-alcálico donde las macromoléculas presentes en el endospermo sufren mayor alteración, produciéndose importantes cambios en la morfología y características reológicas del almidón (Mendez-Montealvo, Garcia-Suarez, Paredes-Lopez, & Bello-Perez, 2008) y desnaturalización de la proteína (Rojas-Molina, Gutiérrez, & Cortés-Acevedo, 2008).

La harina nixtamalizada de maíz producida por el método tradicional se obtiene mediante un proceso de cocción de los granos en solución de hidróxido de calcio, seguido por operaciones de lavado, pelado, deshidratación y molienda (Reyes-Moreno, et al., 2008). Sin embargo, el problema del método tradicional radica en la gran cantidad de agua utilizada y los efluentes alcalinos resultantes del procesamiento. (Milán-Carrillo, Gutierrez-Dorado, Cuevas-Rodríguez, Garzon-Tiznado, & Reyes-Moreno, 2004). Se han propuesto tecnologías alternativas para la producción de harina nixtamalizada de maíz, como microondas (Martinez Bustos, Garcia, Chang, & Sanchez, 2000) y extrusión (Milán Carrillo, Perales Sanchez, Cuevas Rodriguez, Ramirez Wong, & Reyes Moreno, 2006). La principal ventaja que ofrece la tecnología de extrusión es la casi nula generación de aguas residuales y la retención de nutrientes asociados con la posibilidad de emplear el grano entero, eliminando la operación de pelado (descarte del pericarpio). Adicionalmente los efectos del proceso de extrusión permiten la retención de compuestos fenólicos y antioxidantes de los maíces pigmentados (Aguayo-Rojas, Mora-Rochin, Cuevas-Rodríguez, & Serna-Saldivar, 2012).

## **Problema de investigación**

### **Planteamiento del problema.**

La mazorca de maíz morado con un contenido de humedad de 10% (g agua/ 100 g de producto) se encuentra constituida aproximadamente de 82% granos y 18% coronta (MAIA SAC, 2015). La mayor concentración de pigmentos antociánicos se encuentra en la coronta (Lao & Giusti, 2019), y es la parte utilizada para la obtención eficiente del colorante de maíz morado. Sin embargo, como fue reportado por Lavado, Ruez & Robles (2013) en ocasiones el maíz morado es utilizado de forma integral para la extracción del colorante, es decir, sin separar los granos de la coronta. En la experiencia de Wasi Organics® este uso ineficiente del recurso está relacionado a la tecnología instalada para la extracción del colorante, y en la incapacidad de rentabilizar el grano; considerando los costos de desgranado y almacenamiento (MAIA SAC, 2015).

De acuerdo a cifras del Ministerio de Agricultura y Riego, la demanda de colorante de maíz morado ha aumentado diez veces en dos años, incrementándose de 108 mil US dólares en el 2013 a 1 244 mil US dólares en el 2015 (MINAGRI, 2017). Considerando las inadecuadas prácticas de manejo post cosecha del grano, y que gran parte de la extracción del pigmento se realiza a partir de la mazorca entera, se estima que durante el periodo mencionado 1 200 toneladas de grano de maíz morado (valorizado en 2.5 millones de soles) fue desechado debido a un incorrecto manejo post cosecha, vendido para alimentación animal o mermado luego de la extracción del pigmento (MAIA SAC, 2015).

La información económica presentada por Wasi Organics® y otras empresas del rubro durante las reuniones de elaboración de la Norma Técnica Peruana - MAÍZ AMILÁCEO. Mazorcas de maíz morado 2016; concluyó la necesidad de desarrollar procesos tecnológicos generadores de valor agregado para los granos de maíz morado, con la finalidad de obtener un producto útil para la industria de alimentos.

## **Formulación del problema.**

¿Es posible dar valor agregado a los granos de maíz morado obteniendo harina nixtamalizada extruida con características fisicoquímicas similares al testigo comercial importado por Wasi Organics®?

## **Justificación de la investigación.**

- Reducir el costo de producción de la línea tortilla chips de Wasi Organics®

Wasi Organics® realiza contratos de importación de harina nixtamalizada de maíz para la producción de tortilla chips. En el último año (periodo agosto 2017 – setiembre 2018) la cantidad de harina importada de México fue de aproximadamente 10 toneladas. De acuerdo a las estimaciones evaluadas por Wasi Organics®, una sustitución de la harina importada por harina producida localmente generaría una reducción de 8% en el costo de producción.

- Consolidar la cadena productiva del maíz morado en el Perú

La producción de harina nixtamalizada abre un nuevo mercado para el grano de maíz morado, no solo en el Perú sino también en los mercados internacionales. Actualmente Wasi Organics® compra un promedio de 4 toneladas anuales de grano de maíz morado. Con la implementación de la tecnología de nixtamalización se estima que la compra incrementaría de 30 a 40 toneladas anuales, ofreciendo una salida de mercado al grano de maíz morado que hoy en día se subvalora.

- Incrementar el indicador de impacto social de Wasi Organics® evaluado por ACUMEN para el periodo 2019.

ACUMEN es un fondo de inversión sin fines de lucro con 17 años de experiencia invirtiendo en empresas que incorporan un gran número de familias de bajos ingresos a su proceso de negocio (ACUMEN, 2018). Wasi Organics® adquiere la materia prima de asociaciones de agricultores del Perú, con los que trabaja en términos de comercio justo y producción orgánica certificada. Su modelo de negocio consiste en incorporar asociaciones de agricultores en la cadena de abastecimiento (MAIA SAC, 2018). El maíz morado es la materia prima que genera mayor impacto en el indicador social evaluado por ACUMEN (MAIA SAC, 2018).

- Reducir el consumo de agua y efluentes contaminantes del método tradicional

El método de nixtamalización por extrusión, a diferencia del método tradicional, reduce drásticamente el consumo de agua durante la operación y no produce efluentes (Platt-Lucero, y otros, 2012). Los efluentes del método tradicional son considerados altamente contaminante debido a su alta demanda biológica de oxígeno (2692-7875 mg O<sub>2</sub>/L), alta demanda química de oxígeno (10200-22000 mg O<sub>2</sub>/L) y pH básico (10.5- 11.2) (Ramírez Romero, Reyes-Velazquez, & Cruz-Guerrero, 2013).

## **Marco referencial**

### **Antecedentes.**

**Gómez, Waniska & Rooney (1991)** establecen uno de los primeros antecedentes sobre la caracterización fisicoquímica de la harina nixtamalizada. Los investigadores analizaron la distribución del tamaño de partícula, composición y funcionalidad de las harinas comerciales utilizadas para la elaboración de tortillas y tortillas chips. Por otro lado evaluaron las diferencias y cambios de solubilidad, cristalinidad y microestructura del almidón en granos, nixtamal (granos de maíz con tratamiento térmico alcalino), masa (nixtamal triturado) y harina de maíz nixtamalizada; complementándolos con el estudio reológico de la masa de harina nixtamalizada. Los resultados establecieron una relación entre el tamaño de partícula y la funcionalidad de la harina, corroborando lo investigado por Montemayor y Rubio (1983); respecto que las tortillas suaves requieren tamaños de partícula fina en la harina (58% de partículas menores a 250 µm) mientras que la tortilla chips requiere tamaños de partícula gruesa (77.1 % de partículas mayores a 250 µm).

**Martinez - Flores, Martinez - Bustos, C.J., & Gonzales Hernández (1998)** estudiaron el efecto del tipo de moliendo (molienda de cuchillos y molienda de martillos) y granulometría de la harina (malla 500µ y 800µ) sobre las propiedades de la masa obtenida por el método extrusión de dos tipos de maíces (maíz dentado y maíz amiláceo). Los investigadores correlacionaron los efectos del daño del almidón, adhesividad y pico de viscosidad; determinando que al dañarse los gránulos de almidón durante la molienda, se modifica su estructura y las zonas cristalinas se convierten en estructuras molecularmente desorientadas. Adicionalmente el almidón dañado y la excesiva temperatura durante la extrusión resultan en una masa pegajosa con características de adhesividad indeseables. Los investigadores estudiaron: el daño del almidón empleando el método de Williams y Fegol (1969), la viscosidad relativa empleando un Rapid Visco Analyzer y la textura de la masa utilizando un texturometro. Los resultados obtenidos con el Rapid Visco Analyzer

fueron reportados en “*Relative Viscosity units (RVU)*” por una metodología diferente al empleado por Gómez, Lee, McDonough, Waniska & Rooney (1992). Los investigadores concluyeron que tanto el maíz dentado molido con martillos - malla de 800 $\mu$  y el maíz amiláceo molido con cuchillas - malla de 500 $\mu$ ; sometidos a extrusión con una hidratación de 60%, adicionando hidróxido de calcio al 0.25% (m/m) con temperatura de cámara de 80°C, velocidad de tornillo 35 rpm y ratio de compresión 1:1; se obtiene una masa con humedad de 51% con las que se pueden producir tortillas con características de resistencia a la tracción y rolabilidad similares a las tortillas producidas con la nixtamalización tradicional. Finalmente los investigadores postularon a correlacionar la calidad de las tortillas producidas por extrusión con el daño del almidón durante la molienda y extrusión. Así mismo establecen que el daño del almidón se ve reflejado en la propiedad de adhesividad de la masa y pico de viscosidad.

**Gómez – Aldapa, C.; Martínez – Bustos, F.; Figueroa, C.J.D. & Ordorica, F.C. (1999)** estudiaron la calidad nutricional de las tortillas de maíz preparadas a partir de dos muestras de harina elaborada con 0.15 y 0.25% de hidróxido de calcio por el método de extrusión. Los resultados obtenidos fueron comparados con la calidad nutricional de las tortillas preparadas por el método tradicional de nixtamalización. Aunque los investigadores se centraron en la evaluación de la calidad nutricional por ensayos químicos y biológicos, el aporte más importante para la presente investigación fue la elaboración de uno de los primeros flujos de proceso para la producción de harina nixtamalizada por el método de extrusión (figura1).

**Gutiérrez – Dorado, R.; Ayala – Rodríguez, A.E.; Milán – Carrillo, J.; López- Cervantes, J.; Garzón Tiznado, J.A.; López – Valenzuela, J.A.; Paredes- López, O. & Reyes- Moreno, C. (2008)** estudiaron las propiedades tecnológicas y nutricionales de tortillas elaboradas a partir de harina nixtamalizada tradicional y harina nixtamalizada por extrusión; comparándolas con las tortillas producidas con harina de la marca comercial MASECA. De la presente investigación se resalta el método descrito para la determinación del índice de absorción de agua (WAI) y los parámetros recomendados para la producción de harina nixtamalizada por el método de extrusión. Adicionalmente los valores resultantes de la evaluación de composición proximal (proteína, fibra, carbohidratos, cenizas y grasa) de la harina nixtamalizada tradicional, harina nixtamalizada por extrusión y harina comercial MASECA servirán como referentes para la presente investigación.

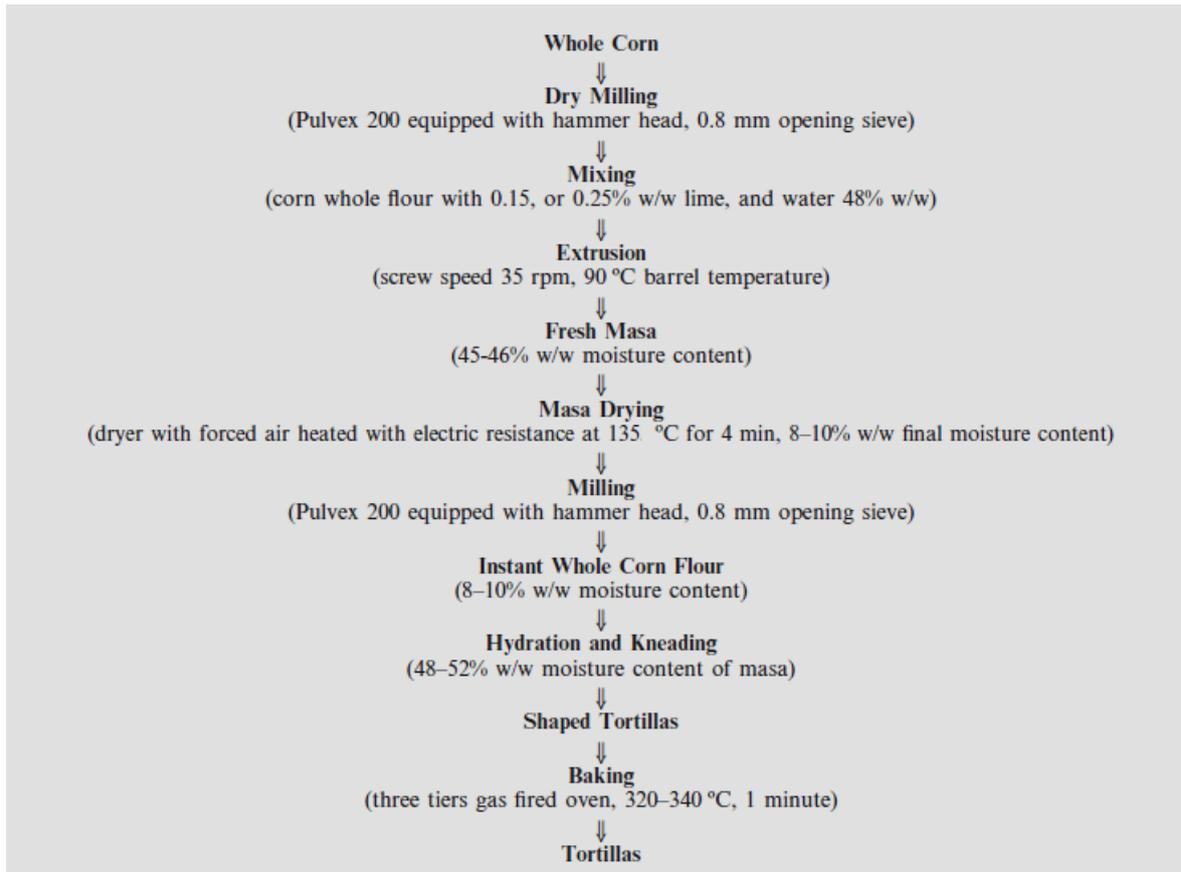


Figura 1. Flujo de proceso para la producción de harina nixtamalizada por el método de extrusión

**Platt – Lucero, L. C.; Ramírez – Wong, B.; Torres – Chávez, P. I.; López – Cervantes, J.; Sánchez – Machada, D. I.; Reyes – Moreno, C.; Milán Carillo, J. & Morales – Rosas, I. (2010)** estudiaron la distribución de tamaño de partícula, capacidad de absorción de agua (WAC) y índice de absorción de agua (WAI) de la harina nixtamalizada de maíz blanco obtenida por el método de extrusión (HNME) añadiendo diferentes formulaciones de hidrocoloides (goma xantán, carboximetilcelulosa y goma guar). Adicionalmente estudiaron la humedad y características visco elásticas en la masa. La conclusión más importante para la presente investigación fue que la HNME con goma xantán (0.25% w/w) y mezcla de gomas (xantán 0.25% w/w, carboximetilcelulosa 0.15% y guar 0.10% w/w) tuvieron los mayores valores de índice de absorción de agua. Esta propiedad se encuentra relacionada con adecuadas características de textura y “*machinability*” (grado de facilidad de la masa en ser trabajada en un equipo laminador cortado) en la masa. La masa obtenida de la harina nixtamalizada por método de extrusión (HNME) fue validada a nivel de planta comercial consiguiendo un desempeño correcto.

**Platt – Lucero, L. C.; Ramírez – Wong, B.; Torres – Chávez, P. I.; López – Cervantes, J.; Sánchez – Machada, D. I.; Carbajal - Millán, E.; Martínez – Bustos, F.; Quintero-Ramos, A. & Morales – Rosas, I. (2011)** estudiaron el impacto de la adición de la enzima xilanasa en diferentes concentraciones (0.05, 0.075 y 0.1% w/w) sobre las propiedades de capacidad de absorción de agua (WAC) y índice de absorción de agua (WAI) en la harina nixtamalizada obtenida por el método de extrusión (HNME). Las harinas que contenían xilanasa mostraron un significativo mayor valor de WAC ( $P < 0.05$ ) que las harinas sin xilanasa. Los parámetros de viscosidad se incrementaron con la adición de la enzima, lo que también contribuyó a la reducción de la dureza e incremento de la flexibilidad en tortillas. Las tortillas de maíz con 0.075 y 0.1% de xilanasa fueron 15% más blandas que el control (sin xilanasa). Adicionalmente las tortillas producidas con HNME que contenían la enzima fueron aceptadas en la prueba organoléptica.

**Contreras-Jiménez, B.; Morales-Sánchez, E.; Reyes-Vega, M. & Gaytán-Martínez M. (2014)** estudiaron el efecto de la temperatura sobre las propiedades funcionales de la harina de maíz obtenidas por el método de extrusión comparada con la obtenida en el proceso de nixtamalización tradicional. Los tratamientos de extrusión consistieron en: temperatura de 70, 75 y 85 °C, humedad de 45, 55 y 65% p/p; y tamaño de partícula de 500, 800 y 1300 µm. De acuerdo a los datos obtenidos en ANOVA, la temperatura afecta significativamente las propiedades: capacidad de absorción de agua (WAC) e índice de absorción de agua (WAI), adhesión y viscosidad. Una temperatura menor a 80°C favorece a una alta viscosidad y textura adecuada. Por otro lado el análisis de componentes principales determinó que la harina con partícula de 1300 µm presenta propiedades de pasta similares a la harina nixtamalizada pero con alta retrogradación. La harina extruida con 75°C, 800 µm de partícula y 45% de humedad presentó capacidad de absorción de agua (WAC), índice de absorción de agua (WAI) y textura semejante a la harina de maíz nixtamalizada tradicional, pero con menor viscosidad.

## **Marco teórico.**

### **Generalidades sobre el maíz**

El maíz es originario del continente americano, específicamente de Mesoamérica, aunque su domesticación pudo realizarse en forma autónoma en varios puntos del continente. Evidencias arqueológicas en Michoacán, Tamaulipas, Tehuacán y el Valle de Oaxaca ponen de manifiesto que el proceso de domesticación del maíz sucedió en México. Los primeros cultivos datan de hace unos 8000 años (Dirección General de Culturas Populares , 1987).

Desde hace más de 100 años diversas teorías han sido expuestas para explicar el origen y la evolución del maíz. Una de las teorías principales es la del teocintle y algunas de sus variantes, la cual sugiere que el maíz desciende directamente de su pariente más cercano, el teocintle (*Euchlaema mexicana*, ahora *Zea mexicana*) por selección directa, por mutación o por la cruce del teocintle con algún pasto desconocido y actualmente extinto. De México se expandió el cultivo del maíz a diferentes partes del continente incluida sur América (Mangelsdorf, 1986).

Con relación al maíz morado, Paucarima (2007) menciona lo dicho por Fopex (1985), respecto que hay diversas variedades de maíz morado, todas ellas provenientes de una raza ancestral denominada "KCULLI" (negro), los investigadores han encontrado restos arqueológicos en Paracas, Nazca y otros lugares de la costa central, cuya antigüedad se estima cercana al 2500 años A.C.

Existen diversos tipos de maíz morado, entre los cuales podemos encontrar los siguientes (Paucar Menacho, 2011):

- Morado Canteño: variedad nativa, altura de 1,8-2,5 m, floración a los 110-125 días.
- Morado Caraz: usado para siembra en sierra.
- Morado mejorado (derivados de Caraz): PVM-581, para siembra en sierra media; PVM-582, para costa central, altura cercana a los 2m, precocidad de floración masculina, 90 a 100 días.
- Arequipeño (variedad Tradicional), color no intenso, presenta mucha variabilidad puede ser mejorado, es más precoz que los anteriores.
- Cusco morado: tardío, granos grandes dispuestos en mazorcas de hileras bien definidos.
- Negro de Junín: en la sierra centro y sur llegando hasta Arequipa.

## Estructura del maíz

El grano de maíz botánicamente es una cariósipide, baya de semilla seca donde la cascara de la fruta está fusionada a la semilla formando un solo grano. Los granos maduros contienen cuatro partes principales (Fig. 2): (1) El pericarpio (cáscara o salvado) que es una capa de células fibrosas que está cubierta por la cutícula, la cual es una capa impermeable cerosa que recubre al grano. El pericarpio constituye cerca del 5.3 % del peso del grano; (2) El germen representa el 11.5% del peso del grano. Sus partes principales son el escutelo y el embrión y almacena los nutrientes que son utilizados para la germinación. (3) El endospermo representa el 83 % del peso del grano y presenta un alto contenido de almidón. Su capa exterior es una capa de aleurona la cual contiene células con gránulos ricos en proteína y minerales. Los gránulos de almidón de sus células, que presentan una forma elipsoidal y angular (poligonales, hexagonales), están cubiertos por una matriz proteínica con pequeños cuerpos de la misma naturaleza incrustados en la superficie. Y (4) pedicelo o capa terminal es la continuación del pericarpio y permite la unión del grano con la coronta. Esta estructura es responsable de la absorción de líquidos del pedicelo al pericarpio (Watson, 1987).

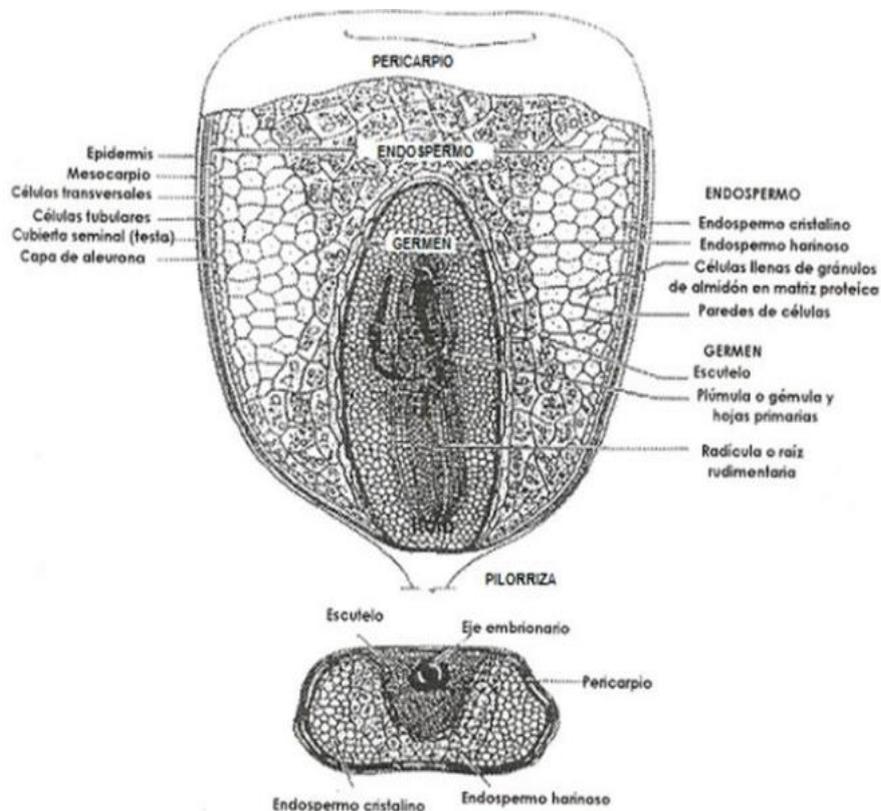


Figura 2. Estructura del grano de maíz (Watson, 1987).

## **Composición y valor nutricional del maíz**

El maíz como la mayoría de los cereales es una fuente muy importante de energía, esto debido a que el componente principal de este cereal es el almidón (60 a 70% en base seca). Sin embargo es una fuente proteica de baja calidad, y también es deficiente en niacina, vitamina del complejo B sintetizada a partir del triptófano (Gutierrez Dorado, 2017).

Los principales componentes químicos del grano son: Almidón, proteínas, lípidos, fibra y cantidades menores de azúcares, minerales y vitaminas (Watson, 1987).

### **Carbohidratos**

El componente principal del grano de maíz es el almidón el cual presenta un promedio de 71.5% del peso del grano y prácticamente todo se encuentra ubicado en las células del endospermo (Watson, 1987). La arquitectura cristalina de los gránulos de almidón es generalmente similar en todas las plantas, su tamaño en el maíz es de 15 nm de forma esférica y poliédrica (Jekins, Camerom, & Donald, 1993). El granulo de almidón se describe físicamente como un material semicristalino, formado por una región cristalina de un elevado orden molecular, y por una región amorfa con poco orden molecular. La región cristalina es más resistente al ataque químico o enzimático que la región amorfa. En la región cristalina hay mayor cantidad de amilopectina, y en la región amorfa hay mayor cantidad de amilosa (Gonzales, 2006).

El almidón es metabolizado en la planta por la condensación progresiva de unidades de glucosa, cuya función es la de reserva energética. El almidón está constituido por dos tipos de moléculas: un polímero lineal que es la amilosa y un polímero ramificado que es la amilopectina, las que se diferencian en peso molecular y estructura química. Generalmente se encuentran en las siguientes proporciones: 24 a 27% de amilosa y de 73 a 79% de amilopectina dentro del granulo del almidón (Schoch & Elder, 1955).

La amilosa tiene un grado de polimerización de hasta 600 unidades de glucosa unidas mediante enlace  $\alpha$  (1-4) (Perez, Baldwin, & J. Gallant, 2006) y tiene cierta tendencia a orientarse paralelamente mediante puentes de hidrogeno (Harper M. , 1991).

La Amilopectina es el otro componente del almidón y es uno de los polímeros ramificados de mayor peso molecular existente. La amilopectina está compuesta por unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-4) y contiene alrededor de 5% de puntos de ramificación con enlace  $\alpha$  (1-6) lo que le otorga propiedades físicas y biológicas diferentes a las de la amilosa. Al analizar la macromolécula de la amilopectina (figura 3) resulta aparente

identificar diferentes poblaciones de cadenas poliméricas que se pueden clasificar en cadenas cortas ( $12 < DP < 20$ ), cadenas largas ( $30 < DP < 45$ ) y cadenas bastante largas ( $DP > 60$ ). Las cadenas adicionalmente se pueden clasificar como cadena tipo “A”, “B” o “C”. La cadena tipo A no lleva ninguna cadena, la cadena tipo B lleva una o más cadenas y la cadena tipo C es la originaria llevando la base del grupo reductor (Perez, Baldwin, & J. Gallant, 2006).

Para Perez, Baldwin, y Gallant (2006) se ha logrado un progreso sustancial en la comprensión de la estructura básica de la amilopectina. Aunque la estructura tridimensional en el gránulo aún no se conoce.

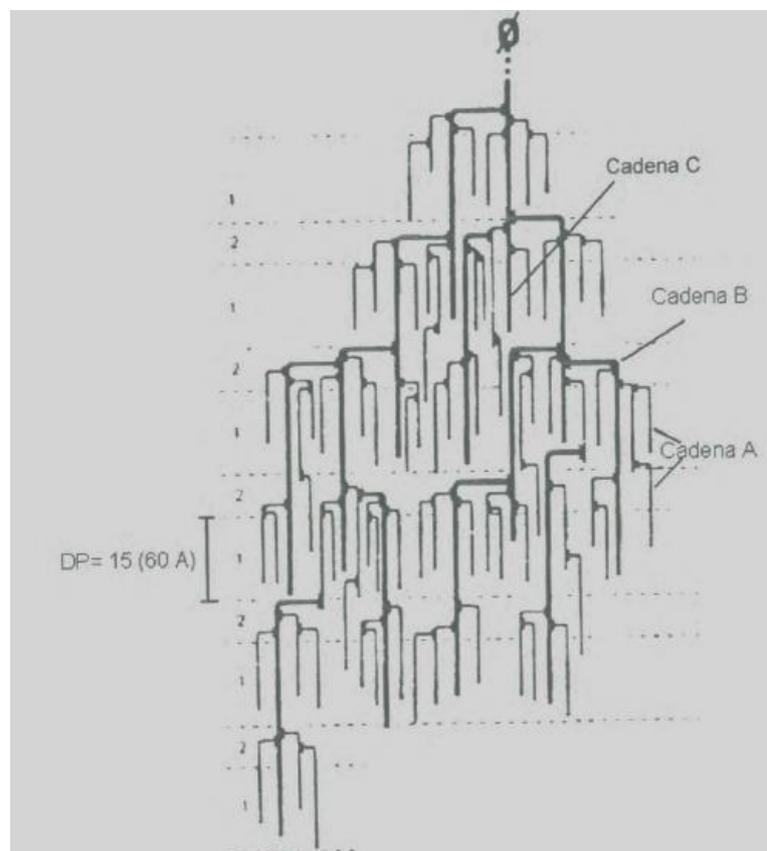


Figura 3. Modelo propuesto para la amilopectina (Gonzales, 2006).

