

**PROCESAMIENTO POR EXTRUSIÓN DE MEZCLAS DE MAÍZ Y ARROZ
(HARINAS Y SALVADOS): Efecto del nivel de contenido de salvados sobre las
características físicas de los extruidos.**

**MAURICIO ORTIZ ARAGON
DONALD STEVEN BARONA TRUJILLO**

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Alimentos
Santiago de Cali
2018

**PROCESAMIENTO POR EXTRUSIÓN DE MEZCLAS DE MAÍZ Y ARROZ
(HARINAS Y SALVADOS):** Efecto del nivel de contenido de salvados sobre las
características físicas de los extruidos.

**MAURICIO ORTIZ ARAGON
DONALD STEVEN BARONA TRUJILLO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero de Alimentos**

Director Académico

ALEJANDRO FERNÁNDEZ QUINTERO, PhD
Profesor de la Escuela de Ingeniería de Alimentos

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Alimentos
Santiago de Cali

2018

DEDICATORIA

“Dedico este logro a Dios por haberme dado la oportunidad de haber estudiado en la Universidad del Valle, por la disciplina, y la sabiduría, a mis padres María del Carmen y Donaldo por brindarme apoyo y afecto, a mi hermano Eduardo por darme ejemplo, al profesor Alejandro Fernández por permitirnos hacer parte de este proyecto, a mi compañero Mauricio por su incondicional apoyo, a los estudiantes de maestría Beatriz, y Juan Carlos por todas sus enseñanzas.”

Donald Steven Barona Trujillo

“A mis padres por el apoyo brindado, por apostar por mí y nunca dudarlo, al profesor Alejandro Fernández por permitirme participar en este proyecto, a mi compañero de tesis por trabajar conjuntamente para la consecución de este objetivo y a los estudiantes de maestría que siempre estuvieron ahí ayudándonos en todo momento, a ustedes mil y mil gracias.”

Mauricio Ortiz Aragon

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por apoyarnos durante todo el proceso universitario. A nuestro director de tesis el Doctor Alejandro Fernández Quintero por su apoyo y asesoría durante todo el proceso. A los profesores de la escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle por todas las herramientas y conocimientos que nos brindaron, y por haber sido parte esencial de nuestros procesos de formación.

| | |
|---|----|
| Contenido | |
| RESUMEN | 9 |
| ABSTRACT | 10 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 12 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 12 |
| 1.1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 12 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN | 13 |
| 1.3. Objetivos | 13 |
| 1.3.1. Objetivo General | 13 |
| 1.3.2. Objetivos Específico | 13 |
| 1.4. Hipótesis | 13 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 14 |
| 2.1. Antecedentes | 14 |
| 2.2. Marco Conceptual | 17 |
| 2.2.1. Arroz | 17 |
| 2.2.1.1. Composición del grano de Arroz | 18 |
| 2.2.1.2. Salvado de arroz | 19 |
| 2.2.1.3. Producción de arroz en Colombia | 19 |
| 2.2.2. Maíz | 20 |
| 2.2.2.1. Composición del grano de maíz | 21 |
| 2.2.2.2. Salvado de maíz | 22 |
| 2.2.2.3. Harina de maíz | 22 |
| 2.2.3. Extrusión | 23 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 24 |
| 3.1. Ubicación | 24 |
| 3.2. Materia prima | 24 |
| 3.3. Equipos | 25 |
| 3.3.1. Extrusor | 25 |
| 3.3.2. Texturómetro Shimadzu Ez-test | 26 |
| 3.4. Puesta en marcha del equipo | 26 |
| 3.5. Experimentos definitivos | 27 |
| 3.6. Variables controladas en el proceso de extrusión. | 27 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.7. | Diseño experimental | 27 |
| 3.7.1. | Análisis estadístico | 29 |
| 3.8. | Manipulación de las muestras | 29 |
| 3.9. | Evaluación física de los extruidos | 29 |
| 3.9.1. | Trabajo de compresión como un indicador de la textura | 29 |
| 3.9.2. | Índice de expansión | 31 |
| 3.9.3. | Densidad | 31 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 32 |
| 4.1. | Naturaleza general del proceso. | 32 |
| 4.2. | Efecto del contenido de salvado total y el contenido de salvado de arroz sobre el trabajo de compresión | 32 |
| 4.3. | Efecto contenido de salvado total y el contenido de salvado de arroz sobre el Índice de expansión | 36 |
| 4.4. | Efecto contenido de salvado total y el contenido de salvado de arroz sobre la densidad aparente del extruido | 38 |
| 4.5. | Relación entre los parámetros físicos estudiados | 41 |
| 5. | Conclusiones | 42 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 43 |
| | Anexos | 48 |
| | Anexo A 1. Análisis de Varianza para el trabajo de compresión | 48 |
| | Anexo A 2. Grafica de normalidad de residuos para el trabajo de compresión | 48 |
| | Anexo A 3. Intervalos de confianza para el trabajo de compresión de extruidos preparados con diferentes proporciones de salvado total y salvado de arroz. | 49 |
| | Anexo A 4. Análisis de Varianza para el índice de expansión | 49 |
| | Anexo A 5. Grafica de normalidad de residuos para el índice de expansión | 49 |
| | Anexo A 6. Intervalos de confianza para el índice de expansión de extruidos preparados con diferentes proporciones de salvado total y salvado de arroz..... | 50 |
| | Anexo A 7. Análisis de Varianza para la densidad del extruido..... | 50 |
| | Anexo A 8. Grafica de normalidad de residuos para la variable de densidad | 51 |
| | Anexo A 9. Intervalos de confianza para la densidad de extruidos preparados con diferentes proporciones de salvado total y salvado de arroz. | 51 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1. Arrozales del mundo clasificados por regímenes de agua y tipo predominante de arroz .</i> | 17 |
| <i>Figura 2. Corte longitudinal de un grano de arroz</i> | 18 |
| <i>Figura 3. Productos obtenidos del maíz.....</i> | 20 |
| <i>Figura 4. Componentes estructurales del grano de maíz.....</i> | 21 |
| <i>Figura 5. Equipo extrusor DS 32II.....</i> | 25 |
| <i>Figura 6. Tornillos del extrusor DS-32II.....</i> | 25 |
| <i>Figura 7. Sistema de control PLC, para control de temperaturas.</i> | 25 |
| <i>Figura 8. Equipo Shimadzu EZ-test.....</i> | 26 |
| <i>Figura 9. Representación esquemática de la fuerza de compresión en relación con la deformación, donde N_0 es el número de picos y d es la deformación.....</i> | 30 |
| <i>Figura 10. Pie de rey utilizado para la determinación del diámetro del pasaboca producido por el extrusor.</i> | 31 |
| <i>Figura 11. Semillas de millo utilizadas para la determinación de densidad de extruidos.....</i> | 31 |
| <i>Figura 12. Expandidos obtenidos del proceso de extrusión</i> | 32 |
| <i>Figura 13. Trabajo de compresión a diferentes porcentajes de salvado total y salvado de arroz en la formulación.</i> | 33 |
| <i>Figura 14. Ilustra los valores de fuerza necesarios para fracturar extruidos preparados con 0% de salvado total y 30% de salvado total con 10% de salvado de arroz.....</i> | 35 |
| <i>Figura 15. Índice de expansión a diferentes porcentajes de salvado total y salvado de arroz en la formulación.</i> | 36 |
| <i>Figura 16. Densidad a diferentes porcentajes de interacción entre salvado total y salvado de arroz en la formulación.</i> | 39 |
| <i>Figura 17. Relación del trabajo de compresión con respecto a la densidad.....</i> | 41 |
| <i>Figura 18. Relación del trabajo de compresión con respecto al índice de expansión</i> | 42 |

Lista de tablas.

