

COCCIÓN POR EXTRUSIÓN DE UNA HARINA DE MIJO BLANCO (*Panicum miliaceum*)

ERWIN PORTILLA MEDINA

HERMAN SALGADO JIMENEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2013

COCCIÓN POR EXTRUSIÓN DE UNA HARINA DE MIJO BLANCO (*Panicum miliaceum*)

ERWIN PORTILLA MEDINA

HERMAN SALGADO JIMENEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial

para optar al título de Ingeniero de Alimentos

Director

Harold A. Acosta Zuleta, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2013

DEDICATORIA

Le agradezco a Dios todo poderoso por guiarme por un buen camino, ser la fuente de luz que me guio día a día y me iluminó con su infinita sabiduría para poder alcanzar este logro. A mis padres que me inculcaron el camino del estudio, que con su apoyo me ayudaron a hacer este sueño realidad y a todos los profesores que durante este tiempo compartieron sus conocimientos y me formaron en la vida profesional. A todos muchas gracias.

HERMAN

Gracias a Dios por la vida proporcionada y sus bendiciones recibidas durante mi carrera. A mis padres por sus valiosos consejos y la lucha incansable para forjar en mí una persona íntegra y los profesores de la Escuela de Ingeniería de Alimentos y su esfuerzo de educar para formar profesionales.

ERWIN P.

AGRADECIMIENTOS

De antemano agradecemos a nuestro director el profesor Harold A. Acosta Z. de la Escuela de Ingeniería de Alimentos, por su valiosa e importante colaboración que hizo que este proyecto y sueño se hiciera realidad.

Al profesor Alejandro Fernández Q. Director de la Escuela de Ingeniería de Alimentos por su valiosa colaboración que fue vital para el desarrollo y culminación de este proyecto.

A la Ingeniera de Alimentos Martha Librero de Pampa Ltda. por facilitar la molienda del grano.

A la Universidad del Valle y la Escuela de Ingeniería de Alimentos y a todos los profesores que fueron parte de nuestra formación académica por compartirnos sus conocimientos y haber logrado que seamos los profesionales que somos ahora.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	x
INTRODUCCION	1
1. MARCO TEORICO	2
1.1. Descripción del grano	2
1.1.1 Generalidades del Mijo blanco o común	2
1.1.2 Características estructurales del grano de mijo	2
1.1.2.1. Pericarpio	2
1.1.2.2. Endospermo	3
1.1.2.3. Germen	3
1.1.3. Almidón	3
1.1.4. Proteínas	4
1.2. Molienda	4
1.3. Tamizado	4
1.3.1. Módulo de fineza (MF)	5
1.3.2. Diámetro promedio (D)	5
1.4. Harinas	6
1.4.1. Caracterización de las harinas	6
1.4.1.1. Índice de absorción de agua (IAA)	6
1.4.1.2. Índice de solubilidad de agua (ISA)	6
1.4.1.3. Análisis reológico de harina de mijo blanco	7
1.4.1.3.1 Esfuerzo de corte o cizalla (τ)	7
1.4.1.3.2. Velocidad de corte o cizalla (γ)	7

	Página
1.4.1.3.3. Viscosidad (μ)	7
1.4.1.3.3.1. Fluidos Newtonianos	8
1.4.1.3.3.2. Fluidos No Newtonianos	8
1.5. Extrusión	9
2. ANTECEDENTES	10
3. FORMULACION DEL PROBLEMA	11
4. JUSTIFICACION	12
5. OBJETIVOS	13
5.1. Objetivo general	13
5.2. Objetivos específicos	13
6. METODOLOGIA	13
6.1. Material botánico	13
6.2. Equipo	13
6.2.1. Extrusor	13
6.2.1.1. Características técnicas del extrusor	14
6.3. Acondicionamiento del grano	15
6.4. Curvas de calibración	15
6.5. Condiciones para la elaboración de una harina de mijo en un extrusor	16
6.5.1. Reducción de tamaño y granulometría	17
6.6. Diseño experimental	17
6.6.1. Factores, niveles y variable de respuesta del diseño experimental	17
6.6.2. Pruebas de hipótesis del diseño experimental	18
6.7. Definición de las variables del proceso	19
6.8. Ensayos definitivos	20

6.9. Métodos analíticos	21
6.10. Evaluación de la variable de respuesta	21
	Página
6.11. Análisis reológico	22
6.11.1 Viscosidad y consistencia	22
7. RESULTADOS Y DISCUSION	20
7.1. Caracterización de la harina de mijo	20
7.2. Curvas de calibración del mijo blanco a diferentes humedades	23
7.3. Molienda y tamizado	24
7.4. Humedad de las harinas extruidas	26
7.5. Análisis reológico	27
7.5.1. Consistencia	27
7.5.2. Comportamiento reológico	30
7.6. Análisis de IAA	32
7.7. Análisis estadístico	35
7.8. Análisis de varianza	39
7.9. Prueba de comparación múltiple o mínima diferencia significativa (LSD)	41
7.10. Coeficiente de variación	42
7.11. Ecuación de línea de mayor ajuste	43
7.12. Validación de supuestos	43
8. CONCLUSIONES	45
9. BIBLIOGRAFIA	46

LISTADO DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Características de los tornillos y el barril	14
Tabla 2. Características técnicas del extrusor	14
Tabla 3. Factores y niveles del diseño experimental.	19
Tabla 4. Condiciones constantes del proceso	19
Tabla 5. Condiciones y variables de operación en etapa preliminar	19
Tabla 6. Condiciones y variables de operación	20
Tabla 7. Tipo de análisis y métodos analíticos que se requieren en la investigación	21
Tabla 8. Relación de alimentación para flujos de alimentación	23
Tabla 9. Porcentaje retenido en cada una de las mallas en las diferentes condiciones de proceso.	24
Tabla 10. Módulo de fineza y diámetro promedio para las diferentes condiciones	25
Tabla 11. Humedad de las harinas extruidas.	26
Tabla 12. Índices de comportamiento al flujo y coeficientes de consistencia obtenidos para los tratamientos.	31
Tabla 13. Índices de solubilidad de agua obtenidos para condiciones estudiadas	33
Tabla 14. Coeficientes estimados para los factores en unidades codificadas.	39
Tabla 15. Análisis de varianza para IAA	39
Tabla 16. Diferencia entre medias para los tratamientos.	42
Tabla 17. Coeficientes estimados para los factores en unidades descodificadas.	43

LISTADO DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Curvas reológicas típicas de fluidos No-Newtonianos de comportamiento independiente del tiempo.	9
Figura 2. Extrusor DS 32 II	14
Figura 3 Tornillos del extrusor DS-32II	14
Figura 4. Extrusor DS 32 II con cada una de sus partes principales	15
Figura 5. Barril del extrusor DS 32 II con cada una de sus zonas de calentamiento.	15
Figura 6. Curvas de calibración de alimentación al extrusor con mijo blanco.	23
Figura 7. Distribución de pesos retenidos (g) para los diferentes tratamientos.	25
Figura 8. Efecto sobre la Consistencia vs Factores del experimento.	27
Figura 9. Efecto sobre la Consistencia vs Factores del experimento.	28
Figura 10. Efecto sobre la Consistencia vs Factores del experimento.	29
Figura 11. Viscosidad aparente de las harinas de mijo obtenidas a diferentes tratamientos.	30
Figura 12. Curva linealizada de viscosidad aparente para los tratamientos.	31
Figura 13. Efecto de los factores estudiados sobre la variable de respuesta IAA.	34
Figura 14. Efecto normal estandarizado.	35
Figura 15. Distribución de los resultados obtenidos de los factores del experimento para la variable de respuesta IAA	36
Figura 16. Efectos estandarizados para la variable de respuesta IAA.	36
Figura 17. Diagrama de efectos principales para la variable de respuesta IAA.	37
Figura 18. Interacción entre los factores de experimentación.	38
Figura 19. Residuos para índice de solubilidad de agua.	44

RESUMEN

Se ha desarrollado una harina precocida a partir de mijo blanco (*Panicum miliaceum*), utilizando un extrusor de doble tornillo. El grano de mijo se molió y se estandarizó su humedad inicial (16 y 20%) para determinar las variables de operación, las cuales se establecieron así: temperatura del dado de 120°C y 140°C, y de la zona de cocción en el barril 140°C y 160°C; velocidad de tornillo 194 y 239 rpm, y humedad inicial de mijo 16 y 20%. El mijo fue alimentado a un flujo de 16 Kg/h. Se utilizó un diseño factorial 2x2x2 completamente aleatorizado y como respuesta, el índice de solubilidad de agua (IAA). Al extruido se le realizaron los siguientes análisis: granulometría, humedad, índice de solubilidad de agua, viscosidad y consistencia. Los factores humedad y velocidad presentaron diferencias significativas, mientras que el factor temperatura no.

El tratamiento a 140°C, 20% de humedad y 194 rpm y el tratamiento a 160°C, 20% de humedad y 239 rpm, mostraron los menores coeficientes de variación (0,02 y 1,45% respectivamente), mientras que el tratamiento a 160°C, 20% de humedad y 194 rpm alcanzó el valor más alto (CV: 11,34%). Un aumento en la velocidad de tornillo y en la humedad inicial de mijo, incrementó el índice de solubilidad de agua. Estos resultados indican que las harinas precocidas de mijo blanco pueden ser una alternativa de uso para este humilde cultivo, pues puede emplearse como ingrediente o como producto terminado, en cualquier caso, puede constituirse en un factor de seguridad alimentaria en áreas semiáridas que puedan sufrir de escasez de alimentos.

Palabras clave: Extrusión, mijo, harina precocida de mijo, índice de solubilidad de agua.

ABSTRACT

A pre-cooked flour from millet (*Panicum miliaceum*) has been developed using a twin-screw extruder. Millet was milled and its moisture was standardized to determine the extruder operational variables which were set to: 120°C and 140°C in the dice, and 140°C and 160°C in the cooking zone of the barrel; the screw at 194 and 239 rpm and the grain initial moisture to 16 and 20%. Feed speed was set to 16 Kg/h. A 2x2x2 factorial design was used and water absorption index was the response variable. Extrudates were analyzed for granulometry, moisture, water absorption index, viscosity and consistency. Moisture and screw speed showed significant differences while temperature did not.

Treatment at 140°C, 20% moisture and 194 rpm, and that at 160°C, 20% moisture and 239 rpm, exhibited the lowest coefficients of variation (0,02 and 1,45%, respectively), meanwhile the one at 160°C, 20% moisture and 194 rpm reached the highest (CV: 11,34%). Increasing screw speed and initial moisture, increased water absorption index. These results indicate that this millet pre-cooked flour could be an alternative use for this humble crop. It could be employed as an ingredient or directly, as a final product, either way it could constitute a food security factor for semi-arid areas where food shortage might be a threat.

Palabras clave: Extrusion, millet, pre-cooked millet flour, water absorption index.

INTRODUCCIÓN

El mijo blanco o común (*Panicum miliaceum* L.) se considera un cereal menor; se usa como alimento básico en zonas tropicales semiáridas de Asia y África. Su valor nutricional lo hace una fuente alternativa de energía, de proteínas, de vitaminas y de minerales para estas poblaciones.

Los mijos se utilizan para elaborar alimentos que pueden agruparse en productos tradicionales e industriales no tradicionales. Los granos procesados o no, se pueden cocer enteros o descortezados, molidos para obtener harina por medio de uno de los métodos tradicionales o industriales para producir distintos tipos de pan, gachas, productos cocidos, productos hervidos, bebidas y alimentos de refrigerio(Rooney, 1987).

La producción total mundial en cereales menores (maíz, cebada, centeno, mijo, etc...) fue de 1.115Mt. El mijo es el sexto cereal en importancia en el mundo y crece extensamente en África, Asia, India y Oriente Próximo, constituyendo una fuente básica para la nutrición de millones de personas(Gramene, 2006).El salvado de mijo es bajo en minerales, pero notablemente rico en proteína. El germen constituye el 16% frente al 10% en el sorgo; es rico en grasa (32%), proteína (19%) y ceniza (10,4%). Prácticamente toda la grasa del grano entero se halla en el germen. (FAO, 1995).

La extrusión es un proceso mediante el cual una mezcla de materiales, se somete a fuerzas de presión y cizalla, que transforman su estructura permitiendo crear nuevas formas y texturas. El proceso combina varias operaciones como mezclado, amasado, cizalla y formación. La extrusión puede realizarse en frío donde el material se extruye sin expansión o en caliente (cocción-extrusión) donde las macromoléculas de los componentes pierden su estructura nativa discontinua y se forma una masa continua y viscosa en la que se dextriniza y gelatiniza el almidón, se desnaturalizan las proteínas, se inactivan enzimas responsables de posibles deterioros, se destruyen algunos compuestos antinutricionales y se disminuye la carga microbiana. Debido a que la extrusión se realiza bajo condiciones de poca humedad, el producto resultante requiere muy poco o ningún secado para alcanzar humedades seguras para el almacenamiento. Las altas temperaturas del proceso pasteurizan efectivamente el producto, lo cual incrementa su estabilidad de anaquel.

1. MARCO TEORICO

1.1. Descripción del grano

1.1.1. Generalidades del Mijo blanco o común

El mijo blanco (*Panicum miliaceum* L.) también se conoce como proso, mijo de puerco, millo, mijo ruso y maíz pardo. Este es un tipo de mijo que se cultiva desde hace muchísimo tiempo; es el milium de los romanos y el verdadero mijo del que habla la historia. Lo cultivaron los primitivos lacustres en Europa. Se cree que fue domesticado en Asia central y oriental y debido a su capacidad para madurar rápidamente fue a menudo cultivado por los nómadas.

Se trata de una planta de raíces someras cuya altura varía entre los 30 y 100 cm. El grano contiene un porcentaje comparativamente mayor de fibra indigestible debido a que las semillas están encerradas en las cascarras y son de difícil separación mediante el proceso tradicional de molturación. El peso de 1000 semillas es de unos 5 gramos. Se presta especialmente para ambientes continentales áridos y se cultiva en climas más templados en comparación con los otros mijos.

1.1.2. Características estructurales del grano de mijo

Las características de los granos de mijo muestran una gran diversidad en color, forma, tamaño y en determinados aspectos de los componentes anatómicos. Sus elementos anatómicos principales son el pericarpio, el germen o embrión y el endospermo.