Con la emergente tecnología del microscopio de fuerza atómica y otras evidencias basadas en técnicas no microscópicas se ha propuesto el nivel de estructura denominado de bloque para la estructura del gránulo de almidón. La evidencia hasta la fecha a favor del concepto de estructura de bloque en los gránulos de almidón indica que las amilopectinas se organizan en bloques efectivamente esféricos que varían en diámetro desde 20 a 500 nm, dependiendo del tipo botánico de almidón y su ubicación en el gránulo. Esta organización encaja con el conocimiento actual de la estructura de gránulos de almidón y se representa

esquemáticamente en la Figura 4. Los bloques grandes en el almidón de patata parecen predominar cerca de la superficie de la granula. En consecuencia, se ha planteado la hipótesis de que, si bien la resistencia de los gránulos parece estar vinculada a varios factores que interactúan, el tamaño de los bloqueos (es decir, el grado de cristalinidad local) puede jugar un papel en la resistencia de los gránulos de almidón a la hidrólisis catalizada por ácidos y enzimas (Perez, Baldwin, & J. Gallant, 2006).

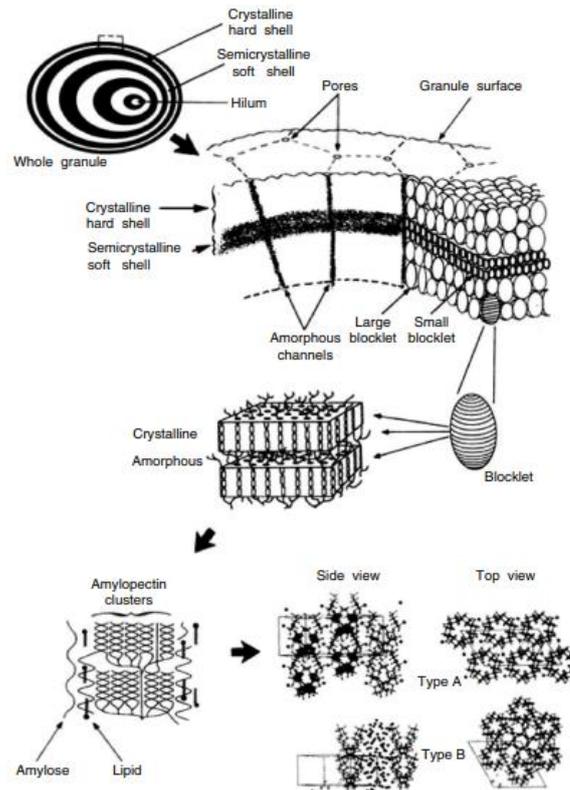


Figura 4. Panorámica de la estructura granular del almidón. En el nivel más bajo de organización de gránulos (arriba a la izquierda), Se muestran alternativamente cáscaras cristalinas (duras) y semicristalinas (suaves) (colores oscuros y claros, respectivamente). En un nivel más alto de la estructura, la estructura de bloque es mostrada en asociación con canales radiales amorfos. El tamaño del bloque es menor en la capa semicristalinas que en las capas cristalinas. En el siguiente nivel más alto de estructura, se muestra un bloque que contiene varias láminas cristalinas amorfas. En el siguiente diagrama, la amilopectina se muestra en las laminillas. La siguiente imagen es un recordatorio de la importancia de los componentes de amilosa-lípidos (y proteínas) en la organización de las cadenas de amilopectina. En el nivel más alto de orden, se muestran las estructuras cristalinas de los polímeros de almidón (Perez, Baldwin, & J. Gallant, 2006). Hasta hace poco, la ubicación y el estado de la amilosa dentro de los gránulos de almidón era una de las mayores preguntas por responder. Tres hipótesis principales se han

presentado para explicar la localización de la amilosa dentro de los gránulos de almidón. La primera hipótesis es que la amilosa se coloca tangencialmente a la orientación radial de la amilopectina para minimizar las interacciones helicoidales de amilosa-amilopectina sin embargo, no existe una base experimental para dicho modelo, que simplemente considera la necesidad que la amilosa y la amilopectina tengan interacciones helicoidales mínimas. Las otras dos hipótesis defienden la deposición radial de la amilosa, ya sea en paquetes o como cadenas individuales, que se intercalan aleatoriamente entre grupos de amilopectina en regiones tanto cristalinas como semicristalinas. De las tres hipótesis, la tercera hipótesis parece ser la más sostenible, ya que se ha demostrado, a través de un experimento de entrecruzamiento utilizando almidón de maíz, que las moléculas de amilosa no se entrecruzan entre sí, pero si se enlacen a las cadenas de amilopectina. El modelo de amilosa actualmente aceptado de su ubicación en los gránulos de almidón es, por lo tanto, como cadenas individuales, orientadas radialmente, distribuidas al azar entre las cadenas de amilopectina radiales.

Adicionalmente ahora hay evidencia sustancial que indica que hay un enriquecimiento de amilosa hacia la periferia del gránulo y que las moléculas de amilosa encontradas cerca de la superficie del gránulo tienen longitudes de cadena más cortas que las localizadas más cerca del centro del gránulo. Se ha demostrado que la mayoría de la amilosa en los gránulos puede ser lixiviada de los gránulos a temperaturas justo por debajo de la temperatura de gelatinización. Además demostraron que la mayoría de las cadenas de amilosa lixivadas estaban en un estado helicoidal simple, en lugar de en una doble hélice por lo tanto, se cree que el estado helicoidal único es el estado predominante de la amilosa (Perez, Baldwin, & J. Gallant, 2006).

### **Cambios fisicoquímicos estructurales en el Almidón**

La amilosa y amilopectina le confieren diferentes propiedades en su conjunto al granulo de almidón y generalmente se considera para determinar la aplicación de los productos obtenidos a partir de este, las propiedades más importantes son:

- **Absorción de agua:** El almidón en agua fría se hidrata hasta alcanzar el equilibrio con el medio circundante y el proceso es reversible. En presencia de agua caliente la absorción es función de la elasticidad y fuerza de unión entra la amilopectina y amilosa. Cuando los enlaces son hidrolizados a la temperatura de gelatinización el proceso es irreversible (Gonzales, 2006).

- **Gelatinización:** Es el colapso (rompimiento) del orden molecular dentro del granulo de almidón manifestado en cambios irreversibles en propiedades como el hinchamiento de los gránulos, fusión de la cristalinidad nativa, perdida de birrefringencia, y solubilización del almidón (lixiviación de polisacáridos). El punto (temperatura) de inicio de la gelatinización y la intensidad con la que se lleva acabo depende de la concentración del almidón, del tipo de almidón y la heterogeneidad de los gránulos. Este fenómeno ocurre a una temperatura menor cuando los gránulos son de diámetros pequeños por lo que existe un intervalo de temperatura de gelatinización de aproximadamente 10°C (Gonzales, 2006). El proceso de gelatinización depende de gran medida de la energía (temperatura) aplicada, esto implica cambios significativos en las propiedades fisicoquímicos del almidón, así como también en la difusividad del agua y calor, viscosidad, comportamiento reológico y susceptibilidad a la digestión enzimática (Riva, 1991). Cuando una suspensión de almidón se somete a un calentamiento en presencia de agua; en las primeras etapas los gránulos se irán hinchando por la absorción de agua, pero conservarán aun sus propiedades de birrefringencia. Posteriormente, se llegará a una temperatura en la que los gránulos se hincharan rápidamente hasta llegar a un punto en el que algunos exhibirán un hinchamiento irreversible, se continua con el calentamiento se observara que durante un estrecho intervalo de temperaturas, la población completa de gránulos se convertirá en un gel. Conforme se calienta la suspensión de gránulos de almidón, existe un incremento en la viscosidad y solubilidad del mismo. El incremento de la viscosidad se debe a un aumento de tamaño de los gránulos ejerciéndose una presión entre ellos por la absorción de agua. Los gránulos de almidón de maíz son elásticos y fácilmente deformables, esto da a la pasta cocida una alta cohesividad y extensibilidad. Si la suspensión de gránulos se calienta a una temperatura superior a la de gelatinización, la viscosidad de la pasta seguirá incrementándose debido que la cantidad de amilosa expulsada y el tamaño de los gránulos cada vez será mayor. Sin embargo, este incremento en la viscosidad presenta un valor máximo (alrededor de los 100°C), después de la cual la viscosidad comenzara a disminuir en forma gradual, aun cuando la temperatura de la pasta siga aumentando. Esta disminución de la viscosidad se debe a la desintegración de los gránulos hinchados (Gonzales, 2006).
- **Retrogradación:** Se puede definir como un proceso que ocurre cuando las moléculas previamente gelatinizadas de almidón comienzan a re asociarse en una estructura ordenada formando un gel rígido. Dicho fenómeno ocurre debido a la formación de puentes de hidrogeno por la amilosa con puentes hidroxilo de

moléculas adyacentes, por lo que la misma amilosa va perdiendo la capacidad de hidratación con respecto a su estado inicial. La unión por puentes de hidrogeno se incrementa hasta alcanzar un tamaño determinado que provoca una precipitación como cristales de almidón. Un almidón retrogradado es más difícil que solubilice, presenta baja afinidad por los iones y no es fácilmente hidrolizado por enzimas. La retrogradación es más significativa en la fracción de amilosa que en la amilopectina debido a que su estructura lineal permite una mayor cohesión entre los gránulos de almidón (Harper M. , 1991). En forma física, este fenómeno se presenta cuando una suspensión de almidón gelatinizado es sometida a un calentamiento y después a un enfriamiento, dando lugar a un gel rígido (Gonzales, 2006).

- **Dextrinización:** Muchos alimentos expandidos son preparados por extrusión (condiciones de elevada fuerza de corte mecánica y bajas condiciones de humedad). La dextrinización es definida como la hidrolisis parcial del almidón. Para comparar las propiedades fisicoquímicas del almidón de maíz crudo, gelatinizado, dextrinizado y extruido, Gómez y Aguilera (1984), mostraron que los productos extruidos de maíz pueden ser visualizadas como materiales mixtos de gelatinización y dextrinización (Gonzales, 2006).

### **Proteínas**

Las proteínas constituyen aproximadamente de 6 a 10% de proteína en el grano completo, y se localizan principalmente en el endospermo y el germen. De acuerdo a su solubilidad se clasifican en: albuminas (solubles en agua), globulinas (solubles en soluciones salinas), prolaminas o zeínas (solubles en etanol 70 – 80%) y glutelinas (solubles en hidróxido de sodio). Cuantitativamente las proteínas predominantes en el maíz son una familia de prolaminas (80 – 90%) y aunque por su solubilidad cabría esperar una menor digestibilidad, su localización preferente en el endospermo (proteína de reserva) tiende hacerlas más accesible a la hidrolisis enzimática (Gonzales, 2006).

### **Lípidos, vitaminas y minerales**

El contenido de lípidos del maíz representa aproximadamente el 4.4% del peso total del grano, y de éstos el 87% se encuentran localizados en el germen. Estos lípidos se encuentran principalmente como triglicéridos, fosfolípidos, esteroides, tocoferoles y carotenoides. El contenido de ácidos grasos saturados (ácido palmítico y esteárico) es bajo

en comparación con los ácidos grasos poliinsaturados, principalmente oleico y linoleico, los cuales representan la mayoría del total de los lípidos contenidos en el maíz (Gonzales, 2006). El maíz contiene dos vitaminas liposolubles A y E. El contenido de vitamina A es genéticamente variable, generalmente en un promedio de 2.5 mg/kg de peso seco. Las vitaminas hidrosolubles tiamina (B1) y piridoxina se encuentran presentes en cantidades considerables, 3.8 y 5.3 mg/kg de peso seco, respectivamente. La niacina se localiza en elevadas concentraciones (28 mg/kg de materia seca), aunque ésta se halla enlazada, de tal forma que se encuentra indisponible para los animales monogástricos. Sin embargo, el tratamiento alcalino la hace disponible. La concentración de minerales en el grano de maíz es aproximadamente de 1.4%. Donde el 78% de éstos están contenidos en el germen del grano, probablemente porque son esenciales durante el crecimiento del embrión. El mineral que más abunda es el fósforo. El pericarpio se caracteriza por un elevado contenido de fibra cruda, aproximadamente el 87%, la que a su vez está formada fundamentalmente por hemicelulosa (heteroxilanos o pentosanos y  $\beta$ -glucanos), con un 70%, celulosa con 23% y lignina con 0.1%. La fibra dietética se halla en un 9.8% del grano entero (Gonzales, 2006).

### **Antocianinas y otros compuestos fenólicos**

La presencia de antocianinas y otros compuestos fenólicos es lo que diferencia al maíz morado de otras variedades de maíz convencional, haciéndolo destacar como un alimento que promueve la salud. La antocianina típica y el perfil fenólico del maíz morado se muestran en la Figura 5a. El contenido fenólico total del maíz morado andino, según lo determinó el ensayo de Folin-Ciocalteu, es de aproximadamente 1756 mg / 100 g de equivalentes de ácido gálico FW, mucho más alto que el contenido de arándanos ricos en fenólicos que contienen 138 a 672 mg / 100 g FW (Prior y otros 1998; Cevallos, Casals y Cisneros - Zevallos 2003). Montilla y otros (2011) compararon los compuestos fenólicos solubles y unidos en diferentes cultivares de maíz bolivianos y mostraron que el maíz con matices más oscuros tendía a contener concentraciones fenólicas más altas. A menudo se encontraron correlaciones dependientes de la dosis entre la cantidad de estos compuestos funcionales de maíz morado y ciertas propiedades que promueven la salud (Lao, Gregory, & Giusti, 2017).

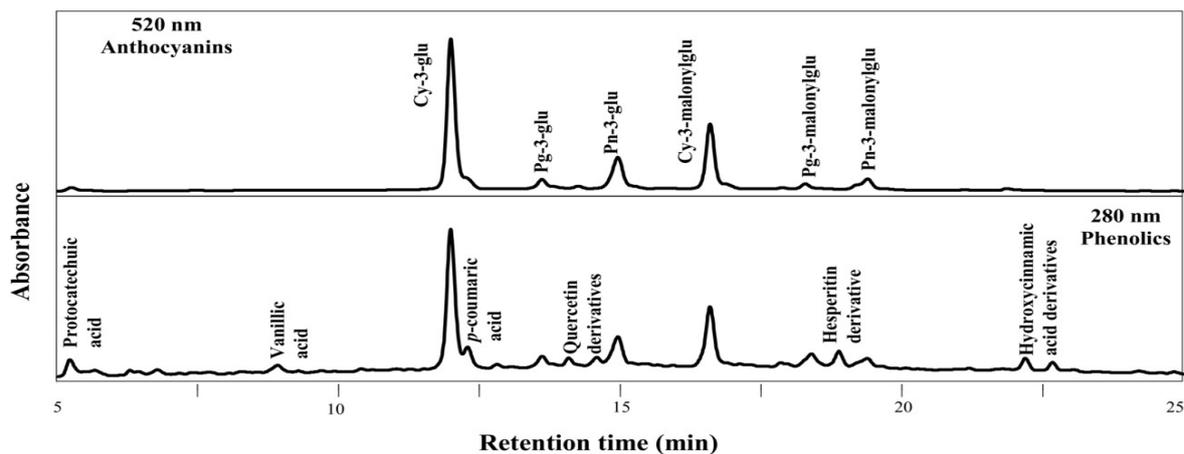
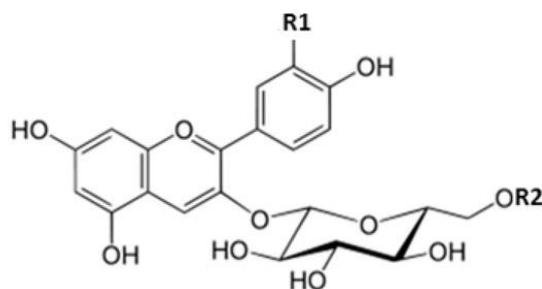


Figura 5a. Cronogramas representativos de las principales antocianinas y compuestos fenólicos del maíz morado (*Zea mays* L.) obtenidos de granos y coronta (Lao, Gregory, & Giusti, 2017).

Las antocianinas son una clase de compuestos fenólicos solubles en agua que imparten el color rojo púrpura oscuro al maíz morado. El contenido de antocianinas del maíz morado varía de 6.8 a 82.3 mg / g FW dependiendo de la porción del material vegetal que se evalúa (Cevallos - Casals y Cisneros- Zevallos 2003; Wu y otros 2006; Li y otros 2008). La composición de antocianinas del maíz morado ha sido bien estudiada, y se identificaron 6 antocianinas mayores y otras 17 (Lao, Gregory, & Giusti, 2017).

Las 6 principales antocianinas de maíz morado incluyen cianidina-3-glucósido (Cy-3-glu), pelargonidina-3-glucósido (Pg-3-glu), peonidina-3-glucósido (Pn-3-glu) y sus respectivos derivados con ácido malónico unido a la posición C - 6 " de la glucosa se observan en la figura 6. (Lao, Gregory, & Giusti, 2017).

Además de las antocianinas se han investigado la presencia de ácidos fenólicos en el maíz morado. Estos compuestos se recuperan generalmente con solventes orgánicos como el alcohol y la acetona y se identifican por HPLC-MS. El contenido de ácido p-cumárico y ácido ferúlico para el maíz morado boliviano de color oscuro fue de 607.5 y 154.2 mg / 100 g DW respectivamente, mucho más alto que los cultivares amarillos que reportaron contener 366.7 y 132.9 mg / 100 g DW, respectivamente. Se encontró que los contenidos de ácido fenólico del maíz morado varían entre los cultivares. Un estudio más reciente demostró que el ácido ferúlico es el ácido fenólico más abundante (39.9 mg / kg DW para nativos y 33.3 mg / kg DW para maíz híbrido), seguido de los ácidos diferulicos y cumárico en el maíz. La mayoría de los ácidos fenólicos están en forma conjugada o ligada; solo una pequeña porción se encuentra en forma soluble y libre para extraerse sin tratamiento de hidrólisis (Lao, Gregory, & Giusti, 2017).



Anthocyanins	R1	R2
Cyanidin-3-glucoside	OH	H
Pelargonidin-3-glucoside	H	H
Peonidin-3-glucoside	OCH <sub>3</sub>	H
Cyanidin-3-(6''-malonylglucoside)	OH	COCH <sub>2</sub> COOH
Pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside)	H	COCH <sub>2</sub> COOH
Peonidin-3(6''-malonylglucoside)	OCH <sub>3</sub>	COCH <sub>2</sub> COOH

Figura 5b. Estructura molecular de las 6 principales antocianinas de maíz morado (Lao, Gregory, & Giusti, 2017).

### Composición proximal maíz morado

De las tablas peruanas de composición de alimentos (2017) se desprende la siguiente información para la harina de maíz morado (Figura 6):

Componente	Cantidad (g)
Agua	11.4
Proteínas	8.5
Grasa Total	4.2
Carbohidratos disponibles	64.5
Fibra dietaría	9.8
Cenizas	1.7

Figura 6. Composición proximal harina maíz morado sobre 100g

### Proceso tradicional de nixtamalización

El método tradicional de nixtamalización se basa en una cocción alcalina del grano de maíz (relación 3:1 agua: maíz) a temperatura de ebullición por un tiempo no mayor de 60 minutos. Entre cada procesador los tiempos de cocción varían entre 40 a 55 minutos de acuerdo a la receta desarrollada. Para conseguir la alcalinización del medio se adiciona

hidróxido de calcio de 1 a 2 %. Después de esta operación el maíz se deja reposando por un periodo de 12 a 18 horas para una homogénea penetración del agua alcalinizada. El grano cocido con la cal en agua es denominado nixtamal y el líquido (residuo alcalino) rico en sólidos, nejayote, el cual es descartado. Después el nixtamal es lavado para remover los fragmentos de pericarpio desprendidos del grano y el exceso de cal. Finalmente el nixtamal es molido para la obtención de la masa, la cual podrá ser utilizada para la producción de diferentes productos (Gonzales, 2006).

### **Harinas nixtamalizadas industriales**

La elaboración de harina nixtamalizada a nivel industrial se fundamenta en el método tradicional de nixtamalización con ciertas modificaciones. Este proceso incluye inicialmente las etapas de recepción, selección, limpieza y almacenamiento del maíz. Posteriormente, el grano es sumergido en agua con cal a punto de ebullición para obtener el nixtamal, el cual se va procesando en lotes continuos. Tras su cocción y reposo, el maíz tratado en solución alcalina es lavado con agua a presión para eliminar el pericarpio o en su defecto el pericarpio es mantenido para las harinas integrales. Una vez lavado el maíz es pasado a un proceso de secado y pulverización. La harina, formada por partículas de distintos tamaños, se pasa por un tamiz para separar las partículas de acuerdo a la granulometría especificada. Las partículas gruesas que no pasaron por el tamiz son transportadas al molino de martillos para ser trituradas nuevamente, y las partículas finas que constituyen el producto final, se envían a la sección de envasado, donde son empacadas en sacos de papel reforzado (Serna-Saldivar, 1996). La harina instantánea es mezclada con agua para obtener una masa adecuada para la elaboración de tortillas y diversos productos nixtamalizados (de acuerdo a la granulometría de la harina obtenida). Los tiempos de cocción y reposo así como las temperaturas son críticas, en general son menores para la elaboración de harinas nixtamalizadas en comparación con el proceso tradicional, debido a que durante el proceso de secado se provoca una gelatinización adicional del almidón (Gómez, Rooney, Waniska, & Pflugfelder, 1987). En el proceso tradicional de nixtamalización, así como en el proceso industrial de harinas nixtamalizadas se genera un efluente conocido como nejayote (Serna-Saldivar, 1996). El nejayote es un agua residual altamente alcalina, con alta demanda química y biológica de oxígeno, y es considerado un contaminante ambiental. Un proceso alternativo que evita dicho efluente es la extrusión. Además, en este proceso todos los componentes del grano de maíz, incluyendo el pericarpio, son retenidos (Arámbula, González-Hernández, Moreno, & Ordorica, 2002).

## Proceso de Extrusión

La operación de extrusión aplicada en alimentos puede ser definida como un proceso continuo en donde se combina el corte mecánico con el calor para obtener la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas, obteniéndose un producto plastificado y reestructurado con nuevas formas y texturas. El extrusor se considera un reactor de tornillos por las transformaciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren; al mismo tiempo se llevan funciones de transporte, mezclado, orientación y formado del material a presión y temperatura controlada. Un extrusor está formado de cinco componentes principales: mecanismo de alimentación, tornillo y su mecanismo de conducción, camisa o cañón, dado o restrictor de flujo y mecanismo de corte (Harper J. , 1989).

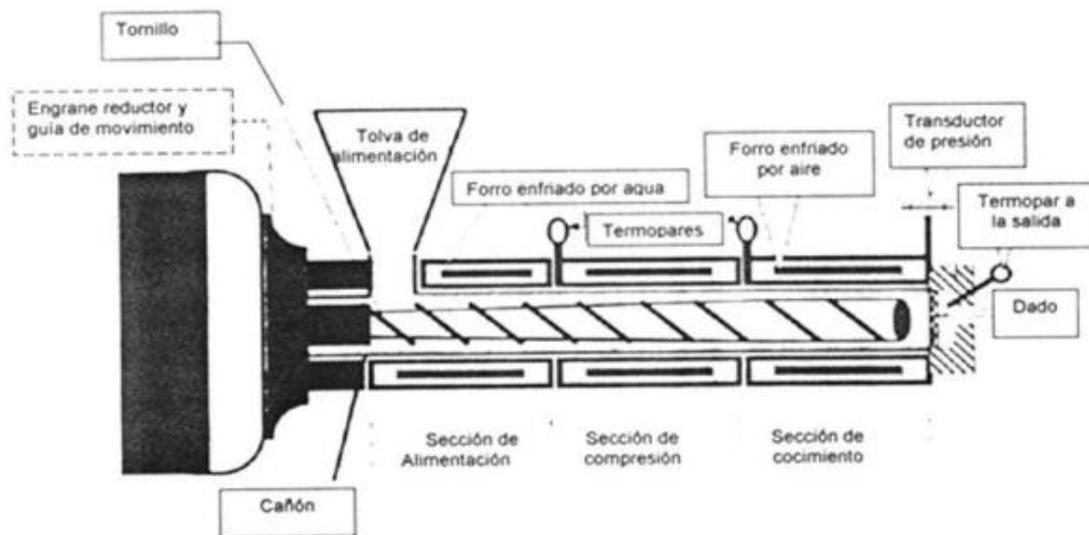


Figura 7. Diagrama extrusor tornillo simple (Harper J. , 1989).

## Funcionamiento básico del extrusor

En la operación de extrusión la mezcla de ingredientes es alimentada por medio de un sistema horizontal, o vertical. Es muy importante que el sistema de alimentación descargue correcta y constantemente la cantidad de material al que haya sido ajustado. El material alimentado, una vez dentro de la boca del extrusor, fluye a través del tornillo que gira dentro del cañón. El cañón está provisto de secciones capaces de ser calentadas o enfriadas con vapor, bandas eléctricas, agua, aire y/o refrigerantes. La pared interna del cañón puede ser lisa, rayada en forma de espiral. La parte fundamental del extrusor es el tornillo, el cual tiene la función de hacer fluir el material de alimentación y sobre todo de propiciar los cambios deseados mediante el esfuerzo mecánico y la fricción. Casi todos los extrusores

tienen diferentes tipos de tornillo con diferente diseño mecánico para distintas aplicaciones. El flujo del material a través del extrusor depende principalmente de la relación de alimentación, velocidad a la que opera el tornillo, diseño de la rosca y diámetro de salida en el dado o matriz presentes en la salida del extrusor (Serna-Saldivar, 1996). El sistema de dado o matriz tiene como función primordial formar el material plástico o cocido que corre a través del extrusor. Existen dados sencillos, múltiples y compuestos con distintas configuraciones. Generalmente, entre menor o más restringido es el dado, mayor es la presión interna. Finalmente, el material formado que fluye del extrusor es cortado por medio de un sistema de navajas simples o múltiples, las cuales giran a ciertas revoluciones a varios milímetros de la salida del dado. El tamaño del producto cortado está dictaminado por la tasa de alimentación, la velocidad del tornillo y principalmente por la velocidad y número de cuchillas del sistema cortador (Serna-Saldivar, 1996). Algunas de las características por las cuales la extrusión ha ganado popularidad son: versatilidad, costos reducidos, alta productividad, productos de alta calidad, diferentes formas del producto, eficiencia energética y ausencia de efluentes (Harper J. , 1989).