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1. Composición química en las diferentes partes del maíz en porcentaje.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Tabla 2. Condiciones de operación</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 3. Condiciones para pruebas de textura realizadas.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 4. Diseño experimental.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabla 5. Ensayos del diseño experimental utilizado.</i> | <i>28</i> |
| <i>Tabla 6. Comparación por el método de Tukey y una confianza de 95%, para el trabajo de compresión.</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabla 7. Comparación por el método de Tukey y una confianza de 95%, para el índice de expansión.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabla 8. Comparación por el método de Tukey y una confianza de 95%, para la densidad.....</i> | <i>40</i> |

Lista de ecuaciones.

| | |
|---|-----------|
| <i>Ecuación 1. Diseño experimental factorial.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Ecuación 2. Número de rupturas espaciales (mm^{-1}).....</i> | <i>30</i> |
| <i>Ecuación 3. Fuerza de punción promedio (N).....</i> | <i>30</i> |
| <i>Ecuación 4. Trabajo de compresión ($\text{N} \cdot \text{mm}$).....</i> | <i>30</i> |
| <i>Ecuación 5. Índice de expansión.....</i> | <i>31</i> |

RESUMEN

En el presente estudio se elaboró un pasaboca por extrusión de ingredientes provenientes de harina y salvados de maíz y arroz, además se pretendió medir el efecto del nivel de contenido de salvados sobre algunas características físicas de los extruidos. El procesado contuvo harinas y salvados de maíz de alta calidad proteica (QPM) y arroz biofortificado con zinc, ingredientes que proporcionan altos niveles de fibras dietarias. El producto final que se obtuvo de cada formulación se evaluó físicamente, con el fin de encontrar las mejores características de proceso que se ajusten a los requerimientos físicos en el extruido a desarrollar. Para elaborar dichos expandidos se utilizó el equipo extrusor de doble tornillo (DS 32II) del Laboratorio de Operaciones Unitarias de Tecnología e Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle. La materia prima se acondicionó a una humedad del 15% y la proporción de salvado en el contenido total de la mezcla utilizada para la elaboración del producto fue de 25% y 30%, donde la proporción de salvado de arroz en la mezcla estuvo entre 0-10%. Como variables físicas se midió el índice de expansión (IE), la densidad aparente (g/cm^3) y el trabajo de compresión (N.mm) de los extruidos, donde este último se determinó a partir de las figuras que se obtuvieron al relacionar la fuerza de compresión en función de la deformación, estos parámetros se midieron usando un texturómetro Shimadzu EZ test. Los resultados mostraron que, a mayor proporción de salvado arroz en la mezcla se obtuvo menor índice de expansión, por consiguiente, menores densidades aparentes y una necesidad de mayor fuerza de compresión para la deformación del producto final.

Palabras clave: Extrusión, procesamiento, harina, salvado, propiedades físicas

ABSTRACT

In the present work, the development of a snack by extrusion of healthy ingredients from flours and brands from corn and rice grains are sought. In addition it is intended to measure the effect of the content level of bran on the physical characteristics of the extrudates, with the aim of to be able to establish the ideal proportion for the possible obtaining of a product with good textural conditions. The processing will contain flours and bran of quality protein maize (QPM) and biofortified rice with zinc, ingredients that provide high levels of zinc and dietary fibers. The final product obtained to each condition was evaluated physically, to find the best process characteristics that fit the physical requirements in the extruded product to be developed. A double screw extruder equipment (DS 32II) of the laboratory of unit operations plant of food technology and engineering at the Universidad del Valle was used to make said expanded samples. The raw material was conditioned at a humidity of 15% and the proportion of bran in the total content of the mixture to be used to produce the product was 25% and 30%, where the proportion of rice bran in the mixture was between 0-10%. As physical variables, the expansion index (IE), the bulk density (g / cm^3) and the crispy work (N.mm) of the extrudates were measured, where the latter was determined from the figures obtained when relating the compression force as a function of the deformation, these parameters were measured using a Shimadzu EZ test texturometer. The results showed that, the greater the proportion of rice bran in the mixture, the lower expansion index was obtained, consequently, lower apparent densities and a need for greater strength for the deformation of the final product.

Keywords: Extrusion, processing, flour, bran, Physical Properties

INTRODUCCIÓN

El presente documento estudió la incorporación de salvado de maíz y arroz a una mezcla de harinas, las cuales fueron procesadas mediante la técnica de extrusión. El fin del trabajo consistió en conocer, como estas cantidades de salvado influyen en las características físicas (Índice de expansión, trabajo de compresión y densidad aparente) de extruidos tipo pasabocas obtenidos en el procesamiento, el motivo de su inclusión radica en que según la literatura, el uso de salvado en el consumo humano, es una fuente sumamente popular de fibra dietética debido a la propiedad hipocolesterolemica de su fracción de aceite. Se ha implementado la utilización de salvado de arroz estabilizado, empleando el método de extrusión con el fin de estabilizar la grasa total del salvado, inactivando su lipasa (Saunders, 1990), encontrando aplicación para el desarrollo de cereales en desayuno, alimentos para refrigerio y productos de panificación (Juliano, 1994).

Los extrusores han evolucionado a partir de simples dispositivos de formación y se han vuelto muy sofisticados en la última década. La extrusión se define comúnmente como un proceso termo-mecánico continuo que depende de la combinación de múltiples operaciones unitarias tales como el transporte, la mezcla, el cizallamiento, la plastificación, la fusión, la cocción, la polimerización, la fragmentación, etc. (Bouvier & Campanella, 2014). La extrusión de doble tornillo permite procesar una gran variedad de productos tales como: aperitivos expandidos, aperitivos co-extruidos, cereales para el desayuno, galletas, pastas (fideos, macarrones, espaguetis, etc.), proteínas vegetales texturizadas, alimentación animal entre otros; en el caso particular de productos expandidos tipo pasabocas se deben controlar tres parámetros importantes: contenido de humedad de la materia prima, temperatura y velocidad de rotación del tornillo, esto con el fin de garantizar un producto con la expansión y textura deseada (Albán & Montero, 2011). Las últimas tendencias en la tecnología y la investigación en extrusión de alimentos se han dirigido principalmente al desarrollo de alimentos sostenibles y funcionales, generando mayor conciencia de los consumidores sobre el papel de los productos y procesos alimentarios en el medio ambiente y la salud (Maskan & Altan, 2011).

Una ventaja importante de la cocción por extrusión es la capacidad para producir una amplia gama de productos, con tiempos mínimos de procesamiento. Los pasabocas representan una de las áreas más estimulantes de la industria alimentaria; tanto por sus procesos de innovación técnica como por el persistente crecimiento de su popularidad dentro de los consumidores, lo que conlleva a decir que el equipo de procesamiento de extrusión se ha convertido en la herramienta base de las empresas dedicadas a la elaboración de pasabocas.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El maíz concentra el 13% del área agrícola y es de gran importancia socioeconómica y de seguridad alimentaria por ser el primer cultivo de ciclo corto con presencia en 250 municipios, concentrados en las zonas de Tolima, Córdoba, Meta, Valle del Cauca y Cesar en donde siembran el 65% del área nacional. Las zonas productoras dependen en un 60% de esta actividad agrícola. El destino del maíz tecnificado nacional es: consumo humano (70%), industria de alimentos balanceados (20%), harina y trilla (8%), otros (2%). El valor de la producción agrícola es de un billón de pesos y la producción y su agroindustria generan en promedio 500.000 empleos al año (Ministerio de agricultura, 2017). La industria que procesa maíz genera unos coproductos, como los salvados, los cuales son destinados para consumo animal, caso similar ocurre con el salvado de la industria arroceras, en parte esto ocurre, debido a que la actividad enzimática de los salvados genera alteraciones de color, sabor y formación de algunos compuestos tóxicos que acorta el tiempo de vida útil limitando su reincorporación como materia prima en otros productos. Sin embargo, estos coproductos presentan una importante fuente de fibra dietaria, proteína, vitaminas del complejo B, carotenos, lípido del salvado de arroz (una fuente de vitaminas del complejo E, antioxidantes y otros micronutrientes, tiene un buen balance de ácidos grasos saturados, mono insaturados y poliinsaturados), zinc, hierro, magnesio y fósforo. Estos componentes pueden llegar a tener un beneficio para la salud humana. Por lo tanto, se planteó un procesamiento por extrusión de estos coproductos para la elaboración de extruidos tipo cereal para desayuno, los cuales se analizaron físicamente.