En el grano de sorgo, el peso medio del pericarpio es del 6%, el del endospermo del 84% y el del germen del 10% (Hubbard, *et al.*, 1950). En el mijo blanco, el germen es muy pequeño y por lo tanto, la proporción entre endospermo y germen es respectivamente de 11:1 a 12:1, muy superior a la del sorgo.

1.1.2.1. Pericarpio

En el mijo blanco, el pericarpio es como un saco, unido débilmente al endospermo en un solo punto. En este tipo de granos, el pericarpio se quiebra fácilmente quedando el revestimiento de la semilla o testa como protección del endospermo interno. El pericarpio es el elemento estructural más externo de la cariopsis y se compone de tres subcapas, el epicarpio, el mesocarpio y el endocarpio. Durante el descortezado o molturación, el pericarpio del mijo perla rompe por las

capas de células transversales y tubulares y pueden quedar unidos al endospermo fragmentos del endocarpio.

1.1.2.2. Endospermo

El mayor componente del grano es el endospermo, que es un importante tejido de almacenaje. Se compone de una aleurona y de zonas periféricas de textura córnea y harinosa; las células de la aleurona son ricas en minerales, vitaminas B, aceite y también contienen algunas enzimas hidrolizantes. El endospermo periférico se caracteriza por sus células rectangulares y largas, que son muy compactas y que contienen gránulos amiláceos y sustancias proteínicas dentro de la matriz proteínica. En el mijo perla, las sustancias proteínicas tienen más contenido harinoso que en la zona córnea (Adams, *et al.*, 1976).

El almidón de la zona harinosa se presta más a la digestión enzimática. La respectiva proporción de endospermo córneo y harinoso determina la textura del grano de mijo. La textura del grano es uno de los parámetros más importantes que determina la calidad de elaboración y alimentaria del mijo (Rooney, *et al.*, 1987).

1.1.2.3. Germen

Las dos partes principales del germen son el eje embrionario y el escutelo. El escutelo es un tejido de almacenamiento, rico en lípidos, proteína, enzimas y minerales.

1.1.3. Almidón

El almidón es la sustancia de reserva alimenticia predominante en las plantas y proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por los humanos en todo el mundo. Existe en entidades discretas, semicristalinas, las cuales reciben el nombre de gránulos. El tamaño, la forma y la estructura de los gránulos difieren substancialmente entre fuentes botánicas. Tanto el almidón como los productos de la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos digestibles de la dieta habitual (Fennema, 2000). Este material es una mezcla de dos sustancias, amilosa y amilopectina, que sólo difieren en su estructura, la forma en la que se unen las unidades de glucosa entre sí para formar las cadenas. En el caso de la amilosa las unidades de glucosa están unidas entre ellas por enlaces α 1-4 lo que da lugar a una cadena lineal, mientras que, en la amilopectina aparecen ramificaciones debidas a enlaces α 1-6. Así, la amilosa que representa alrededor del 20-30% del

almidón, que se hidroliza más fácilmente que la amilopectina, molécula más grande y ramificada (FAO, 1995).

1.1.4. Proteínas

Las proteínas son biomoléculas formadas básicamente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Las proteínas de todo ser vivo están determinadas genéticamente, es decir, codificadas en el material genético de cada organismo, donde se especifica su secuencia de aminoácidos.

1.2.Molienda

Operación unitaria mediante el cual el material de alimentación se reduce a tamaños más pequeños por medio de una acción mecánica, es decir, los materiales se fracturan. El primer paso del proceso consiste en que las partículas de alimentación se deformen y desarrollen tensiones por acción de la maquinaria de reducción de tamaño. A medida que se aplica más fuerza a las partículas, la energía de tensión excede un nivel y el material se fractura.

Los equipos para la reducción de tamaño se pueden clasificar de acuerdo a la forma en que se aplican las fuerzas, de la siguiente manera: entre dos superficies, como en la trituración y el corte; en una superficie sólida, como el impacto y por la acción del medio circundante como en los molinos coloidales. Una clasificación más práctica consiste en dividir los equipos en trituradores, molinos, molinos finos y cortadores (Geankoplis, 1998).

1.3. Tamizado

Es una operación básica en la que una mezcla de partículas sólidas de diferentes tamaños, se separa en fracciones pasándolas por un tamiz. Cada fracción es más uniforme en tamaño que la mezcla original. El tamizado se utiliza en el análisis de partículas para determinar el tamaño de estas y la distribución de tamaños de los productos que habían sido sometidos a una molienda. (Brennan, *et al.*, 1998).

1.3.1. Módulo de fineza (MF)

Indica la uniformidad de la molienda, se utiliza para obtener el tamaño promedio de las partículas. Cuando MF es alto, el material es grueso, medio y fino (presencia de partículas de diferente tamaño).

Cuando MF es cero, el material es fino, todas las partículas son de igual tamaño.

El módulo de fineza se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{\sum F_i W_i}{\sum W_i} \quad (1)$$

Dónde:

$i = 0, \dots, n$.

MF= adimensional.

F_i = factor de ponderación numero natural creciente otorgado al peso retenido en cada criba. El factor de ponderación para el colector es cero.

W_i = fracción o % de peso retenido en cada tamiz.

1.3.2. Diámetro promedio (D)

El diámetro medio de una fracción es aquel que pasa por un tamiz dado, pero es retenida por el siguiente más pequeño de la serie. (Brennan *et al.*, 1998). Este se calcula con la siguiente expresión:

$$D = 0.1046 * (2.0)^{MF} \quad (2)$$

Dónde:

D: diámetro promedio de las partículas (mm)

MF: módulo de fineza (adimensional)

1.4. Harinas

1.4.1. Caracterización de las Harinas

Una harina precocida de origen amiláceo contiene almidones que han modificado su estructura por un tratamiento hidrotérmico. La principal característica de una harina precocida es la facilidad de hidratación, solubilización y desarrollo de una textura viscoelástica como resultado de los almidones modificados que contiene. Las variaciones en la textura de una harina precocida reconstituida por hidratación están íntimamente ligadas al estado de transformación del almidón como consecuencia de las condiciones de proceso.

Los índices de solubilidad y absorción de agua se pueden utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamientos termomecánicos.

1.4.1.1. Índice de Absorción de Agua (I.A.A.)

Este índice es el peso del gel obtenido por gramo de muestra seca; que originalmente fue desarrollado como una medida de esponjamiento o hinchamiento del almidón. Durante la extrusión en caliente de los alimentos amiláceos, su humedad se incrementa por adición de agua y el almidón es sometido a elevadas temperaturas y a intensas fuerzas de cizalla. Como consecuencia de ello los gránulos de almidón se hinchan, absorben agua y se gelatinizan, dando como consecuencia una masa viscosa y plástica. Este cambio en la estructura macromolecular hace que el almidón, sin apenas degradarse, se torne más soluble. Los cambios que se producen en su solubilidad a diferentes condiciones de temperatura e intensidad de fuerza de cizalla se miden mediante el índice de absorción de agua (Linko, 1981).

1.4.1.2. Índice de Solubilidad de Agua (I.S.A.)

Este índice es expresado como un porcentaje de los sólidos secos originales, es la cantidad de materia seca recuperada después de evaporar el sobrenadante de la determinación de la adsorción de agua. El ISA es una medida de la dextrinización (Linko, 1981).

Análisis reológico de harina de mijo blanco.

Estudia la deformación y el flujo de la materia, ayuda a entender los diferentes comportamientos de los fluidos. Los parámetros reológicos son:

1.4.1.2.1. Esfuerzo de corte o cizalla (τ)

Es la fuerza tangencial por unidad de área y se expresa para el flujo tangencial simple entre placas como:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Dónde:

T: esfuerzo de corte o cizalla

μ : viscosidad

$\frac{du}{dy}$: Tasa de esfuerzo cortante

1.4.1.2.2. Velocidad de corte o cizalla (γ)

Cambio de velocidad μ a través de la distancia y entre dos platos. Las unidades son 1/s.

1.4.1.2.3. Viscosidad (μ)

Relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte adoptada por el fluido.

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4)$$

Dónde:

μ : viscosidad

τ : esfuerzo de corte

γ : velocidad de cizalla

1.4.1.2.3.1. Fluidos newtonianos

Son aquellas sustancias que cumplen que el esfuerzo de corte τ es directamente proporcional a la velocidad de corte del fluido.

1.4.1.2.3.2. Fluidos no-newtonianos

Son aquellos fluidos que no presentan una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación. Los fluidos no newtonianos se pueden representar por la siguiente expresión:

$$\tau = k\gamma^n \quad (5)$$

Dónde:

k: coeficiente de consistencia en (Pa.sⁿ)

n: índice de comportamiento de flujo (adimensional).

Si $0 < n < 1$, el fluido es pseudoplastico.

Si $1 < n < \infty$, el fluido es dilatante.

Para conocer el valor de n teniendo el esfuerzo de corte y la velocidad de corte de un fluido no newtoniano, se hace una linealización de la ecuación 1, resultando:

$$\ln \tau = \ln k + n \ln \gamma \quad (6)$$

Se gráfica y con la ecuación de la recta se obtienen los parámetros, si el fluido no es lineal y el intercepto no está en cero, el fluido es Bingham. Cuando se trata de fluidos no Newtonianos se toma la viscosidad aparente, ya que esta aumenta o disminuye.

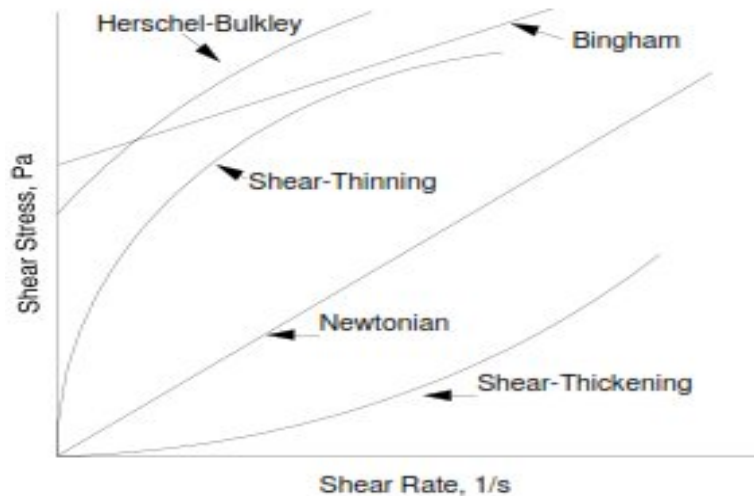


Figura 1. Curvas reológicas típicas de fluidos No-Newtonianos de comportamiento independiente del tiempo. (Steffe, 1996)

1.5 Extrusión

Los extrusores de doble tornillo constan de dos tornillos que giran en el interior de un cilindro que pueden tener diferentes formas. Este equipo se clasifica según el sentido de rotación de los cilindros y según el tipo de esfuerzo realizado por los tornillos.

Al utilizar un extrusor se mejora tanto la calidad como la homogeneidad del producto, se obtiene un producto más higiénico, logra una mayor uniformidad en la temperatura evitando los cambios en su apariencia, evita que en la masa aparezcan estrías al tener esta un menor contacto con el aire, reduce las pérdidas ocasionadas.

En la industria de alimentos el tipo de extrusor más utilizado son los de tornillo cortante en los que el alimento es impulsado a través del extrusor por el movimiento de estos; el movimiento de ambos tornillos mejora el mezclado, se logra una cocción más completa y evita que el alimento rote en el cilindro.

Ventajas de los extrusores de doble tornillo:

- Su producción es independiente del flujo de alimentación y puede ajustarse por el desplazamiento de los tornillos.
- Maneja fácilmente productos aceitosos, pegajosos y de alto contenido de agua.
- Es capaz de manejar concentraciones altas de grasa, azúcar y agua.

- Su sección de descarga corta, hace que la se cree la presión suficiente para lograr la extrusión, logrando que la zona de mayor desgaste sufra menos.
- Maneja tanto productos granulados como pulverizados.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad se suelen emplear varios métodos tradicionales de procesamiento del mijo, la mayoría de estas técnicas son laboriosas, monótonas y se realizan manualmente. En cierto grado, los métodos que se emplean se han desarrollado para conseguir que los alimentos tradicionales se adecuen a los gustos locales. Las técnicas más comunes son: el descortezamiento, el malteado, la fermentación, el tostado, el exfoliado y la molienda. Son métodos casi siempre de empleo intensivo de trabajo y que dan un producto de mala calidad. En general, los métodos industriales para la transformación del mijo no están tan bien desarrollados como lo están los que se emplean para elaborar el trigo y el arroz, cereales que en la mayoría de los lugares se tiene en mucha mayor consideración que el mijo. Las posibilidades de elaboración industrial del mijo son buenas y en varios países se ha intentado desarrollar técnicas industriales mejoradas.

Una vez limpio el grano, la primera operación de elaboración es la separación de desechos de la parte comestible. Los desechos se componen del pericarpio y a veces del germen (descortezado). Después de la eliminación de los desechos, la parte comestible se suele molturar para reducir el tamaño de las partículas de la fracción comestible.

El Centro Nacional de Investigaciones Agronómicas de Bambey, Senegal, comenzó a utilizar una descortezadora PRL para el mijo en 1979. A principios de los años ochenta Palyi desarrolló una variante y la ensayó en Canadá. La Palyi-Hanson BR001-2 puede elaborar tres toneladas por hora. En Gambia se ensayó una descortezadora PRL durante un año a lo largo del cual se descortezaron 50 toneladas de mijo perla bajo gestión local.

Se ha descrito un nuevo procedimiento de elaboración industrial mediante técnicas frotadoras. Por este método el descortezamiento, se conseguía mediante un rotor de acero que hacía rotar a la masa de grano dentro una cámara generalmente cilíndrica, el sistema rendía un 80% de harina con una blancura comparable a la molienda tradicional (Munck, *et al...*, 1982).