### **Pre acondicionado**

El pre-acondicionamiento con vapor o agua siempre ha sido una parte importante del proceso de extrusión de alimentos. Investigaciones recientes han demostrado que el rendimiento eficiente del extrusor casi se duplica si el material de partida se acondiciona previamente con vapor o agua. En varias aplicaciones de productos alimenticios extruidos el pre-acondicionamiento juega un papel clave en el proceso de extrusión. El pre-acondicionamiento favorece la hidratación uniforme de las partículas, reduce los tiempos de retención dentro del extrusora y aumenta el rendimiento, aumentando la vida útil del equipo, debido a una reducción en el uso de componentes de barril y tornillo, reduciendo también los costos de energía involucrados en el proceso. Dependiendo de la configuración del tornillo, el tiempo de residencia del material dentro de la extrusora puede variar de 5 segundos a más de 2 minutos. El objetivo principal del pre-acondicionamiento es hidratar uniformemente la materia prima para eliminar cualquier núcleo seco (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### **Sistema alimentación**

La mayoría de las materias primas utilizadas en la extrusión de alimentos son sólidas. El sistema de alimentación esta normalmente compuesto por un contenedor donde se carga el material y este mismo cumple la función de descargar del material hacia la cámara de

extrusión. El sistema de alimentación puede estar compuesto por un tornillo de alimentación vertical, un tornillo de alimentación horizontal o un sistema de canalización vibratoria. El objetivo principal del sistema de alimentación es garantizar una alimentación constante y no interrumpida de las materias primas en el extrusor para garantizar un funcionamiento eficiente y uniforme de la operación. Cuando los líquidos son agregados se pueden dosificar con un rotámetro, medidores Venturi, medidores desplazamiento positivo o bombas dosificadoras (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

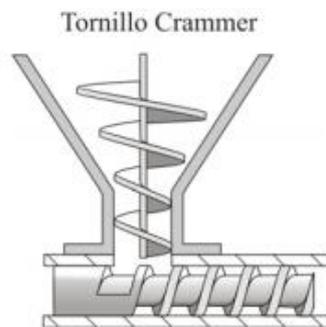


Figura 8. Ejemplo de sistema de alimentación (Beltrán & Marcilla, 2006)

### **Tornillo de extrusión**

El tornillo del extrusor es ciertamente uno de los componentes más importantes de este equipo, no solo porque determina el grado de coacción, gelatinización y dextrinización del almidón; y desnaturalización de la proteína, sino también porque garantiza la calidad del producto final. Los tornillos pueden ser mono-pieza (compuesto de una pieza única) o multi-pieza (compuesta de varios elementos). Los elementos del tornillo pueden variar en número y formas, cada segmento está diseñado para un propósito específico. Existen segmentos cuya función es transferir el material crudo o pre-acondicionado por el barril, segmentos que comprimen y desgasifican el material; y otros segmentos que deben promover el amasado, el reflujo y el cizallamiento (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

Algunos tornillos han interrumpido vuelos para mejorar la mezcla, aumentar el reflujo, o aumentar la disipación de energía mecánica en la extrusora. Las principales características del diseño de un tornillo de extrusión incluyen: (i) longitud del tornillo; (ii) diámetro del tornillo; (iii) profundidad del canal del tornillo; (iv) ancho del canal del tornillo; (v) ancho de la hélice; (vi) distancia entre tornillo y barril; (vii) ángulo de la hélice del tornillo; (viii) ángulo de flanco anterior; (ix) ángulo de flanco posterior; (x) paso de tornillo; (xi) dirección del flujo

de arrastre; (xii) dirección del flujo de presión, (xiii) dirección del flujo de fuga y (xiv) paso de tornillo (t) (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

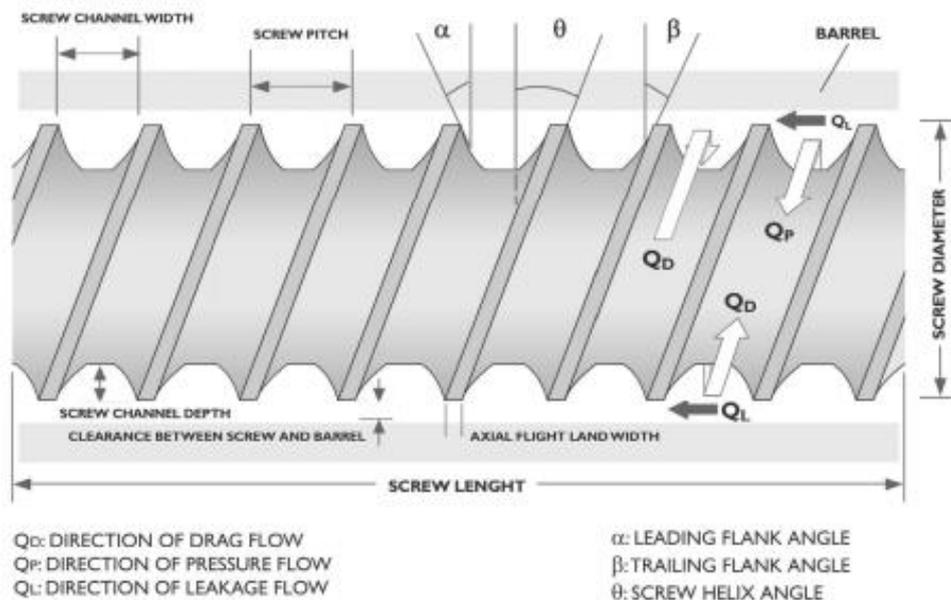


Figura 9. Principales características del diseño de un tornillo de extrusión (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### Barril extrusión

El barril se divide en zonas de alimentación, amasado y alta presión. Las mangas que rodean el tornillo pueden ser sólidas, pero a menudo están encaquetadas para permitir circulación de vapor o aceite sobrecalentado para la calefacción y agua o aire para la refrigeración, permitiendo así el ajuste preciso de la temperatura en las distintas zonas del extrusor. La mayoría de las mangas están equipadas con sensor de presión y temperatura. En el extrusor de doble tornillo, la superficie interior del barril es generalmente lisa pero se pueden construirse con ranuras longitudinales o helicoidales. En el extrusor de un solo tornillo, la superficie interior del barril es generalmente estriado en el interior, con ranuras rectas o en espiral. Las ranuras en espiral proporcionan un alto flujo hacia adelante, mientras que surcos rectos lo obstaculizan. Este último da como resultado un caudal más bajo, pero más esfuerzo mecánico de corte (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### Dado o matriz

La matriz presenta dos funciones principales: dar forma al producto final y promover la resistencia al flujo de material dentro del extrusor para permitir un aumento de la presión

interna. El dado puede presentar varios diseños y número de orificios. Los dados o matrices pueden ser diseñados para ser altamente restrictivos, favoreciendo el aumento del llenado del barril, tiempo de residencia y entrada de energía. El diseño de la matriz muchas veces es pasado por alto sin entender que puede tener un impacto sobre la calidad del producto final (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### Clasificación de extrusores

Los extrusores son principalmente clasificados de acuerdo a la cantidad de tornillos que poseen: Extrusor de un solo tornillo, extrusor de dos tornillos y extrusor de tornillos múltiples. Los extrusores comunes a nivel industrial son de uno y dos tornillos, mientras que el extrusor de tornillo múltiple son limitados para producciones a escala piloto y para aplicaciones bastante específicas en la industria de polímeros (Sakai, 2013).

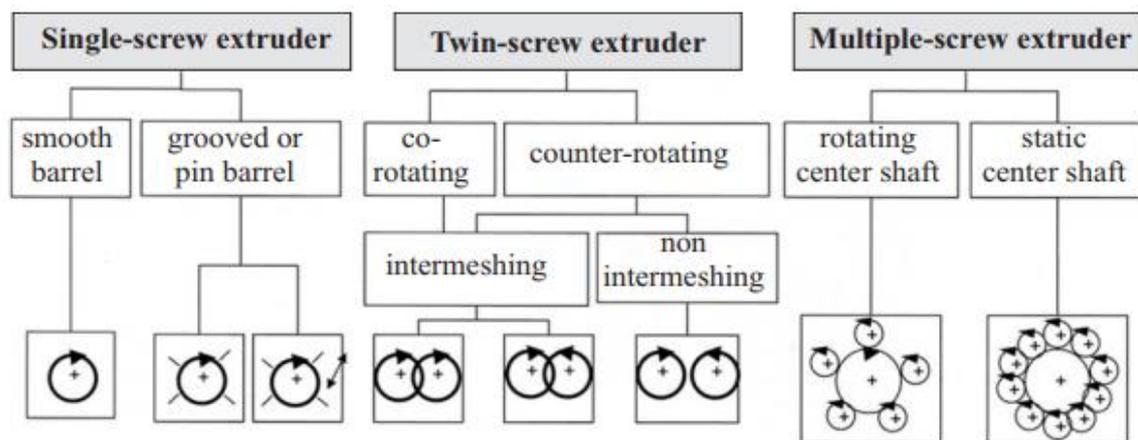


Figura 9. Clasificación de extrusores por el número de tornillos (Sakai, 2013).

Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012 mencionan que el extrusor de un solo tornillo es el extrusor más común usado en la industria de alimentos. Las extrusoras de doble tornillo se utilizan para la extrusión de alta humedad, para productos que incluye mayores cantidades de componentes como fibra y grasa; o para productos con formas sofisticadas.

### Extrusor de un tornillo

La clasificación del extrusor de un solo tornillo se puede definir según los parámetros del proceso tales como: contenido de humedad de acondicionamiento (seco o húmedo), tornillo sólido o segmentado, grado de cizallamiento deseado y fuente de calor. Desde un punto

de vista práctico, la principal clasificación utilizada considera el grado de cizallamiento y la fuente de calor. Con respecto a la configuración de los tornillos, hay tornillos compuestos de una sola pieza o tornillos de piezas múltiples. Los tornillos de un solo elemento pueden presentar diferentes configuraciones: (i) tornillo con profundidad y vuelo constantes - rectos; (ii) tornillo con vuelo constante y profundidad variable - cónico - (cónico desde la extremo de alimentación hasta el extremo del dado); (iii) tornillo con una reducción de la profundidad justo después de la alimentación, volviéndose constante al final - cónico recto – y (iv) tornillo con aberturas de vuelo - vuelo interrumpido - para aumentar la fuerza de corte debido al aumento en el flujo de fuga y turbulencia del material (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

El tornillo de elementos múltiples se puede construir de acuerdo a la necesidad deseada debido a la gran versatilidad en cuanto al número de formatos posibles, variando vuelo de tornillo y profundidad. Por lo general, este tipo de tornillo es dividido en cinco secciones, donde la primera sección presenta vuelo ancho y gran profundidad con el objetivo de homogeneizar y transportar el material. En la segunda sección, también conocida como la sección intermedia, hay una reducción en el vuelo de tornillo paralelo (o adyacente) y la profundidad, lo que resulta en una mezcla aún mayor del material y el comienzo de cizallamiento, mientras que el material se transporta a la siguiente sección. La tercera sección es responsable del aumento en la fuerza de corte y la presión, promoviendo cambios estructurales en el material. Se puede aumentar aún más la fuerza de corte en la tercera sección con interrupciones en el vuelo de tornillo favoreciendo la turbulencia del material. En la cuarta sección, debido al pequeño espacio libre disponible para el material, hay un alto esfuerzo corte y un aumento en la temperatura de la masa fundida, que resulta en la cocción del producto. En la última sección, debido a una reducción aún mayor en el vuelo y la profundidad del tornillo, la generación de cizallamiento y calor favorecen la cocción final (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

Las extrusoras de un solo tornillo se pueden clasificar en cuatro tipos diferentes según el grado de fuerza de corte:

- Extrusores de conformación en frío: funcionan con un contenido moderado de humedad en el producto de ingreso (30 - 40%), cizalla baja y superficie interna del cañón lisa, vuelo profundo y velocidad de tornillo baja. Se utilizan para formar productos compactos como la pasta, galletas, masas de pastelería, carnes procesadas y ciertos dulces (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

- Extrusores de conformación de alta presión: funcionan con bajo cizallamiento, cilindro ranurado y compresión tornillo. Se utilizan para producir harinas y gránulos pregelatinizados (para la posterior expansión por aire caliente o friendo) (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).
- Extrusores de cocción de bajo cizallamiento: funcionan con un grado moderado de cizallamiento y alta compresión de tornillo y barril acanalado (recto o helicoidal) para favorecer la mezcla. Por lo general involucran camisa de vapor o resistencia eléctrica para mejorar la cocción con el objetivo de lograr pasteurización, inactivación enzimática, desnaturalización de proteínas y / o gelatinización de almidón (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).
- Extrusores de boquilla: funcionan con alto cizallamiento, cilindro ranurado y tornillo con un aumento en Compresión (a través de múltiples vuelos poco profundos). Comúnmente utilizado para producir expandido. Bocado de sémola de maíz. El contenido de humedad de acondicionamiento debe ser bajo (12 - 14%) y temperatura alta (150 - 175 ° C), lo que resulta en la dextrinización parcial y la gelatinización del almidón. Debido a la alta presión formada dentro de la extrusora, al salir de la matriz hay expansión inmediata del material (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### **Extrusor de dos tornillos**

Las extrusoras de doble tornillo están compuestas por dos ejes que giran dentro de un barril; usualmente la superficie interna del cilindro del extrusor de doble tornillo es lisa. Dependiendo de la posición de los tornillos y su dirección de rotación, cuatro tipos configuraciones son posible: (i) tornillos entrelazados de co-rotación; (ii) tornillos sin entrelazado de co-rotación; (iii) tornillos entrelazados de giro contrario; y (iv) tornillos sin entrelazado de giro contrario. Los tornillos entrelazados dan como resultado un mayor tiempo de residencia del material de extrusión, mientras que los tornillos sin entrelazado causan mayor grado de cizallamiento debido al canal abierto entre ellos, especialmente si giran en direcciones opuestas. Sin embargo, este tipo de extrusor se usa poco en la industria de alimentos (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

Cuando el material entra en el barril, los ingredientes se mezclan antes de continuar el procesamiento en las otras zonas del extrusor. En este primer paso el tornillo está diseñado con una profundidad de canal de tornillo grande con suficiente espacio entre la raíz del tornillo y el cilindro para que tenga lugar el mezclado, y con frecuencia, los tornillos se

roscan hacia atrás para permitir la mezcla intensiva y tiempos de residencia más largos. En la siguiente zona, el diámetro de la raíz aumenta rápidamente mientras que la profundidad del canal se vuelve más superficial aumentando la presión aplicada al producto, de esta forma el almidón se gelatiniza y el material proteico se desnaturaliza. Cuando es necesario, después de la zona de cocción, el material es forzado a la zona de despresurización donde el diámetro de la raíz del tornillo es mucho más pequeño, mientras que la profundidad del canal es mucho más profunda que en la zona anterior. En la zona de conformación, el diámetro de la raíz del tornillo aumenta, reduciendo la profundidad del canal y dando como resultado un aumento en la presión aplicada. Esta presión debe ser lo suficientemente alta como para permitir la extrusión del producto a través del dado para alcanzar la forma deseada (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### **Elaboración de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión**

Para la producción de la harina nixtamalizada por extrusión y tortillas se muele de forma integral el grano de maíz, posteriormente el grano molido es mezclado con cal y agua en concentraciones y porcentajes determinados por el investigador. La mezcla se homogeniza y se deja reposar. Enseguida se somete al proceso de extrusión cuyas condiciones de cocción y velocidad de flujo también son muy variables. Los “*pellets*” extrudidos se dejan reposar a temperatura ambiente para eliminar cierta cantidad de agua, o se pasan directamente a un secador. Los “*pellets*” secos se muelen a un tamaño de partícula adecuado para de esta forma obtener la harina nixtamalizada por extrusión. El siguiente paso es hidratar la harina con la cantidad de agua necesaria para hacer una masa de consistencia adecuada para elaborar tortillas. En el proceso de extrusión se evita la gelatinización completa de los almidones y la expansión de extruido. Algunos autores han reportado que el tamaño de partícula de los ingredientes, el contenido de humedad, la temperatura de extrusión, la velocidad y la configuración del tornillo, y el tamaño y forma de la boquilla afecta significativamente el producto (Bedolla, 1983); (Vargas Lopez, 1987); (Serna-Saldivar, 1996)). Algunos investigadores (Bazua, Guera, & Stemer, 1979), (Martinez - Flores, Martinez - Bustos, C.J., & Gonzales Hernandez, 1998), (Gomez – Aldapa, Martinez – Bustos, & Figueroa, 1999) (Milán Carrillo, Perales Sanchez, Cuevas Rodriguez, Ramirez Wong, & Reyes Moreno, 2006) (Gutierrez – Dorado, y otros, 2008) han aplicado el proceso de extrusión para la elaboración de harina nixtamalizada para tortillas de maíz con el beneficio nutricional que presentan los granos enteros y con la textura similar a las tortillas obtenidas por el proceso de nixtamalización tradicional. Uno de los problemas de las tortillas a partir de harina nixtamalizada extrudida es su textura, ya que

se hacen duras más rápidamente que las producidas por harinas nixtamalizadas comerciales. Esto posiblemente es debido, a que después que las tortillas son preparadas, la retrogradación del almidón ocurre más rápidamente, alterando su textura (Aguirre-Cruz et al., 2005). Para aumentar y preservar la calidad de las tortillas a partir de harina de maíz extrudida nuevas alternativas han sido estudiadas. Entre estas alternativas, el uso de ciertos aditivos, tales como hidrocoloides o gomas han sido adicionadas.

## **Cambios de los componentes en la Extrusión**

### **Almidón**

Extrusión, dependiendo de las condiciones del proceso y la composición de la materia prima, causan la hinchazón y la rotura del gránulo de almidón; destruyendo total o parcialmente la estructura de los gránulos organizados. Durante la extrusión una porción de amilosa y amilopectina se hidrolizan parcialmente a maltodextrinas debido a las altas temperaturas y cizallamiento dentro del extrusor. Una consecuencia importante de la degradación del almidón es la reducción de la expansión. Por otro lado, en ciertos cereales como el trigo duro, el maíz vítreo y algunas variedades de cebada existe una fuerte unión entre los gránulos de almidón y las láminas de proteínas, conformando una estructura de mayor dureza que requiere más energía para descomponerse, lo que se reflejara en el aumento de temperatura al interior del extrusor. Una vez dentro de la extrusora, y a temperaturas relativamente altas, los gránulos de almidón se funden y se vuelven blandos, además de cambiar su estructura se comprime a una forma aplanada. La aplicación de calor, la acción de cizallamiento sobre el gránulo de almidón y el contenido de agua destruyen la estructura molecular organizada del granulo. Los polímeros de almidón se dispersan y degradan para formar una masa fundida continua. El polímero retiene las burbujas de vapor de agua y se estira durante la expansión del extruido hasta la ruptura de la estructura celular (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

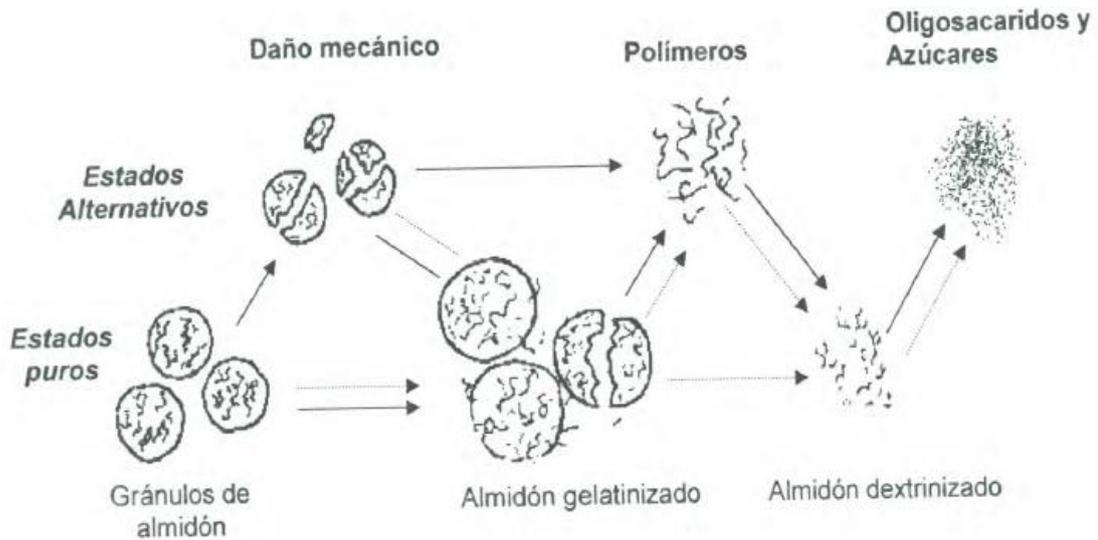


Figura 10. Modelo propuesto para la degradación del almidón durante el proceso de extrusión (Gomez & Aguilera, 1983).

### Proteínas

Las proteínas son polímeros con un gran número de grupos químicos en comparación con los polisacáridos y, por lo tanto, son más reactivos; lo que da lugar a varios cambios durante el proceso de extrusión, siendo el más importante la desnaturalización proteica.

Las proteínas se forman a partir de cadenas de aminoácidos y tienen una amplia gama de tamaño molecular y formas dependiendo la materia prima. Las proteínas en general se clasifican, con respecto a su solubilidad en agua, solución salina, solución de alcohol y soluciones ácidas o alcalinas. Durante la extrusión, los enlaces disulfuro se rompen y eventualmente pueden volver a formarse. Las interacciones electrostáticas e hidrófobas favorecen la formación de agregados insolubles. La creación de nuevos enlaces peptídicos durante la extrusión se encuentran en controversia. Las proteínas de alto peso molecular pueden disociarse en subunidades más pequeñas. Las enzimas pierden su actividad después de ser sometidas al proceso de extrusión debido a altas las temperaturas y cizallamiento. La desnaturalización de las proteínas durante el proceso de extrusión favorece la digestibilidad e inactivación de anti nutrientes (factor anti-tripsina). Además, la extrusión reduce el sabor amargo característico de algunas materias primas mediante la volatilización de compuestos indeseables relacionados a la proteína. Adicionalmente, durante el proceso de extrusión al utilizarse altas temperaturas se favorece la reacción de Maillard, donde los azúcares reductores producidos durante el proceso de extrusión pueden reaccionar con los grupos de amino libres de la lisina u otros aminoácidos (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

En conclusión, durante la extrusión las estructuras proteicas se alterarán debido al alto esfuerzo de corte, presión, y temperatura. La proteína pasara por procesos de reorganización y polimerización donde los enlaces disulfuro, enlaces hidrofóbicos y las interacciones electrostáticas serán los principales enlaces e interacciones en las proteínas extruidas (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### **Lípidos**

Lípidos tienen una poderosa influencia en la extrusión. Los procesos de cocción actúan como lubricantes, ya que reducen la fricción entre partículas de la mezcla y entre la superficie del tornillo y del barril. En el Extrusor, las grasas y los aceites se vuelven líquidos a temperaturas mayores de 40°C y al mezclarse con los otros materiales, se dispersan rápidamente como finas gotas. La presencia de lípidos en cantidades inferiores al 3% no afecta las propiedades de expansión, sin embargo, en cantidades superiores al 5%, la reducción en la tasa de expansión es considerable. Collona (1998) sugieren que el aumento en el contenido de lípidos se puede corregir a través de la reducción en el contenido de humedad en la operación de acondicionado, para no afectar el índice de expansión. El tipo de almidón y lípido presente en la materia prima influye en la formación del complejo de amilosa-lípido, con ácidos grasos libres y mono glicéridos que son más favorables a la formación de este complejo que los triglicéridos (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

### **Fibra**

El término "fibra" cubre una gran variedad de sustancias con diferentes propiedades físicas, químicas y fisiológicas. La fibra dietética consiste en fracciones de moléculas vegetales, polisacáridos, lignina y sustancias asociadas que son resistentes a la hidrólisis por enzimas presentes en el sistema digestivo de los humanos; sin embargo, algunos tipos de fibras pueden ser fermentadas por bacterias en el colon. Como muchos efectos fisiológicos de las fibras parecen estar relacionados con su solubilidad en agua, se clasifican frecuentemente como "solubles" e "insolubles" (Stark & Madar, 1994).

Las fibras solubles forman una red de gel o una red viscosa, bajo ciertas condiciones fisicoquímicas, y por lo tanto ligan agua aumentando la viscosidad, retardando el tránsito gástrico, reduciendo tasas de absorción de glucosa, lípidos y esteroides. Las investigaciones han demostrado que la cocción de las fibras por extrusión puede producir cambios en su estructura características y propiedades fisicoquímicas, siendo el principal efecto la redistribución de fibra insoluble a fibra soluble (Larrea, Chang, & Bustos, 2005).

Este efecto sería el resultado de la ruptura de enlaces covalentes y no covalentes entre carbohidratos y proteínas asociadas a la fibra, lo que resulta en fragmentos moleculares más pequeños mejorando su solubilidad. Varios investigadores han informado de una reducción en el índice de expansión (IE) cuando la fibra dietética es añadida a la formulación (Vernaza, Chang, & Steel, 2009).

### **Humedad**

En el proceso de extrusión de productos de baja humedad, la expansión final del producto está inversamente relacionada con la humedad de la materia prima y está directamente relacionado con el aumento de la temperatura de extrusión. Sin embargo, el efecto de la humedad es más significativo (Harper, 1994).

El agua actúa como un plastificante para el material almidonado que se desplaza dentro del extrusor, reduciendo la viscosidad y la energía mecánica, produciendo productos de mayor densidad e inhibiendo el crecimiento de las burbujas. Los estudios realizados con granos de maíz demostraron que la expansión es inversamente proporcional al contenido de humedad del material que se está extruyendo (Colonna, Tayeb, & Mercier, 1998). A mayor humedad, la gelatinización del almidón se ve reducida y la aparición de burbujas se retarda, lo que resulta en productos finales más densos y menos crujientes (Ding, Ainsworth, Plunkett, Tucker, & Marson, 2005).

En extruidos de alta humedad el producto al salir del dado se expande mínimamente con una estructura que después del enfriado resulta en un producto de alta densidad y dureza (Harper, 1994). Lo explicado por Harper (1994) se complementa con lo descrito por Guy (2001) quien menciona que la extrusión de baja humedad (15 a 30%) tiende a resultar en procesos con mayor generación de energía mecánica y productos con menor densidad; mientras que en productos de alta humedad (50 a 70%) la extrusión resulta en extruidos de mayor densidad, y se usa normalmente en la producción de pellets (Guy, 2001).

### **Compuestos coloreados**

El color en los productos extruidos está influenciado por la temperatura, la composición de la materia prima, tiempo de residencia, presión y fuerza de corte (Guy, 2001). Durante el proceso de extrusión, suceden varias reacciones que en su conjunto pueden afectar el color de los productos. Entre las reacciones más importantes, las más comunes son el pardeamiento no enzimático (Maillard y caramelización) y la degradación de pigmentos. Las condiciones del proceso normalmente utilizados en la extrusión de alta temperatura y

bajo contenido de humedad son conocidos por favorecer la reacción entre azúcares y aminoácidos reductores, que resulta en la formación de compuestos de color y la reducción del aminoácido lisina. Si el bronceado es demasiado intenso, se pueden producir colores y sabores no deseados. Además, los cambios de color durante el proceso de extrusión puede ser un indicador para evaluar la intensidad del proceso en términos de cambios químicos, nutricionales y sensoriales (Steel, Vernaza, Schmiele, Ferreira, & Chang, 2012).

En un estudio realizado por Mora (2010) comparo la harina nixtamalizada de maíz azul producida por el método tradicional y por extrusión. Las harinas de maíz azul producidas por el método tradicional perdieron alrededor de 55% de antocianinas cuando fueron procesadas. Los resultados indicaron que el proceso de extrusión retiene mayores niveles de compuestos como el ácido ferúlico y antocianinas en harina de maíz azul nixtamalizada por extrusión (Mora, y otros, 2010).

Las antocianinas son compuestos estables en pH ácido y cuando el hidróxido de calcio es añadido las antocianinas se degradan (Salinas, Martinez, Soto, Ortega, & Arellano, 2003). Adicionalmente de acuerdo a Brennan, Brennan, Derbyshire y Tiwari (2011) altas velocidades de tornillo y temperatura en la extrusión es un factor que afecta el contenido de polifenoles y antocianinas por descarboxilación (Brennan, Brennan, Derbyshire, & Tiwari, 2011).

En un estudio realizado por Escalante y otros (2012) determinaron que los extrudidos retienen entre el 17.8 y 38.5% de las antocianinas totales en el maíz azul. Las antocianinas totales fueron afectadas por la humedad de alimentación; a menor humedad de alimentación mayor degradación. Adicionalmente de acuerdo a lo esperado los tratamientos procesados con una temperatura de 130°C retuvieron mayor cantidad de antocianinas que los tratamientos procesadas con una temperatura de 140°C (Escalante, y otros, 2012).

### **Influencia de la extrusión en la calidad microbiológica**

Uno de los requisitos más importantes de los consumidores es la seguridad microbiológica de los alimentos. La mayoría de los productos extruidos convencionales, como los aperitivos, cereales para el desayuno y harinas precocidas, son seguras de ingerirlas debido que las materias primas están sujetas a altas temperaturas (más de 130 ° C) y la actividad de agua del producto tiende a reducirse porque el producto se deseca hasta un contenido de humedad de menos del ocho por ciento. Aunque es bien sabido que la

mayoría de los organismos vegetativos, levaduras y mohos se destruyen bajo condiciones de extrusión típica, las condiciones de operación bajo el cual las esporas se inactivan no se conocen bien (Guy, 2001).

El proceso de extrusión al aplicar altas temperaturas, incluso cuando el recorrido es de corta residencia, elimina una gran cantidad de microorganismos (Baik, Powers, & Nguyen, 2004). El proceso de extrusión también permite obtener valores de actividad de agua más bajos en el producto final, con valores entre 0.1 y 0.5. Por lo tanto, es posible extender la vida útil de los productos (Fellows, 2000).

Fraiha et al. (2011) realizó estudios con microorganismos resistentes al calor que muestran que el esfuerzo de corte puede estar involucrado en la reducción de la carga microbiana durante el proceso de extrusión, postulando a que las fuerzas mecánicas causan la ruptura celular en microorganismos termófilos (Fraiha, Ferraz, & Biagi, 2011).

Okelo et al. (2006), estudio la optimización de las condiciones de extrusión para la eliminación de bacterias mesófilas durante el procesamiento térmico de alimentos para animales, señalando que, en general, el procesamiento térmico está diseñado para eliminar los organismos mesófilos y no organismos termófilos. Demostró que la mayoría de los organismos patógenos en los alimentos se inactivan mediante cocción dentro de los rangos variables experimentales. Esta reducción también incluiría también a miembros del grupo mesófilo de *Bacillus cereus*.

Las micotoxinas son un riesgo para la salud humana, siendo el principal vehículo de ingesta los alimentos de origen vegetal como maní, maíz y trigo. Los métodos de procesamiento que han conseguido ser efectivos en la reducción de micotoxinas han recibido especial atención. La cocción por extrusión es uno de los métodos más efectivos para reducir micotoxinas en el procesamiento de alimentos, especialmente si se incluyen en la operación sustancias como bisulfito de sodio, hidróxido de calcio o hidróxido de amonio (Castells, Marin, Sanchis, & Ramos, 2005).