1.1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Es posible determinar los valores óptimos del nivel de contenido de salvados, para la obtención de extruidos con propiedades físicas (trabajo de compresión, índice de expansión y densidad) similares a una formulación sin contenido de salvado total?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Como justificación, diferentes autores recomiendan desarrollar nuevos estudios por medio de la tecnología de extrusión, aprovechando la gran versatilidad que brinda esta operación y que puede dar solución a la implementación de nuevos productos con la utilización de materias primas que logren dar un valor agregado en términos de calidad, sin afectar los costos de producción (Ordoñez, 2006). Debido a esto, el presente trabajo buscó la implementación de materias primas tales como: salvados de maíz y arroz, en formulaciones de harina, con el objetivo de evaluar los cambios en las características físicas tales como trabajo de compresión, índice de expansión y densidad, además se realizó una comparación respecto a una formulación patrón que no presentó contenido de salvados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar algunas características físicas de extruidos preparados con mezclas de harina de maíz, harina de arroz y sus salvados.

1.3.2. Objetivos Específico

- Establecer el efecto de la proporción de salvados en una formulación con harinas de maíz y arroz sobre variables físicas como: textura, índice de expansión y densidad del producto extruido.

1.4. Hipótesis

H₁: La variación de la proporción de salvado de maíz y arroz incide de manera significativa en las propiedades físicas: índice de expansión, densidad y trabajo de compresión; en comparación con las propiedades físicas de la formulación patrón (Harina de maíz, harina de arroz, sin contenido de salvado)

H₀₁: La variación en el contenido de salvado de maíz y arroz no incide de manera significativa en las propiedades físicas: índice de expansión, densidad y trabajo de compresión; en comparación con las propiedades físicas de la formulación patrón (Harina de maíz, harina de arroz, sin contenido de salvado)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Los primeros usos comerciales de los extrusores se remontan a la industria del caucho a finales de 1870 para Inglaterra y a principios de 1880 para los Estados Unidos. Estos extrusores eran combinaciones de extrusores de martillo y extrusores de tornillo de relaciones cortas longitud a diámetro (L/D). Alrededor de 1935, se concibieron y aplicaron los principios básicos de la extrusión con doble tornillo a la industria de los termoplásticos. La primera principal aplicación comercial del extrusor de tornillo único en la industria procesadora de alimentos fue la conversión de sémola o harina en pasta. Este proceso de moldeado a baja temperatura de bajo cizallamiento encontró la primera producción comercial en los años 1920 y 1930 y permanece como un proceso de producción estándar dentro de los años 1990. Los productos convencionales de pasta están procesados solamente como un extrusor hasta el nivel necesario para ligar junta la masa humidificada y producir la forma deseada (Riaz, 2000).

En 1997, la producción de aperitivos extruidos en USA estuvo representada por 932 millones de dólares de volumen de ventas (Wilkes et al, 1998). Estimando un volumen de producción de 160 toneladas, con la mayoría siendo producidos utilizando el extrusor de tornillo único. En 1998, el valor total comercial de ventas al detalle de los productos extruidos en USA fue de 3,62 billones de dólares (Bregenzer, 1998) Esto representa alrededor de 3,7 millones de toneladas utilizando extrusores de tornillo único (Riaz, 2000).

La producción de alimentos extruidos ha adquirido una cierta relevancia tanto desde el punto de vista nutritivo, como desde el saludable. Se considera que puede resultar útil para la mejora de la calidad nutritiva de la alimentación, al permitir la elaboración de productos estables y seguros desde el punto de vista microbiológico, con la posibilidad de ser almacenados durante largos periodos de tiempo sin plantear problemas de alteraciones. Como en el proceso de extrusión intervienen diversos parámetros, a veces se pueden manipular algunos de ellos para incidir sobre las propiedades de algunos componentes. Bajo el concepto de aperitivo se comercializan gran variedad de productos, destinados a tomar parte de una ingesta alimenticia fuera de las comidas convencionales. Su diversidad responde a la aplicación de diversas modalidades tecnológicas (Gutierrez, 2005).

Como entramos en un nuevo milenio, estas áreas de productos ilustran una sola fracción de un ilimitado número de productos que se pueden elaborar utilizando los extrusores de cocción. La investigación continua y un mejor entendimiento del proceso de extrusión combinado con el conocimiento de las características y comportamiento de la materia prima trabajaran en conjunto para aumentar los productos comercializables (Riaz, 2000).

En el mundo se han venido estudiando el uso de nuevas materias primas para la creación de pasabocas usando la tecnología de extrusión, un estudio realizado por (Albán & Montero, 2011) mostro la viabilidad del uso de harina de yuca en producción de expandidos, sustituyendo sémola de maíz con harina de yuca, la cual se adicionó a la mezcla en un intervalo de 7,5-22,5%, obteniendo como resultado que a menores contenidos de humedad y mayor proporción de harina de yuca se obtuvo mayor índice de expansión, menor densidad aparente y menor trabajo de crujencia, demostrando de forma preliminar la viabilidad del uso de harina de yuca en productos extruidos tipo pasabocas.

Combariza y Sanchez (2006) y Aristizabal, et al. (2013) investigaron el proceso de extrusión utilizando materiales obtenidos de cultivos biofortificados, con el propósito de desarrollar una harina precocida comestible con buenas características nutricionales. Se demostró que es factible crear un alimento precocido con alto valor nutricional a partir de mezclas de harinas obtenidas de cultivos biofortificados, sin necesidad de adicionar micronutrientes en otras etapas del proceso. Además, los autores encontraron que la extrusión de las mezclas de harinas (yuca, arroz, frijol, batata, maíz y hoja de yuca), produce un alimento con altos valores de índice de absorción de agua, buena consistencia y altas viscosidades por acción del agua. Sin embargo, se observó que el contenido de betacarotenos en las harinas precocidas disminuye luego del proceso de extrusión.

Delahaye, et al. (2006) evaluaron propiedades físicas y nutricionales de harinas extruidas de plátano verde, ocumo chino y sus mezclas con maíz, con el objetivo de diversificar la producción e informar acerca de un uso potencial en la agroindustria. Los autores utilizaron un extrusor de tipo monohusillo a una temperatura de alimentación de 75°C, temperatura de barril y de la matriz de 180°C, velocidad de tronillo 120 RPM y 16% de contenido de humedad de las harinas. Obteniendo a partir de plátano verde extruidos de alta densidad y bajo índice de expansión, mientras que con las mezclas por separado de la harina de ocumo chino y de plátano verde con un 80% de la harina de maíz blanco, resultaron extruidos de baja densidad y alto índice de expansión. Además, concluyeron que los extruidos de plátano verde por su aporte en almidón resistente, fibra dietética y una digestión lenta del almidón, se podrían recomendar en alimentos precocidos para regímenes especiales de alimentación.