El desarrollo comercial de un primer extrusor co-rotación de doble tornillo fue desarrollado por Colombo y LMP de Turing, Italia en 1937. En el seminario sobre “la investigación tecnológica en cocción-extrusión de alimentos en América Latina”, se presentaron varios resultados en cuanto a la extrusión de mezclas realizando estudios sobre la influencia de las variables como composición, tipo de tornillo, humedad, temperatura, y velocidad de giro del tornillo en la extrusión de una mezcla de arroz y frijol (Grimanesa, 1991) Otros estudios describen la utilización de la pulpa de merluza deshidratada en la elaboración de bocaditos expandidos por extrusión de maíz (Maza, 1998).

Se han evaluado las propiedades del mijo perla luego extrusión; para lo cual se manejaron contenidos de humedad inicial de 12.5, 13.6, 15 y 16.3%. Los resultados indicaron aumento de solubilidad de agua y la viscosidad en el extruido de mijo descortezado en condiciones de baja humedad; se obtuvo una papilla a partir de mijo seco con una alta calidad nutricional y con propiedades aceptables para este tipo de alimento (Almeida, *et al...*, 1993).

También, se ha estudiado el efecto de las variables de proceso de cocción por extrusión y algunas características físico-químicas. Los resultados indicaron que las condiciones óptimas de proceso para granos de mijo menores a 355 micras de tamaño fueron 18 ± 1 % de contenido de humedad, extrusión a $150 \pm 5^\circ\text{C}$ y 200 ± 10 rpm de velocidad de tornillo. El estudio mostró que el mijo perla puede ser utilizado como base de productos alimenticios, mostrando amplias bondades desde el punto de vista nutricional (Sumathi, *et al...*, 2007).

3. FORMULACION DEL PROBLEMA

Se pretende desarrollar un procedimiento para obtener harina a base de mijo que conserva las características nutritivas de este y mejore el tiempo de vida de almacenamiento del producto.

Por eso, una atractiva alternativa es producir una harina mediante la tecnología de la extrusión como alternativa de uso y comprobando su calidad fisicoquímica para orientar posibles aplicaciones alimenticias. El proceso de extrusión en la industria de cereales ha sido ampliamente aceptado en el procesamiento de granos y harinas, debido a sus múltiples ventajas; la principal es que se llevan a cabo varias operaciones unitarias (mezclado, cizallamiento, cocción, secado y texturización) en un solo proceso rápido y eficiente (Duran, 1988).

Por otra parte, el mijo en Colombia se comercializa muy poco para el consumo humano y las tecnologías de elaboración son artesanales. Debido a esto se tienen muy pocos estudios de sus propiedades nutricionales y procesos de elaboración industrial.

4. JUSTIFICACIÓN

La importancia de este trabajo radica en los problemas que se viven a nivel mundial por la escasez de alimento en las zonas menos favorecidas. Por ejemplo en zonas semi-áridas, el mijo se cultiva con relativa facilidad y es un alimento de un valor nutricional representativo, que podría garantizar cierto nivel de seguridad alimentaria (Rooney, 1987). Sin embargo, la cultura de muchos países solo permite usarlo como alimento animal. Es por eso, que el empleo de tecnologías como la de extrusión puede mejorar la disponibilidad tanto del almidón como de la proteína, mejorando su digestibilidad, lo cual podría convertirse en una alternativa alimentaria para poblaciones desfavorecidas (Miller, 2008).

También, se debe contar con que el mijo es un cultivo poco conocido en nuestro país y su uso se ha reducido casi exclusivamente como alimento para aves. Por lo tanto, es importante ofrecer alternativas para este producto, demostrando que es posible obtener derivados que puedan utilizarse en la industria alimentaria. Así, utilizando los principios de la ingeniería de alimentos se busca elaborar un alimento a nivel industrial y que cumpla con los requerimientos mínimos de una dieta que supla los nutrientes básicos.

OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

- Desarrollar un proceso para producir harina precocida a base de mijo blanco utilizando la tecnología de extrusión.

5.2. Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones de adecuación del grano de mijo blanco para el proceso de extrusión.
- Establecer las condiciones de proceso para obtener harina cocida de mijo usando un extrusor de doble tornillo.
- Evaluar algunas propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida.

5. METODOLOGÍA

6.1. Material botánico

El mijo blanco (*Panicum miliaceum*) se obtuvo de una especie que se cultiva en la costa atlántica de Colombia, zonas secas y que hacen fácil el cultivo de este. Que era el que se obtenía fácilmente en el mercado ya que no se pudo obtener uno que fuera certificado del tipo de variedad.

6.2. Equipo

6.2.1. Extrusor

El equipo empleado fue un extrusor de prueba de doble tornillo modelo DS 32-II (Jinan Saixin Machinery Co, China) mostrado en la figura 3, con dirección de rotación de los tornillos en co-rotación con aletas entrelazadas (Figura 4). El equipo tiene un sistema de programación y control lógico (PLC por sus siglas en inglés), con el cual se programó y controló las temperaturas en el barril y las velocidades de los motores.



Figura 2. Extrusor DS 32 II

6.2.1.1. Características técnicas del extrusor

En la tabla 3 se relacionan las características de los tornillos y el barril. En la tabla 4 se especifican las características técnicas del extrusor.

Tabla 1. Características de los tornillos y el barril

Longitud	60cm
Diámetro	3,2mm
Relación L/D	18,8
Dirección de rotación tornillos	Entrelazados en co-rotación
Tipo de cilindro	Liso



Figura 3 Tornillos del extrusor DS-32II

Tabla 2. Características técnicas del extrusor

Entrada de voltaje	220V/60Hz
Rendimiento	12-20-Kg/h
Potencia de alimentación	0.75kW
Potencia de motor principal	5.5kW
Potencia de motor de corte	0.55kW
Poder de calentamiento	0.7-2.5kW
Dimensiones	2 x 0.6x 1.5m

A continuación se muestra el un diagrama del extrusor especificando sus partes principales y las zonas de calentamiento.

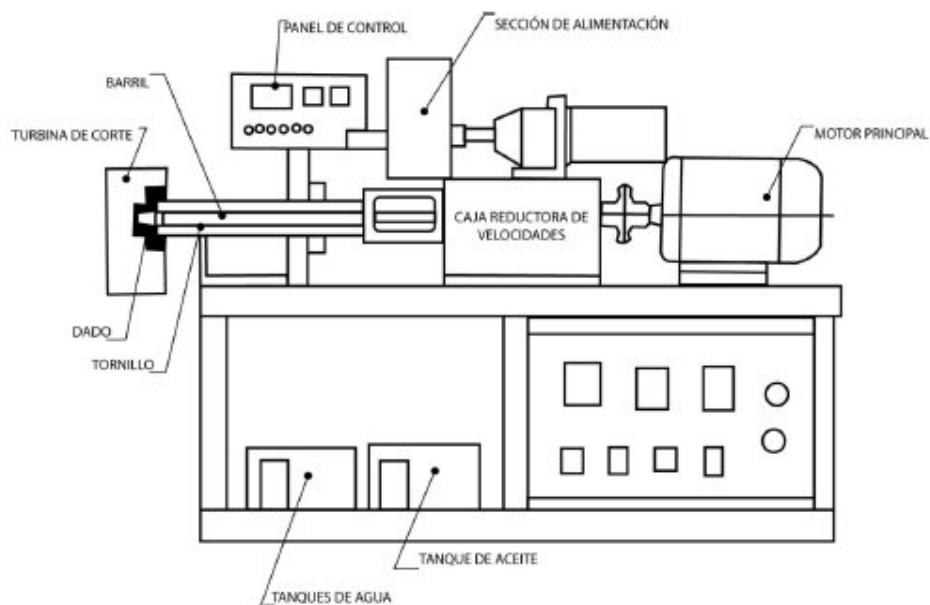


Figura 4. Extrusor DS 32 II con cada una de sus partes principales

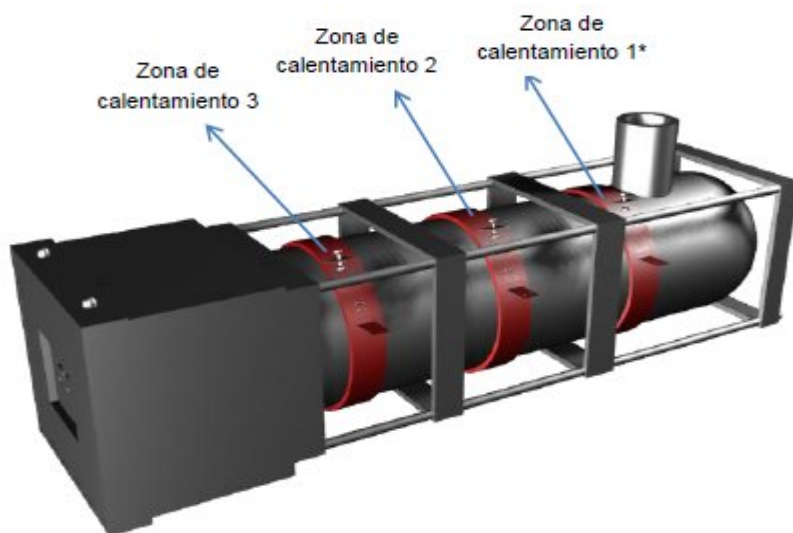


Figura 5. Barril del extrusor DS 32 II con cada una de sus zonas de calentamiento. Fuente: Alban y Montero (2011)

La zona 1 en el barril no posee sistema de refrigeración.

6.3. Acondicionamiento del grano

El grano fue necesario realizarle una reducción de tamaño en un molino de discos. Este proceso se realizó en las instalaciones de la planta de Pampalinda Ltda. Se determinó la humedad inicial del grano, y usando como guía de extrusión del sorgo como guía, se determina el nivel de humedad necesaria para alimentar el mijo al extrusor (AACC Methods, 1997). Se usaron humedades de 16 y 20% (Martínez *et al.*, 1992), previamente acondicionadas en bolsas de 700 g por 12 horas.

6.4. Curvas de calibración

Para determinar el flujo de alimentación del material en unidades de kilogramos/hora, se realizó una prueba en el extrusor, la cual consistió en alimentar el equipo a diferentes velocidades ya que las medidas que se tomaban de este eran de frecuencia (Hz), tomando como referencia intervalos de treinta segundos. Seguidamente se registraron los pesos de cada intervalo para determinar el flujo másico (Kg/h) a diferentes velocidades.

6.5. Condiciones para la elaboración de una harina de mijo en un extrusor

Los experimentos se realizaron en un extrusor de doble tornillo co-rotante (Marca Jinan SaixinMachinery Co. Ltd Modelo DS32-II). La velocidad de los tornillos, la tasa de alimentación del material y la temperatura fueron monitoreadas en el panel de control. Para estos experimentos se utilizó un dado circular de 5 mm de diámetro.

Establecida la humedad necesaria de alimentación, se acondicionó el extrusor (Temperatura, velocidad tornillos y velocidad alimentación) para realizar corridas de prueba. Posteriormente se alimentó el extrusor con el material húmedo, al terminar las corridas con las muestras se agregaban sémola de maíz, que actuaba como limpiador e identificador entre muestras. Posteriormente se limpió el extrusor para evitar obstrucciones y contaminación. Finalmente los extruidos se llevaron a un horno a 40°C por 24 horas para estabilizar la humedad y su posterior análisis.

6.5.1. Reducción de tamaño y granulometría

Los extruidos estabilizados fueron sometidos a dos procesos de molienda, para obtener un polvo fino.

La harina obtenida fue tamizada siguiendo la norma S352.2 dada por ASAE (1994), para obtener muestras de granulometría uniforme, utilizando un juego de tamices tipo Tyler(número de mallas: 20, 30, 60, 100 y 140 Mesh(1Mesh= 1 orificio por pulgada), El tamizado se realizó en un Ro-Tap (Marca W.S Tyler), con un tiempo de agitación de 15 minutos por muestra.

6.6. Diseño Experimental

6.6.1. Factores, niveles y variable de respuesta del diseño experimental

Se realizó un diseño factorial 2^3 completamente aleatorizado por duplicado. Los tres factores fueron la temperatura, la humedad y velocidad de los tornillos, cada uno de estos con dos niveles. La variable de respuesta fue el índice de absorción de agua.

El diseño experimental se dividió en dos fases: ensayos preliminares y ensayos definitivos. Los ensayos preliminares se realizaron con el fin de determinar la operatividad del equipo y encontrar las condiciones de operación apropiadas para este tipo de cereal.

La ecuación del modelo fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \alpha_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\alpha)_{il} + (\beta\alpha)_{jl} + (\tau\beta\alpha)_{ijl} + \epsilon_{ijkl}$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, A$; $j = 1, 2, \dots, B$; $l = 1, 2, \dots, C$; $k = 1, 2, \dots, r$;

Y_{ijkl} = Valor aleatorio que toma la variable respuesta en la k-ésima replica que ha sido expuesta al l-ésimo nivel del factor velocidad de los tornillos, al j-ésimo nivel del factor temperatura, y al i-ésimo nivel del factor humedad.

μ = Efecto medio general.

τ_i = Efecto del debido al factor humedad.

β_j = Efecto del debido al factor temperatura.

$\alpha_i =$	Efecto del debido al factor velocidad de los tornillos.
$(\tau\beta)_{ij}=$	Efecto debido a la interacción entre los factores humedad y temperatura.
$(\tau\alpha)_{ii}=$	Efecto debido a la interacción entre los factores humedad y velocidad de los tornillos.
$(\beta\alpha)_{ji}=$	Efecto debido a la interacción entre los factores temperatura y velocidad de los tornillos.
$(\tau\beta\alpha)_{iji}=$	Efecto debido a la interacción entre los factores humedad, temperatura y velocidad de los tornillos.
$\epsilon_{ijkl}=$	Error experimental.

Los resultados se evaluarán usando un análisis de varianza (ANOVA) y empleando como criterio de separación de medias, el estadístico LSD modificado de Fisher a un nivel de significancia de 0.05.

6.6.2. Pruebas de hipótesis del diseño experimental

Se plantea aceptar o rechazar la hipótesis nula que indica la interacción entre la humedad τ_i , la temperatura β_j , y velocidad de los tornillos α_i que no generan un efecto significativo sobre el índice de absorción de agua, mientras que la hipótesis alternativa indica que la interacción entre los factores si genera un efecto significativo sobre el índice de absorción de agua (IAA).