## Evaluación del grano de maíz morado para Nixtamalización

La Norma Técnica Peruana NTP 011.601 Mazorcas de maíz morado. Requisitos 2016. Define, clasifica y establece los requisitos que deben cumplir las mazorcas de maíz morado para su uso como materia prima en el procesamiento industrial y en el consumo directo.

El REGLAMENTO (CE) No 1881/2006 DE LA COMISIÓN DE LA COMUNIDAD EUROPEA por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios establece para el maíz y productos derivados el contenido máximo de micotoxinas.

“La Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano” NTS N° 071- MINS/DIGESA establecida en el marco del Reglamento sobre Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas, aprobado por Decreto Supremo N° 007.98 SA y en concordancia con lo establecido en los Criterios Microbiológicos para Alimentos del *Codex Alimentarius* (CAC/GL-21(1997) establece la clasificación y planes de muestreo por categoría. Dicha clasificación permite la determinación de los agentes microbianos a evaluar, estableciendo las condiciones microbiológicas de calidad sanitaria apta para el consumo humano.

V. GRANOS DE CEREALES, LEGUMINOSAS, QUENOPODIÁCEAS Y DERIVADOS (harinas y otros).						
V.1 Granos secos.						
Agente microbiano	Categoría	Clase	n	c	Límite por g	
					m	M
Mohos	2	3	5	2	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>

Figura 11. “La Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano” NTS N° 071- MINS/DIGESA – Granos Secos (Maíz morado).

### Índice de flotación y peso en hectolitro del grano

El índice de flotación y el peso en hectolitro son métodos para determinar la dureza del grano. La dureza está determinada por la estructura del grano, especialmente por la relación entre el endospermo vítreo y harinoso. El maíz de endospermo vítreo, así como las variedades de maíz cristalino y reventador, tienen granos duros, en tanto que las variedades de maíz amiláceas y harinosas tienen granos blandos (Véles-Medina, 2004).

La dureza se define como la fuerza necesaria para romper el grano y es el parámetro que determina esencialmente la capacidad del grano para absorber y retener agua durante las diferentes etapas del proceso de cocción de la nixtamalización tradicional. Los maíces denominados suaves se hidratan mejor que los duros, es decir, absorben mayor cantidad de agua debido a que los gránulos de almidón son más fácil de alcanzar por la solución alcalina ( (Watson, 2003), (Salinas-Moreano & Aguilar-Modesto, 2010)). La industria de nixtamalización prefiere granos de intermedios a duros y necesita conocer este parámetro para determinar el tiempo de cocción adecuado al momento de nixtamalizar (Salinas-Moreano & Aguilar-Modesto, 2010) . El índice de flotación (IF) y el peso en hectolitro permite determinar la dureza de todo tipo de grano de maíz (blanco, amarillo, rojo o pigmentado), otorgando su clasificación en materiales muy suaves, suaves, intermedios, duros y muy duros. El índice de flotación se basa en el número de granos que flotan en una solución de referencia, ya que depende de la densidad de estos con respecto a la densidad de la solución de nitrato o azúcar, por lo que entre más duro sea el tipo de maíz menor es el valor de IF. Dado que el porcentaje de humedad de las muestras influye significativamente en el resultado, se recomienda que sea homogénea entre las muestras a evaluar (aproximadamente 12%) (Salinas-Moreno & Vázquez-Carrillo, 2006). El peso hectolitro se considera como la densidad aparente del grano, la cual está relacionada con su dureza, susceptibilidad a la ruptura y a la molienda, velocidad de secado y resistencia al desarrollo de hongos. La técnica consiste en determinar el peso del grano contenido en un volumen de un litro (Salinas-Moreno & Vázquez-Carrillo, 2006).

Granos flotantes	Dureza
0-12	Muy duro
13-37	Duro
38-62	Intermedio
63-87	Suave
88-100	Muy suave

Figura 12. Clasificación del grano de maíz por su dureza según el índice de flotación en solución de azúcar al 67% (CIMMYT, 2016).

Peso hectolítrico kg hL <sup>-1</sup>	Dureza
78	Duro
74 - 75	Intermedio
73	Suave

Figura 13. Clasificación del grano de maíz por su dureza según peso hectolitrico kg/hL (CIMMYT, 2016).

## **Evaluación de la masa de harina nixtamalizada de maíz**

### **Análisis del perfil de textura (TPA)**

El análisis del perfil de textura es una prueba analítica de compresión doble bastante empleada en la industria de alimentos y tiene por objetivo evaluar las propiedades texturales de los alimentos crudos, de procesamiento intermedios o finales. Ocasionalmente es usada en otras industrias para productos farmacéuticos, geles y cuidado personal. Durante una prueba de TPA, las muestras se comprimen dos veces con un analizador de textura para proporcionar una idea de cómo se comportan las muestras. La identidad de textura de cualquier alimento rara vez es una simple cuestión de entender un atributo singular como la dureza, la adhesión, la cohesión o la elasticidad. La textura de cualquier alimento es multifacética y está vinculada a las expectativas funcionales de la materia alimenticia analizada. El TPA como método analítico permite cuantificar múltiples parámetros de textura en un solo experimento. Los parámetros TPA han evolucionado desde la creación de la prueba, a través de los comentarios de la industria de alimentos y las extensas pruebas realizadas en investigaciones (Texture-Technologies, 2019).

### **Equipo Analizador de Textura**

Los analizadores de textura constan de cuatro componentes esenciales (Figura 14). Primero, el sistema de transmisión imparte movimiento a un brazo móvil (*cross head or arm*) que contiene la celda de prueba (*test cell*). Segundo, la plataforma (*platform*) de prueba es generalmente estacionaria, se encuentra unida a la base de la máquina y es compatible con el alimento de prueba que sostiene. Tercero, la celda de prueba se describe principalmente por su masa (kg) y se le pueden instalar diferentes pruebas de acuerdo a la necesidad de la investigación. En cuarto lugar, el sistema de medición, registro y análisis de información de prueba. El software utilizado para controlar el analizador de textura es de vital importancia para la calibración de equipo y establecimiento de los parámetros de prueba; es fácil de usar y ofrece una amplia gama de pruebas preestablecidas para diferentes categorías de alimentos (Rolle, Siret, Río-Segade, & Maury, 2012).

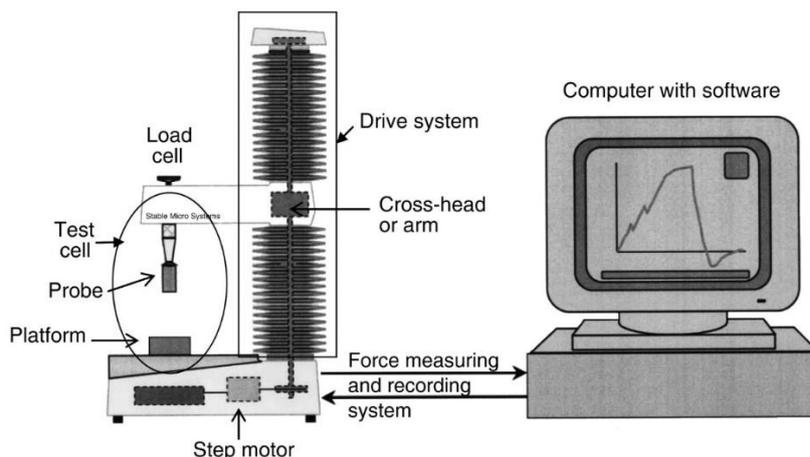


Figura 14. Equipo analizador de textura (Rolle, Siret, Río-Segade, & Maury, 2012).

### **Cohesividad**

Un producto es cohesivo cuando se adhiere a sí mismo bajo algún esfuerzo de compresión o tensión. En los alimentos, la forma obvia de experimentar cohesión es la energía empleada en desorganizar estructuralmente un producto. Mecánicamente, se pueden aplicar pruebas experimentales con diversos estresores. Un producto con una fuerte cohesión será más tolerante con las tensiones de fabricación, embalaje y entrega y, por lo tanto, se presentará a los consumidores en su estado esperado. Un producto con mala cohesión no lo hará. Piense en una galleta con chispas de chocolate seca que se rompe en mil pedazos en un primer bocado. Un producto no puede ser 100% cohesivo si está estresado más allá de su punto de deformación, ya que irremediablemente habrá perdido algo de energía en ese punto de rendimiento (Texture-Technologies, 2019).

### **Adhesividad**

Las primeras publicaciones originales de TPA en 1963 describieron la adherencia como un parámetro primario del TPA. En Texture Technologies Corp se ha establecido como un parámetro secundario, ya que existen otras pruebas idóneas para cuantificar la adhesión en alimentos en lugar de una prueba de TPA. La secuencia TPA implica comprimir un producto, retirar la sonda al punto de contacto original y luego repetir el ciclo completo una segunda vez. La adhesión se mide como el trabajo negativo entre los dos ciclos, sin embargo, en muchos casos el producto se pega a la sonda y puede distorsionar la evaluación de los resultados. La métrica tampoco funciona con muchos productos que son sensibles a la presión. En otros casos, un producto más duro también crea más presión

entre el producto y la base y, por lo tanto, se puede crear una incrustación. No es infrecuente que las muestras altamente adhesivas se levanten parcialmente durante la carrera de descompresión, especialmente porque las muestras rara vez se sujetan durante las pruebas de TPA. En consecuencia, muchos investigadores y fabricantes de equipos TPA recomiendan que los interesados específicamente en la adhesividad realicen otras pruebas en lugar de usar el método TPA (Texture-Technologies, 2019).

### Interpretación cohesividad y adhesividad TPA

Diferentes artículos establecen los criterios de interpretación y cálculo para cada uno de los dos ciclos de compresión incluyendo tanto el trabajo de bajada como el de retirada (figura 15). De acuerdo a Texture - Technologies (2019), Armero et al. (1997) y Peyron et al. (2011) la cohesividad se calcula como la relación entre las áreas  $A2/A1$  y la adhesividad es equivalente al área  $A3$ .

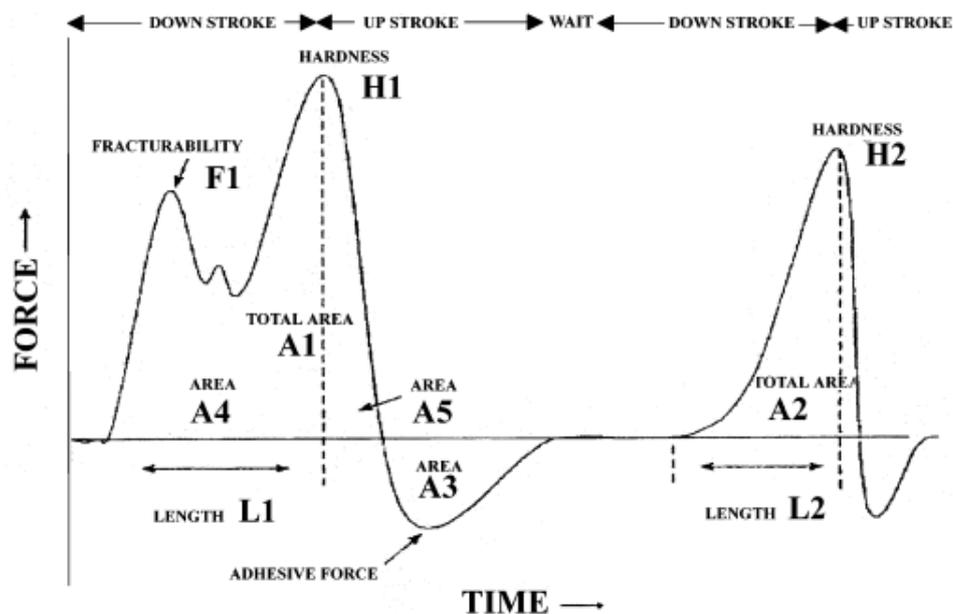


Figura 15. Grafica de dos ciclos de compresión TPA (Armero, Collar, & Forsch, 1997).

### Rapid Visco Analyzer (RVA)

El Rapid Visco Analyzer (RVA) es un viscosímetro rotacional que cuantifica y registra continuamente la viscosidad, es decir determina la resistencia al flujo de una pasta a base de almidón cuando es sometida a una tensión de desplazamiento constante, incorporando a su vez condiciones de tiempo y temperaturas específicas de acuerdo al tipo muestra. Si bien el RVA mide el desempeño del almidón, otros componentes como proteínas,

azúcares, lípidos y fibra impactan en el análisis de la matriz como un todo. Este instrumento es particularmente valioso en muchos procesos y aplicaciones de investigación para la evaluación de productos desarrollados con funcionalidades específicas. El tiempo de cada prueba es de 13 minutos aproximadamente utilizando para ello un pequeño tamaño de muestra (aproximadamente 3 g de harina) lo que la convierte en una prueba rápida. La prueba del RVA consiste en someter a la muestra al ciclo clásico de la cocción (precalentamiento-calentamiento-reposo) donde la viscosidad registra un comportamiento que depende en gran medida del origen y las propiedades del almidón. Los cambios de viscosidad producidos por calentamiento y enfriamiento del almidón en agua proporcionan una característica curva de la pasta (*Pasting curve*) (Avila, 2002).

El RVA es operado gracias a una interfase conectada a un programa de computadora denominado "*Thermocline for Windows*" (TCW) que permite realizar las corridas, exportar, analizar y graficar los resultados de las pruebas. Antes de iniciar cada corrida se calibra el equipo. El TCW cuenta con perfiles preconfigurados según sea la muestra que requiere analizar, para la harina de maíz existe un perfil estándar aprobado por la AACC (2000), que consiste en condicionar la muestra a una serie de temperaturas y tiempos determinados (Perten, 2015).

Al utilizar el equipo RVA primero se selecciona el método apropiado en el TCW software. Segundo, se pesa con precisión la muestra (3.5 g) y el agua (25 g) utilizando un balanza electrónica; en la capsula de prueba el orden correcto es añadir el agua y luego la muestra. Tercero, coloque el agitador en la capsula de prueba y empuje hacia abajo cualquier masa de muestra. Cuarto, acople la capsula en el rotor del RVA. Quinto, cierre el equipo e inicie la prueba. Quinto, la prueba comenzara y con ello la gráfica de resultados en el monitor de la computadora. Todas las variables controladas, tiempo, temperatura, velocidad y la viscosidad son registradas, graficadas y pueden ser observadas a tiempo real de la corrida. Finalmente en el monitor se indicará que la prueba ha finalizado y los resultados serán reportados (figura 16) (Perten, 2015).

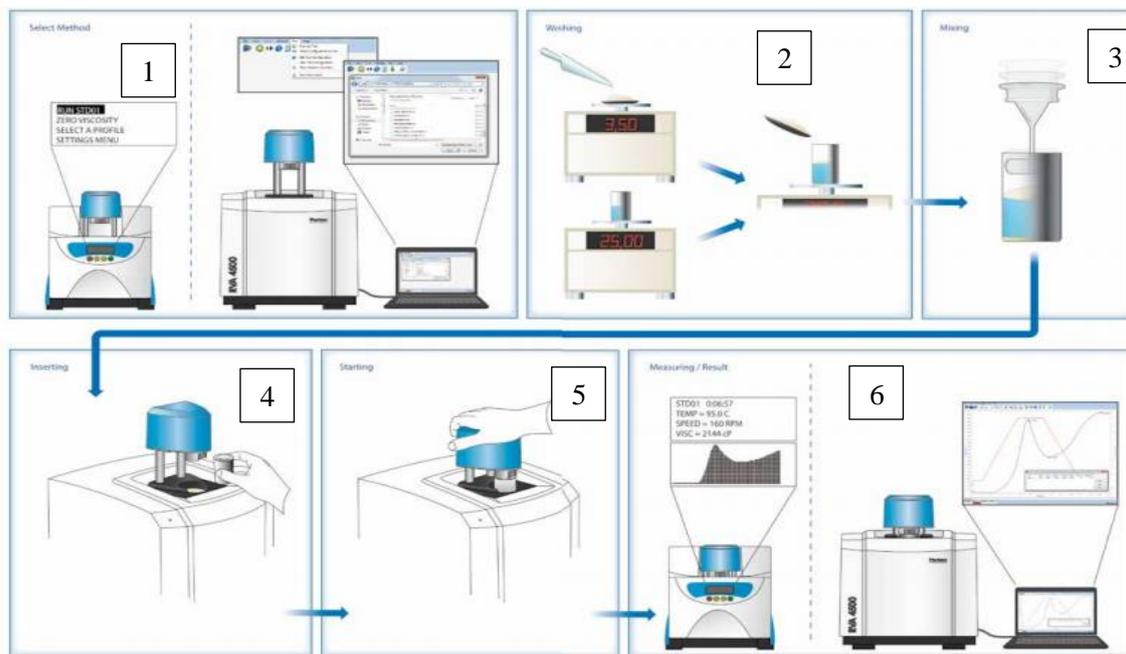


Figura 16. Secuencia de seis pasos para de uso del equipo RVA (Perten, 2015).

### Interpretación de las curvas de pasta del RVA

En la figura 17a y 17b se puede observar una curva típica de pasta en el equipo RVA para harinas de granos.

“*Peak viscosity*” es la máxima viscosidad alcanzada durante la etapa de calentamiento a 95°C. La variación de “*peak viscosity*” esta usualmente asociada con el poder de hinchamiento de los gránulos almidón y su grado de disrupción (Corke, Wu, Yue, & Sun, 1997).

“*Holding Strength*” es la mínima viscosidad alcanzada durante la etapa de calentamiento a 95°C. “*Holding Strength*” mide la viscosidad del almidón cuando el hinchamiento de los gránulos es afectado por la fuerza de corte y calentamiento. “*Holding Strength*” refleja la susceptibilidad del almidón a descomponerse por el corte y calentamiento. Los gránulos de almidón a medida que se van hinchando por la absorbiendo agua se vuelven más susceptibles a la desintegración por cizallamiento; especialmente los almidones con menor contenido de amilosa (Kaur, Singh, Ezekiel, & Guraya, 2007).

“*Final Viscosity*” es la viscosidad final de la pasta luego de ser enfriado a 50°C. Los gránulos de almidón experimentan una reestructuración de su organización molecular y

retrogradación. La viscosidad final mide la capacidad del almidón en formar una pasta viscosa después de la cocción y enfriado (Shafie, Cheng, Lee, & Yiu, 2016).

“*Breakdown viscosity*” ha sido definida como la diferencia entre “*Peak viscosity*” y “*Holding Strength*”. Está asociada a la estabilidad de la pasta explicada por la hidratación, poder de hinchamiento del granulo de almidón y resistencia al corte y calentamiento (Corke, Wu, Yue, & Sun, 1997).

“*Setback viscosity*” indica la tendencia del almidón de una pasta a la retrogradación después de la gelatinización y enfriamiento a 50°C. El cálculo de la “*Setback viscosity*” se calcula restando “*Peak viscosity*” de “*Final viscosity*” (Kaur, Singh, Ezekiel, & Guraya, 2007).

“*Pasting Temperature*” provee la información de la mínima temperatura requerida para cocinar la muestra (Jin, 2018). Como indica Bao Jin (2008) no se debe confundir la “*Pasting Temperature*” (PT) con la temperatura de gelatinización (GT) derivada de un escaneo de calorimetría diferencial (DSC), debido que el valor de PT obtenido en una prueba de RVA está siempre sobreestimado y es mayor a la GT obtenida en una DSC. Juhász & Salgo (2008) brindan una definición más técnica mencionando que es la temperatura en la que el equipo RVA registra un incremento de 25 cP por un periodo de 20 segundos.

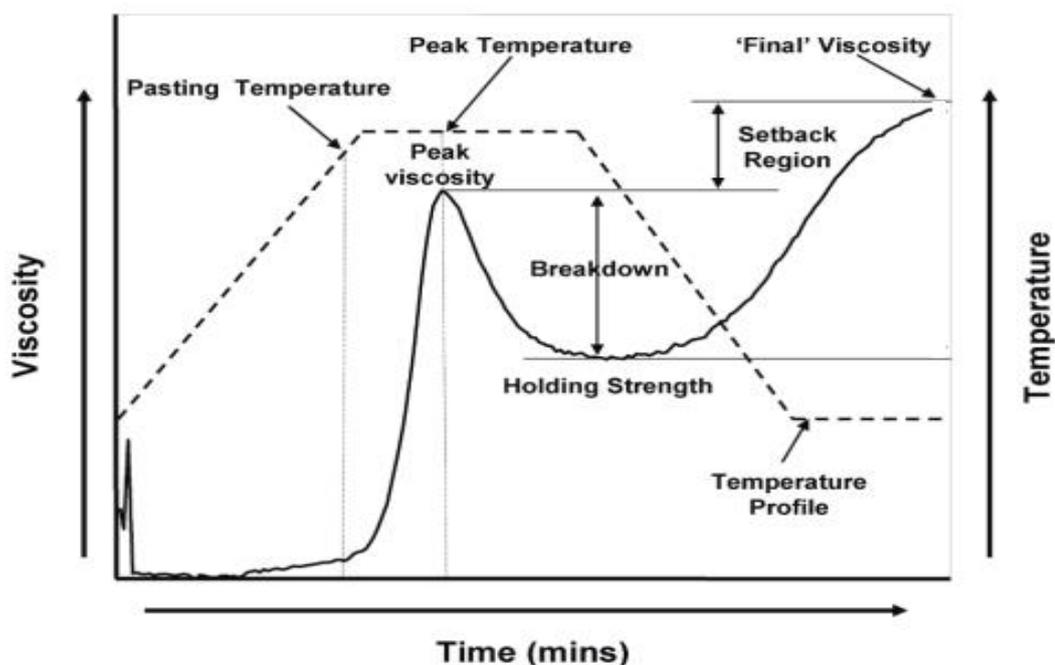


Figura 17a. Curva de pasta típica del RVA para harinas de granos (Martinez, 2017)

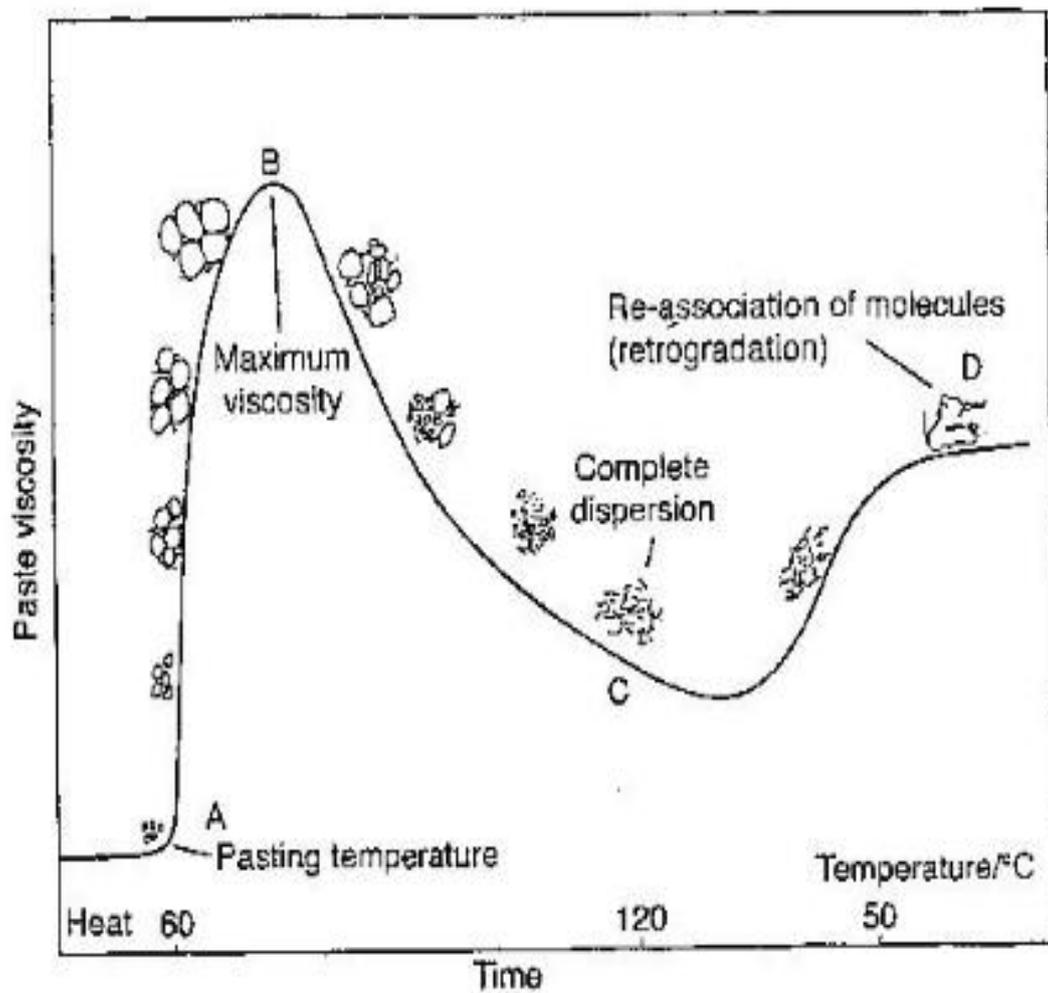


Figura 17B. Curva de pasta típica del RVA para harinas de granos

## **Objetivos e hipótesis Objetivos.**

### **Objetivo general**

- Obtener harina nixtamalizada a partir del grano de maíz morado mediante el método de extrusión con características fisicoquímicas similares a la harina nixtamalizada importada por Wasi Organics.

### **Objetivos específicos**

- Determinar los efectos de la granulometría, contenido de humedad y velocidad de tornillo en las propiedades fisicoquímicas de las harinas nixtamalizadas producidas por extrusión.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la harina nixtamalizada comercial y de las harinas nixtamalizadas por extrusión mediante viscoamilografía (RVA) y texturometría para determinar la adhesividad y cohesividad.
- Evaluar los efectos de la nixtamalización por extrusión en la retención de antocianinas en la harina de maíz morado.

### **Hipótesis.**

- La harina nixtamalizada por el método de extrusión de maíz morado no presenta diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas (viscosidad, capacidad de absorción de agua, adhesividad, cohesividad) comparado con la harina nixtamalizada comercial importada de México.

## Método

### Abastecimiento de materia prima

Se utilizó como materia prima maíz morado orgánico variedad Canteño identificado con número de lote WMO 0917, hidróxido de sodio identificado con número de lote 211217, cloruro de calcio identificado con número de lote 20180101 y harina nixtamalizada marca MINSA como muestra patrón identificada con número de lote 128213.

### Maíz morado orgánico variedad Canteño

Se verificó la conformidad de los límites de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos para el maíz morado de acuerdo a las normativas vigentes. Los ensayos de laboratorio a excepción de los contaminantes físicos fueron realizados por NSF INASSA.

#### a) Contaminantes Físicos

- Granos dañados e impurezas < 5%

Se realizó una selección manual de granos dañados e impurezas sobre una muestra aleatoria de 1500g. La proporción de contaminantes físicos se calculó mediante la relación: Granos dañados e impurezas g x 100% /1500 g

#### b) Contaminantes Químicos

- Aflatoxinas Totales (B1, B2, G1, G2) < 4ppb (Método Kit Veratox)
- Fumonisina < 4ppm (Método Kit Veratox – AOAC.2001.06)

#### c) Contaminantes Microbiológicos

- Mohos < 10<sup>5</sup> ufc / g (Método ICMSF. Pag 165-167. 2da edición 2000)
- Salmonella Ausencia en 25 g (Método ISO 6579-1-2017)

### Cal Hidratada / Hidróxido de Calcio (Ca (OH)<sub>2</sub>)

El hidróxido de calcio en concentraciones superiores al 40% es un producto químico controlado y sujeto a permiso por SUNAT. Para efectos de la investigación se elaboró hidróxido de calcio mediante la reacción de cloruro de calcio (pureza >90%) e hidróxido de sodio (pureza >95%). La producción se condujo en el laboratorio de MAIA SAC siguiendo las recomendaciones establecidas por NileRed (2014) para la obtención de hidróxido de calcio en polvo.

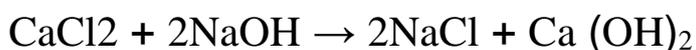


Figura 18. Ecuación de reacción del hidróxido de calcio (NileRed, 2014).

## **Harina nixtamalizada marca MINSA**

Se verifico la conformidad de la harina nixtamalizada de maíz blanco dentado de la marca MINSA- BUNGE, comparando el certificado de calidad y la ficha técnica. Se realizó un ensayo de tamaño de partícula en el laboratorio de la empresa SGS del Perú. El método fue por cuantificación de partículas retenidas en malla ASTM 20, 35 y 80.