De Cruz, et al. (2015) estudiaron el efecto de fuentes de almidón como taro y arroz partido, junto con la temperatura del troquel de extrusión (125,140,155 y 170 °C) sobre las propiedades físicas de gránulos extruidos, las propiedades evaluadas por los autores fueron la relación de expansión, densidad aparente, flotabilidad, durabilidad, absorción de agua y índice de solubilidad, obteniendo resultados significativos sobre las propiedades físicas durante el aumento de la temperatura de troquel y el cambio de la fuente de almidón, los resultados mostraron que la relación de expansión, la flotabilidad, el índice de durabilidad y la absorción del agua aumentaron a medida que la temperatura se movía de 125 a 170 °C. En contraste

con los valores de densidad aparente y el índice de solubilidad, los cuales redujeron sus valores a medida que se incrementaba la temperatura.

Wang, et al. (2016), investigaron los efectos de la temperatura de extrusión y la velocidad de rotación de los tornillos en la calidad de pasta de arroz integral. Obteniendo que la temperatura de extrusión y la velocidad del tornillo afectan significativamente la calidad de la cocción y las propiedades de textura de la pasta de arroz integral. La pasta producida a una temperatura de extrusión de 120 °C y una velocidad de tornillo de 120 RPM tuvo la mejor calidad con una pérdida de cocción, dureza y adhesividad de 6,7%, 2387,2 g y 7,0 g.s, respectivamente, similares a las de pasta hecha de harina libre de gluten. Indicando que el arroz integral se puede utilizar para producir pasta sin gluten con una nutrición mejorada.

Guevara y Fernández (2015) estudiaron las condiciones óptimas de tratamiento térmico por extrusión para la inactivación enzimática de lipasas que causa la rancidez hidrolítica deteriorando el contenido de aceite en salvado de arroz. En dicho estudio se determinó el contenido de AGL en el salvado crudo y en el salvado extruido después de 7 días de almacenamiento. Obteniendo que el salvado crudo mostró un incremento en el contenido de AGL del 11,8% y los salvados extruidos no mostraron un aumento significativo en el contenido de AGL, el cual fue inferior al 2% durante el período de almacenamiento de 7 días. Las condiciones óptimas del tratamiento de extrusión donde se presentó menor aumento de AGL, resultaron a una velocidad de tornillo de 200 rpm, temperatura del barril del 130 °C y contenido de humedad en el salvado del 20,5%. Obteniendo que el tratamiento térmico por extrusión fuera eficaz para lograr la inactivación, concluyendo que el salvado de arroz estabilizado contiene altos niveles nutricionales y es viable para su inclusión como materia prima en futuros productos alimenticios para el ser humano.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Arroz

El arroz (*Oryza Sativa L.*) es el cultivo de cereal más importante del mundo en desarrollo y el alimento básico de más de la mitad de la población del planeta. Suele ser considerado como una planta herbácea anual semiacuática. Se conocen unas veinte especies del género *Oryza* pero prácticamente todo el arroz cultivado pertenece a *O. Sativa L.* En África se cultiva una pequeña cantidad *Oryza glaberrima*, una especie perenne. El llamado << arroz silvestre >> (*Zizania acuática*), cultivado en la región de los Grandes Lagos de los Estados Unidos, guarda un parentesco más estrecho con la avena que con el arroz. Debido a su larga historia de cultivo y selección en diversos ambientes, *O. Sativa L.* ha adquirido toda una gama de adaptabilidad y tolerancia, lo cual le permite cultivarse en una amplia serie de regímenes hídricos que van de tierras profundamente inundadas a laderas de colina áridas. También se han desarrollado y explotado cultivares tolerantes a la sumersión por aguas de inundación (Ver figura 1), y a la alta salinidad; resistentes a la toxicidad del aluminio y del hierro, así como cultivares tolerantes a temperaturas frías en la fase de siembra o maduración en Asia, y a las limitaciones térmicas en África. El arroz se cultiva actualmente en más de 100 países de todos los continentes, salvo la Antártida, en una zona que va de los 50° de latitud norte a los 40° de latitud sur y que se eleva desde el nivel del mar hasta una latitud de 3000 metros (Bienvenido , 1994).

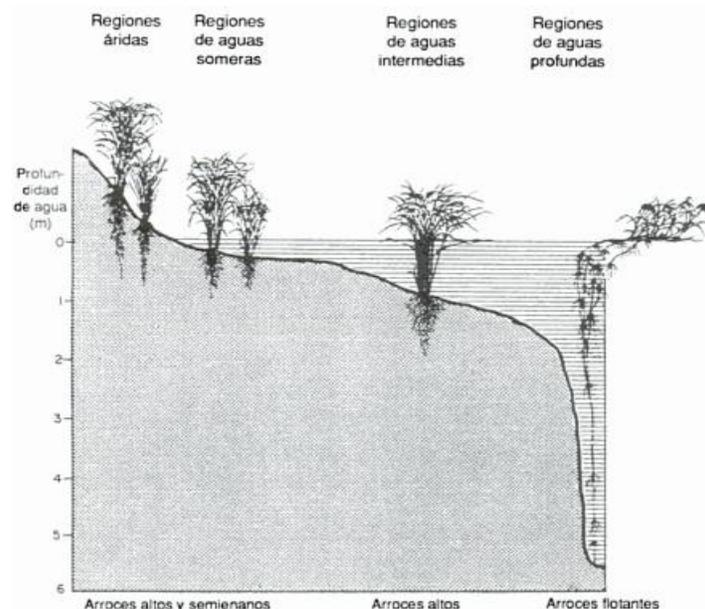


Figura 1. Arrozales del mundo clasificados por regímenes de agua y tipo predominante de arroz

Fuente: (Bienvenido , 1994)

2.2.1.1. Composición del grano de Arroz

El arroz es un cereal que se consume principalmente como grano entero, por lo cual el conocimiento de la estructura y composición de la cariósida es importante para entender propiedades fisicoquímicas y bioquímicas de sus constituyentes. Los diferentes tejidos que lo conforman difieren bastante en estructura, composición y funciones (ver figura 2). La cáscara está compuesta de dos hojas modificadas: la lema y la palea, cuya forma y tamaño corresponde a las del grano maduro. La parte exterior de la cáscara posee tricoma o vellosidades. Algunas variedades tienen una arista adherida en la parte superior del lema. Las células de la cáscara son altamente lignificadas y quebradizas. La cáscara representa el 20 % del peso del grano de arroz (fluctúa entre 16 y 28 %) y su principal función consiste en proteger a la cariósida del ataque de insectos y hongos (Julian & Betchel, 1985).

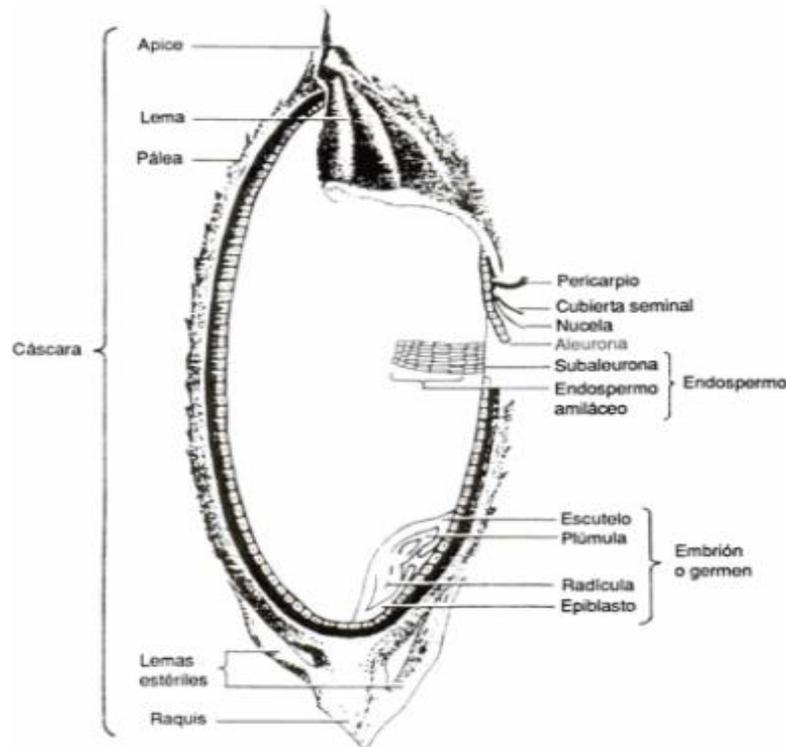


Figura 2. Corte longitudinal de un grano de arroz

Fuente (Martinez & Cuevas, 1989)

La composición y propiedades del grano de arroz y sus fracciones dependen del genotipo, del medio ambiente y del tipo de procesamiento a que se someta. El grano de arroz está conformado por tres componentes básicos: almidón, proteínas y lípidos que constituyen el 98,5 % de la materia seca: el porcentaje de estos elementos varía de acuerdo con el grado de procesamiento del arroz (Martinez & Cuevas, 1989).