Planteamiento de las hipótesis:

$$H_0: (\tau\beta\alpha)_{iji} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: (\tau\beta\alpha)_{iji} \neq 0$$

En el caso que la interacción entre los factores no genere un efecto en el IAA, se acepta la hipótesis nula), se evalúa el efecto de la interacción entre dos factores.

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

Interacción entre la humedad y la temperatura

$$H_0: (\tau\alpha)_{ii} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: (\tau\alpha)_{ii} \neq 0$$

Interacción entre la humedad y la velocidad de los tornillos

$$H_0: (\beta\alpha)_{ji} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: (\beta\alpha)_{ji} \neq 0$$

Interacción entre la temperatura y velocidad de los tornillos

Si se obtiene como resultado que la interacción entre dos factores no genera ningún efecto en el IAA, se procede a analizar el efecto de cada factor individualmente:

$$H_0: \tau_i = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: \tau_i \neq 0$$

$$H_0: \beta_j = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: \beta_j \neq 0$$

$$H_0: \alpha_i = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: \alpha_i \neq 0$$

6.7. Definición de las variables de proceso

En los ensayos preliminares se trabajó bajo diferentes niveles con el fin de determinar las mejores condiciones de proceso. Las variables independientes de procesamiento incluyen humedad inicial de muestra (%), velocidad de tornillos (rpm) y temperaturas de barril (°C). Se tomó como condiciones constante la rata de alimentación (Kg/h) y la configuración del dado. En la tabla 1, se muestran las variables de proceso y sus respectivos niveles que fueron utilizados en el diseño experimental.

Tabla 3. Factores y niveles del diseño experimental.

Variables de proceso	Niveles	Variables de respuesta
Humedad de muestra	16 y 20%	Índice de absorción de agua
Temperatura de la última sección del barril	140 y 160 °C	
Velocidad de tornillos	194 y 239 rpm	

Las temperaturas se escogieron teniendo en cuenta el grado de cocción en las harinas, para lo cual se determinó el índice de solubilidad de agua (ISA) y el índice de absorción de agua (IAA), con el fin de evaluar la modificación de los almidones durante el proceso de cocción extrusión. Las condiciones constantes de proceso se muestran en la tabla 2.

Tabla 4. Condiciones constantes del proceso

Parámetros de entrada	Condiciones
Flujo de alimentación	16 Kg/h (varia con base en la humedad del producto, este es un dato promedio de las dos humedades utilizadas).
Diámetro del dado	5 mm

Se realizaron 12 ensayos preliminares, los cuales se describen a continuación.

Tabla 5. Condiciones y variables de operación en etapa preliminar

Muestra	Condiciones			
	Humedad (%)	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 3 (°C)	Velocidad de tornillos (rpm)
Muestra 1	16	120	140	194,07
Muestra 2	18	120	140	194,07
Muestra 3	20	120	140	194,07
Muestra 4	16	140	180	194,07
Muestra 5	18	140	180	194,07
Muestra 6	20	140	180	194,07
Muestra 7	16	90	130	194,07
Muestra 8	18	90	130	194,07
Muestra 9	20	90	130	194,07
Muestra 10	16	90	130	238,86
Muestra 11	18	90	130	238,86
Muestra 12	20	90	130	238,86

6.8. Ensayos definitivos

Según los resultados de las variables de respuesta presentados en los ensayos preliminares, se seleccionaron como variables de operación durante la experimentación la humedad (16 y 20%), temperatura (120-140 y 140-160°C) y velocidad de tornillos (194 y 238 rpm).Las condiciones generales y las variables de operación se describen a continuación en la tabla 4.

Tabla 6. Condiciones y variables de operación

Muestra	Condiciones			
	Humedad (%)	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 3 (°C)	Velocidad de tornillos (rpm)
Muestra 1	16	118,90 ± 0,32	139,24 ± 0,33	194,07
Muestra 2	20	117,34 ± 0,15	138,07 ± 1,21	194,07
Muestra 3	16	118,14 ± 0,14	139,74 ± 0,19	238,86
Muestra 4	20	119,16 ± 0,23	140,74 ± 0,28	238,86
Muestra 5	16	138,04 ± 1,49	158,78 ± 1,74	194,07
Muestra 6	20	136,60 ± 0,14	156,25 ± 0,17	194,07
Muestra 7	16	140,03 ± 0,29	159,93 ± 0,17	238,86
Muestra 8	20	140,05 ± 0,13	161,63 ± 0,22	238,86

6.9. Métodos Analíticos

El extruido obtenido se enfrió en bandejas y se almacenaron en bolsas de polietileno. Las muestras molidas también se almacenaron en bolsas de polietileno de alta densidad y de allí se tomaron las submuestras a las cuales se le realizaron evaluaciones analíticas, usando métodos reconocidos como se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipo de análisis y métodos analíticos que se requieren en la investigación

Análisis	Método
Contenido de humedad	AOAC 925.10 (A.O.A.C, 1990) para harinas a una temperatura de 105 ⁰ C.
IAA	Método empleado por Sandoval <i>et al.</i> (2006)
ISA	Método empleado por Sandoval <i>et al.</i> (2006)
Viscosidad aparente	AOAC 935.35 (A.O.A.C, 1990).
Consistencia	Método de consistómetro de Bostwick.
Granulometría	965.22 AOAC (Método Tipo I con especificaciones de tamiz según ISO 3310/1 - 1982 Tamices de ensayo).

6.10. Evaluación de la variable de respuesta

La variable de respuesta, tomada en cuenta para el análisis de los datos, fue el índice de absorción de agua (IAA), estos análisis se llevaron a cabo por duplicado. El IAA en harinas precocidas, se usa como medida de la capacidad de absorción de agua de los almidones que se han pregelatinizado.

El IAA se determinó según el método de Anderson, *et al.* (1969) con pequeñas variaciones, el cual consiste en gelatinizar los almidones en condiciones estándares, para luego separar por centrifugación los gránulos hinchados del líquido sobrenadante. Un peso de 1,25 g muestra (b.s) se suspendieron en 30 mL de agua destilada en beakers tarados de 50 mL. La suspensión se homogeniza por 30 minutos en agitación continua en baño maría y centrifugó (4900 rpm, 30 minutos). El sobrenadante se separó y se tomó una alícuota de 10 mL, fue depositada en una caja de petri y llevada a estufa a 70°C por 24 horas. El IAA se calculó a partir del peso del precipitado y se expresó como gramos gel/ gramos solidos (bs).

6.11. Análisis reológico

Las propiedades reológicas o termodinámicas de los almidones, determinan la calidad del procesamiento y ciertas características sensoriales que favorecen su aceptación por parte del consumidor. Una de dichas propiedades es la gelatinización del almidón que ocurre cuando los alimentos son calentados en un exceso de agua (Gonzales., *et al.*, 2006).

Las propiedades reológicas se evaluaron por medio de pruebas de viscosidad aparente y consistencia.

6.11.1. Viscosidad aparente y consistencia

La viscosidad aparente y la consistencia permiten determinar el grado de espesamiento a partir de las características de fluidez y observar el comportamiento de estos a determinadas condiciones (tesis harinas precocidas)

La prueba de viscosidad se llevó a cabo acondicionando las muestras en una solución acuosa a 23 °C, usando un viscosímetro (BrookfieldEngineeringLaboratories, Stoughton, USA; Model DV-III). La harina se pasó por la malla de 100 µm para uniformidad en la prueba y se prepararon 20 g de solución con una concentración de 12% (b.s.). Las soluciones fueron sometidas a baño maría durante 25 min, con agitación continua; finalmente, estas se reposaron hasta 28 °C. Las pruebas se efectuaron por duplicado con la aguja No. 0,0 a diferentes velocidades de rotación. La prueba de consistencia se realizó sobre una mesa firme con un consistómetro Bostwick. La burbuja de nivelación se ajustó concéntricamente en el círculo exterior, con ayuda de los tornillos posteriores de nivel.

Para la prueba de consistencia se prepararon las ocho muestras en soluciones al 17 % (b.s.), luego fueron homogenizadas con un agitador magnético durante 5 min. Las muestras fueron retiradas y se vertieron en el compartimiento del consistómetro individualmente, disparando inmediatamente el gatillo de liberación, contabilizando 30 seg. Pasado este tiempo, se registró la distancia recorrida por la muestra en la regla con que cuenta el consistómetro de Bostwick.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Caracterización de la harina de mijo

Obtenida la harina de mijo siguiendo los procedimientos descritos anteriormente, se procedió a realizar los análisis granulométricos, para estudiar el comportamiento de la harina luego del proceso de molienda y para garantizar uniformidad de tamaño en las siguientes pruebas. Posteriormente se llevó a cabo los análisis de la variable de respuesta (IAA), la cual determina la variabilidad del proceso. Finalmente se estudió el comportamiento reológico de las harinas en suspensión y los parámetros fisicoquímicos.

7.2. Curva de calibración de alimentación del mijo blanco a diferentes humedades

Para determinar el flujo másico de alimentación se varió la frecuencia del extrusor, midiendo rangos constantes de tiempo, registrando los pesos respectivos obteniéndose las siguientes curvas para las dos humedades (16 % y 20%) trabajadas durante la experimentación.

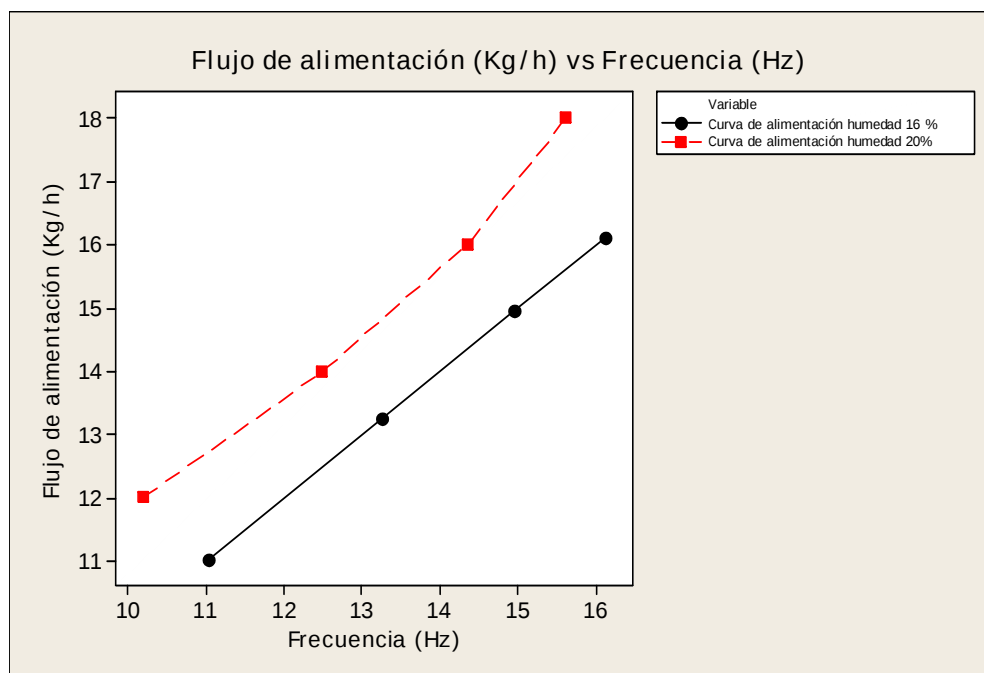


Figura 6. Curvas de calibración de alimentación al extrusor con mijo blanco.

La humedad es un factor que influye sobre las propiedades de fluencia en el alimentador del extrusor, ya que a una misma frecuencia el flujo de alimentación varía. A mayor frecuencia de entrada, el flujo de alimentación se incrementa proporcionalmente.

A partir de la regresión lineal de la figura 2. Se obtienen las siguientes relaciones

Tabla 8. Relación de alimentación para flujos de alimentación

Ecuación	R ²
Flujo de alimentación (Kg/h) = 0,8471 Frecuencia (Hz) + 1,1292 » (16%)	0,98
Flujo de alimentación (Kg/ h) = 0,9059 Frecuencia (Hz) - 0,4266 » (20%)	0,98

7.3. MOLIENDA Y TAMIZADO

Se efectuó la reducción de tamaño utilizando el molino de discos y el molino de aspas posteriormente para observar la diferencia entre los ocho tratamientos, utilizando tamices y un ro- tap para obtener la granulometría requerida, siguiendo la norma S319.2 de ASAE (1994). El mayor porcentaje retenido se encuentra entre los tamices N° 60 y 100 (ver tabla 7 y figura 3), en promedio la malla N° 100 retuvo un 44%, lo que correspondió a un tamaño de partícula de 150 µm. Según la Norma Técnica Colombiana (NTC 3595), para harinas para harina precocida de maíz el porcentaje de retención para el tamiz N° 25 (710 micras U.S.A Standard) según AOAC, debe ser máximo del 1%, en el caso de estas harinas el porcentaje de retención para el tamiz N° 30 es menor al 1%.

Tabla 9. Porcentaje retenido en cada una de las mallas en las diferentes condiciones de proceso.

N° tamiz	Porcentaje retenido								
	Tamaño (mm)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
20	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,60	0,11	0,09	0,09	0,02	0,25	0,10	0,26	0,12
60		54,20	37,70	39,46	29,40	50,81	36,85	49,98	44,39
100	0,15	37,04	46,0	49,42	42,60	40,30	46,83	43,86	46,54
140	0,11	7,86	12,70	9,64	19,05	8,34	13,90	5,58	8,22
colector		0,79	3,51	1,40	8,92	0,31	2,32	0,33	0,74

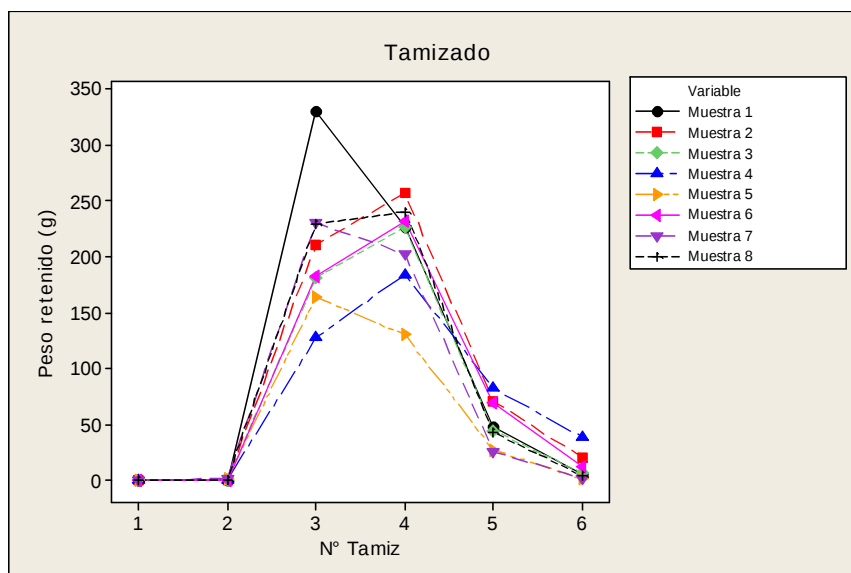


Figura 7. Distribución de pesos retenidos (g) para los diferentes tratamientos.