### **Análisis de la materia prima**

#### **Análisis químico**

Se realizó un análisis proximal por duplicado a la harina de maíz morado y de la harina comercial (Harina nixtamalizada MINSA- BUNGE) siguiendo los siguientes métodos:

- Antocianinas (solo para harina de maíz morado) - Se seleccionó una muestra de 525g y se siguió el procedimiento de ensayo: " Journal Food Science Vol. 32. 1968 Quantitative methods for anthocyanins extracction and determination".
- Cenizas - Se seleccionó una muestra de 525g y se siguió el procedimiento de ensayo NTP 206.012: 2018 Bizcochos, galletas, pastas y fideos.
- Fibra Dietaría - Se seleccionó una muestra de 525g y se siguió el procedimiento de ensayo: AOAC 985.29 On line 20th Ed. 2016 Total Dietary Fiber in foods. Enzymatic - gravimetric Method.
- Grasas - Se seleccionó una muestra de 525g y se siguió el procedimiento de ensayo: AOAC 920.39, C, 20th. Edition. 2016. Fat (Crude).
- Humedad- Se seleccionó una muestra de 100 g y se siguió el procedimiento de ensayo NTP 206.011: 2018 Bizcochos, galletas, pastas y fideos.
- Proteína - se seleccionó una muestra de 525g y se siguió el procedimiento de ensayo: AOAC 984.13. On line 20th Ed. 2016. Protein (crude) in animal feed and pet food. Copper catalyst Kjeldahl method.
- Carbohidratos disponibles por diferencia: 100% - %proteína -%grasa - %humedad - % cenizas - %fibra dietaría

## Análisis físico

Se realizaron ensayos por triplicado para determinar la dureza del grano de maíz morado mediante los métodos sugeridos por el CIMMYT (2016): índice de flotación en solución de azúcar al 67% y peso hectolitrico. El índice de flotación en solución de azúcar al 67% se ejecuta seleccionando 100 granos sanos y se sumergen en una mezcla homogénea de 580 ml de agua destilada y 670 g de azúcar refinada, finalmente se determina la dureza del grano de acuerdo a la cantidad de granos flotantes según la figura 12 del marco teórico. El peso hectolitrico se determina mediante la relación del peso de granos de maíz que ocupan el volumen de un litro en un vaso precipitado transparente, finalmente se determina la dureza del grano de acuerdo a la relación kg/hL según la figura 13 del marco teórico.

## Preparación harina de maíz morado

Las mazorcas de maíz morado (200 kg) almacenadas a una humedad aproximada de 10 % en base húmeda (bh) fueron desgranadas manualmente. Luego se procedió al tamizado de los granos en mallas mosquiteras para separar las partículas de polvo de los granos. La preparación de las muestras de harina de maíz morado se realizó moliendo los granos sin separar el pericarpio en un molino de martillos de 5 hp sin marca. Se trabajó con mallas de 0.6mm y 0.93 mm en la operación. Posteriormente la harina se envaso en bolsas rotuladas de polipropileno biorientado (bopp) de 40 micras por 10 kg (Figura 19).



Figura 19. Flujo de proceso para la obtención de harina de maíz morado.

### **Acondicionamiento de la harina de maíz nixtamalizada comercial**

La harina nixtamalizada de maíz blanco de México de la marca MINSA- BUNGE fue fraccionada de su envase primario (sacos papel multipliego de 20 kg) a dos bolsas rotuladas de polipropileno biorientado (bopp) de 40 micras de 10 kg.

### **Procesamiento para la obtención de harina nixtamalizada de maíz morado**

#### **Acondicionamiento de la harina de maíz morado**

La harina de maíz morado fue homogenizada en una mezcladora planetaria Marca Nova con una concentración de hidróxido de calcio de 0.3% (p/p) de acuerdo a Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014); por 30 minutos y en lotes de 30 kg de por cada granulometría de harina (0.6mm y 0.93 mm). A la mezcla se le ajustó el contenido de humedad en base húmeda a 30% de acuerdo a Milán-Carrillo et al. (2006), 40% y 50% (p/p) (Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan, 2014). La hidratación en las proporciones mencionadas se realizó con la ayuda de un pulverizador manual. Se determinó la humedad inicial de la harina con un analizador de humedad Mettler Toledo HE73 y mediante caculos matemáticos se estableció y peso la cantidad de agua requerida para alcanzar cada contenido de humedad. La hidratación mediante pulverización se realizó simultáneamente al mezclado por aproximadamente 20 minutos. Posteriormente se dejó operando la mezcladora por 40 minutos adicionales. Por cada contenido de humedad (30, 40 y 50%) se almacenó 10 kg de muestra en bolsas bopp de 40 micras por 15 horas a temperatura ambiente (26°C) antes de iniciar la extrusión (Figura 20).

#### **Operaciones**

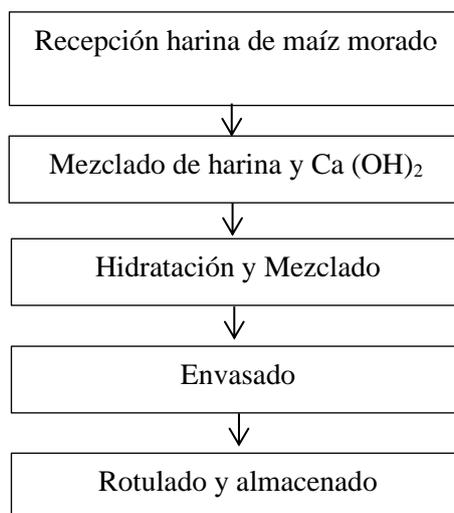


Figura 20. Flujo de proceso del acondicionamiento de la harina de maíz morado.

### Nixtamalización por extrusión de la harina de maíz morado

La extrusión se llevó cabo en un extrusor de tornillo doble sin marca con una razón de compresión de tornillo de 2:1, 19 mm de diámetro de tornillo, relación largo – diámetro de 25:1, con tornillos entrelazados y de co-rotación. El diámetro de boquilla de extrusión fue de 3 mm y cinco zonas de calentamiento. Los parámetros de la operación del extrusión: temperatura y velocidad de tornillo; fueron seleccionados considerando las condiciones óptimas establecidas por Milán-Carrillo et al. (2006). Las temperaturas en las cinco zonas de calentamiento del extrusor fueron programadas de manera ascendente desde la alimentación hasta la salida (60, 70, 80, 90 y 100°C). Las velocidades de tornillo fueron 50 y 110 rpm. Las harinas acondicionadas fueron introducidas por el alimentador horizontal del extrusor, el cual giraba a la misma velocidad que los tornillos principales para mantener un flujo constante y homogéneo de producto en la cámara de extrusión. Las cuchillas de cortado del extruido se programaron a una velocidad de 50 rpm.

Los extruidos fueron enfriados a temperatura ambiente y posteriormente deshidratados en un secador tipo bandejas a 65°C hasta alcanzar una humedad de 10%. La humedad fue monitoreada por un analizador de humedad Mettler Toledo HE73. El producto fue molido en un molino de martillos con malla de 0.85 mm (Figura 21). Las muestras por cada tratamiento fueron rotuladas y almacenadas en bolsas bopp de 40 micras por 5 kg.

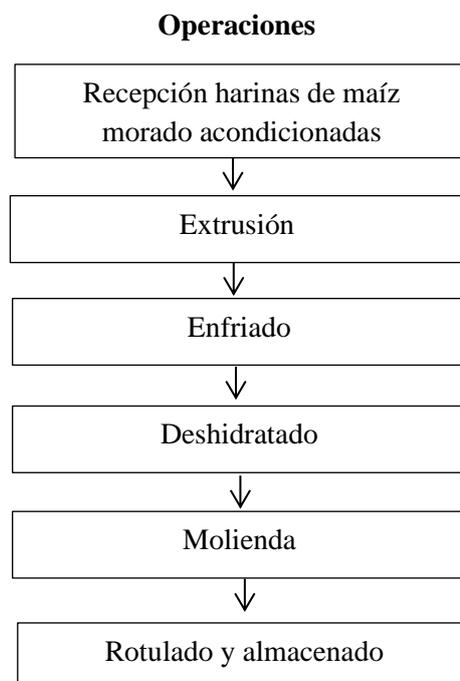


Figura 21. Flujo de proceso nixtamalización por extrusión de la harina de maíz morado.

## Diseño Experimental

Para la obtención de harina de maíz morado nixtamalizada por el método de extrusión el diseño experimental fue completamente al azar con tres factores: Tamaño de partícula de harina, humedad inicial de extrusión y velocidad de tornillo de extrusión. El tamaño de partícula de harina se trabajó con dos niveles, la humedad inicial de extrusión con tres niveles y la velocidad de tornillo de extrusión con dos niveles. El diseño factorial fue de 2 x 3 x 2 con un total de 12 tratamientos. (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Factores y niveles del diseño experimental para la obtención de harina de maíz morado nixtamalizada por el método de extrusión.

Factores	Niveles
Tamaño de partícula de harina	100% pasante por malla 0.6mm (1 molienda)
	100% pasante por malla 0.93 mm (1 molienda)
Humedad Inicial de extrusión	30 %, base húmeda
	40 % base húmeda
	50 % base húmeda
Velocidad de tornillo de extrusión	50 RPM
	110 RPM

Tabla 2. Codificación de tratamientos del experimento

Tratamiento	Granulometría (mm)	Velocidad de Tornillo	Humedad
T1 0.6mm, 110rpm, 30%	0.60	110 rpm	30%
T2 0.6mm, 50rpm, 30%	0.60	50 rpm	30%
T3 0.93mm, 110rpm, 30%	0.93	110 rpm	30%
T4 0.93mm, 50rpm, 30%	0.93	50 rpm	30%
T5 0.6mm, 110rpm, 40%	0.60	110 rpm	40%
T6 0.6mm, 50rpm, 40%	0.60	50 rpm	40%
T7 0.93mm, 110rpm, 40%	0.93	110 rpm	40%
T8 0.93mm, 50rpm, 40%	0.93	50 rpm	40%
T9 0.6mm, 110rpm, 50%	0.60	110 rpm	50%
T10 0.6mm, 50rpm, 50%	0.60	50 rpm	50%
T11 0.93mm, 110rpm, 50%	0.93	110 rpm	50%
T12 0.93mm, 50rpm, 50%	0.93	50 rpm	50%

## Evaluaciones fisicoquímicas

### Contenido de Humedad

El contenido de humedad para los tratamientos de harinas nixtamalizadas se determinó mediante un analizador de humedad Mettler Toledo HE73 por triplicado.

### Prueba Rapid Visco Analyzer (RVA)

Las pruebas de harinas de maíz en el Rapid visco Analyzer (RVA) fueron realizados en los laboratorios de la empresa GRANOTEC PERU por el Método: AACC, Met. 76-21: Perfil STD2 – General Pasting Method una sola vez para los 12 tratamientos y por duplicado para la harina nixtamalizada comercial.

La prueba se realizó colocando en el equipo RVA 3.5 gramos de muestra ajustada a una humedad del 14% y 25.0 ml de agua destilada. El programa de temperatura y tiempo fue el perfil STD2 como se observa en la figura 23.

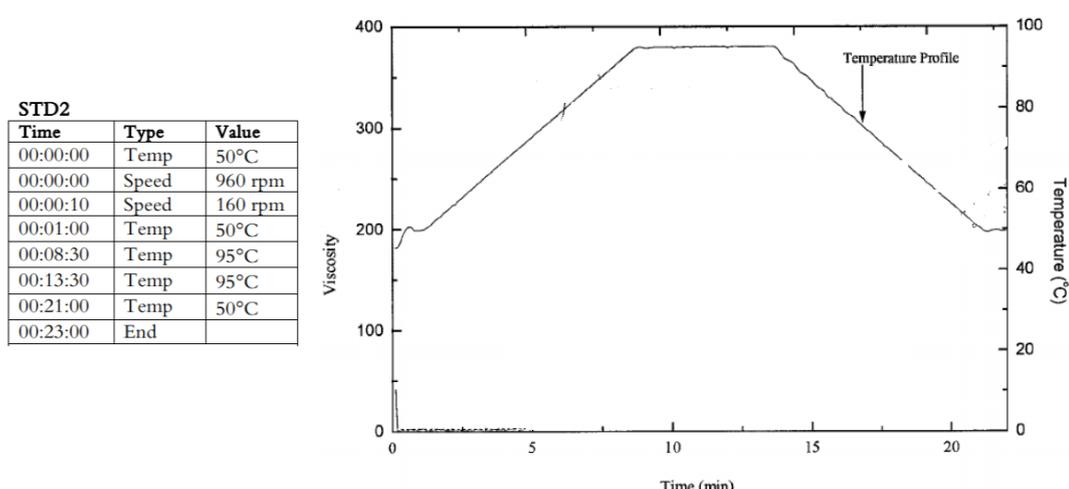


Figura 23. Programa de temperatura y tiempo RVA- Perfil STD2 (Perten, 2018).

El RVA se operó utilizando un programa de computadora denominado “*Thermocline for Windows*” (TCW) que permitió realizar las corridas, exportar, analizar y graficar los resultados de los tratamientos. Antes de iniciar cada corrida se calibro el equipo. El TCW cuenta con perfiles preconfigurados. Para la harina de maíz existe un perfil estándar aprobado por la AACC (2000), que indica como acondicionar la muestra, velocidad de giro del viscosímetro y secuencia de temperaturas.

### **La capacidad de absorción de agua (CAA)**

La CAA se midió utilizando la metodología descrita por Flores-Farias et al. (2002) y Bedolla & Rooney (1984). Se pesaron 100 g de harina, adicionándose agua de forma gradual, realizando un amasado manual suave hasta obtener una masa de buena consistencia. La masa debe tener una consistencia cohesiva, con suficiente humedad para ser moldeada fácilmente sin mostrar signos de fractura. Al pasar un rodillo sobre la masa esta debe poder laminarse y desprenderse del utensilio sin dificultad. La masa no deber tener una consistencia pegajosa, ni exceso de humedad que le haga perder plasticidad.

La cantidad de agua adicionada se registró como la capacidad de absorción de agua de la harina en ml de agua / 100 g de harina.

### **Evaluación adhesividad y cohesividad**

Los ensayos adhesividad y cohesividad se llevaron a cabo en el laboratorio de pruebas fisicoquímicos de la Universidad San Ignacio de Loyola. Se utilizó un analizador de perfil de textura equipado con una celda de poder de 5 kg. La adhesividad y cohesividad se evaluó por medio de penetración de una esfera de prueba de 2 mm de diámetro a una velocidad de 2mm/s y 4 mm de penetración. Las muestras de masa se acondicionaron de acuerdo a su valor de CAA según lo establecido por Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014).

### **Análisis Estadístico**

Los análisis estadísticos fueron realizados empleando el programa Minitab versión 19.

Se empleo el método de Tukey con una de confianza del 95% para las comparaciones múltiples.

Se realizo un diseño factorial completo de  $2^3$ . Para ello se retiraron los experimentos con una humedad de 50%. Dejando tres factores con dos niveles cada uno.

## Resultados y Discusión

### Presentación de resultados y discusión

#### Análisis de la materia prima

#### Maíz morado orgánico variedad Canteño

Los resultados de los ensayos físicos, químicos y microbiológicos del maíz morado orgánico Canteño (Lote WMO 0917) se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los ensayos físicos, químicos y microbiológicos del maíz morado orgánico Canteño (Lote WMO 0917).

<b>Análisis Físicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado *</b>
Inspección visual Proporción granos dañados e impurezas	%	4.091 ± 0.54
<b>Análisis químicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
Aflatoxinas totales (B1, B2, G1, G2) Límite de cuantificación 1ppb	ppb	<1
Fumonisina Límite de cuantificación 1ppm	ppm	<1
<b>Análisis Microbiológicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
Mohos (recuento)	UFC/g	99 x 10 <sup>3</sup>
Salmonella (detección)	25g	No detectado

\* Valor representado como la media ± desviación estándar ( $\bar{x} \pm SD$ )

Del análisis estadístico de los granos dañados e impurezas, se determinó que la media, la media ± SD y el intervalo de confianza t de Student (90% confianza) se encuentran por debajo del límite de 5% establecido como porcentaje máximo para contaminantes físicos.

El resultado de ensayo de micotoxinas, Aflatoxinas totales y Fumonisina, se encuentra por debajo del valor establecido 4 ppb y 4 ppm respectivamente. El resultado del ensayo de microorganismos dio negativo para Salmonella y por debajo de cien mil unidades formadoras de colonia (UFC) para mohos. Se concluye la conformidad del maíz morado (Lote: WMO 0917) para contaminantes físicos, químicos y microbiológicos.

## Informe de Ensayo N° 134648

### DATOS DEL CLIENTE

Solicitante	MAIA S.A.C.
Domicilio legal	CAL.LOS TAPICEROS NRO. 179 LIMA - LIMA - ATE
Contacto	Sr. Rolando Vincos
Dirección de entrega	CAL.LOS TAPICEROS NRO. 179 LIMA - LIMA - ATE

### DATOS DEL PRODUCTO

Producto	MAIZ MORADO EN MAZORCA
Ensayos realizados en	Av. La Marina 3035 San Miguel - Lima

### DATOS DE LA MUESTRA: M - 194471

Identificación	Cantidad	Descripción / Presentación	Precinto	FV	FP
LOTE:WMO 0917	3210g aprox.	Bolsa de plástico sellada e identificada	--	--	--

### DATOS DEL SERVICIO

Identificación	Análisis	Unidad	Resultado
LOTE:WMO 0917	<b>Aflatoxinas Totales (B1, B2, G1, G2) (Límite de cuantificación 1 ppb)</b>	<b>ppb</b>	<b>&lt;1(*)</b>
LOTE:WMO 0917	<b>Bacillus cereus (Recuento)</b>	<b>UFC/g</b>	<b>&lt;100(**)(*)</b>
LOTE:WMO 0917	Escherichia coli (Numeración)	NMP/g	<3.0
LOTE:WMO 0917	<b>Fumonísina (Límite de cuantificación 1 ppm)</b>	<b>ppm</b>	<b>&lt;1(*)</b>
LOTE:WMO 0917	Mohos (Recuento)	UFC/g	99 000
LOTE:WMO 0917	Salmonella (Detección)	25g	NO DETECTADO

### Métodos

**Aflatoxinas Totales (B1, B2, G1, G2):** Kit Verator para Aflatoxina HS – Prueba Cuantitativa de alta sensibilidad  
**Bacillus cereus (Recuento):** FDA/BAM On line, 8th Ed. Rev. A, 1998, Chapter 14, January 2001; Updated February 2012. Bacillus cereus.  
**Escherichia coli (Numeración):** FDA/BAM, Online 8th.Ed.Rev.A, 1998, September 2002-Chapter 4, A,B,C,E y F (Revisada el 2013).2013.Enumeration of Escherichia coli and the Coliform Bacteria. Conventional Method for coliforms, fecal coliforms and E. coli  
**Fumonísina:** Verator para Fumonísina – Prueba Cuantitativa. Método Oficial de la AOAC 2001.06.  
**Mohos (Recuento):** ICHMF Microorganismos de los Alimentos. Su significado y métodos de enumeración. Pág. 165-167 2da Ed. Reimpresión 2000 1983  
**Recuentos de mohos y levaduras. Método de recuento de mohos y levaduras por siembra en placa en todo el medio**  
**Salmonella (Detección):** ISO 6579-1:2017. First edition (Excepto item 9.3.3; 9.4.3 y Annex D). 2017. Microbiology of the food chain -- Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of Salmonella -- Part 1: Detection of Salmonella spp.

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL – DA.  
 (\*\*) Valor Estimado

**El muestreo no es parte del alcance de la acreditación del laboratorio de ensayo de NSF INASSA SAC.**

**NSF INASSA S.A.C**

Carmen Quintana Rodríguez  
 Jefe del Laboratorio de Microbiología  
 C.B.P. N° 5857

Emma Aguinaga Malca  
 Gerente Senior de Laboratorios  
 C.I.P. N° 29217

Lima, 11 de noviembre de 2017

Figura 24. Resultados de ensayo de micotoxinas y microorganismos.

### Análisis químico de harinas

Los resultados por duplicado del análisis proximal de la harina de maíz morado y de la harina nixtamalizada comercial de maíz blanco (MINSA- BUNGE) se muestran en base húmeda en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados del análisis proximal de harina de maíz morado y de harina nixtamalizada comercial (Harina MINSA- BUNGE).

<b>Análisis Proximal</b>	<b>Harina Maíz morado*</b>	<b>Harina Nixtamalizada Comercial*</b>
Proteína N x 6.25%	7.750 ± 0.00	9.250 ± 0.00
Grasa %	4.750 ± 0.00	4.000 ± 0.00
Humedad %	11.455 ± 0.05	11.885 ± 0.11
Cenizas %	1.640 ± 0.03	1.895 ± 0.05
Fibra dietaría %	11.575 ± 0.08	6.585 ± 0.23
Carbohidratos disponibles %	62.830 ± 0.06	66.410 ± 0.24

\* Valores representado como la media ± desviación estándar ( $\bar{x} \pm SD$ )

Los resultados del análisis proximal de la harina de maíz morado expresan valores de proteína, grasa, humedad, cenizas, fibra dietaría y carbohidratos semejantes a los reportados en las tablas peruanas de composición de alimentos (2017) para harina de maíz morado.

La proteína en la harina nixtamalizada comercial de maíz blanco MINSA- BUNGE es superior a la harina de maíz morado en 16%; y la fibra en la harina de maíz morado es superior a la harina nixtamalizada comercial de maíz blanco MINSA- BUNGE en 44%.

Considerando que el contenido de proteína no se ve afectado durante el proceso de nixtamalización (Paredes Lopez, Guevara Lara, & Bello Perez, 2009) la cantidad de proteína del grano utilizado por MINSA – BUNGE sería superior al contenido proteico del grano de maíz morado. Gutiérrez- Dorado (2017) menciona que los maíces híbridos (DEKALB) empleados por MINSA – BUNGE presentan un contenido proteico cercano a 9.5 %. Adicionalmente el contenido proteico en la harina comercial (9.250 ± 0.00) tiene proximidad a los resultados presentados por Méndez M., y otros (2005) quienes reportan valores de proteína superiores a 9.3% para híbridos de maíz en México.

El bajo contenido de fibra en la harina nixtamalizada comercial se podría explicar por la remoción del pericarpio (operación pelado) durante el proceso de nixtamalización; sin embargo, la harina nixtamalizada comercial de maíz blanco MINSA- BUNGE declara ser “Whole Grain” por lo que se entiende que el pericarpio no fue retirado y las únicas pérdidas

de fibra estarían asociadas a la operación de cocción y remojo. Méndez M., y otros (2005) reportan valores de fibra menores a 8 % para ciertos híbridos de maíz.

El contenido superior de fibra en la harina de maíz morado podría resultar beneficioso para producir una harina nixtamalizada de maíz morado comparativamente superior en fibra a la harina nixtamalizada de maíz blanco MINSA- BUNGE ; sin embargo, como menciona Sivam, Sun-Waterhouse, Quek, & Perera (2010) un contenido alto de fibra en masa podría alterar propiedades viscoelásticas.

### Análisis físico

Los resultados de los ensayos por triplicado para determinar la dureza del grano de maíz morado mediante los métodos sugeridos por el CIMMYT (2016): índice de flotación y peso hectolitrico, se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados determinación dureza de grano mediante índice de flotación en solución de azúcar al 67% y peso hectolitrico.

<b>Análisis físico</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultados*</b>
<b>Granos de maíz morado</b>		
índice de flotación en solución de azúcar al 67%	%	98.333 ± 1.528
Peso hectolitrico	kg	68.530 ± 0.272

\* Valores representado como la media ± desviación estándar ( $\bar{x} \pm SD$ )

De acuerdo con la categorización CIMMYT (2016) el resultado de indice de flotacion y peso hectolitrico clasifica a los granos de maíz morado como granos muy suaves y suaves respectivamente.

El resultado de dureza limitaría el uso de los granos de maiz morado para la nixtamalización. De acuerdo a lo publicado en la norma Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002 “Calidad para maíz nixtamalizado” (Salinas-Moreano & Aguilar-Modesto, 2010) se recomienda granos de maíz con peso hectolitrico de 74 kg (dureza intermedia) para la elaboración de harina nixtamalizada. Los maíces de dureza intermedia presentan una composición molecular ideal para la nixtamalización tradicional comparado con los maíces de endospermo suave que se hidratan muy rápido (Watson, 2003) al presentar mayor cantidad de amilopectina que amilosa (Ansari, Baga, Chibbar, Sultana, & Howes, 2010).

Por otro lado Martínez - Flores, Martínez - Bustos, C.J., & Gonzales Hernandez (1998) determinaron que las masas nixtamalizadas por extrusión de maíz dentado (dureza intermedia) y maíz harinoso (dureza suave) son aptas para elaborar tortillas, por lo que se podría hipotetizar que la dureza del grano es un factor a considerar en el proceso de nixtamalización tradicional pero no determinante cuando se realiza nixtamalización por extrusión.

### **Tamaño de partícula Harina nixtamalizada marca MINSA- BUNGE**

En tabla 7 se muestran los resultados de tamaño de partículas en malla ASTM 20, 35 y 80 de la harina nixtamalizada marca MINSA- BUNGE.

Tabla 7. Resultados de tamaño de partículas en malla ASTM 20, 35 y 80 de la harina nixtamalizada marca MINSA- BUNGE

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
Retenidos en malla ASTM 20 (0.85 mm) (g/100g)	%	7.09
Retenidos en malla ASTM 35 (0.5 mm) (g/100g)	%	20.14
Retenidos en malla ASTM 80 (0.18 mm) (g/100g)	%	53.27
Pasantes en malla ASTM 80 (0.18 mm) (g/100g)	%	19.50

En los resultados el 80.5% de partículas de la harina nixtamalizada comercial de maíz blanco (MINSA- BUNGE) tenían un tamaño mayor a 0.18mm. Este valor nos permitió establecer una granulometría de molienda referencial en la obtención de la harina nixtamalizada por extrusión de maíz morado.

Adicionalmente los resultados obtenidos concuerdan con los resultados de Gomez, Waniska, & Rooney (1991) respecto a que las harinas nixtamalizadas comerciales son el resultado de una combinación de tamaños de partícula según la aplicación industrial. Los resultados de Gomez, Waniska, & Rooney (1991) determinaron que las harinas nixtamalizadas con  $77.1 \pm 4.2$  % de partículas con un tamaño mayor a 0.25 mm corresponden a harinas nixtamalizadas destinadas para la producción de tortilla chips.

### Pruebas Rapid Visco Analyzer (RVA)

La tabla 10 muestra los resultados por duplicado obtenidos en el Rapid visco Analyzer (RVA) de la harina de maíz nixtamalizada comercial marca MINSAL- BUNGE: CN 01.

Tabla 10. Resultados obtenidos en el Rapid visco Analyzer (RVA) de la harina de maíz nixtamalizada comercial marca MINSAL- BUNGE.

Pruebas	Unidad	Resultados*
Humedad	%	10.880 ± 0.26
Pasting Temperature	°C	67.550 ± 0.64
Peak Time	min	8.430 ± 0.14
Peak Viscosity	cP	1916.500 ± 46.00
Final Viscosity	cP	3329.500 ± 7.78

\* Valores representado como la media ± desviación estándar ( $\bar{x} \pm SD$ )

Los resultados de la tabla 10 fueron los valores extraídos de la curva graficada por el software del RVA para la harina comercial de maíz nixtamalizado.

Estos valores sirvieron referencialmente como un patrón típico de una harina de maíz nixtamalizada. De esta forma se compararon todos los valores RVA de los tratamientos realizados en la investigación contra los valores RVA patrón.

Respecto a los resultados de la tabla 10 obtenidos en el Rapid visco Analyzer (RVA) de la harina de maíz nixtamalizada comercial marca MINSAL- BUNGE se desprende lo siguiente:

- La “*Pasting Temperature*” promedio 67.55 °C se encuentra cercano al valor 69.0°C reportado por Sefa-Dedeh, Cornelius, Sayki, & Ohene, (2004) para la harina nixtamalizada de maiz traicional producida sin tiempo de cocción, con un remojo de 12 horas y concentración de hidroxido de calcio de 0.5%.
- El valor promedio de “*peak viscosity*” 1916.5 cP se encuentra dentro del rango de valores reportado para harinas nixtamalizadas de maiz por metodo tradicional evaluadas por Castillo y colaboradores (2009), de entre 1630.5 ± 38.89 a 3025.5 ± 45.45 cP dependiendo de los tiempos de cocción, reposo y concentración de hidroxido de calcio. Tambien el resultado de “*peak viscosity*” se encuentra dentro del rango de valores reportado para harinas nixtamalizadas de maiz evaluadas por

Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014), de entre 1800.0 y 2584 cP aproximadamente para 1% de cal, 25 minutos de cocción, reposo de 12 horas y secado a 45°C.