2.2.1.2. Salvado de arroz

El salvado de arroz es uno de los productos secundarios más abundantes de la industria arrocera, Las concentraciones más altas de nutrientes del salvado de arroz son las grasas y proteínas. Según las condiciones de proceso, el salvado de arroz comercial contiene 11,5-17,2 % de proteína, 12,8-29,6% de grasa, 6,2- 31,5% de fibra (de la cual el 1,9 -2,5% es fibra alimentaria soluble) y 8,0-17,7 % de cenizas. (Gil, 2010) Sin embargo, si se almacena el salvado de arroz sin inactivar la lipasa, la grasa del salvado se hidroliza rápidamente y se oxida, enranciando el salvado de arroz y haciéndose desagradable al paladar por lo que se debe inactivar las lipasas por calor. Debido a que en el salvado de arroz predomina la fibra insoluble, es reconocida su capacidad de absorción de agua, mejorando la función intestinal en las personas que lo consumen. Este ingrediente libre de gluten es una buena fuente de fibra para personas alérgicas al gluten de trigo. La aplicación del salvado de arroz estabilizado como ingrediente de productos de panadería ha sido exitosamente incorporado en niveles de hasta 20% como máximo el salvado de arroz ayuda a mantener la humedad y frescura y por consiguiente mejora la vida útil del producto (Pacheco Delahaye & Peña, 2006).

Estudios realizados en seres humanos y animales con hipercolesterolemia indicaron que el consumo de salvado de arroz disminuye el colesterol. La utilización del salvado de arroz para alimentación humana ha estado limitada por su capacidad de enranciarse. Sin embargo, el calentamiento del salvado destruye las enzimas lipolíticas y estabiliza el salvado. La extrusión inactiva las lipasas, reduce la carga microbiana y mejora la estabilidad. Además, este proceso destruye las pequeñas cantidades de inhibidores de tripsina procedente del germen (Gil, 2010).

Recientes hallazgos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2013) muestran que el salvado de arroz es tan bueno o incluso mejor que el salvado de avena en la reducción de colesterol, disminuyendo el riesgo de enfermedades del corazón.

2.2.1.3. Producción de arroz en Colombia

En Colombia el cultivo de arroz ocupa el primer lugar en términos de valor económico entre los cultivos de ciclo corto. Es el tercer país productor de América Latina y del Caribe después de Brasil y Perú (FAO, 2010) y ocupa el puesto 22 a nivel mundial con una participación de 0,4%. El arroz es el tercer producto agrícola en extensión, después del café y el maíz. Representa el 13% del área cosechada en Colombia y el 30% de los cultivos transitorios. Su producción constituye el 6% del valor de la producción agropecuaria y el 11% de la actividad agrícola colombiana. El valor generado por este producto es equivalente al 63% del valor constituido por el cultivo del café. El país arrocero se divide en cinco zonas, de acuerdo con las principales características agroecológicas: Bajo Cauca, Centro, Llanos Orientales, Santanderes y Costa Norte. El Centro y los Llanos son las zonas

más productoras de arroz con el 34% cada una, seguida por el Bajo Cauca con el 17% del área, la Costa Norte con el 9% y los Santanderes con el 6%. Respecto a la Zona Centro, el Tolima representa 70% del área cultivada (Espinal, Martínez, & Acevedo, 2005).

2.2.2. Maíz

El maíz (*Zea mays L.*) es un cereal perteneciente a la familia de las gramíneas cuya descripción taxonómica corresponde a una especie monocotiledónea de crecimiento anual y un ciclo vegetativo muy amplio. De acuerdo con la variedad su desarrollo puede durar de 80 a 200 días, el cual empieza en la siembra y termina con la cosecha (Grande & Orozco, 2013). Es una fuente importante de elementos nutritivos para los seres humanos y animales, además de que se considera una materia básica de la industria como fuente de la cual se obtiene almidón, aceites, proteínas, bebidas alcohólicas y jarabes de glucosa y fructosa. Como alimento se puede usar todo el grano, o bien se puede tratar con técnicas de molienda en seco para obtener productos intermedios, como sémolas y harinas de distintas granulometrías, y como subproductos, el germen, a partir del cual se obtiene el aceite comestible de elevada calidad, y la cubierta o pericarpio (Salvado), utilizado como alimento para animales y que en los últimos años ha adquirido importancia como fuente de fibra dietética. La molienda húmeda es un proceso que se utiliza fundamentalmente para la obtención de almidón, proteínas, aceite y fibra. Los diversos productos obtenidos del maíz se muestran en la figura 3 (Gil, 2010).

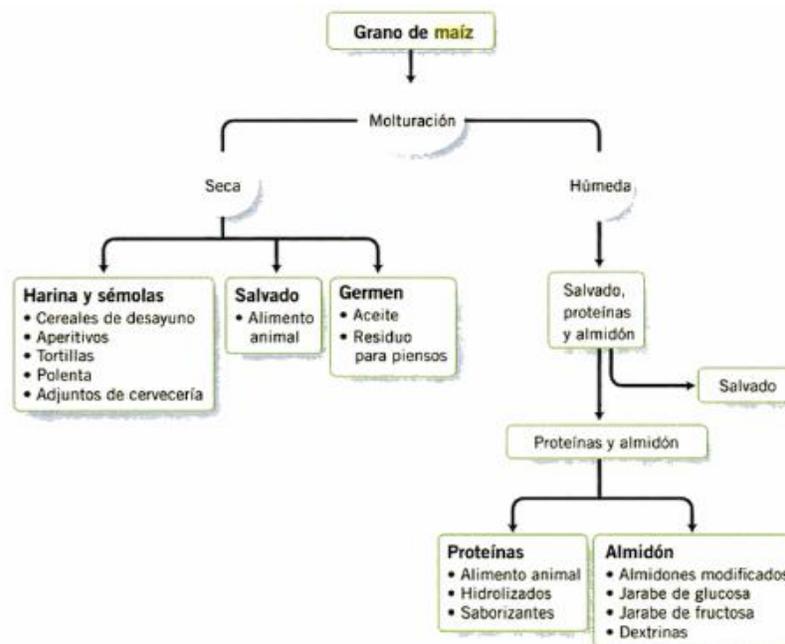


Figura 3. Productos obtenidos del maíz.