A partir de la ecuación 1 y 2 se calculó el módulo de fineza (Tabla 8) y el diámetro promedio para los diferentes tratamientos, con el fin de evaluar el efecto de estos sobre las condiciones de molienda y sobre las propiedades de hidratación de partícula.

Tabla 10. Módulo de fineza y diámetro promedio para las diferentes condiciones

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
Módulo de fineza (MF)	2,45	2,18	2,27	1,93	2,42	2,19	2,44	2,35
Diámetro promedio (mm)	0,57	0,47	0,51	0,4	0,56	0,48	0,57	0,53

El módulo de fineza obtenido para las diferentes condiciones de proceso indican que la mayoría de la muestra de harina de mijo extruida, se encuentran por encima de cero por lo se concluye que la operación de molienda aplicada a las harinas permitió obtener materiales con características de uniformidad medias.

El diámetro promedio de las harinas de mijo extruidas varía entre 0,4 mm a 0,57 mm obtenido mediante el uso de la ecuación 2. El tamaño de partícula es una propiedad importante de las

harinas, ya que define la capacidad de hidratación con características reológicas óptimas, de ahí la importancia de obtener harinas con tamaños promedio uniformes. Partículas muy pequeñas incorporan más agua, pero pueden formar masas muy compactas difíciles de troquelar, en general las partículas entre 3,2 mm y 0.074 mm corresponden a las harinas de cereales y las mezclas.

Los factores que inciden en el tamaño medio de la partícula de la harina son la dureza del grano, el ajuste en la velocidad del molino y los tratamientos durante la extrusión. La granulometría de la harina determina el uso para el cual será destinado, por tanto, este debe ser homogéneo (Miller, 2008).

Cuando el material se expone a tratamiento intenso por fricción, los gránulos de almidón se hacen muy sensibles a la degradación mecánica, sin embargo, si la fricción persiste ocurrirá la fragmentación por esfuerzo, en consecuencia el IAA de los productos se reduce (Miller, 2008).

7.4. HUMEDAD DE LAS HARINAS EXTRUIDAS

Se determinó el contenido de humedad de las harinas obtenidas después de la molienda obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 11. Humedad de las harinas extruidas.

	Muestra							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Humedad media (%)	6,85	6,84	6,59	6,06	6,40	6,76	5,78	7,13
Desviación estándar	0,46	0,10	0,27	0,02	0,18	0,08	0,16	0,05
C.V*	6,74	1,48	4,10	0,35	2,80	1,11	2,85	0,72

*: Coeficiente de variación

El porcentaje de humedad de las harinas, se encuentra en un rango entre 5,8 – 7,1 %, indicando desviación mínima en la humedad final entre las muestras. Los tratamientos con máximas temperaturas y máximas velocidades causan alto grado de dextrinización del almidón o rompimiento y exposición de grupos OH, esperándose que más agua sea ligada (Rueda *et al...*, 2003). Según la Norma Técnica Colombiana 3594 (NTC 3594), para harinas precocidas de maíz, el porcentaje de humedad máximo de la harina debe ser del 13%, cumpliendo con los requisitos fisicoquímicos establecidos.

7.5. ANÁLISIS REOLOGICO

Estandarizadas las concentraciones y las condiciones de las soluciones se procedió a realizar el respectivo análisis.

7.5.1. Consistencia

La consistencia de una suspensión acuosa como la harina, es una propiedad importante asociada a la fluidez de un líquido en la medida que se afecta por su viscosidad. Esta es una medida de la capacidad de formación de una pasta por absorción de agua de los componentes de la harina (Combariza *et al.*, 2006)

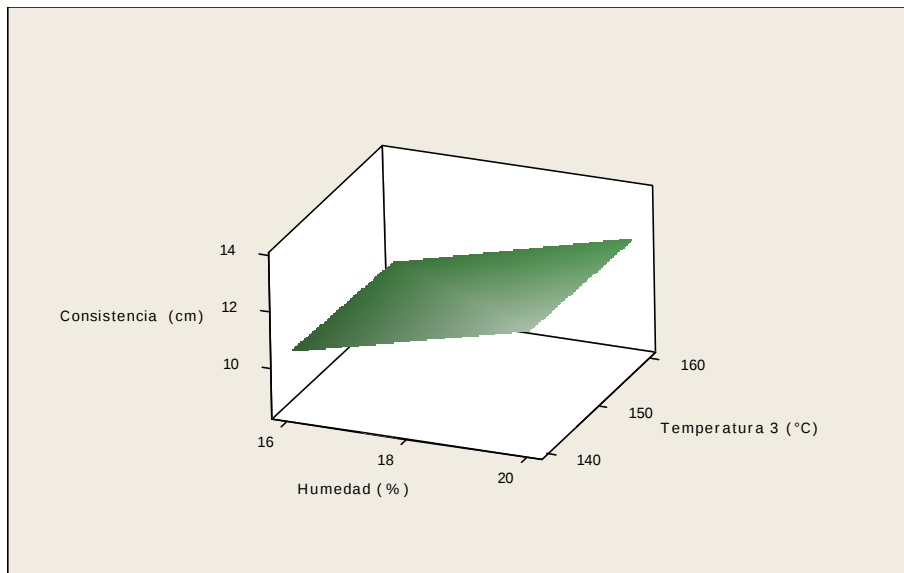


Figura 8. Efecto sobre la Consistencia vs Factores del experimento.

Los valores de consistencia estuvieron por debajo de 23 cm, indicando que las condiciones del proceso, propiciaron cambios estructurales permitiendo el desarrollo de viscosidad.

En la figura 4 se observa el comportamiento de la consistencia en relación con la humedad y la temperatura. La harina desarrolla mayor consistencia temperaturas y humedades altas, ya que los componentes estructurales tales como las proteínas y los almidones se ven sujetos a mayores modificaciones (Valls, 1993).

Cuando se extruyen harinas se observan cambios en el almidón, que implican modificaciones en el comportamiento reológico de las mismas (Hagenimana, *et al.*, 2006). La extrusión provoca cambios, en el almidón más bruscos que los métodos de cocción tradicionales, dañando una mayor cantidad de gránulos y modificando el poder espesante en frío de los almidones tratados (Wolf, 2010).

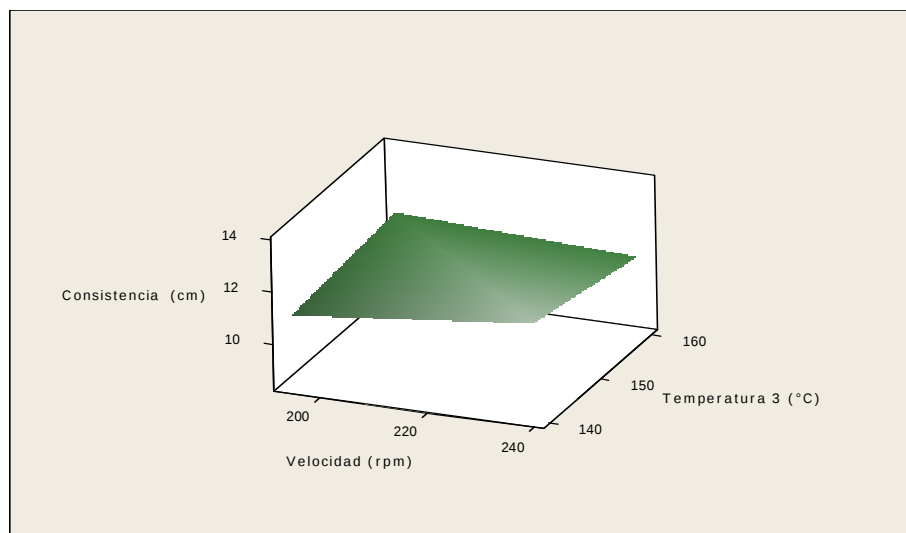


Figura 9. Efecto sobre la Consistencia vs Factores del experimento.

En la figura 5 se observa el comportamiento de la consistencia en relación con la velocidad y la temperatura. La harina desarrolla mayor consistencia a velocidad baja y temperatura alta, ya que una mayor residencia del alimento a temperatura alta propicia el rompimiento de cadenas proteicas y amiláceas, las cuales permiten el desarrollo de redes o geles (Valls, 1993)

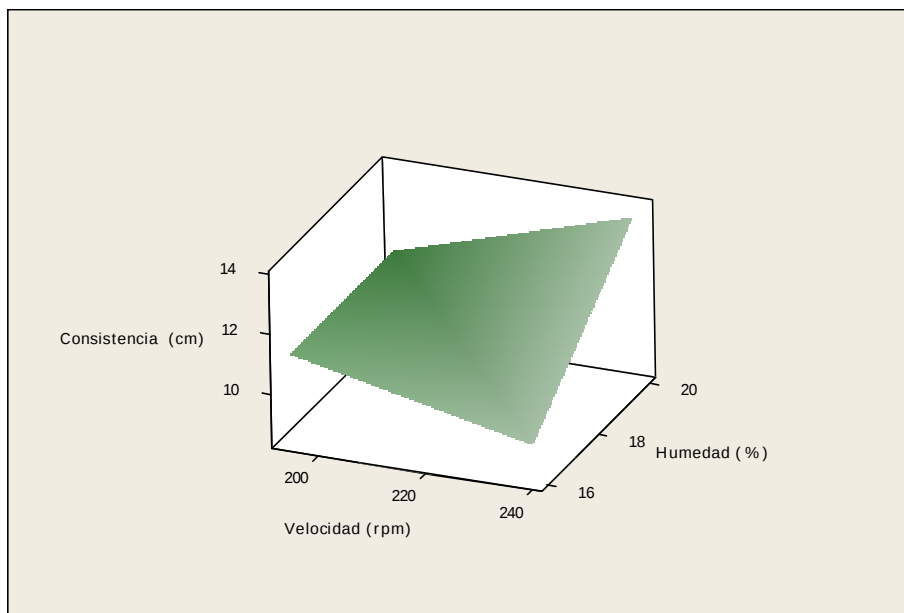


Figura 10. Efecto sobre la Consistencia vs Factores del experimento.

En la figura 6 se observa el comportamiento de la consistencia en relación con la velocidad y la humedad. La harina desarrolla mayor consistencia a humedad alta y velocidad alta.

Las harinas extruidas incrementan la consistencia de las masas y este efecto es mayor cuanto mayor es la intensidad del tratamiento. Un aumento en la consistencia es consecuencia del aumento del de sólidos solubles por efecto del tratamiento térmico, mejorando las características viscoelásticas de las mismas (Martínez, 2012).

Martínez (2012), desarrollo pruebas con la inclusión de harinas extruidas obteniendo resultados en los que se evidencia que la inclusión de harinas de este tipo, incrementan la consistencia de las masas, disminuyendo el desarrollo de estas a partir de cierto punto, lo que traduce en un menor volumen específico y una mayor firmeza en los panes.

En general la harina desarrolla mayor consistencia a 160 °C, 20 % de humedad y a 238 rpm (Condición 8) y presenta menor consistencia a 160 °C, 16 % de humedad y a 238 rpm (Condición 7). De esta manera se comprueba que las harinas desarrollan mayor consistencia al aplicar tratamientos más severos durante la extrusión (Martínez, 2012)

7.5.2. Comportamiento reológico

La viscosidad de una suspensión es una forma de evaluar el grado de cocción alcanzado durante el tratamiento térmico de almidones. El almidón es posiblemente el compuesto más relacionado directamente con las propiedades reológicas de productos extruidos. Tratamientos severos destruyen la estructura granular del almidón parcialmente haciendo que la viscosidad sea más baja (Gonzalez, 2006)

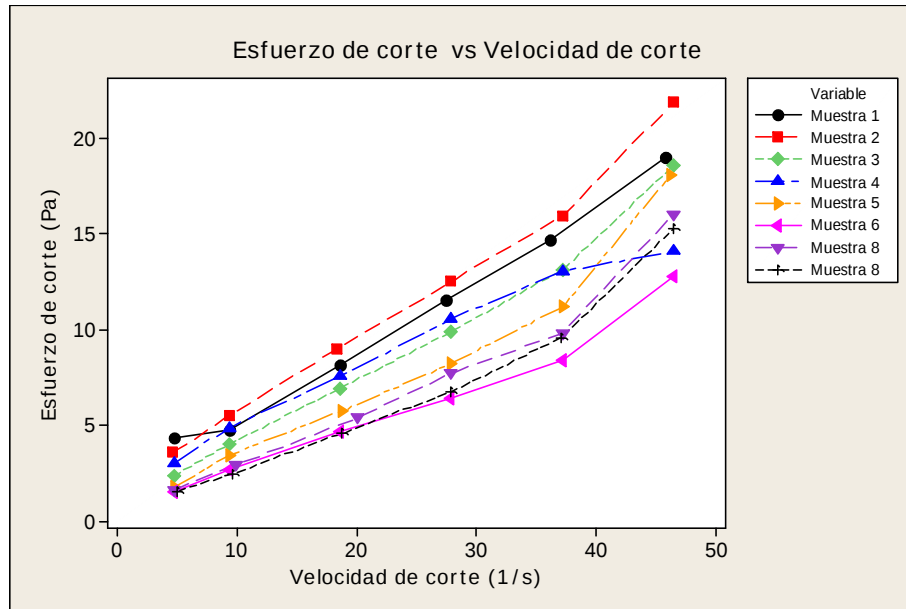


Figura 11. Viscosidad aparente de las harinas de mijo obtenidas a diferentes tratamientos.