- El valor promedio de “*Final viscosity*” 3329.5 cP se encuentra dentro del rango de valores reportado para harinas nixtamalizadas de maiz por metodo tradicional evaluadas por Castillo y colaboradores (2009). Los autores reportaron valores de entre  $3050 \pm 103.23$  a  $5370.5 \pm 24.74$  cP dependiendo de los tiempos de cocción, reposo y concentración de hidroxido de calcio. Tambien el resultado de “*Final viscosity*” se encuentra dentro del rango de valores reportado para harinas nixtamalizadas de maiz evaluadas por Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014), de entre 3000 y 5000 cP aproximadamente para 1% de cal, 25 minutos de cocción, reposo de 12 horas y secado a 45°C.
- El valor promedio de “*peak time*” 8.43 min es superior al reportado para harinas nixtamalizadas de maiz por metodo tradicional evaluadas por Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014). Los autores reportaron un valor aproximado de 7.9 min para 1% de cal, 25 minutos de cocción, reposo de 12 horas y secado a 45°C.

Se debe recordar que los valores de “*Pasting Temperature*”, “*Peak viscosity*” y “*Peak time*” en harinas nixtamalizadas se encuentran estrechamente relacionadas con el daño del almidón, específicamente el daño sobre la amilopectina (Bedolla & Rooney, 1984); y/o la proporción de amilopectina / amilosa (Juhász & Salgo, 2008); y/o gelatinización adicional generada durante extrusión y/o secado(Gómez, Rooney, Waniska, & Pflugfelder, 1987).

Si se compara la masa de nixtamal, con las harinas nixtamalizadas comerciales se debe tener en claro que estas últimas experimentan un proceso adicional de secado y molienda; lo cual contribuye a una gelatinización extra y daño mecánico del almidón.

Los resultados obtenidos de “*Pasting Temperature*” y “*peak viscosity*” de la harina de maíz nixtamalizada comercial marca MINSA- BUNGE refuerzan lo expuesto por Gómez, Rooney, Waniska, & Pflugfelder (1987) quienes mencionan que los tiempos de cocción y reposo son menores para la elaboración de harinas nixtamalizadas comerciales comparado con el proceso tradicional. Se podría sospechar que esta reducción de tiempo de cocción y reposo constituye un mecanismo operativo compensatorio al proceso de secado. Por lo que no sorprende obtener un valor de “*Pasting Temperature*” similar al de una harina nixtamalizada sin cocción y con remojo de 12 horas.

Aparentemente los productores de harinas nixtamalizadas industriales al ser conscientes que durante el proceso de secado ocurre una gelatinización adicional del almidón y/o daño mecánico; deben haber desarrollado a lo largo de los años un “*know how*” que establece una combinación optimizada de los factores económicos: tiempo de cocción, tiempo de remojo y temperatura - tiempo de secado, con la finalidad de alcanzar una harina con características de maquinabilidad semejantes al de la masa de nixtamal.

Finalmente, no se debe perder de perspectiva lo investigado por Gómez, Lee, McDonough, Waniska & Rooney (1992) quienes estudiaron los cambios estructurales y moleculares del almidón de maíz por rayos X, cromatografía líquida, viscosidad y técnicas microscópicas en nixtamal. Los investigadores mencionan que durante el proceso de nixtamalización tradicional en la operación de cocción la cristalinidad del almidón es parcialmente afectada, sin embargo, luego en la operación de remojo la cristalinidad nativa del almidón es recuperada (“*annealing*”). En su investigación la mayoría de gránulos de almidón en la muestra de nixtamal se encontraban hinchados, unidos a otros gránulos y exhibiendo parcial o total birrefringencia (sin embargo la cruz maltes de los gránulos de almidón eran menos distintivas comparadas con los gránulos de maíz crudo). El mismo fenómeno de “*annealing*” fue reportado por Gutierrez – Dorado, y colaboradores (2008) y Flores-Farias, y colaboraderes (2002) en el nixtamal durante la nixtamalización tradicional.

Gutierrez – Dorado, y colaboradores (2008) menciona que las harinas nixtamalizadas comerciales al modificar los tiempos de cocción y remojo; y adicionar las operaciones de secado y moliendo llegan a perder la composición de esta matriz (*annealing*) o nunca logran desarrollar el fenómeno. Esto conlleva a notar una menor calidad de maquinabilidad de una harina nixtamalizada comercial rehidratada comparado con un masa de nixtamal.

Por lo explicado en el párrafo anterior resulta lógico encontrar mayor similitud entre una harina nixtamalizada comercial (suponiendo que nunca desarrolla *annealing*) con una harina nixtamalizada extruida (la cual tampoco desarrollara *annealing* durante su procesamiento). Adicionalmente ambas harinas pasan por las operaciones de secado y moliendo, guardando mayor similitud en proceso que la masa de nixtamal.

La hipótesis que las harinas nixtamalizadas comerciales no desarrollan “*annealing*” o que pierden la composición de la matriz durante el secado y molienda se han relacionado con la “*peak viscosity*” (Gutiérrez – Dorado, y colaboradores, 2008). Masas de nixtamal por el método tradicional reportan “Peak viscosity” que sobrepasan los 4000 cP, mientras que las harinas nixtamalizadas comerciales un máximo de 2400 cP.

Tabla 11. Resultados obtenidos en el Rapid visco Analyzer (RVA) de la harina de maíz de maíz nixtamalizado por método de extrusión.

Pruebas	Unidad	Resultados *											
		T1 0.6mm, 110rpm, 30%	T2 0.6mm, 50rpm, 30%	T3 0.93mm, 110rpm, 30%	T4 0.93mm, 50rpm, 30%	T5 0.6mm, 110rpm, 40%	T6 0.6mm, 50rpm, 40%	T7 0.93mm, 110rpm, 40%	T8 0.93mm, 50rpm, 40%	T9 0.6mm, 110rpm, 50%	T10 0.6mm, 50rpm, 50%	T11 0.93mm, 110rpm, 50%	T12 0.93mm, 50rpm, 50%
Humedad	%	6.76	6.63	7.06	7.10	6.02	5.79	6.22	6.03	5.56	5.60	6.19	6.13
Pasting Temperature	°C	65.10	67.05	66.65	67.05	79.95	82.3	71.85	74.65	82.75	85.15	75.9	76.25
Peak Time	cP	9.60	10.27	9.47	10.13	9.13	9.27	8.73	8.93	9.07	9.27	9.33	9.67
Peak Viscosity	cP	606	810	535	748	515	425	670	493	245	228	481	546
Final viscosity	cP	1780	2527	1561	2409	1326	1126	1338	1102	604	519	1157	1876

\* Valores representado como la media ( $\bar{x}$ )

Respecto a los resultados de la tabla 11 se observa que el rango de "Peak Viscosity" para las harinas de maíz morado nixtamalizadas por extrusión es de 228 a 810 cP. El rango obtenido se encuentra incluido parcialmente en el rango reportado por Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014) para harinas de maíz blanco dentado nixtamalizadas por extrusión. Ellos reportaron un rango de "Peak Viscosity" de 665.8 hasta 2403.5 cP. Los menores valores de "Peak Viscosity" reportados por Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014) fueron los que tuvieron una mayor hidratación antes de extrusión (65% p/p). Igualmente nuestros menores valores de "Peak Viscosity" fueron los que tuvieron mayor hidratación antes de la extrusión (50% p/p). A la inversa el grupo con la menor hidratación (30% p/p) tuvieron los mayores valores de "Peak Viscosity". El mismo fenómeno observa en los resultados de Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014).

El fenómeno descrito en el párrafo anterior posiblemente este asociado a la transición de fase del almidón explicada por Coral, Pineda-Gomez, Rosales-Rivera, & Rodriguez-Garcia (2009). Muchas de las técnicas asociadas a la modificación de almidones están relacionadas a tratamientos de calentamiento e hidratación, que buscan evitar destruir la estructura granular del almidón. La temperatura media de transición del almidón es usada para describir el comportamiento molecular del almidón relacionado con el calentamiento y la hidratación. En este proceso el almidón cambia de estructura semi-cristalina a una fase amorfa. El parámetro más importante que se ha estudiado en la gelatinización es la temperatura. En el proceso de gelatinización, " $T_o$ " es definida como la temperatura inicial,  $T_{p1}$  es la temperatura de inicio de derretimiento de los cristales y " $T_e$ " es la temperatura final. El rango de temperatura de gelatinización se establece como " $\Delta T = T_e - T_o$ ". Por lo estudiado por Coral, Pineda-Gomez, Rosales-Rivera, & Rodriguez-Garcia (2009) si existe un exceso de humedad y la temperatura aumenta los cristales de almidón se fusionan a la " $T_{p1}$ ". Mientras que cuando el contenido de agua es limitado solamente una proporción de los cristales se fusionan y el resto produce una segunda transición a mayor temperatura conocida como " $T_{p2}$ ". Este fenómeno se puede ver claramente en un termograma de una calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Finalmente, de la tabla 11 se observa que los valores más altos de "Peak Viscosity" para las condiciones de extrusión y secado estudiadas son los tratamientos con menor hidratación y velocidad de tornillo: T2  $0.6\text{mm}, 50\text{rpm}, 30\%$  y T4  $0.93\text{mm}, 50\text{rpm}, 30\%$ . Una menor velocidad de tornillo reduce la cizalla durante la extrusión y genera menor daño mecánico a los gránulos de almidón.

## Prueba Índice de absorción de agua (WAC)

En la tabla 12 se observan los resultados de capacidad de absorción de agua para los tratamientos de la harina nixtamalizada de maíz morado por extrusión y de la harina nixtamalizada comercial. El resultado WAC obtenido para la harina nixtamalizada comercial CN (1.01 ml /100g) se encuentra por debajo del rango 1.21 – 1.36 ml/ 100g reportado por Flores-Farias, Martínez-Bustos, Salinas- Morena, & Rios (2002) para harinas comerciales. Esta diferencia se atribuye principalmente a que muchas harinas comerciales presentan en su formulación gomas adicionales, que les permite absorber mayor cantidad de agua. En el caso de la harina nixtamalizada comercial marca MINSA- BUNGE no presenta ninguna goma en su lista de ingredientes.

Tabla 12. Resultados Índice de absorción de agua (WAC) de las harinas de maíz nixtamalizadas por método de extrusión y sus respectivos valores de “*peak viscosity*” .

Pruebas	Resultados*												
	CN	T1 0.6mm, 110rpm, 30%	T2 0.6mm, 50rpm, 30%	T3 0.93mm, 110rpm, 30%	T4 0.93mm, 50rpm, 30%	T5 0.6mm, 110rpm, 40%	T6 0.6mm, 50rpm, 40%	T7 0.93mm, 110rpm, 40%	T8 0.93mm, 50rpm, 40%	T9 0.6mm, 110rpm, 50%	T10 0.6mm, 50rpm, 50%	T11 0.93mm, 110rpm, 50%	T12 0.93mm, 50rpm, 50%
<b>WAC (ml/ 100g)</b>	1.006 ±0.02	0.837 ±0.01	0.856 ±0.01	0.813 ±0.02	0.856 ±0.02	0.813 ±0.01	0.813 ±0.01	0.830 ±0.01	0.807 ±0.01	0.790 ±0.01	0.776 ±0.02	0.820 ±0.02	0.813 ±0.01

\* Valores representado como la media ± desviación estándar ( $\bar{x} \pm SD$ )

De los resultados presentados para WAC en la tabla 12 los tratamientos con menor hidratación (30% p/p) y menor velocidad de tornillo (50 rpm): T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30%; obtuvieron los valores WAC más altos y más próximos a la harina nixtamalizada comercial (CN). Adicionalmente el valor WAC de las harinas nixtamalizadas por extrusión mostraron diferencia significativa con respecto a la harina nixtamalizada comercial - CN (Tukey, 95% de confianza,  $p < 0.05$ ). Adicionalmente entre los tratamientos T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% no hubo diferencia significativa (Tukey, 95% de confianza,  $p > 0.05$ ).

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan (2014) quienes obtuvieron valores WAC desde 0.81 hasta 1.08 (g/100g) para harinas nixtamalizadas de maiz obtenidas por extrusión.

De acuerdo con la bibliografía revisada el valor WAC está relacionado inversamente al porcentaje de almidón dañado. Contreras y colaboradores (2014) obtuvieron mayores valores WAC debido que trabajaron con una velocidad de tornillo de 20 RPM; reduciendo la cizalla y por ende reduciendo el daño mecánico del almidón.

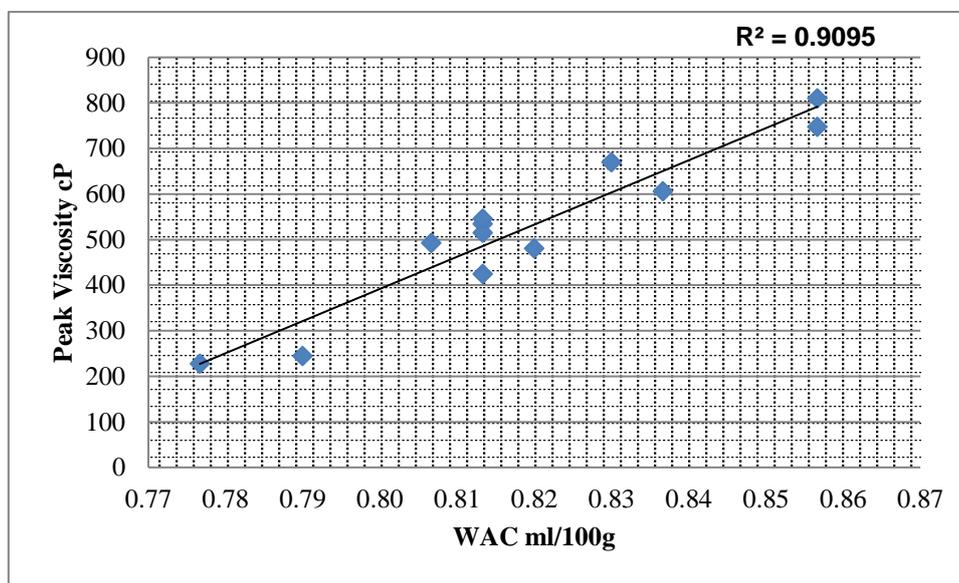


Figura 25. Gráfica de correlación de valores WAC (ml/100g) y “*peak viscosity*” (cP) para las harinas de maíz morado nixtamalizadas por extrusión.

Los valores reportados en la tabla 11 y 12 permitieron graficar la figura 25, donde se observa una fuerte correlación ( $R = 0.95$ ) de WAC y “*peak viscosity*” para los tratamientos de harinas de maíz morado nixtamalizadas por extrusión.

Este alto coeficiente de correlación corrobora los resultados de otras investigaciones y teoría expuesta respecto que tanto “*peak viscosity*” y WAC son indicadores indirectos del daño del almidón (Bedolla & Rooney, 1984) (Contreras, Morales, Reyes, & Gaytan, 2014); y/o gelatinización adicional que sufren las harinas durante el proceso de secado y molienda (Gómez, Rooney, Waniska, & Pflugfelder, 1987).

### Evaluación adhesividad y cohesividad

En la evaluación de adhesividad y cohesividad solo se consideraron los dos tratamientos con mayores valor WAC y “*peak viscosity*” (T2  $0.6\text{mm}$ , 50rpm, 30% y T4  $0.93\text{mm}$ , 50rpm, 30%) y la harina nixtamalizada comercial.

De acuerdo con los resultados de adhesividad presentados en la tabla 13, se encontró que las harinas nixtamalizadas por extrusión T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% mostraron diferencia significativa (Tukey, 95% de confianza, p<0.05) con respecto a la harina nixtamalizada comercial (CN). Además entre los tratamientos T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% no se mostró diferencia significativa (Tukey, 95% de confianza, p>0.05).

Por otro lado en los resultados de cohesividad presentados en la tabla 13, se encontró que las harinas nixtamalizadas por extrusión T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% mostraron diferencia significativa (Tukey, 95% de confianza, p<0.05) con respecto a la harina nixtamalizada comercial (CN). Además entre los tratamientos T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% no se mostró diferencia significativa (Tukey, 95% de confianza, p>0.05).

Martinez - Flores, Martinez - Bustos, C.J., & Gonzales Hernández (1998) reportaron en su investigación que el almidón dañado resulta en una masa pegajosa con características de adhesividad indeseables. En base a la investigación mencionada podríamos suponer que los tratamientos T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% presentan una cantidad superior de almidón dañado comparado a la harina comercial, y explicaría su mayor adhesividad.

Tabla 13. Resultados de adhesividad y cohesividad para los tratamientos con mayor WAC de harina de maíz morado nixtamalizada por extrusión (T2 y T4 y para la harina nixtamalizada comercial (CN).

Propiedad	Resultados *		
	CN	T2 0.6mm, 50rpm, 30%	T4 0.93mm, 50rpm, 30%
Adhesividad (g . s)	-1.307 ± 0.682	-5.055 ± 0.781	-5.146 ± 0.994
Cohesividad (%)	72.438 ± 0.997	83.922 ± 2.349	84.721 ± 1.584

\* Valores representado como la media ± desviación estándar ( $\bar{x} \pm SD$ )

### Evaluación antocianinas

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 14, se determinó que durante los tratamientos de nixtamalización por extrusión de harina de maíz morado (T2 0.6mm, 50rpm, 30% y T4 0.93mm, 50rpm, 30% ) existió una reducción de 71.43% de antocianinas con respecto a la harina de maíz morado sin nixtamalizar.

La estabilidad de las antocianinas depende principalmente de la presencia de luz, oxígeno, pH, presencia de iones metálicos y de la temperatura (Bordignon, Gauche, Gris, & Falcao,

2007); por este motivo el maíz morado y otros maíces pigmentados son difíciles de procesar mediante nixtamalización tradicional, nixtamalización por extrusión u otros procesos alternos. Salinas Moreno y colaboradores (2003) reportaron pérdidas de antocianinas por el método de nixtamalización tradicional de entre 19.5 y 50.2% en maíces con pigmentación predominante en la aleurona. El maíz morado presenta pigmentación en la aleurona y debió tener un ratio de pérdida de antocianinas menor; sin embargo, fue procesado en la forma de harina, lo que aumento su superficie de contacto y con ello un mayor deterioro de antocianinas.

De acuerdo con la revisión realizada por Escalante, Ramírez Wong, Torres Chávez, Barrón Hoyos, Figueroa Cárdenas y López (2013) la extrusión ha mostrado conseguir mayores retenciones de antocianinas con reducción de la temperatura. Sin embargo una reducción en la temperatura de extrusión conllevaría a obtener un producto extruido con mayor humedad, obligando a aumentar el tiempo de secado y/o la temperatura de secado por lo que la degradación de las antocianinas simplemente se desplazaría de una operación a otra.

Tabla 14. Resultados cuantificación de antocianinas para harina de maíz morado y los mejores tratamientos de harina de maíz morado nixtamalizada por extrusión.

Ensayo	Harina de maíz morado	T2 0.6mm, 50rpm, 30%	T4 0.93mm, 50rpm, 30%
Antocianinas (mg/ kg)	1400	400	400

### Diseño Factorial Completo de dos niveles 2<sup>3</sup>

La figura 26 muestra la gráfica normal de los efectos en respuesta al “Peak viscosity”. La humedad (B) y la interacción entre la humedad y velocidad de tornillo (BC) son más significativos para explicar la respuesta al “Peak viscosity”. La humedad tiene un efecto estandarizado negativo, es decir al aumentar la humedad el “Peak viscosity” disminuye. Por otro lado la interacción entre la humedad y velocidad del tornillo tienen un efecto positivo.

La figura 27 muestra la gráfica cuadrada de relación entre factores Humedad y Velocidad de tornillo para “Peak viscosity” y observamos un mejor desempeño a menor humedad y velocidad de tornillo (-1,-1).

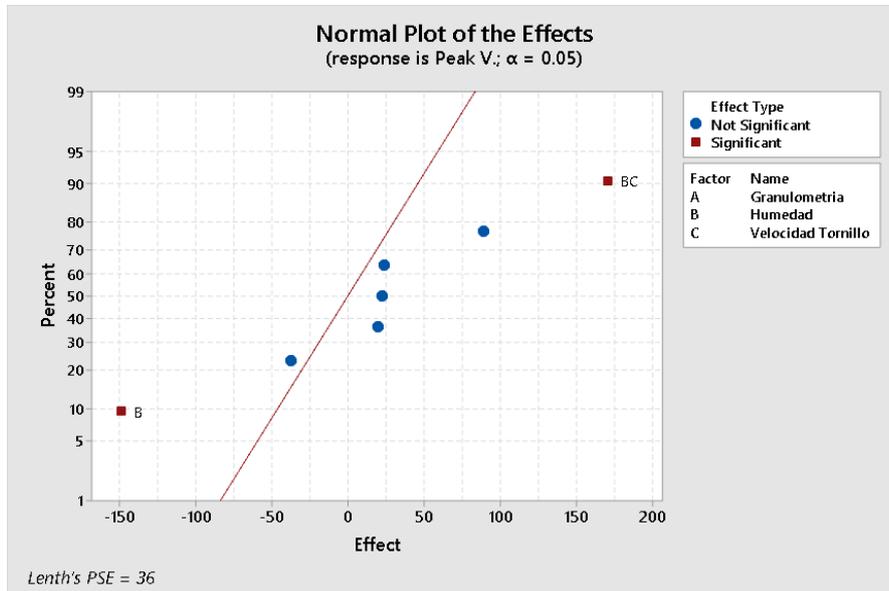


Figura 26. Grafica normal de los efectos en respuesta al “Peak viscosity”

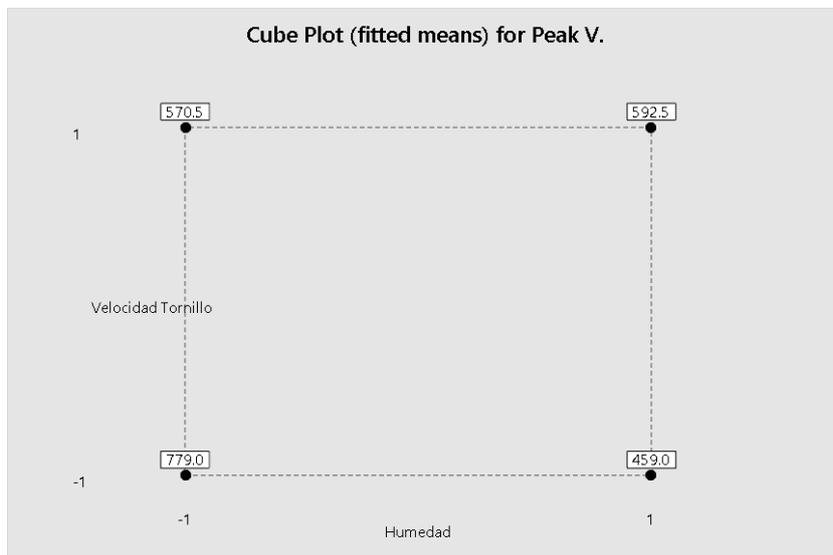


Figura 27. Grafica de cuadrada de relación entre los factores Humedad y Velocidad de tornillo

## Conclusiones

- Se obtuvo harina nixtamalizada a partir del grano de maíz morado mediante el método de extrusión, sin embargo la harina resultante presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las propiedades fisicoquímicas de viscosidad, capacidad de absorción de agua, adhesividad y cohesividad con respecto a la harina nixtamalizada comercial MINSA- BUNGE.
- Considerando las variables de “Peak viscosity” de RVA y capacidad de absorción de agua (WAC); los tratamientos de harina nixtamalizada por extrusión con valores más cercanos a los de la harina nixtamalizada comercial se obtuvieron con un contenido de humedad de 30% y una velocidad de tornillo de extrusión de 50 rpm.
- Se confirmó la fuerte correlación ( $R = 0.95$ ) que existe entre los valores de capacidad de absorción de agua (WAC) y “peak viscosity” de RVA para los tratamientos de harinas de maíz morado nixtamalizadas por extrusión.
- Se determinó que durante los tratamientos de nixtamalización por extrusión de harina de maíz morado existió una reducción 71.43% de antocianinas.
- La propiedad de “Peak viscosity” de la harina nixtamalizada responde a la combinación de los siguientes factores: humedad y velocidad de tornillo. En este sentido al reevaluar el diseño experimental se deben considerar reducir la humedad y la velocidad de tornillo. Adicionalmente se podría considerar replantear la temperatura de extrusión el cual no fue un factor del experimento con la finalidad de reducir el daño térmico al almidón.

## **Recomendaciones**

- En próximas investigaciones con la finalidad de lograr un mejor entendimiento de la materia prima se debe determinar la cantidad total de almidón y la proporción de amilosa – amilopectina en el grano de maíz morado y grano mexicano.
- En un próximo diseño experimental se debe considerar reducir la velocidad de tornillo a 20 rpm, humedad de la harina de extrusión en 20% y la temperatura de extrusión entre 65 - 75C°.
- Para reducir el daño mecánico del almidón durante la molienda y extrusión se puede evaluar trabajar con tamaños de partícula de 16 U.S. mesh (2 mm).
- Se deben realizar pruebas de maquinabilidad para evaluar el comportamiento de las harinas nixtamalizadas obtenidas por extrusión en equipos de planta.

## Referencias

- ACUMEN. (2017). About Acumen- One Pager Q2 2017. Obtenido de <https://acumen.org/wp-content/uploads/2017/10/About-Acumen-One-Pager-Q2-2017.pdf>
- ACUMEN. (2018). ACUMEN. Obtenido de <https://acumen.org/>
- Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochin, S., Cuevas-Rodríguez, E., & Serna-Saldivar, S. (2012). Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after lime-cooking extrusion process of whole pigmented Mexican maize. *Plant Foods Hum. Nutr.* 67, 178-185.
- Ansari, O., Baga, M., Chibbar, R., Sultana, N., & Howes, N. (2010). Analysis of starch swelling power in Australian breeding lines of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) . *Field crops research*, 171-178.
- Arámbula, V., González-Hernández, J., Moreno, M., & Ordorica, F. (2002). Characteristics of tortillas prepared from dry extruded masa flour added with maize pericarp. *J. Food Sci.*, 1444-1448.
- Armero, E., Collar, C., & Forsch, Z. L. (1997). Texture properties of formulated wheat doughs Relationships with dough and bread technological quality. Springer-Verlag.
- Avila, M. (2002). Incorporación del Rapid Visco Analyser (RVA) para la determinación de la calidad culinaria de arroz . Fundación para la investigación agrícola .
- Baik, B., Powers, J., & Nguyen, L. (2004). Extrusion of regular and waxy barley flours for production of expanded cereals. *Cereal Chemistry*, 94-99.
- Bazua, C., Guera, R., & Stemer, H. (1979). Extruded corn flour as an alternative to lime heated corn flour for tortilla preparation. *J. Food Sci.*, 940-941.
- Bedolla, S. (1983). Development and characterization of instant tortilla flour from sorghum and corn by infra-red cooking (micronizing) and extrusion cooking. PhD Dissertation, Texas A&M University .
- Bedolla, S., & Rooney, L. (1984). Characteristics of U.S and Mexican Instant Maize Flours for Tortilla and Snack Preparation. *Cereal Food* , 732-735.
- Bello Peres, L., Osorio Díaz, P., Agama Acevedo, E., Nuñez Santiago, C., & Paredes Lopez, O. (2002). Chemical, physicochemical and rheological properties of masa and nixtamalized corn flour . *Agrociencia* 36, 319-328.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2006). Obtenido de [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA\\_4\\_extrusion.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf)
- Bordignon, M., Gauche, E., Gris, E., & Falcao, L. (2007). Colour stability of anthocyanins from Isabel grapes (*Vitis labrusca*L.) in model systems. *LWT- Food Sci. Technol.* , 549-599.

- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E., & Tiwari, B. (2011). Effects of extrusion on polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. . Trends in food science and technology , 570-575.
- Carl Roth GmbH . (5 de Octubre de 2018). <https://www.carlroth.com/en/en>. Obtenido de [https://www.carlroth.com/downloads/sdb/es/3/SDB\\_3529\\_ES\\_ES.pdf](https://www.carlroth.com/downloads/sdb/es/3/SDB_3529_ES_ES.pdf)
- Castells, M., Marin, S., Sanchis, V., & Ramos, A. (2005). Fate of mycotoxins in cereal during extrusion cooking: a review. Food Additives and Contaminants, 150-157.
- Castillo, V., Ochoa, M., Figueroa, C., Delgado, L., Gallegos, I., & Morales, C. (2009). Efecto de la concentración de hidróxido de calcio y tiempo de cocción del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas y reológicas del nixtamal. Instituto Tecnológico de Durango, CINVESTAV- Querétaro, México.
- Caviedes, J., Muñoz, H., & Meneses, J. (2006). EL PARADIGMA DEL HIDROXIDO DE CALCIO EN ENDODONCIA. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Odontología, <http://www.javeriana.edu.co/>.
- Cevallos - Casals, A., & Cisneros- Zevallos, L. (2003). Stoichiometric and Kinetic Studies of Phenolic Antioxidants from Andean Purple Corn and Red-Fleshed Sweetpotato. J. Agric. Food Chem., 3313–3319 .
- CIMMYT. (2016). Calidad del grano para tecnicos postcosecha. Texcoco de Mora - Mexico: Laboratorio de calidad nutricional del maíz - CIMMYT.
- Colonna, P., Tayeb, J., & Mercier, C. (1998). Extrusion cooking of starch and starchy products. In: Extrusion cooking. American Association of Cereal Chemists, 247-319.
- Contreras, B., Morales, E., Reyes, M., & Gaytan, M. (2014). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. CyTA - Journal of Food 12, 263-270.
- Contreras-Jiménez, B., Morales-Sánchez, E., Reyes-Vega, M., & M., G. M. (2013). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. CyTA - Journal of Food, 263-270.
- Coral, D., Pineda-Gomez, P., Rosales-Rivera, A., & Rodriguez-Garcia, M. (2009). DETERMINATION OF THE GELATINIZATION TEMPERATURE OF STARCH PRESENTED IN MAIZE FLOURS. Journal of Physics: Conference Series.
- Corke, H., Wu, H., Yue, S., & Sun, H. (1997). Developing Specialty Starches from New Crops: A Case Study Using Grain Amaranth. In Cereals: Novel Uses and Processes. New York: Plenum Press, 95 -100 .
- Ding, Q., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice base expanded snacks. Journal of food engineering , 283-289.
- Dirección General de Culturas Populares . (1987). El maíz, fundamento de la cultura popular. Museo Nacional de Culturas Populares, 114.

- Ebrehim, A. (2013). Let's be realistic about measuring impact . Massachusetts: Harvard Business Review .
- Escalante, A., Ramirez Wong, B., Torres Chavez, P., Barrón Hoyos, J., Figueroa Cardenas, J., & Lopez, J. (2013). THE NIXTAMALIZATION PROCESS AND ITS EFFECT ON ANTHOCYANIN CONTENT OF PIGMENTED MAIZE, A REVIEW. *Rev. Fitotec. Mex.* , 429-437.
- Escalante, A., Ramirez Wong, B., Torres, P., Figueroa, J., Lopez, J., Barron, M., & Morales. (2012). Effect of extrusion processing parameters on anthocyanin content and physicochemical properties of nixtamalized blue corn expanded extrudates. *CyTA - Journal of Food* , 29-37.
- Fellows, P. (2000). *Food processing technology: principles and practice*, (2nd ed.). Boca Raton USA: CRC Press.
- Flores-Farias, R., Martinez-Bustos, F., Salinas- Morena, Y., & Rios, E. (2002). Characterization of commercial nixtamalized maize flours. *Agrociencias*, 557-567.
- FOPEX. (1985). *El maíz morado. Manual del Fondo de promoción de exportadores*, 46.
- Fraiha, M., Ferraz, A., & Biagi, J. (2011). Pre-treatment of thermophilic spores in CO2 modified atmosphere and their survivability during food extrusion. . *Ciencia e Tecnologia de alimentos*, 167-171.
- Gomez – Aldapa, C., Martinez – Bustos, F., & Figueroa, C. &. (1999). A comparison of the quality of whole corn tortillas made from instant corn flours by traditional or extrusion processing. *International Journal of Food Science and Technology*, 391–399.
- Gomez, H., & Aguilera, M. (1983). Changes in the starch fraction during extrusion cooking of corn. *Journal of Food Sci.*, 378 - 381.
- Gomez, M. H., Lee, J. K., McDonough, C. M., Waniska, R. D., & Rooney, L. W. (1992). Corn Starch Changes During Tortilla and Tortilla Chip Processing. *Cereal Chem.* 69, 275 -279.
- Gómez, M., Rooney, L., Waniska, R., & Pflugfelder, R. (1987). Dry corn masa flour for tortilla and snack production. *Cereal Foods World*, 372-376.
- Gomez, M., Waniska, R., & Rooney, L. (1991). Starch characterization of dry masa flour. *Cereal Chem.*, 578-582.
- Gonzales, I. (2006). Evaluacion en los cambios fisicoquimicos que sufre el almidon en el proceso de elaboracion de tortillas, utilizando harina nixtamalizada por extrusion de maiz de alta calidad proteica. Sonora, Mexico: Universidad de Sonora.
- Gutierrez – Dorado, R., Ayala – Rodriguez, A., Milán – Carrillo, J., López- Cervantes, J., Garzón Tiznado, J., López – Valenzuela, J., . . . Reyes- Moreno, C. (2008). Technological and Nutritional Properties of Flours and Tortillas from Nixtamalized and Extruded Quality Protein Maize (*Zea mays* L.). *Cereal Chem.*, 808–816.

- Gutierrez Dorado, R. (2017). Elaboración de Harinas a partir de maiz por nixtamalización, extrusion y otras vias. Universidad Autonoma de Sinaloa , Culiacan, Sinaloa, Mexico
- Guy, R. (2001). Extrusion cooking: technologies and applications. Cambridge, United Kingdom : Woodhead Publishing.
- Harper. (1994). Extrusion processing of starch. In: Developments in carbohydrate chemistry. American Association of Cereal Chemists, 37-64.
- Harper, J. (1989). Foods extruders and their applications in extrusion cooking. American Association of Cereal Chemists, 1–15.
- HARPER, J. (1989). Foods extruders and their applications in extrusion cooking . American Association of Cereal Chemists, 1–15.
- Harper, M. (1991). Extrusion of food Vol.I - II. Estados Unidos: International Standard Book Library of Congress.
- Jekins, P., Camerom, R., & Donald, A. (1993). Starch. 45.
- Jin, B. (2008). Accuarate measurement of pasting temperature by the rapid visco analyser. Rice science, 69-72.
- Jin, Z. (2018). Functional starch and application in food. Wuxi, China: Springer.
- Juhász, R., & Salgo, A. (2008). Pasting Behavior of Amylose, Amylopectin and Their Mixtures as Determined by RVA Curves and First Derivatives. Starch - Department of Applied Biotechnology and Food Science, Budapest University, 70-78.
- Kaur, A., Singh, N., Ezekiel, R., & Guraya, H. (2007). Physicochemical, Thermal and Pasting Properties of Starches Separated from Different Potato Cultivars Grown at Different Locations. . Food Chemistry 101, 643-651.
- Lao, F., & Giusti, M. (2019). Cuantification of Purple Corn (ZeamaysL.) AnthocyaninsUsing Spectrophotometric and HPLC Approaches: MethodComparison and Correlation. Food Anal. Methods 9, 1367–1380.
- Lao, F., Gregory, S. M., & Giusti, M. (2017). Health Benefits of Purple Corn (Zea mays L.) Phenolic Compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 234-246.
- Larrea, M., Chang, Y., & Bustos, F. (2005). Effect of some operational extrusion parameters on the constituents of orange pulp. Food Chemistry, 301-308.
- Lavado, M., Raez, L., & Calderon, R. (2013). El maíz morado como materia prima industrial. INDUSTRIAL DATA Revista de Investigación .
- MAIA SAC. (2015). Estudio de optimizacion de uso de las mazorcas de maiz morado para la elaboracion de concentrado liquido . Lima.
- MAIA SAC. (2018). Wasi Organics. Recuperado el 2018, de <https://www.wasiorganics.com/>

- Mangelsdorf, P. (1986). The origin of corn. *Sci. Am* 255, 72-78.
- Martinez - Flores, H., Martinez - Bustos, F., C.J., F., & Gonzales Hernandez, J. (1998). Tortillas from Extruded Masa as Related to corn Genotype and Milling Process. *Journal of food science*, 130-133.
- Martinez Bustos, F., Garcia, M., Chang, Y., & Sanchez, F. (2000). Characteristics of nixtamalized maize fours produced with the use of microwave heating during alkaline cooking. *Journal Sci. Food Agric.* , 651 - 656.
- Martinez, M. (2017). Taller pr áctico: Rapid Visco Analyser (RVA). Obtenido de Food Biophysics and Health Lab | Biological Engineering Program | School of Engineering | University of Guelph | Canada: <http://www.aetc.es/wp-content/uploads/2017/11/Taller-pr%C3%A1ctico-Rapid-Visco-Analyser-RVA.-Mario-Mart%C3%ADnez.-Universidad-de-Guelph.-Patrocinado-por-PERTEN-INSTRUMENTSAB.pdf>
- Méndez M., G., Solorza F., J., Velázquez del Valle, M., Gómez-Montiel, N., Paredes L., O., & Bello P., I. (2005). CHEMICAL COMPOSITION AND CALORIMETRIC CHARACTERIZATION OF HYBRIDS AND VARIETIES OF MAIZE CULTIVATED IN MÉXICO. *Agrociencia*, 267 - 274.
- Mendez- Montealvo, G., Garcia-Suarez, F. J., Paredes-Lopez, O., & Bello-Perez, L. A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal of cereal science* 48, 420 - 425.
- Milán Carrillo, J., Perales Sanchez, J., Cuevas Rodriguez, E., Ramirez Wong, B., & Reyes Moreno, C. (2006). The optimization of the extrusion process when using maize flour with modified amino acid profile for making tortillas. *J. Food Sci. Technol.* 41, 727-736.
- Milán-Carrillo, J., Gutierrez-Dorado, R., Cuevas-Rodríguez, E., Garzon-Tiznado, J., & Reyes-Moreno, C. (2004). Nixtamalized flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of alkaline processing. *Plant Foods Hum Nutr* 59, 35–44.
- MINAGRI. (2017). Maíz morado - Purple Corn Fact Sheet . Lima.
- Montemayor, E., & Rubio, M. (1983). Alkaline cooked corn flour: Technology and uses in tortilla and snack products. *Cereal foods World* 28, 577.
- Mora, R. S., Guitierrez, U. J., Serna, S., Sanchez, P., Reyes, M., & Milan, C. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 502-508.
- NileRed. (2014). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=G26uzosONGk>
- Paredes Lopez, O., Guevara Lara, F., & Bello Perez, L. (2009). Nixtamalización y el valor nutricional en el maíz. *Revista cultural científica- Facultad de ciencias Universidad Nacional Autonoma de Mexico*, 60-70.

- Paucar Menacho, L. (2011). ESTUDIO DEL MAIZ MORADO (*Zea mays* (L.) var. subnigroviolaceo), COMO ALIMENTO FUNCIONAL. (pág. 10). Chimbote: Universidad Nacional del Santa.
- PAUCARIMA, R. E. (2007). Maiz morado (*Zea mays* L.) - Cuatro fórmulas de abonamiento y tres densidades de siembra a 2750 msn -Ayacucho. Tesis para obtener el título de ingeniero agronomo .
- Perez, S., Baldwin, P., & J. Gallant, D. (2006). Starch: Chemistry and Technology. En Starch: Chemistry and Technology (págs. 150-190). Francia : Elsevier Inc.
- Perten. (2015). Rapid Visco Analyzer - Application and Method . Obtenido de [https://www.perten.com/Global/Brochures/RVA/RVA%20Method%20Brochure\\_20151110.pdf](https://www.perten.com/Global/Brochures/RVA/RVA%20Method%20Brochure_20151110.pdf)
- Perten. (2018). Perten Instruments Method Description - RVA. Obtenido de <https://www.perten.com/Global/Application%20notes/RVA/General%20Pasting%20Method%20-%20RVA%2001.05.pdf>
- Pineda, P., Acosta, A., Coral, D., & Rosales, L. (2012). Physicochemical characterization of traditional and commercial instant corn flours prepared with threshed white corn. *CyTA - Journal of Food*, 287-295.
- Platt – Lucero, L. C., Ramirez – Wong, B., Torres – Chavez, P. I., Lopez – Cervantes, J., Sanchez – Machada, D. I., Carbajal - Millan, E., . . . Morales – Rosas, I. (2011). EFFECT OF XYLANASE ON EXTRUDED NIXTAMALIZED CORN FLOUR AND TORTILLA: PHYSICOCHEMICAL AND RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS. *Journal of Food Process Engineering*, 179–186.
- Platt – Lucero, L. C., Ramirez – Wong, B., Torres – Chavez, P. I., Lopez – Cervantes, J., Sanchez – Machada, D. I., Reyes – Moreno, C., . . . Morales – Rosas, I. (2010). IMPROVING TEXTURAL CHARACTERISTICS OF TORTILLAS BY ADDING GUMS DURING EXTRUSION TO OBTAIN NIXTAMALIZED CORN FLOUR. *Journal of Texture Studies*, 736–755.
- Platt-Lucero, L., Ramírez-Wong, B., Carvajal-Millan, E., Torres-Chávez, P., Morales-Rosas, I., López-Mazón, S., & Tapia-Ayala, G. (2012). Extruded nixtamalized corn flour for making tortilla: the effect of xylanase on the depolymerization of ferulated arabinoxylans. *CyTA - Journal of Food* , 84-89.
- Ramírez Romero, G., Reyes-Velazquez, M., & Cruz-Guerrero, A. (2013). STUDY OF NEJAYOTE AS CULTURE MEDIUM FOR PROBIOTICS AND PRODUCTION OF BACTERIOCINS. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 463-471.
- Reyes-Moreno, R., Gutiérrez-Dorado, A., Ayala-Rodríguez, J., Milán-Carrillo, J., López-Cervantes, J., Garzón-Tiznado, J., . . . Paredes-López, C. (2008). Technological and Nutritional Properties of Flours and Tortillas from Nixtamalized and Extruded Quality Protein Maize (*Zea mays* L.). *Cereal Chemistry Volume 85*, 808-816.

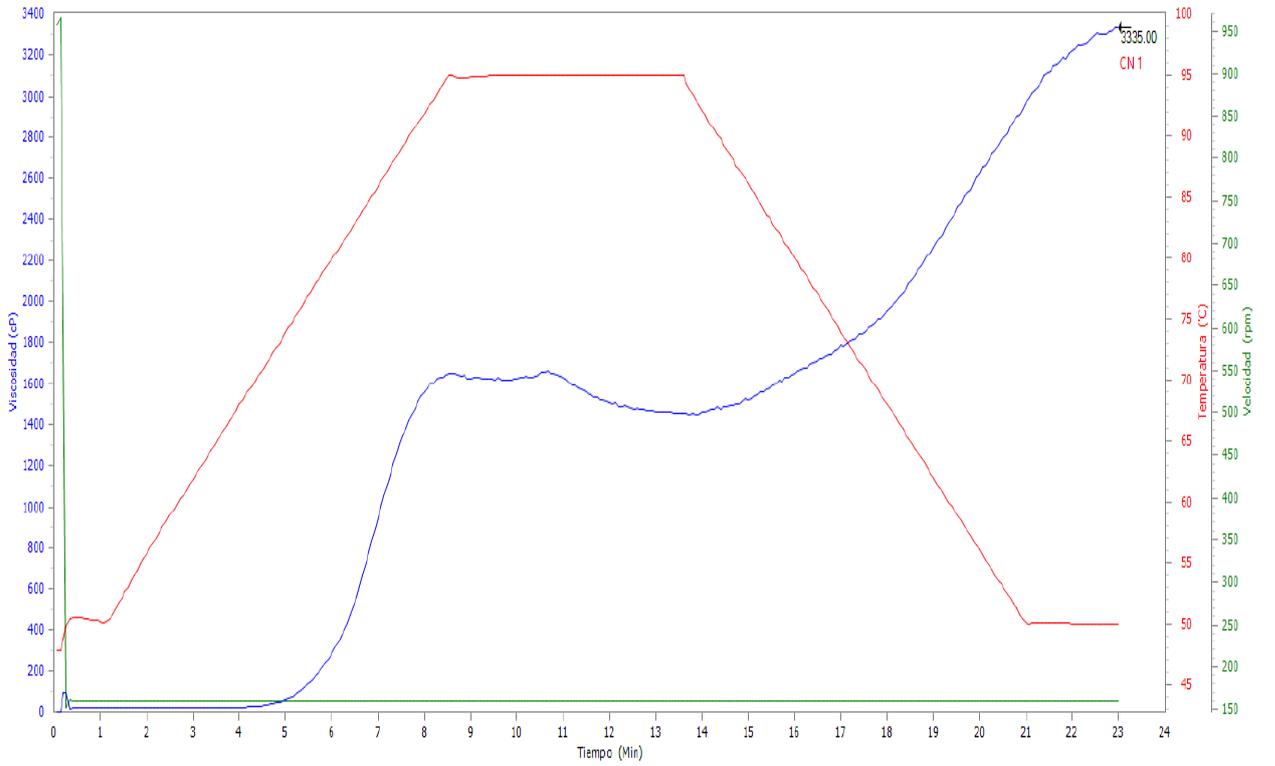
- Rojas-Molina, I., Gutiérrez, E., & Cortés-Acevedo, M. (2008). Analysis of quality protein changes in nixtamalized QPM flours as a function of the steeping time. *Cereal Chemistry* 85, 409-416.
- Rolle, L., Siret, R., Río-Segade, S., & Maury, C. (2012). Instrumental Texture Analysis Parameters as Markers of Table-Grape and Winegrape Quality: A Review. *Am. J. Enol. Vitic.* 63.
- Sakai, T. (2013). Screw extrusion technology — past, present and future. *POLIMERY*, 847-856.
- Salinas, M., Martínez, B., Soto, H., Ortega, P., & Arellano, V. (2003). Effect of alkaline cooking process on anthocyanins in pigmented maize grain. *Agrociencia*, 617-628.
- Salinas-Moreano, Y., & Aguilar-Modesto, L. (2010). "Efecto de La Dureza Del Grano de Maíz (*Zea Mays* L.) Sobre El Rendimiento Y Calidad de La Tortilla.". *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 5-11.
- Salinas-Moreno, Y., & Vázquez-Carrillo, G. (2006). Metodologías de Análisis de Calidad Nixtamalera-Tortillera En Maíz. Chapingo- Mexico : Folleto tecnico - Universidad autonoma de Chapingo .
- Scoch, T., & Elder, A. L. (1955). Starches in food industry. *Chemistry Series* 12, 21-34.
- Sefa-Dedeh, S., Cornelius, B., Sayki, E., & Ohene, E. (2004). Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry*, 317-324.
- Serna-Saldivar, S. (1996). Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. Monterrey : Tecnológico de Monterrey .
- Shafie, B., Cheng, S., Lee, H., & Yiu, P. (2016). Characterization and classification of whole-grain rice based on rapid visco analyzer (RVA) pasting profile. *International Food Research Journal* , 2138-2143.
- Simanis, E., & Hart, S. (2008). The Base of the Pyramid Protocol: Toward Next Generation BoP Strategy. New York : Johnson School of Management Cornell University.
- Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Quek, S., & Perera, C. O. (2010). Properties of Bread Dough with Added Fiber Polysaccharides and Phenolic Antioxidants: A Review. *Journal of Food Science*, 163-174.
- Stark, A., & Madar, Z. (1994). Dietary fiber. Functional food : Designer food, pharmafoods, nutraceuticals. New York : Springer .
- Steel, C., Vernaza, M., Schmiele, M., Ferreira, R., & Chang, Y. (2012). Thermoplastic Extrusion in Food Processing . *InTech*, 267-290.
- Subhan, F., & Khattak, A. (2016). What Constitutes the Bottom of the Pyramid (BOP) Market? Conference: Institute of Business Administration International Conference on Marketing (IBA-ICM) (pág. 11). Kuala Lumpur: Researchgate. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/315744411\\_What\\_Constitutes\\_the\\_Bottom\\_of\\_the\\_Pyramid\\_BOP\\_Market](https://www.researchgate.net/publication/315744411_What_Constitutes_the_Bottom_of_the_Pyramid_BOP_Market)

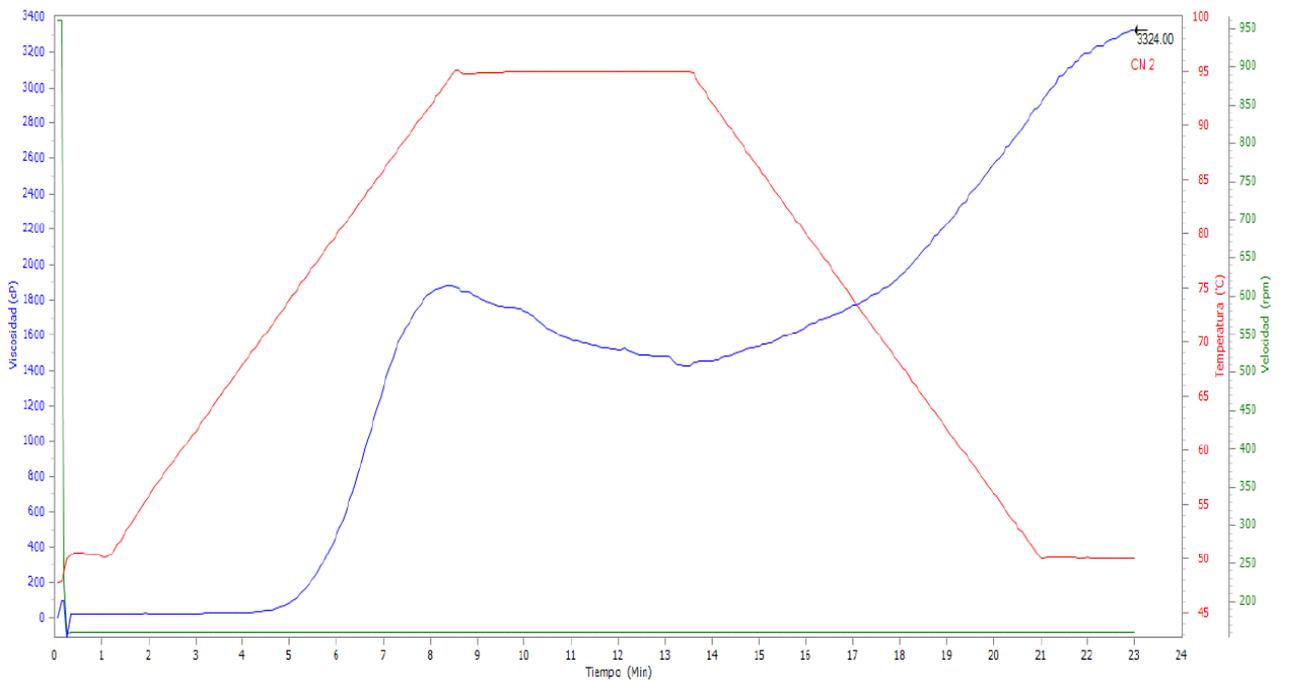
- Texture-Technologies. (2019). Texture Technologies. Obtenido de <http://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis#select-characteristics>
- Vargas Lopez, J. M. (1987). Producción y evaluación de una harina para elaborar tortillas a partir de una mezcla maíz / sorgo en un extrusor-cocedor de bajo costo. Tesis de Maestría Universidad de Sonora.
- Véles-Medina, J. (2004). Caracterización de Tostadas Elaboradas Con Maíces Pigmentados Y Diferentes Métodos de Nixtamalización. CICATA-Instituto Politécnico Nacional.
- Vernaza, M., Chang, Y., & Steel, C. (2009). Efeito do teor de farelo de maracujá e da umidade e temperatura de extrusão no desenvolvimento de cereal matinal funcional orgânico. *Brazilian Journal of Food Technology*, 145-154.
- Watson, S. (1987). Structure and composition "Corn: Chemistry and Technology",. *American Association of Cereal Chemists*, 53-78.
- Watson, S. (2003). Description, Development, Structure, and Composition of the Corn Kernel. *Chemistry and technology*, 69-106.