Fuente: (Gil, 2010)

2.2.2.1. Composición del grano de maíz

Los nutrientes que se encuentran en el grano de cualquier cereal presentan un patrón de distribución dentro de los diferentes componentes del mismo: el endospermo, la cascarilla, el germen, etcétera. Además de una reducción en el tamaño de la partícula, durante la molienda ocurre un cambio en el contenido de carbohidratos, fibra, grasa, minerales, proteínas y vitaminas. Se presenta una pérdida importante de nutrientes en la obtención de las harinas en comparación con los que están presentes en el grano original. El proceso para obtener harinas refinadas de trigo y de maíz reduce en forma significativa el contenido de vitaminas y minerales; en algunos casos, dicha disminución es superior al 70% del contenido en el grano original (Rosado, Camacho-Solís, & Bourges, 1999). El maíz entero es una buena fuente de tiamina, piridoxina y fósforo, y una fuente aceptable de riboflavina, niacina, folato, biotina, hierro y zinc. Sin embargo, muchos de estos nutrientes se pierden durante la molienda. Los micronutrientes que no se encuentran en cantidades significativas son las vitaminas A y E, y el calcio (Rosado, Camacho-Solís, & Bourges, 1999). A continuación, se muestra en la tabla 1 y la figura 4 la composición del grano:

Tabla 1. Composición química en las diferentes partes del maíz en porcentaje

| Componente químico | Pericarpio | Endospermo | Germen |
|--------------------|------------|------------|--------|
| Proteínas | 3,7 | 8,0 | 18,4 |
| Extracto etéreo | 1,0 | 0,8 | 33,2 |
| Fibra cruda | 86,7 | 2,7 | 8,8 |
| Cenizas | 0,8 | 0,3 | 10,5 |
| Almidón | 7,3 | 87,6 | 8,3 |
| Azúcar | 0,34 | 0,62 | 10,8 |

Fuente: (Watson, 1987)

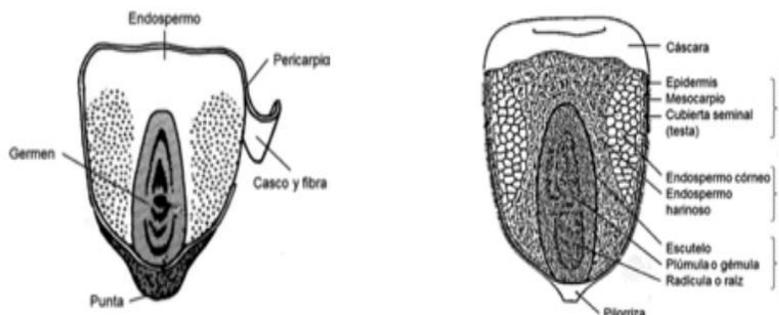


Figura 4. Componentes estructurales del grano de maíz

Fuente: (Grande & Orozco, 2013)

2.2.2.2. Salvado de maíz

El salvado de maíz corresponde a la fracción blanda harinosa del grano con un alto contenido de almidón, grasa y fibra que se desprende en el proceso de trillado, su composición abarca fracciones de harina, almidón, germen y cascarilla. Generalmente este subproducto es usado en la elaboración de alimentos balanceados para consumo animal, sin embargo, debido a su contenido nutricional se desea implementar en algunos productos saludables, como en cereales, pasabocas, productos de panadería entre otros.

Durante el proceso de molido en seco de maíz, hay una acumulación de una porción de salvado fibroso (5% del total de granos procesados), que resulta del proceso de desgerminación del grano y no ha sido bien estudiado o utilizado. Este producto está básicamente compuesto de las fracciones anatómicas del pericarpio y la punta de la tapa del grano de maíz. Una pequeña cantidad de endospermo también está presente, especialmente la capa de aleurona (Paes, 2006), donde el fitato es concentrado (Mjoun et al., 2008). Teniendo en cuenta que el pericarpio está constituido por hemicelulosa (67%), celulosa (23%) y lignina (0.1%) (Paes, 2006); este producto puede ser una fuente potencial de fibra dietaria (Sayer et al., 2013).

2.2.2.3. Harina de maíz

Existen varios tipos de maíz los cuales se pueden utilizar para diferentes fines, a continuación, se presentan las diferentes clases de maíz:

Dentado: este es el maíz de mayor importancia comercial. Ocupa casi el 73% de la producción global. Se utiliza para alimento para ganado y fabricación de productos industriales como almidón, aceite, alcohol, jarabes de maíz, etc. Consiste en un núcleo harinoso con inclusiones laterales de almidón duro. Debido a que la parte alta del grano contiene almidón harinoso, la pérdida de humedad de esta área provoca un ligero colapso durante la maduración, que produce la apariencia dentada característica (Haller, 2007).

Blando: es la variedad favorita para consumo humano. Consiste de granos suaves que son fácilmente molidos o cocinados para preparar alimentos como tortillas, atoles, tamales, etc. Ocupa aproximadamente el 12% de la producción global (Haller, 2007).

Dulce: tiene un endospermo constituido principalmente de azúcar, con muy poco almidón. La producción anual es de menos del 1% del total, pero tiene un alto valor comercial por su utilidad como vegetal procesado (Watson, 1987). El grano de maíz (como todo cereal) está constituido principalmente por tres partes características: a) el endospermo (aproximadamente 83% del peso del grano) que se compone de dos partes: una córnea (traslúcida, dura y frágil) y otra harinosa (opaca, blanda y con menor contenido de proteínas); b) el germen (10-12% del peso del grano), el cual es la parte con mayor valor nutricional (rico en vitaminas, minerales, proteínas,

azúcares y aceite; y c) la cáscara o pericarpio, el cual posee alto contenido de fibra. Además, el grano presenta en su base una parte fibrosa llamada “tip cap”, que es el residuo del pedicelo (parte con la que el grano está adherida al marlo) (Haller, 2007).

El maíz destinado a la elaboración de harina es una variedad en el que predomina el almidón blando, que facilita la molienda del grano. Se cultiva mucho en los Andes sudamericanos, territorios que ocupaba el antiguo Imperio inca. La harina de maíz se extrae al moler la parte interna o núcleo del grano (consumer, 2009). Esta parte representa el 75% del peso del grano del cereal, y está formado fundamentalmente por almidón, y por un complejo proteico denominado zeína. El maíz no origina harinas panificables, ya que no contiene en su composición las proteínas que conforman el gluten al amasarse con agua. Como esta harina no tiene la suficiente capacidad para hacer crecer a la masa, es recomendable mezclarla con otras. La harina de maíz blanco al sustituir por salvado de arroz es decir un material rico en almidón por otro rico en fibra y grasa, ocasiona en el extruido baja concentración de almidón y disminuye la viscosidad. Adicionalmente la grasa ejerce un efecto ablandador, en el caso de la viscosidad se registra pérdida de consistencia de la masa, según la cantidad de salvado de arroz sustituida (Pacheco Delahaye & Peña, 2006).

2.2.3. Extrusión

Desde el punto de vista tecnológico, podemos definir extrusión como “el proceso que consiste en dar forma a un producto, forzándolo a través de una abertura con diseño específico”. Se trata de un proceso continuo que involucra el trabajo y la compresión para formar una masa semisólida, que abarca una serie de operaciones unitarias que se combinan entre sí: mezclado, amasado, cizallamiento, calentamiento, enfriamiento, conformación, texturización y deshidratación de alimentos (Guy, 2003).

De acuerdo con lo dicho previamente, la extrusión se entiende como una técnica de fabricación de diversos materiales; en el caso de la alimentación juega un papel importante en la producción de diversos alimentos como: *pasabocas*, pastas, masa de galletas, cereales de desayuno, aperitivos, alimentos destinados para la nutrición infantil, piensos de animales, incluso dulces elaborados a partir de harinas extruidas de cereales. Por ende, podemos considerar a este un proceso muy importante en la sociedad desde su surgimiento en el siglo XVII hasta la actualidad. Debido a la aparición de tecnologías y al avance de nuevas tendencias de alimentación en el consumo de alimentos extruidos han adquirido mayor relevancia con el paso del tiempo como una forma alternativa al consumo de alimentos tradicionales.