La curva de esfuerzo de corte vs. La velocidad de corte corresponde a un fluido pseudoplástico, ya que esta es cóncava hacia arriba y comienza en el origen. En la figura 7 se observan las curvas a diferentes tratamientos obtenidas para la harina de mijo, en ella se observa una tendencia al incremento del esfuerzo de corte proporcional al aumento de la velocidad de corte.

El incremento progresivo de la viscosidad está relacionado con el poder de hinchamiento de los gránulos de almidón, debido a la gelatinización de estos por efecto de la temperatura (González *et al.*, 2006). La intensidad de la gelatinización también depende del contenido de humedad, variando con las condiciones de cocción y con el tipo de gránulo de almidón (Rooney, 2001).

Lazaridou, *et al.* (2007), quienes trabajaron con polisacáridos modificados encontraron una mejora en la retención de agua a causa de su naturaleza hidrofílica de estos. Estos poseen grupos

hidrofóbicos al igual que las harinas extruidas, los cuales inducen a propiedades adicionales del sistema, produciendo un aumento en la actividad interfacial de la harina durante la cocción, permitiendo aumentar la viscosidad (Martínez, 2012)

Realizando la respectiva linealización, para fluidos no newtonianos (Figura 8), se obtuvieron los respectivos índices de comportamiento al flujo, para los respectivos experimentos.

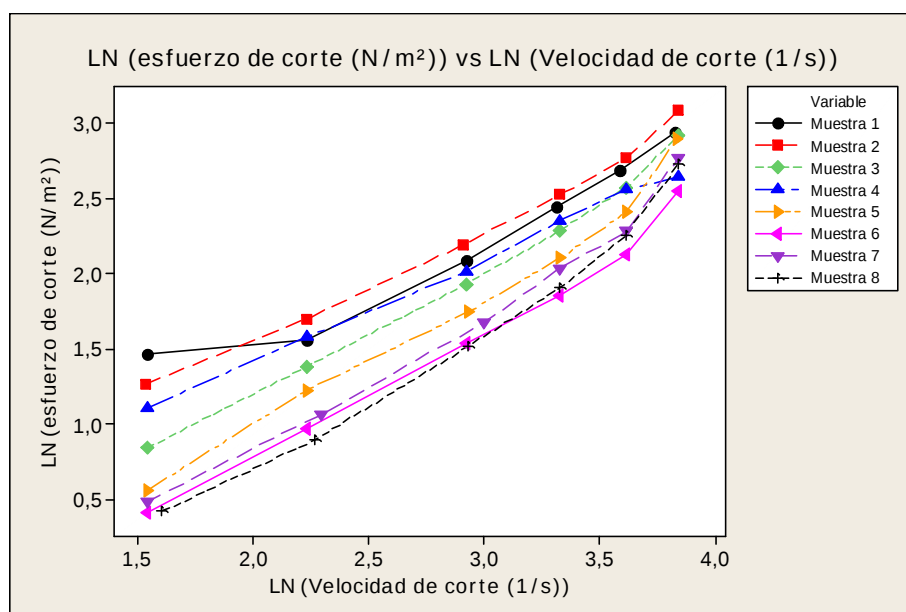


Figura 12. Curva linealizada de viscosidad aparente para los tratamientos.

Tabla 12. Índices de comportamiento al flujo y coeficientes de consistencia obtenidos para los tratamientos.

	Muestra							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Índice de comportamiento al flujo	0,67	0,83	0,87	0,69	0,95	0,88	0,95	0,99
R ²	0,94	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98
Coefficiente de consistencia (Pa * s ⁿ)	1,29	0,82	0,57	1,04	0,39	0,37	0,35	0,27

R²: Coeficiente de determinación

El índice de comportamiento obtenido para las diferentes condiciones, indica que todas las harinas presentan un comportamiento pseudoplástico, ya que esta se encuentra entre cero y uno (Geankoplis, 1998)

En suspensiones de almidón gelatinizado se han encontrado que a bajas concentraciones de almidón el comportamiento reológico sigue la ley de potencia sin un esfuerzo de fluencia en un amplio rango de velocidades de corte. Las pastas de almidón con calentamiento previo a temperaturas por encima de 90 °C, como es el caso de la harina extruida de mijo, son generalmente fluidos pseudoplásticos (González y Pérez, 2003).

El tratamiento uno dio un valor de coeficiente de consistencia más alto, influenciado por el bajo contenido de humedad inicial, lo que imposibilita parcialmente el proceso de gelatinización, aumentando la viscosidad inicial. El efecto de los tratamientos hace que el coeficiente de consistencia disminuya o aumente, este comportamiento se explica por la competencia de agua de los componentes de la harina. El agua inicial incide directamente en la gelatinización del almidón: a mayor contenido de agua se presenta una mayor gelatinización e hinchamiento del gránulo, por lo que la viscosidad rápidamente disminuye cuando las moléculas de amilopectina y amilosa se rompen (Sandoval, *et al...*, 2007).

7.6. ANALISIS DE INDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA).

En la tabla 11, se observan los respectivos IAA obtenidos para cada uno de los tratamientos, con sus respectivos estadígrafos. La muestra con menor variabilidad corresponde a la condición 2 (140°C, 20 % Humedad y 194 rpm), ya que el coeficiente de variación así lo indica (0,02 %)

Tabla 13. Índices de solubilidad de agua obtenidos para condiciones estudiadas

Temperatura (°C)	Humedad (%)	Velocidad (rpm)	IAA	C.V.
140	16	194	4,54 ± 0,47*	10,34
140	16	194		
140	20	194	6,18 ± 1,41E-03	0,02
140	20	194		
140	16	239	5,52 ± 0,07*	1,25
140	16	239		
140	20	239	6,07 ± 0,21*	3,47
140	20	239		
160	16	194	6,17 ± 0,31*	4,95
160	16	194		
160	20	194	5,11 ± 0,58*	11,34
160	20	194		
160	16	239	5,23 ± 0,10*	1,97
160	16	239		
160	20	239	6,16 ± 0,09*	1,45
160	20	239		

*: Desviación estándar, C.V.: Coeficiente de variación

Combariza y Sánchez (2006), obtuvieron una harina extruida a partir de cultivos biofortificados, evaluando el índice de absorción de agua como variable de respuesta, como resultado obtuvieron que el IAA disminuyen con el aumento de la temperatura, sin embargo este parámetro depende directamente de la resistencia de los gránulos, ya que gránulos más resistentes disminuyen el proceso de dextrinización durante la extrusión.

Los valores obtenidos de IAA durante la experimentación son similares a los reportados por Combariza y Sánchez (2006), apuntando que los coeficientes de variación muestran homogeneidad en los resultados.

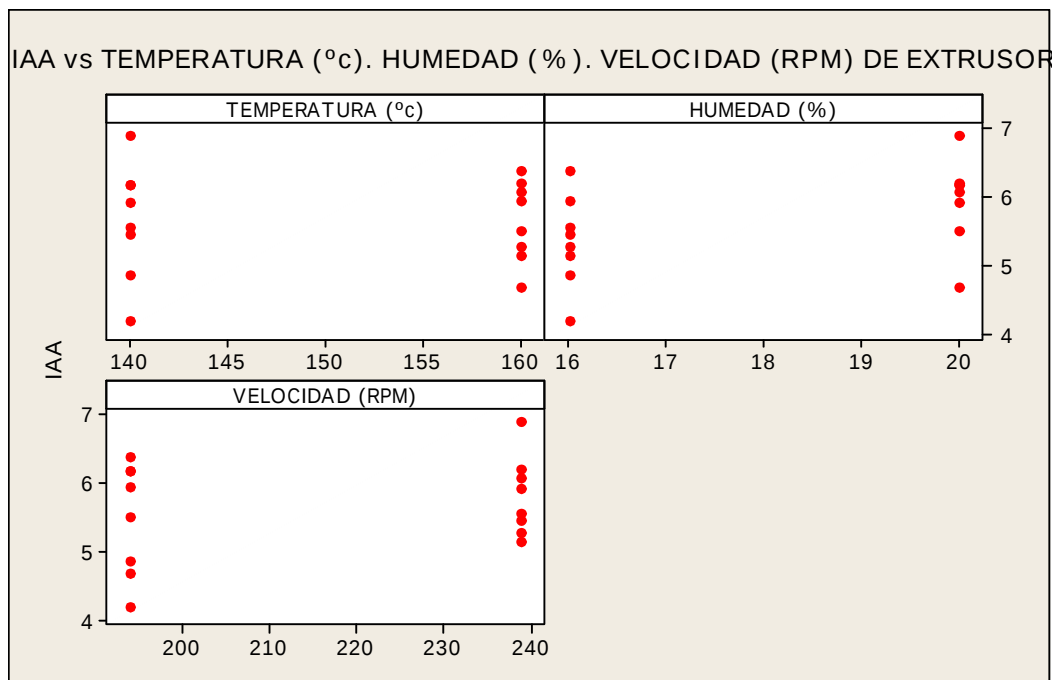


Figura 13. Efecto de los factores estudiados sobre la variable de respuesta IAA.

En la figura 9 se observa que la humedad y velocidad tuvo mayor efecto sobre la variable de respuesta IAA. Al combinar una temperatura de 160 °C, humedad del 20% Y 194 rpm de velocidad de tornillo se registró la menor variabilidad en los resultados. Se reportó mayor dispersión de los datos respecto a su media, al experimentar a una temperatura en la sección 3 de 160 °C, 20% de humedad y 194 rpm de velocidad de tornillo.

7.7. Análisis estadístico

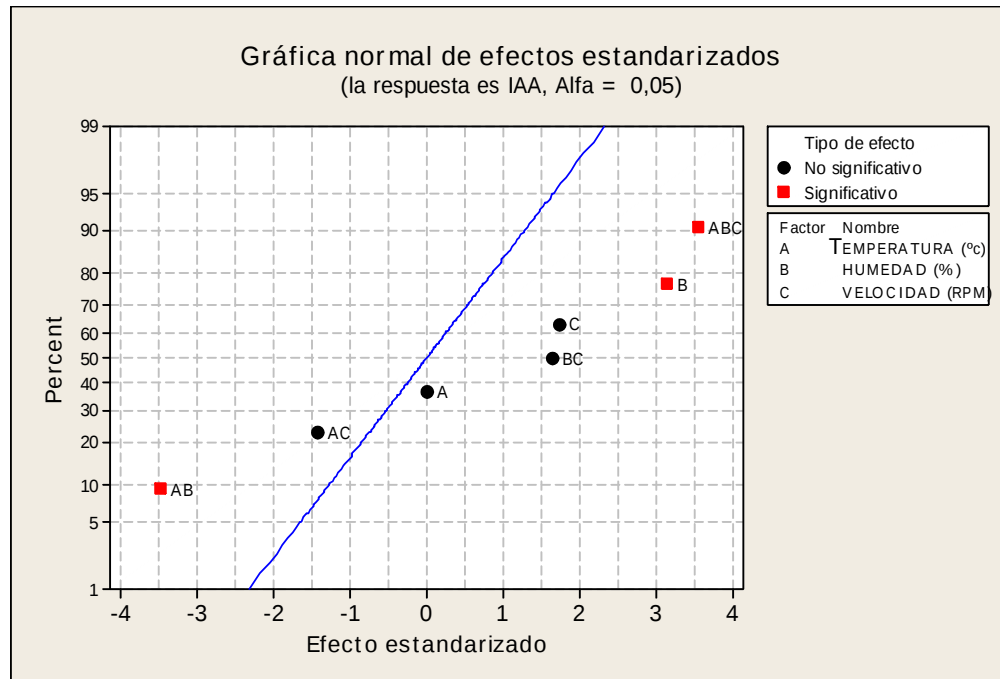


Figura 14. Efecto normal estandarizado.

En esta gráfica muestra los factores e interacciones que hacen que rechazara la hipótesis, observándose las diferencias de medias de los efectos principales, tres interacciones doble y una triple.

El efecto estandarizado normal, con un nivel de significancia del 5% no tuvo un efecto significativo analizado individualmente a excepción del factor humedad el cual se rechaza en la prueba de hipótesis, sin embargo la combinación de factores temperatura – humedad y temperatura – humedad – velocidad, causaron un efecto sobre la variable de respuesta IAA.

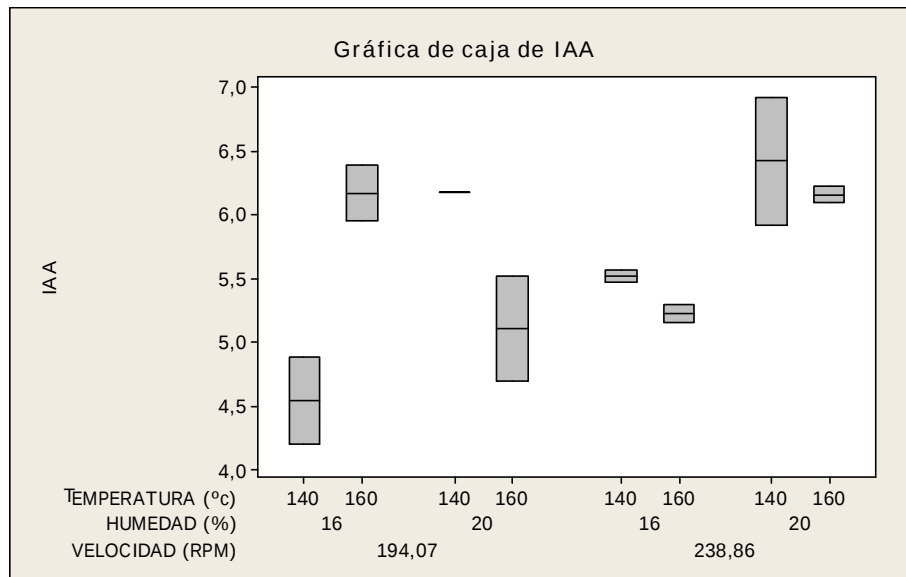


Figura 15. Distribución de los resultados obtenidos de los factores del experimento para la variable de respuesta IAA

En la figura 9 se observa que la condición en la que se presentó mayor dispersión de la variable de respuesta IAA se dio a una temperatura de 140 °C, humedad inicial del 20 % y una velocidad de 238 rpm (Condición 4), mientras la de menor variación se dio a una temperatura de 140°C, humedad inicial del 20% y una velocidad de 194 rpm (Condición 2).