# ANEXOS

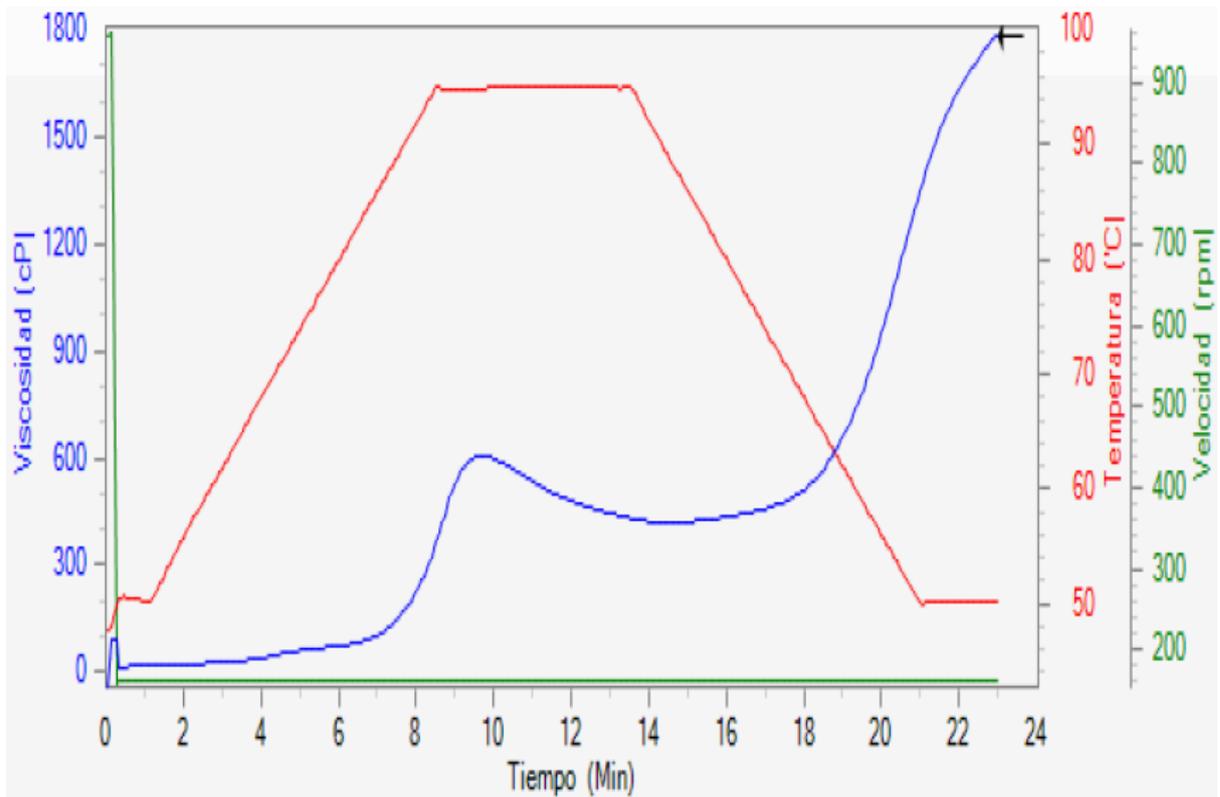
## Curva empaste RVA - CN01



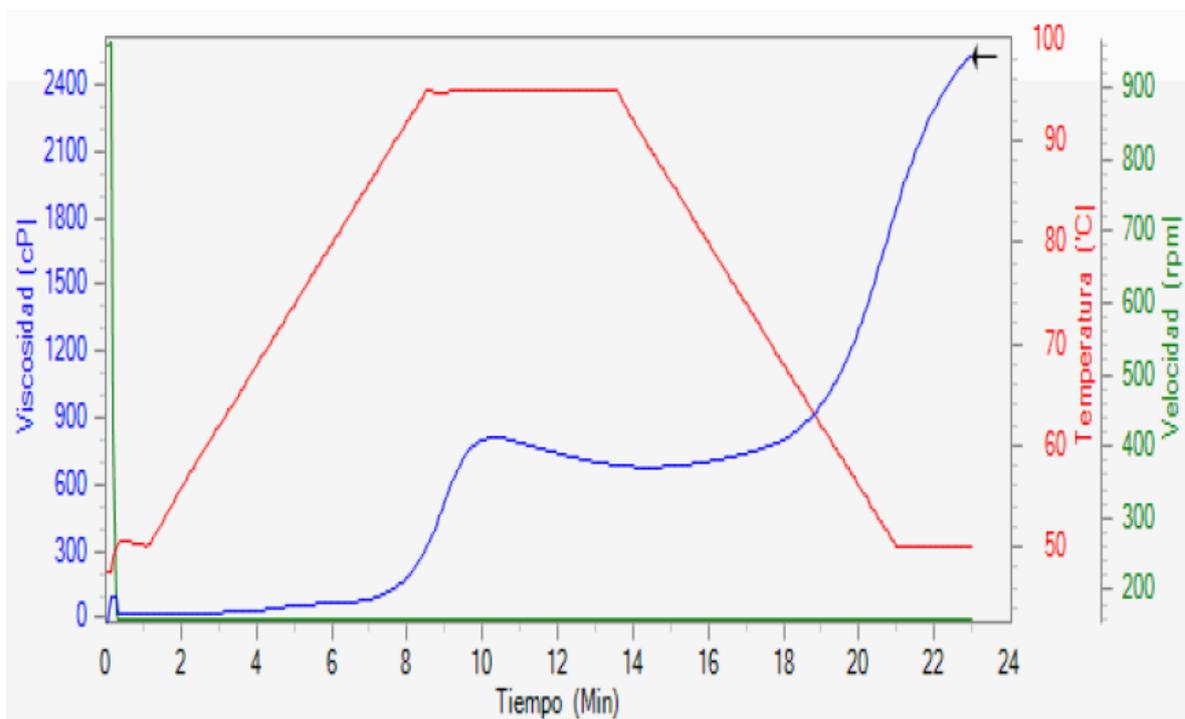
## Curva empaste RVA - CN02



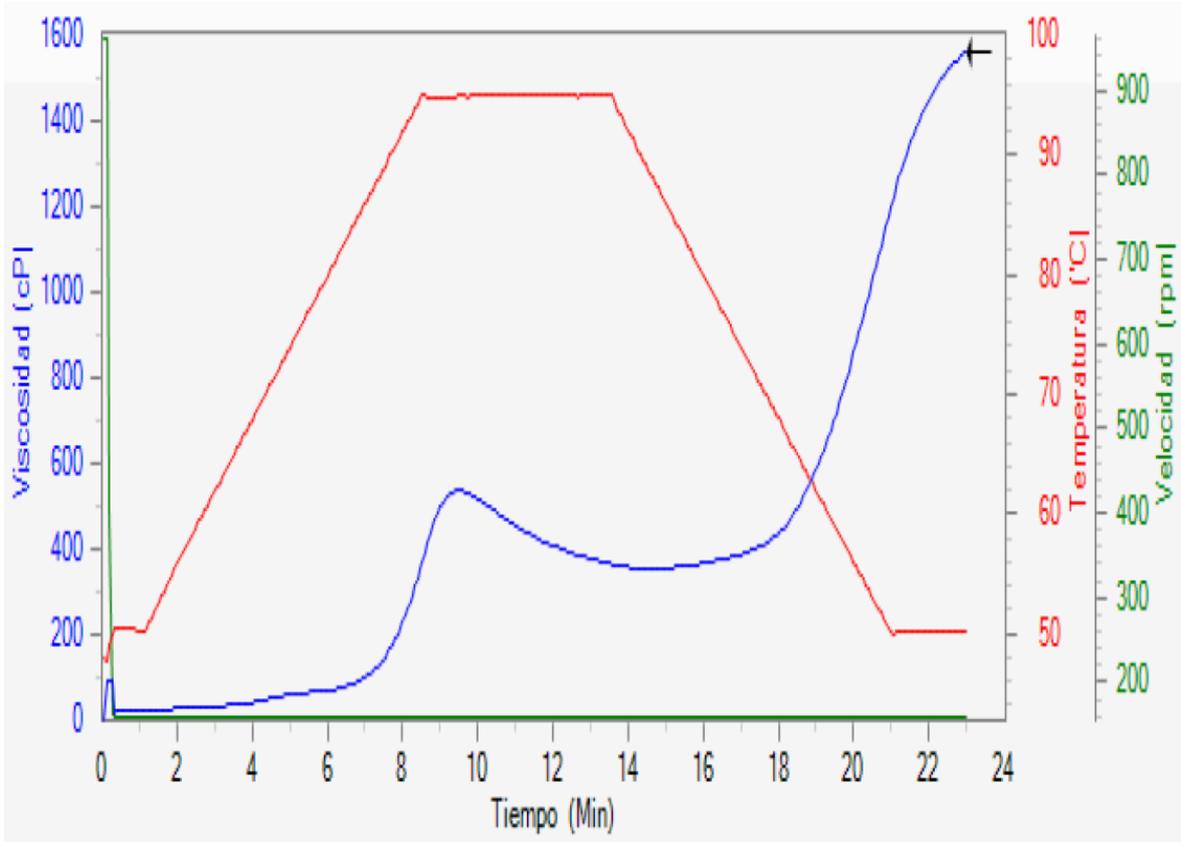
**Curva empaste RVA - T1**



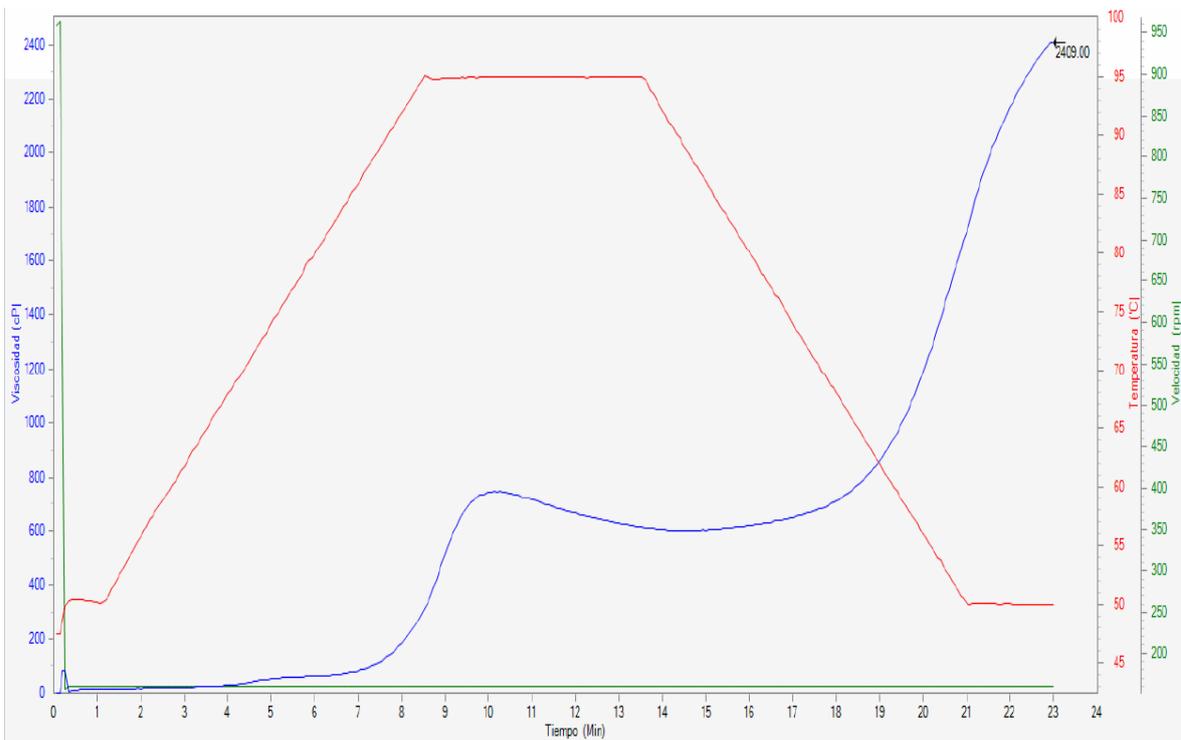
**Curva empaste RVA - T2**



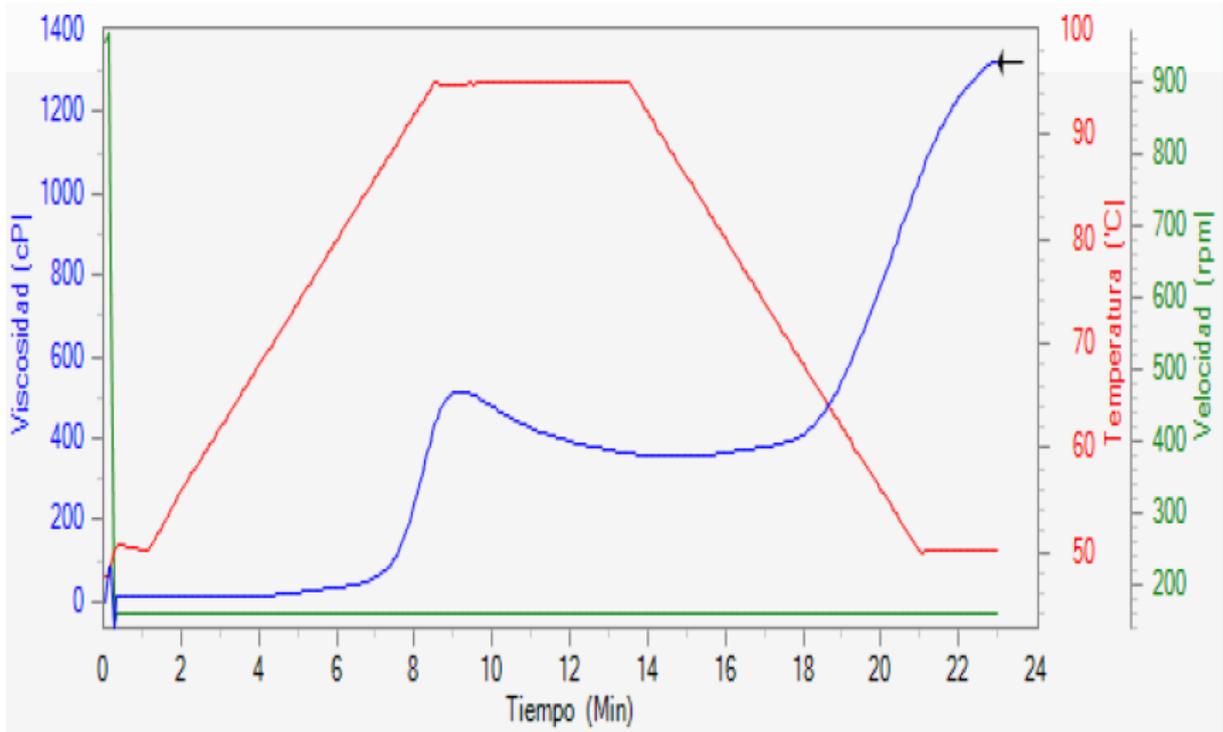
**Curva empaste RVA - T3**



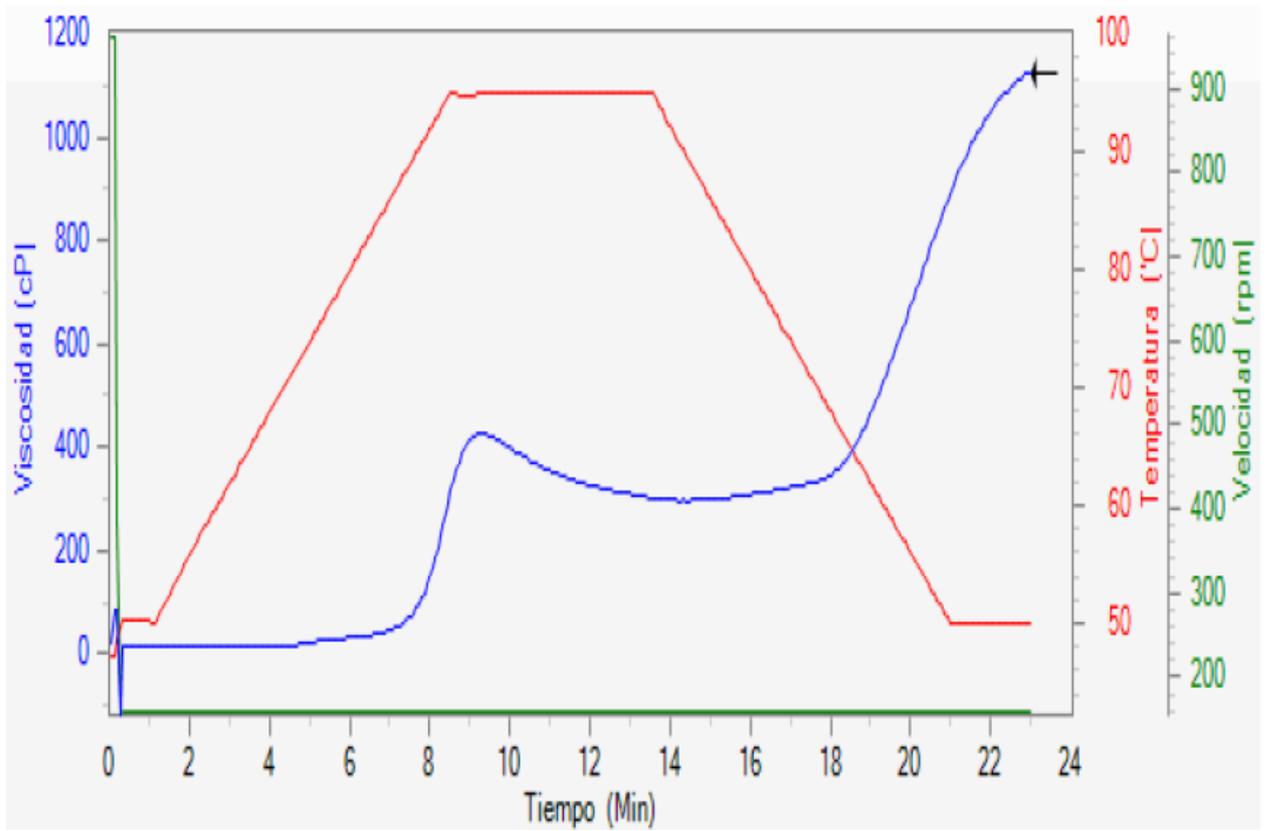
**Curva empaste RVA - T4**



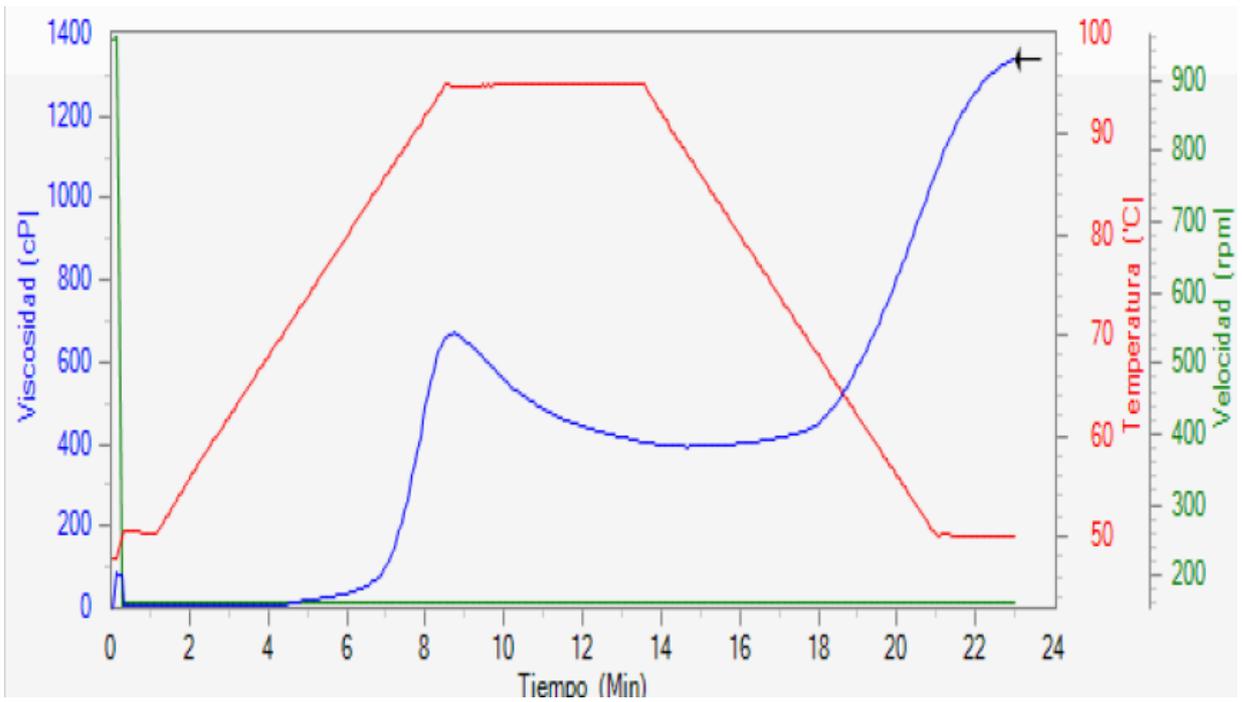
**Curva empaste RVA - T5**



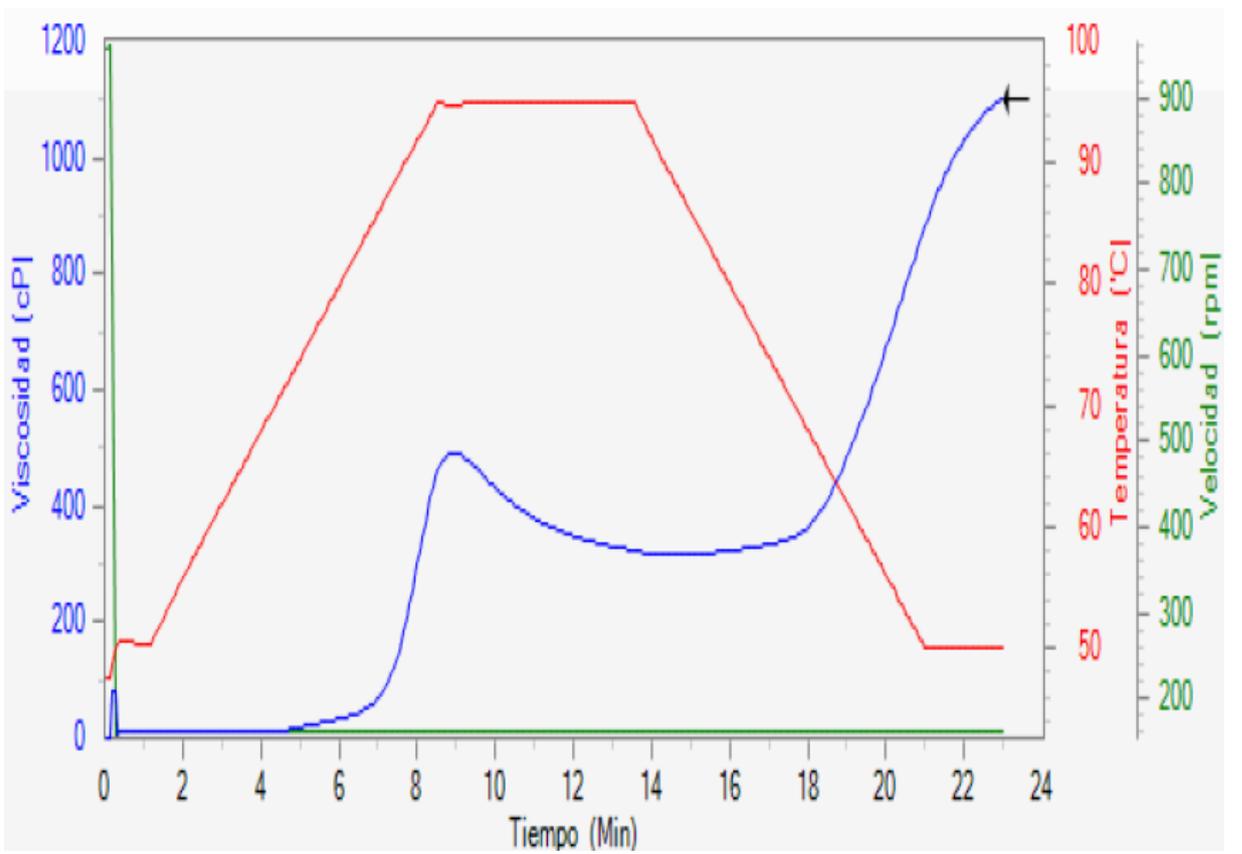
**Curva empaste RVA - T6**



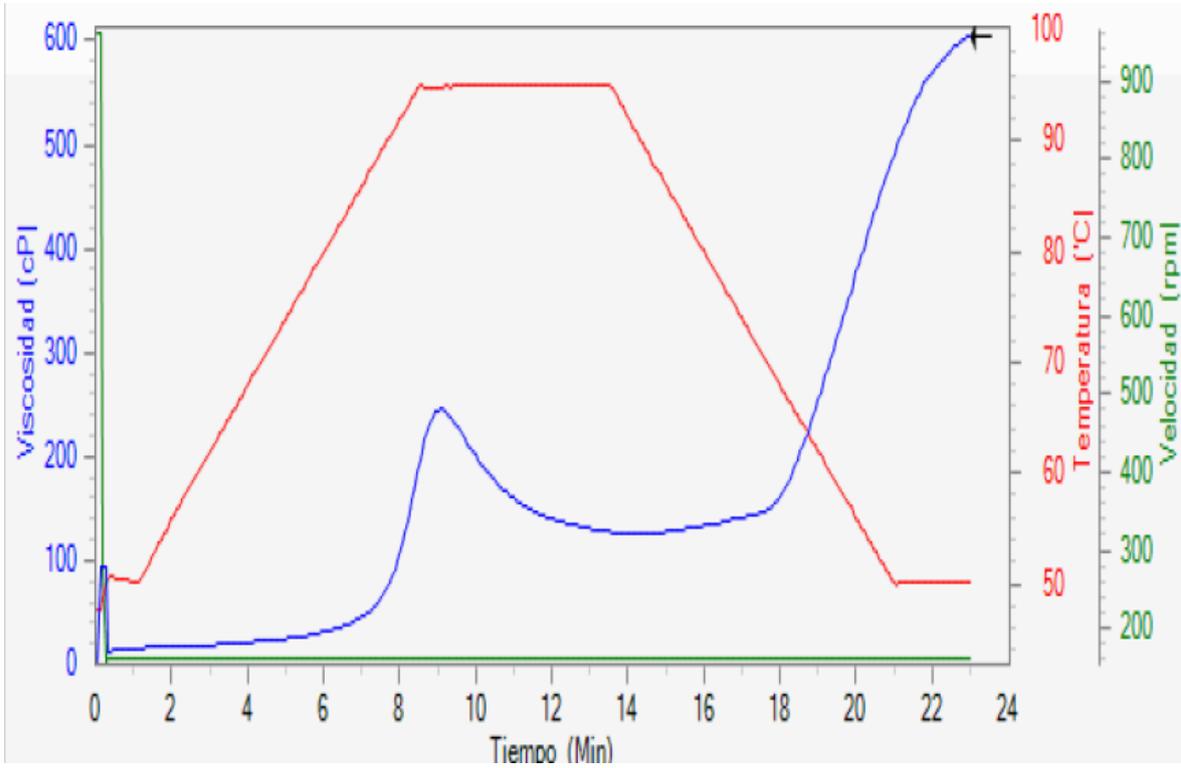
**Curva empaste RVA - T7**



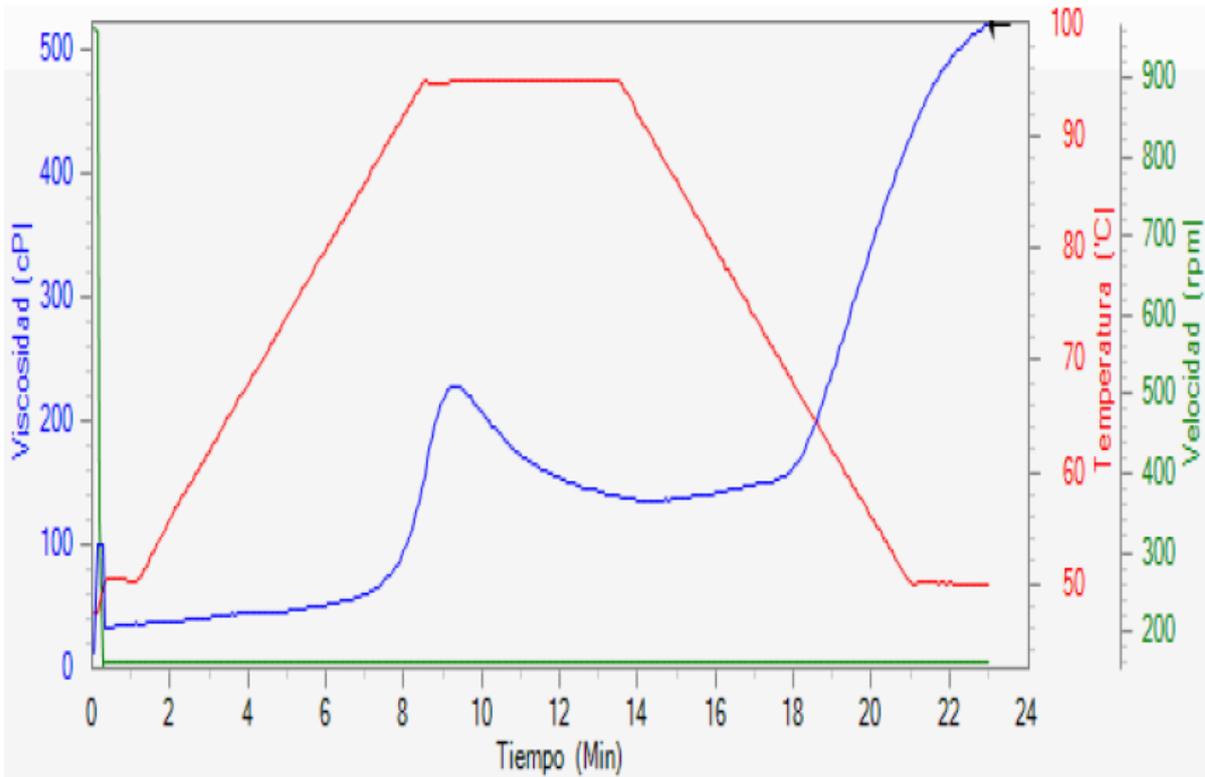
**Curva empaste RVA - T8**



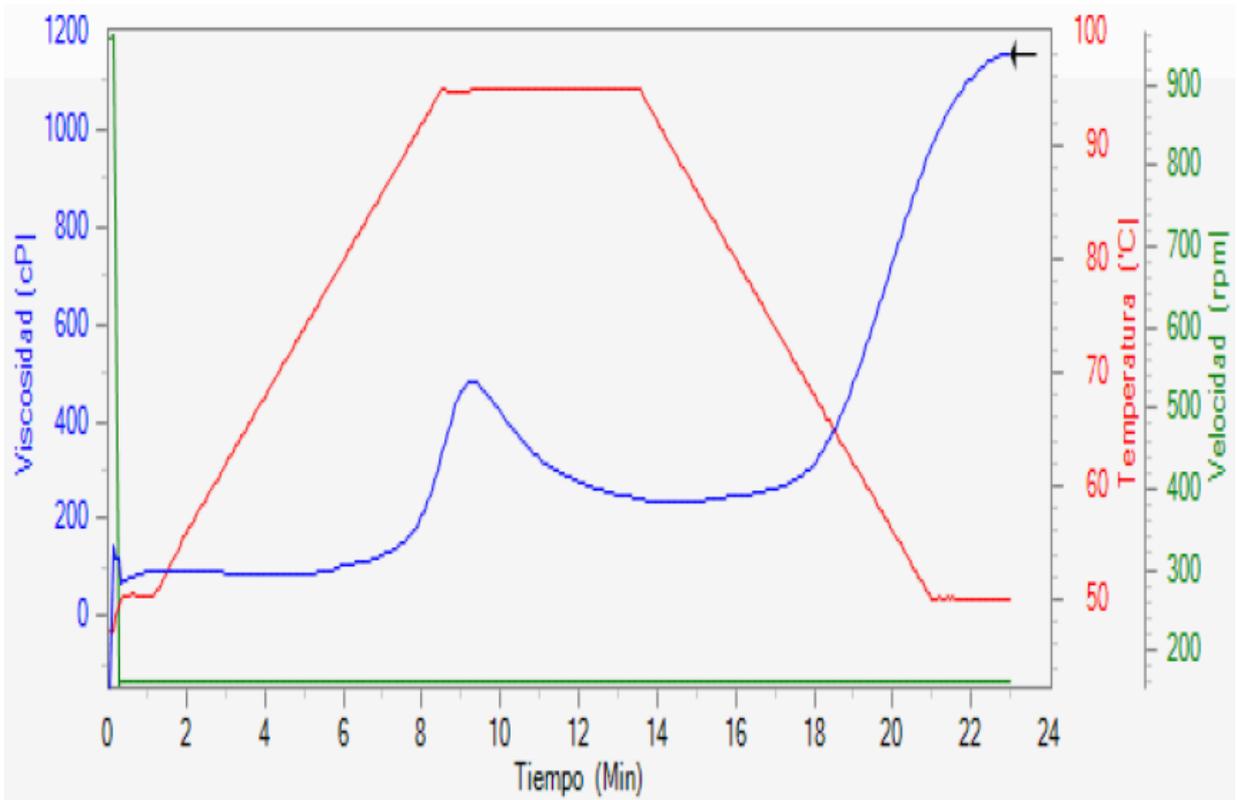
**Curva empaste RVA - T9**



**Curva empaste RVA - T10**



**Curva empaste RVA - T11**



**Curva empaste RVA - T12**