Los alimentos tipo *pasaboca* han adquirido una gran importancia dentro del colectivo infantil. El primer alimento tipo pasaboca fue fabricado a partir de granos de maíz mediante una extrusora de tornillo sencillo, elaborados por la empresa “The Adams

Company” en la década de 1940. Se continuaron fabricando este tipo de alimentos durante muchos años, a pesar de que todavía no se conocía a fondo la ciencia del proceso de extrusión (Guy, 2001).

Los pasabocas tienen como base los granos de cereal (trigo, maíz, arroz, cebada, etc.) sin embargo, la extrusión puede ocasionar cambios de tipo químico y físico en el alimento como transformaciones nutricionales o cambios organolépticos. Se utilizan principalmente dos diseños de extrusor diferentes: el extrusor de tornillo único y el extrusor de tornillo gemelo. Dependiendo de los requisitos de procesamiento, los extrusores pueden tener rendimientos que varían desde varios gramos por hora hasta varias toneladas por hora. Para la mayoría de las aplicaciones de extrusión de alimentos, los extrusores de husillo doble co-rotantes son adecuados y preferidos, ya que permiten una amplia variación en los insumos de energía térmica y mecánica, control del tiempo de residencia y la aplicación de mezclas eficientes. Esta naturaleza de procesamiento excepcionalmente versátil de la extrusión ha permitido que este tipo de tecnologías tengan gran aplicación en la industria (Bouvier & Campanella, 2014).

En el caso de cereales para el desayuno y aperitivos, la alta temperatura y presión durante la cocción de la masa a base de almidón y la alta caída de presión en la matriz extrusionadora conducen a una evaporación del agua en la salida del troquel. Esta evaporación conduce a la formación de burbujas (nucleación) y crecimiento dentro de la masa, lo cual es responsable de una expansión significativa del producto (Horvat et al, 2013).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

La fase experimental de acondicionamiento de materias primas y extrusión se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de Tecnología e Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, ubicada en la ciudad de Santiago de Cali y las evaluaciones físicas de los productos terminados se realizó en el laboratorio de propiedades físicas de la escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, durante los semestres 2017 A y 2017 B

3.2. Materia prima

Las materias primas utilizadas para los ensayos de extrusión fueron salvados y harinas de maíz blanco de alta calidad proteica (QPM) suministrada por CIMMYT - CIAT y una línea de arroz con altos niveles de Zinc que fue suministrada por el programa de mejoramiento de arroz del CIAT.

3.3. Equipos

3.3.1. Extrusor

El equipo utilizado en la fase experimental fue un extrusor de doble tornillo modelo DS 32-II el cual se muestra en la figura 5, con dirección de rotación de los tornillos en co-rotación con aletas entrelazadas (ver Figura 6). El equipo cuenta con un sistema de programación y control lógico, con el cual se verificó las temperaturas en las zonas de barril (Figura 7).



Figura 5. Equipo extrusor DS 32II



Figura 6. Tornillos del extrusor DS-32II

Fuente: (Albán & Montero, 2011)



Figura 7. Sistema de control PLC, para control de temperaturas.

Las condiciones de operación utilizadas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de operación

| | |
|----------------------------|--|
| Velocidad de los tornillos | 220 RPM |
| Tasa de alimentación | 350 g/min |
| Perfil de temperaturas | Zona 1= 80°C - Zona 2=120°C- Zona 3= 160°C |

Zona 1: localizada en la entrada de material al barril; zona 2 localizada en la parte media del barril, zona 3 a la salida del barril.

3.3.2. Texturómetro Shimadzu Ez-test

Las pruebas de textura se realizaron con un texturómetro Shimadzu Ez-test (Figura 8), el cual se ajustó a los requerimientos mostrados en la tabla 3. Se realizó una prueba de fuerza – deformación mediante una compresión del producto final. De la información obtenida se obtuvo un indicador de la textura que se denomina el trabajo de compresión (N*mm) y el procedimiento de cálculo se expone en la sección 3.9.1.



Figura 8. Equipo Shimadzu EZ-test

Tabla 3. Condiciones para pruebas de textura realizadas.

| | |
|--------------------------|-----------|
| Rapidez | 50 mm/min |
| Distancia de deformación | 2 mm |
| Disco para deformación | 5 cm |

3.4. Puesta en marcha del equipo

Inicialmente se examinó el funcionamiento del equipo y la forma para programar y controlar las temperaturas y velocidades de los motores. Así como también se siguió el protocolo de puesta en funcionamiento del equipo, descrito en el trabajo de (Albán & Montero, 2011), el cual se muestra en el Anexo A.

Para el proceso de extrusión antes de adicionar cada material al barril se agregó una muestra triturada (purga) la cual sirvió como indicador para la determinación del tiempo de salida de cada muestra. Durante el proceso se registró las temperaturas de extrusión; además, se vigiló la alimentación al extrusor para que el doble tornillo del equipo no quedara sin alimentación.

3.5. Experimentos definitivos

Se estableció el plan experimental que consistió en evaluar extruidos obtenidos de formulaciones de mezclas de maíz y arroz (Harinas y salvados) a diferentes contenidos de salvado de arroz y contenido total de salvado en la formulación. Se operó el extrusor de doble tornillo a 220 rpm y las temperaturas se fijaron en 85°C en la zona 1, 120°C en la zona 2 y 160°C en la zona 3. La humedad de la mezcla a extruir se acondicionó a 15% en base húmeda, mientras la proporción de salvado de arroz en la mezcla se varió entre 0-10% y la de salvado total se varió en 25% y 30 %.

3.6. Variables controladas en el proceso de extrusión.

- Proporción de salvado de arroz en la formulación (%)
- Proporción de salvado total en la formulación (%)

3.7. Diseño experimental

Se realizó un diseño factorial de 2X7 completamente aleatorio para analizar el efecto de la proporción de salvado total y salvado de arroz sobre las variables respuesta (Tabla 4), en donde las unidades experimentales fueron extruidos preparados con formulaciones de mezclas de maíz y arroz (harinas y salvados).

Tabla 4. Diseño experimental

| Factores | Niveles | Variables respuesta |
|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| % de Salvado total | 25, 30 | Trabajo de compresión (N*mm) |
| % de salvado de arroz | 0, 5, 6, 7, 8, 9, 10 | Densidad (g/mL) |
| | | Índice de expansión |

Para las pruebas de trabajo de compresión (N*mm) se realizaron 28 tratamientos, los cuales consistieron en 2 réplicas por cada formulación de mezclas de maíz y arroz (Harinas y salvados), mientras que para las variables de densidad (g/mL) e índice de expansión se analizaron 70 tratamientos, los cuales correspondieron a 5 muestras promedio de cada formulación.

Con el objetivo de realizar una comparación con los niveles estudiados en el diseño experimental; también se realizó un ensayo el cual no presento inclusión de salvado total en la formulación (patrón), con una proporción de 53,3% Harina de maíz con

46,2% de Harina de arroz y 0,5% de polvo de hornear. La proporción de cada formulación del diseño experimental se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Ensayos del diseño experimental utilizado.

| Corridas | Harina de maíz (%) | Harina de arroz (%) | Salvado total (%) | |
|----------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | | | Salvado de maíz (%) | Salvado de arroz (%) |
| 1 | 40 | 35 | 25 | 0 |
| 2 | 40 | 35 | 20 | 5 |
| 3 | 40 | 35 | 19 | 6 |
| 4 | 40 | 35 | 18 | 7 |
| 5 | 40 | 35 | 17 | 8 |
| 6 | 40 | 35 | 16 | 9 |
| 7 | 40 | 35 | 15 | 10 |
| 8 | 40 | 30 | 30 | 0 |
| 9 | 40 | 30 | 25 | 5 |
| 10 | 40 | 30 | 24 | 6 |
| 11 | 40 | 30 | 23 | 7 |
| 12 | 40 | 30 | 22 | 8 |
| 13 | 40 | 30 | 21 | 9 |
| 14 | 40 | 30 | 20 | 10 |

* Todas las mezclas formuladas contenían 0.5% de polvo para hornear, el cual se adiciono en la proporción de salvado total.