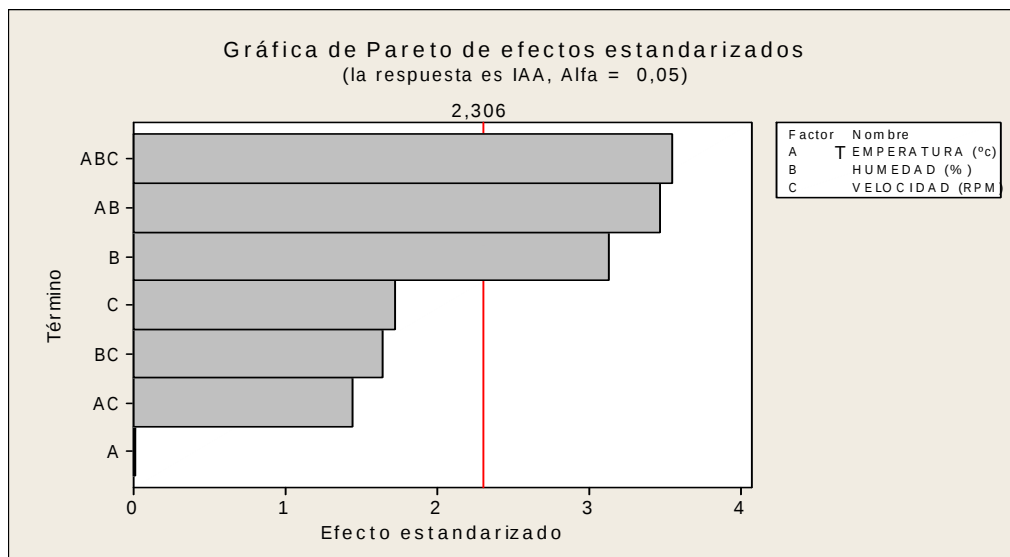


Figura 16. Efectos estandarizados para la variable de respuesta IAA.

La gráfica de Pareto de efectos estandarizados (Figura 12), muestra que los factores del experimento analizadas individualmente no tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta IAA, sin embargo, el factor humedad tuvo el menor efecto significativo, ya que se encuentran por debajo del valor absoluto de efectos estandarizados. Mientras tanto la combinación de factores temperatura – humedad – velocidad tuvo el mayor efecto seguido de la combinación temperatura – humedad.

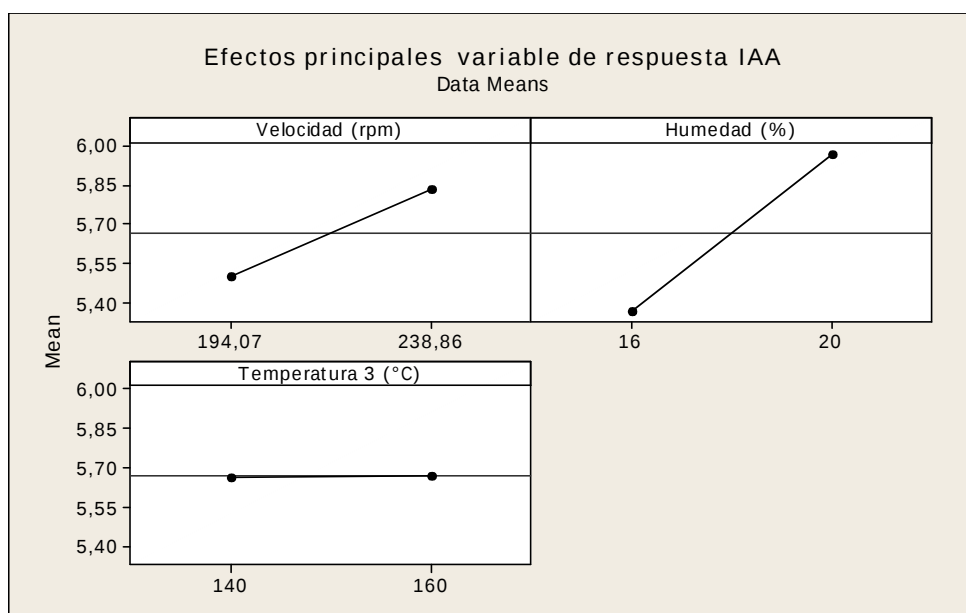


Figura 17. Diagrama de efectos principales para la variable de respuesta IAA.

La humedad es factor de proceso que tuvo mayor influencia sobre la variable de respuesta IAA, debido a que el contenido de agua dentro de la matriz del alimento, es directamente proporcional al aumento en el cizallamiento, resultando una modificación estructural del almidón. De esta manera una combinación velocidad - humedad causa una gran modificación estructural en la harina de mijo (Combariza y Sánchez, 2006)

La temperatura promedio entre los niveles de los factores no tuvo efecto significativo sobre el índice de solubilidad de agua. La diferencia entre los efectos indica las variables actúan de forma independiente en cuanto a la influencia sobre el índice de solubilidad de agua.

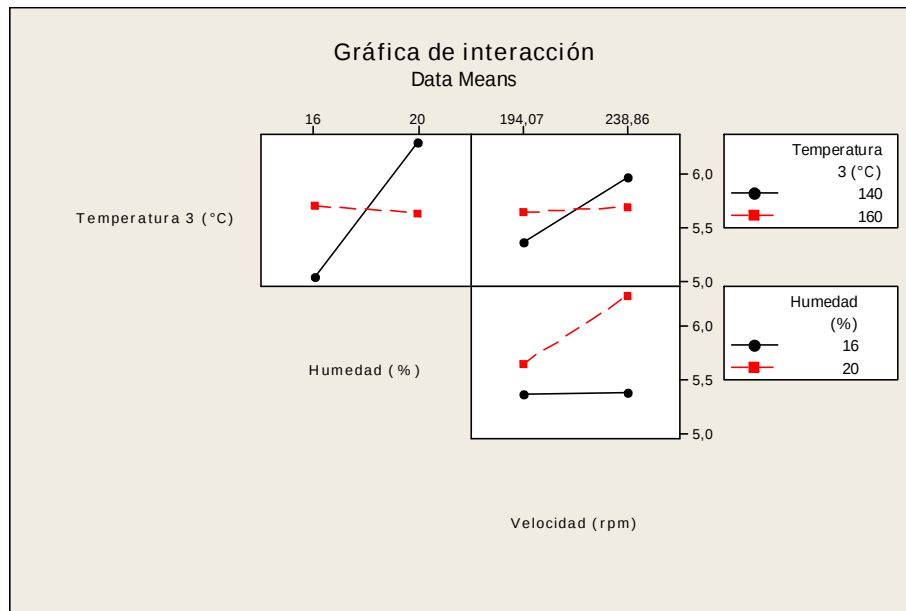


Figura 18. Interacción entre los factores de experimentación.

En esta figura se puede concluir la interacción que tiene cada uno de los factores principales entre sí. En el caso de la interacción temperatura – humedad se observa que el mayor IAA se obtiene al combinar una temperatura de 140 °C con una humedad del 20%, la interacción está indicada por el cruce de líneas, comprobando el resultado alto en comparación con los efectos estandarizados. La interacción temperatura - velocidad presenta mayor IAA a una temperatura de 140 °C y una velocidad de tornillo de 283 rpm. Entre tanto el factor humedad no tuvo interacción con el factor velocidad de tornillo, sin embargo en la figura se observa que si se trabajara con velocidades de tornillo más bajas existiría interacción entre los dos factores.

Tabla 14. Coeficientes estimados para los factores en unidades codificadas.

Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante		5,6669	0,09599	59,03	0,000
TEMPERATURA (°C)	0,0012	0,0006	0,09599	0,01	0,995
HUMEDAD (%)	0,6012	0,3006	0,09599	3,13	0,014
VELOCIDAD (RPM)	0,3312	0,1656	0,09599	1,73	0,123
TEMPERATURA (°C)*HUMEDAD (%)	-0,6663	-0,3331	0,09599	-3,47	0,008
TEMPERATURA (°C)*VELOCIDAD (RPM)	-0,2763	-0,1381	0,09599	-1,44	0,188
HUMEDAD (%)*VELOCIDAD (RPM)	0,3137	0,1569	0,09599	1,63	0,141
TEMPERATURA (°C)*HUMEDAD (%)* VELOCIDAD (RPM)	0,6812	0,3406	0,09599	3,55	0,008

S = 0,383968 PRESS = 4,7178t

R-cuad. = 84,05% R-cuad.(pred.) = 36,21% R-cuad.(ajustado) = 70,10%

El coeficiente de determinación para el experimento, muestra que el índice de solubilidad de agua, depende un 70 % de los factores humedad, temperatura y velocidad de tornillo.

7.8. Análisis de varianza

Tabla 15. Análisis de varianza para IAA

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Efectos principales	3	1,88492	1,88492	0,6283	4,26
2-Interacciones de (No.) factores	3	2,47457	2,47457	0,8249	5,59
3-Interacciones de (No.) factores	1	1,85641	1,85641	1,8564	12,59
Error residual	8	1,17945	1,17945	0,1474	
Error puro	8	1,17945	1,17945	0,1474	
Total	15	7,39534			

En la tabla 6 y 7, se observa el resumen estadístico del análisis de varianza trabajándose con un nivel de significancia del 5 %, con ello se puede concluir que el factor humedad y velocidad tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta IAA, ya que el p-valor es menor a 0,05, aceptándose la hipótesis alternativa. Sin embargo el factor temperatura por sí solo no tuvo efecto (p –valor > 0,05), pero en combinación con las demás factores produjo cambios en IAA.

Por medio de la prueba F también se concluyó el resultado del análisis de varianza comparando:

$$F_{CAL} > F_{tabla}$$

$$F_{tabla} (5,8; 0,05) = \mathbf{3,69}$$

Por tanto los factores estudiados tienen un efecto significativo sobre el índice de solubilidad de agua.

Los mayores IAA de productos de cereales se dan con altos contenidos de humedad (Anderson *et al.*, 1969). Los menores valores de IAA, obtenidos con baja humedad se pueden relacionar con un aumento en el cizallamiento resultando en una modificación estructural del almidón (Diosady *et al.*, 1985) y el aumento de velocidad en el equipo. La desnaturalización de proteínas, la gelatinización del almidón e hinchamiento de la fibra cruda, que ocurren durante la extrusión, podrían ser la causa del incremento del IAA (Gusjka, 1991).

En el proceso de extrusión el gránulo de almidón absorbe agua y en el instante de salida de la matriz de la extrusora, el agua sometida a presión pasa a la forma de vapor y el almidón sufre un proceso de alineamiento, rizado y rotura, gelatinizando la mayoría de los gránulos. La extrusión produce la desnaturalización de las cadenas proteicas. Las moléculas se alinean a largo de la matriz. En ausencia de cantidades importantes de almidón, la cocción por extrusión reduce la solubilidad de la proteína cuando la temperatura aumenta. Existe un proceso por el cual a medida que la temperatura se va elevando, la proteína se va degradando. En productos con elevado contenido de almidón, la proteína queda dentro de la matriz formada por el almidón, con lo que queda enredada y encapsulada (Valls, 1993).

Un incremento continuo en la temperatura de extrusión y la velocidad de tornillo, aumentaron el índice de absorción de agua. A medida que la temperatura crece, el producto es más resistente al cizallamiento. En general los tratamientos de extrusión suaves (alta humedad y bajas temperaturas) mejoran las características nutricionales de los productos tratados, mientras que los tratamientos más severos (baja humedad y altas temperaturas) los empeoran (Martínez, 2012).

Colonna *et al.*, 2006 demostraron que los almidones de trigo presentan cadenas de amilosa y amilopectina de menor peso molecular que los obtenidos mediante secado por rodillos. Este

efecto, debido a las fuerzas de cizalla que experimenta el almidón, se traduce en un menor poder espesante en frío pero aumenta su solubilidad.

Las mejoras nutricionales obtenidas en productos extruidos como la harina de mijo, potencian su uso, como reemplazante parcial de ingredientes en formulaciones o convirtiéndose en parte de la dieta humana, dados sus beneficios nutricionales. Este tipo de harinas conlleva al desarrollo de mezclas con alta solubilidad, viscosidad y estabilidad, favoreciendo esto la compatibilidad en la incorporación de formulaciones, contribuyendo seguramente a elevar el valor nutricional y calórico del producto final.

7.9. Prueba de comparación múltiple o mínima diferencia significativa (LSD)

Aceptándose la hipótesis alternativa es necesario distinguir la diferencia entre la media de los tratamientos aplicando una prueba post-anova, en este caso se aplica la prueba de comparación múltiple, aplicando como principio la siguiente ecuación.

$$LSD = t(GL, \alpha 0,05) * \sqrt{\frac{2 * CM\ error}{n}} \quad (7)$$

Dónde;

n: Número de repeticiones,

Gl: Grados de libertad del error experimental

CM: Error experimental.

Reemplazando en la ecuación se obtuvo un valor **LSD= 0,89**

Con el fin de distinguir los efectos significativos entre las medias de los tratamientos, se hizo la respectiva diferencia de medias para comparar con el parámetro estadístico LSD.

Tabla 16. Diferencia entre medias para los tratamientos.

Condición	Factores			1	2	3	4	5	6	7	8
	T (°C)	H (%)	V (rpm)								
1	140	16	194,07		1,64	0,98	1,88	1,63	0,57	0,69	1,62
2	140	20	194,07	1,64		0,66	0,24	0,01	1,07	0,95	0,02
3	140	16	238,86	0,98	0,66		0,90	0,65	0,41	0,29	0,64
4	140	20	238,86	1,88	0,24	0,90		0,25	1,31	1,19	0,26
5	160	16	194,07	1,63	0,01	0,65	0,25		1,06	0,94	0,01
6	160	20	194,07	0,57	1,07	0,41	1,31	1,06		0,12	1,05
7	160	16	238,86	0,69	0,95	0,29	1,19	0,12	0,12		0,93
8	160	20	238,86	1,62	0,02	0,64	0,26	0,01	1,05	0,93	

En la tabla 16. Se observan los tratamientos que no presentan diferencia significativa.

7.10. Coeficiente de variación

Para medir la homogeneidad de los datos estudiados se calcula el coeficiente de variación a partir de la siguiente ecuación:

$$\%CV = \frac{S}{X} * 100 = \frac{\sqrt{CMErrorExp}}{r * t} * 100 \quad (8)$$

Dónde:

t: Tratamientos;

r: repeticiones

CMErrorExp: Cuadrado de medias del error experimental.

$$CV (\%) = 2,40 \%$$

El coeficiente de variación del experimento indica homeneidad en los resultados, ya que se encuentra por debajo del 20%.

7.11. Ecuación de línea de mayor ajuste

A partir de los coeficientes estimados en la tabla 13 para unidades codificadas y en la tabla 15 para unidades descodificadas es posible predecir el valor de IAA en función de las variables del proceso. Las siguientes ecuaciones predicen los modelos para unidades codificadas y descodificadas respectivamente.

Tabla 17. Coeficientes estimados para los factores en unidades descodificadas.

Término	Coef
Constante	-494,475
Temperatura (°C)	3,39655
Humedad (%)	26,5836
Velocidad (RPM)	2,09020
Temperatura (°C)*Humedad (%)	-0,181276
Temperatura (°C)*Velocidad (RPM)	-0,0143056
Humedad (%)*Velocidad (RPM)	-0,110572
Temperatura (°C)*Humedad (%)* Velocidad (RPM)	0,000760493

$$Y_{x1, x2, x3} = 5,6669 + 0,0006X_1 + 0,3006X_2 + 0,1656X_3 - 0,3331X_1X_2 - 0,1381X_1X_3 + 0,1569X_2X_3 + 0,3406X_1X_2X_3$$

$$Y_{T, H, V} = -494,475 + 3,39656T + 26,5836H + 2,09020V - 0,181276TH - 0,01430TV - 0,110572TV + 0,000760493THV$$

7.12. Validación de supuestos.

Se busca probar las siguientes hipótesis de normalidad de los errores:

H_0 : Los errores tienen una distribución normal

H_1 : Los errores no tienen una distribución normal.

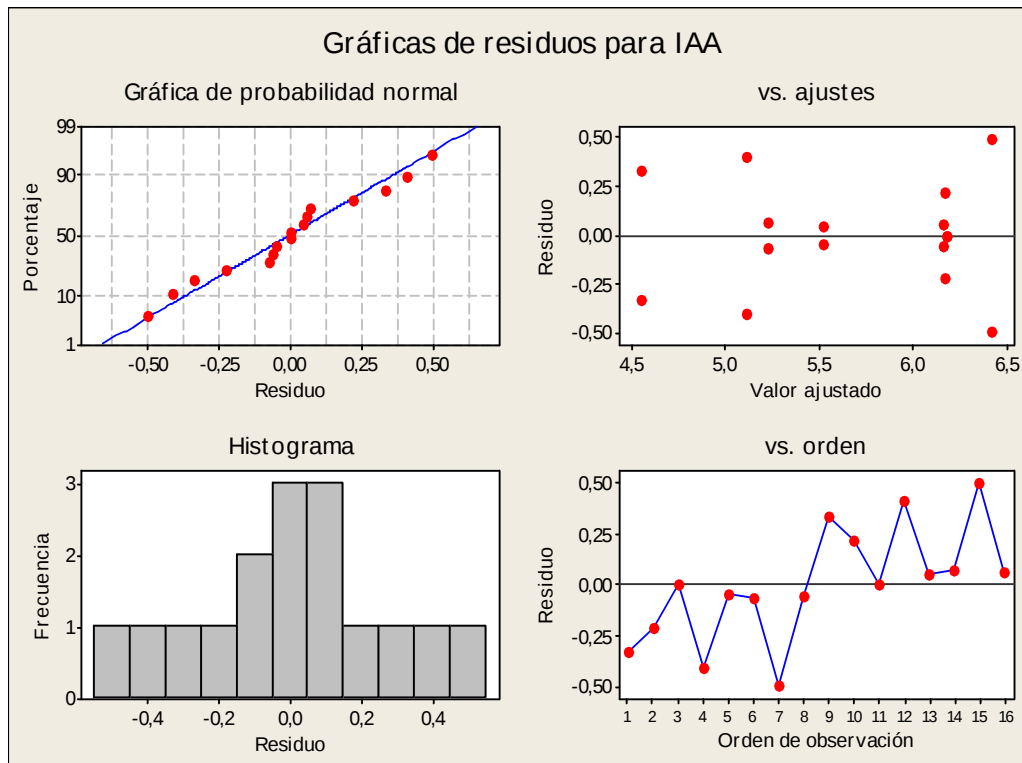


Figura 19. Residuos para índice de solubilidad de agua.

En la figura 15 se observa para los errores tienen una tendencia a una línea recta, esto indica que la distribución de los errores es normal.

Para el supuesto dos se pretende probar que la varianza de los errores es constante, en este caso los puntos se encuentran centrados alrededor de cero, indicando la igualdad de varianzas.

El supuesto tres pretende probar la independencia de los errores frente a las variables. Los residuos obtenidos en las diferentes observaciones no indican una tendencia clara, por tanto se acepta la hipótesis nula.

8. CONCLUSIONES

- La harina desarrolla mayor consistencia a 160 °C, 20 % de humedad y a 238 rpm (muestra 8) y presenta menor consistencia a 160 °C, 16 % de humedad y a 238 rpm (muestra 7), por lo que se afirma que las harinas desarrollan mayor consistencia al aplicar tratamientos más severos durante la extrusión.
- El diámetro promedio de las harinas varió entre 0,4 mm y 0,6 mm y el módulo de fineza indicó que las muestras presentan características de uniformidad medias, siendo estos parámetros un indicativo del uso de estas.
- Las ocho muestras presentan comportamiento pseudoplástico, ya que los índices de comportamiento al flujo se encuentran entre cero y uno.
- El tratamiento a 140°C, 20% de humedad y 194 rpm y el tratamiento a 160°C, 20% de humedad y 239 rpm, mostraron los menores coeficientes de variación (0,02 y 1,45% respectivamente), mostrando la interacción entre estos dos factores.
- El tratamiento a 160°C, 20% de humedad y 194 rpm alcanzó el valor más alto (CV: 11,34%), sin embargo su valor indica paridad en los resultados (CV< 20%).
- Los factores velocidad de tornillo y humedad inicial de mijo mostraron diferencias significativas, respecto a la variable de respuesta índice de solubilidad de agua, mientras la temperatura no.
- El factor humedad tuvo mayor influencia sobre la variable de respuesta IAA, debido a que el contenido de agua dentro de la matriz del alimento, es directamente proporcional al aumento en el cizallamiento.
- La interacción temperatura – humedad se observa que el mayor IAA se obtiene al combinar una temperatura de 140 °C con una humedad del 20%.
- La interacción temperatura - velocidad presenta mayor IAA a una temperatura de 140 °C y una velocidad de tornillo de 283 rpm. Entre tanto el factor humedad no tuvo interacción con el factor velocidad de tornillo.
- La harina de mijo extruida, se convierte en una alternativa importante de uso en la industria de alimentos, ya que se consigue mejorar aspectos fisicoquímicos.

9. BIBLIOGRAFIA

- AACC Official Methods. 1997. American Association of Cereal Chemists. Minneapolis, MN, USA.
- AOAC. (Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis). 15a.1990, USA.
- Adams, C.A., Novellie, L. & Liebenberg, N.V.d.W. 1976. Biochemical properties and ultrastructure of protein bodies isolated from selected cereals. *Cereal Chem.*, 53: 1-12.
- Almeida, HD., Gomez, MH. 1993. Extrusion de cocina de mijo para la producción de alimentos de destete de caupí millet.
- American Association of Cereal Chemist (AACC). 2000. *Cereal Laboratory Methods*. St. Paul, Mn. USA.
- American Society Of Agricultural Engineers. Standards engineering practices data. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1994. p. 467-469
- Anderson, R.a., Conway, V.F., Pfeifer, V.F, Griffin, E.L. 1969. Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion-cooking. *Cereal Science Today*.
- Atwell, W.A.; L. F. Hood; D. R. Lineback; E. Varriano-Marston; H. F. Zobel, 1988. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Food World*. (3):306-311.
- Brennan, J., Burgos, J. (1998) *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. 3ª edición. Zaragoza, Acribia. Pag. 71, 79.
- Colonna, P., Doublier, J., Melcion, J., Monredon, F. 1984. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. *Cereal Chemistry*, 61, 538- 543.
- Combariza, A., Sanchez, 2006 D. Estudio de obtención de un alimento precocido a partir de cultivos biofortificados. Cali, 126p. Trabajo de Grado. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
- Diosady, L. L. D. Paton, N. Rosen, L. J. Rubin, and C. Athanassoulis. 1985. Degradation of wheat starch in a single screw extruder: mechano-kinetic breakdown of cooked starch. *J. Food Sci.* 50: 1697-1699.
- Duran, C. 1988. Una nueva tecnología para la extrusión alcalina de maíz y sorgo. Proyecto Multinacional de Tecnología de Alimentos. pp. 8-12. México D.F.

- FAO 1995. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. El sorgo y el mijo en la nutrición humana (Colección FAO: Alimentación y nutrición N°27).
- FAOstat 2005, 2006. <http://faostat.fao.org/default.aspx>. visitada (27 febrero de 2011)
- Fennema, O. 2000. Química de los alimentos, Segunda edición.
- Geankoplis, C. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía editorial continental, México, 3ª edición.
- Gonzalez, O.J., Pacheco, E. 2006. Propiedades físicas y reológicas de la harina de banana verde (*Musa AAA*) en la elaboración de geles de piña (*AnanascomosusL. Merr.*).Revista farmacológica Agronómica (Maracay). Vol 32, pag 37-40
- González, Z. M., Pérez, E. 2003. Evaluación fisicoquímica y funcional de almidones de yuca (*ManihotesculentaCranz*) pregelatinizados y calentados con microondas. Acta Científica Venezolana. Vol. 54.
- Grimanese, P. 1991. Estudio de algunas características funcionales y organolépticas de mezclas de arroz-frijol precocidas por extrusión utilizadas en alimentos infantiles.
- Gujska, E., and K. Khan. 1991. Feed moisture effects on functional properties, trypsin inhibitor and hemmagglutinatingactivities of extruded bean high starch fractions. J. Food Sci. 56: 443-447.
- Hagenimana, A., Ding, X., 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. Journal of Cereal Science, 43, 38-46
- Hubbard, JE., Hall, HH., Earle, FR. 1950. Composition of the component parts of the sorghum kernel. Cereal Chem., 27: 415-420.
- Huang, D. P., Rooney, L. W.2001. Starches for snack foods. Snack food processing. Technomic Publishing Company , Lancaster, Pennsylvania..
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N. 2007. Effects of hydrocollids on dough rheology and bread quality parameters in gluten free formulations. Journal of food engineering, 72, 1033 -1047.
- Linko, P., Colonna P., Mercier CH. (1981). High Temperature Short Time Extrusion Cocking Advance in Cereal Sciencie and Tecnology. Vol. IV Capitulo 4.
- Martínez, B.F., Pau, C.L. 1992. Extrusión de sorgo integral y descortificado.

- Martínez, M. 2012. Influencia de la adición de harinas en la elaboración de panes de arroz. Área de Tecnología de los Alimentos, Universidad de Valladolid, España
- Maza, R. 1998. Elaboración de productoproteinizadoexpandidopor extrusion.
- Miller, R. 2008. Tecnología de extrusión de alimentos. Oficina regional para México, Centro América y el Caribe.
- Munck, L., Bach, K.E., Axtell, J.D. 1982. Milling processes and products as related to kernel morphology.
- Mustakas, G. C., W. J. Albrecht, G. N. Bookwalter, J. E. Mc. Ghee, W. F. Kwolek, and E. L. Griffirin Jr. 1970. Extruder processing to improve nutritional quality, flavor and keeping quality of full-fat soybean flour. Food Tech. 24(6): 1290-1296.
- Norma Técnica Colombiana 3594. 2007. Harina precocida de maíz para consumo humano. ICONTEC.
- Otun, E. L, A. Crawshaw, and P. J. Frazier. 1986. Flow behaviour and structure of proteins and starches during extrusion cooking. In: Faridi H, and J. M. Faubion (eds). Fundamentals of Dough Rheology. St. Paul, AACC.
- Rooney, LW, Mcdonough CM. 1987. Food quality and consumer acceptance of pearl millet. Proceedings of the International Pearl Millet Workshop Hyderabad, Inde, Pág. 43-61. Patancheru, India, ICRISAT.
- Alban, RD., Montero, JC. 2011 Caracterizaciónfísica de extruidospreparados con mezcla de sémola de maíz y harina de yuca
- Rueda, J., Chang, Y., Martínez, F. 2003. Características funcionales de soya desengrasada texturizada. Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Estatal de Campiñas, Brasil.
- Sandoval, E., Fernandez, A., Alonso, L., Ospina, B. (2006). Reologia de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. Ingeniería y Desarrollo, # 19; Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia.
- Sandoval, A., Farhat, I., Fernandez, A. 2007. Comportamiento reológico de harinas y almidones de yuca (Manihotesculenta) durante un proceso de extrusión. Revista de la Facultad de Química Farmacéutica, Vol 14, Universidad de Antioquia.
- Steffe, J.F. 1996. RheologicalMethods In FoodProcessEngineering. 2nd edition. East Lansing, USA-FreemanPress.

- Sumathi, A., Ushakumari, SR., Malleshi, NG. 2007. Physico-chemical characteristics, nutritional quality and shelf-life of pearl millet based extrusion cooked supplementary foods
- Valls Porta A. 1993. El proceso de extrusión en cereales y habas de soja, Efecto de la extrusión sobre la utilización de nutrientes. IX Curso de especialización FEDNA, Barcelona.
- Wolf, B. 2010. Polysaccharide functionally through extrusión processing. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 23 277-83.