El modelo estadístico para el diseño factorial del experimento se presenta a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta(ij) + \varepsilon_k(ij)$$

Ecuación 1. Diseño experimental factorial

Y_{ijk} : Observación en la unidad experimental.

μ : Media general.

i: % Salvado de arroz (1, 2,3,4,5,6 y 7).

j: % de salvado total (1 y 2).

k: Repeticiones (1...k).

α_i : Efecto del % de salvado de arroz ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ y α_7).

β_j : Efecto del % de salvado total (β_1 y β_2).

$\alpha\beta(ij)$: Efecto de la interacción entre el porcentaje de salvado de arroz y el porcentaje de salvado total.

$\varepsilon_k(ij)$: Valor aleatorio, error experimental de i y j.

El modelo estadístico debe cumplir los siguientes supuestos:

- Correcta especificación del modelo.
- Homogeneidad de varianza en los errores.
- No correlación de los errores.
- Distribución normal de los errores.

Para el diseño se plantearon las siguientes hipótesis nulas (H_0) y alternativas (H_a):

Para el efecto del porcentaje de salvado de arroz

$$H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_i = 0 \quad H_a = \text{algún } \alpha_i \text{ es distinto de } 0$$

Para el efecto del porcentaje de salvado total

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = 0 \quad H_a = \text{algún } \beta_j \text{ es distinto de } 0$$

Para el efecto de la interacción entre el porcentaje de salvado de arroz y el porcentaje de salvado total

$$H_0 = \alpha\beta_{11} = \alpha\beta_{12} = \dots = \alpha\beta_{ij} = 0 \quad H_a = \text{algún } \alpha\beta_{ij} \text{ es distinto de } 0$$

3.7.1. Análisis estadístico

Los resultados del diseño experimental se analizaron en el programa Minitab 18 mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95%. Para los análisis Post-anova se utilizó la prueba de Tukey, que permitió encontrar los tratamientos que presentaron diferencias significativas entre sí.

3.8. Manipulación de las muestras

Las muestras que se obtuvieron del proceso de extrusión se cortaron y acondicionaron a 50°C durante 24 horas, para homogenizar el contenido de humedad. Cuando se terminó el proceso de secado se procedió a empacar el producto en bolsas laminadas metalizadas, hasta que se realizaron las respectivas mediciones.

3.9. Evaluación física de los extruidos

3.9.1. Trabajo de compresión como un indicador de la textura

Para la determinación del trabajo compresión (crujencia) se empleó el método utilizado por (Valles et al, 2000), el cual se puede interpretar como un trabajo promedio de compresión en una muestra que exhibe múltiples fracturas durante el proceso de deformación. Las muestras obtenidas del proceso de extrusión se llevaron al equipo Shimadzu Ez-test en donde se realizó la prueba de fuerza-

deformación, obteniendo la curva de fracturas múltiples como se muestra en la figura 9.

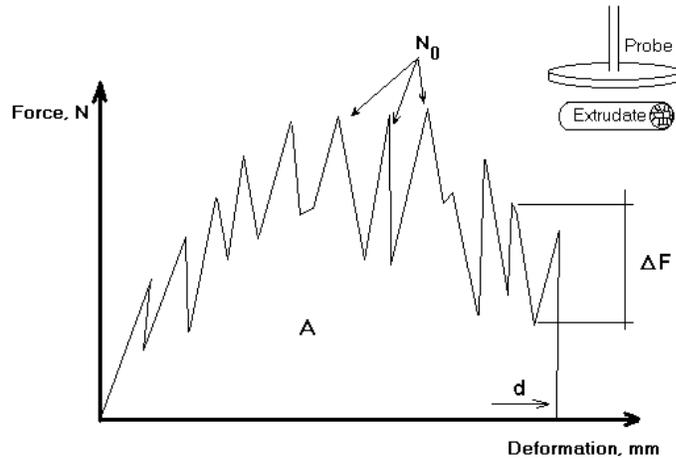


Figura 9. Representación esquemática de la fuerza de compresión en relación con la deformación, donde N_0 es el número de picos y d es la deformación.

Fuente: (Albán y Montero 2011)

A partir de la figura 9 se obtiene los valores necesarios para la determinación del trabajo de compresión (crujencia), los cuales se muestran a continuación:

$$Nsr(mm^{-1}) = \frac{N_0}{d}$$

Ecuación 2. Número de rupturas espaciales (mm^{-1})

Donde N_0 es el número total de picos, d es la distancia en la que el producto fue comprimido (mm).

$$Fm(N) = \frac{A}{d}$$

Ecuación 3. Fuerza de punción promedio (N)

Donde A es el área bajo la curva de fuerza que provoca la deformación

$$Wc(N \cdot mm) = \frac{Fm}{Nsr}$$

Ecuación 4. Trabajo de compresión ($N \cdot mm$)

3.9.2. Índice de expansión

Una vez las muestras salieron de la boquilla del extrusor se dejaron en reposo por un periodo de 10 min y se empacaron en bolsas laminadas metalizadas, luego de unos días se procedió a abrir la bolsa y se midió el diámetro del expandido con un calibrador “pie de rey” (Ver figura 9) y se comparó con el diámetro de la boquilla a la salida del extrusor, la cual fue de 5,2 mm y se utilizó la relación:

$$IE = \frac{D_E}{D_S}$$

Ecuación 5. Índice de expansión

Donde D_E es el diámetro del pasaboca a la salida, D_S =diámetro del orificio de salida y IE = Índice de expansión.



Figura 10. Pie de rey utilizado para la determinación del diámetro del pasaboca producido por el extrusor.

3.9.3. Densidad

Para la medida de densidad se determinó en primera instancia el volumen usando el principio de desplazamiento en un medio, en este caso semillas de millo las cuales son pequeñas y permitieron observar claramente cuanto se desplazó el volumen (figura 10), para cada caso se pesó la muestra y se usó la relación masa/volumen para calcular la densidad (Albán & Montero, 2011).



Figura 11. Semillas de millo utilizadas para la determinación de densidad de extruidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Naturaleza general del proceso.

La estructura de un producto extrusionado, se crea mediante la formación de un fluido derretido a partir de biopolímeros y soplando burbujas de vapor de agua en el fluido para formar una espuma. La película de biopolímeros debe fluir fácilmente en las paredes de la burbuja para permitir que estas se expandan a medida que el agua sobrecalentada se libere muy rápidamente a presión atmosférica. El fluido funde los biopolímeros desde las paredes de la célula y le permite expandirse hasta que estallen, generando así, las diferentes relaciones de expansión obtenidas en la parte experimental del presente estudio. Después de la expansión, la caída rápida de temperatura causada por la evaporación y el aumento de la viscosidad debido a la pérdida de humedad, vuelve rígida la estructura celular. El rápido aumento de la viscosidad va seguido de la formación de un estado vítreo. Los polímeros de almidón son muy buenos en esta función y las estructuras celulares bien expandidas se pueden producir a partir de almidones disponibles en maíz y arroz (Guy, 2001), materia prima base para el desarrollo de los extruidos elaborados en esta investigación y los cuales se muestran en la figura 12.



Figura 12. Expandidos obtenidos del proceso de extrusión

4.2. Efecto del contenido de salvado total y el contenido de salvado de arroz sobre el trabajo de compresión

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el trabajo de compresión, mostraron que a medida que se incrementa el contenido de salvado en la formulación, genera un aumento en dicha propiedad física. La figura 13 mostró los perfiles de trabajo de compresión para las distintas formulaciones del diseño experimental.

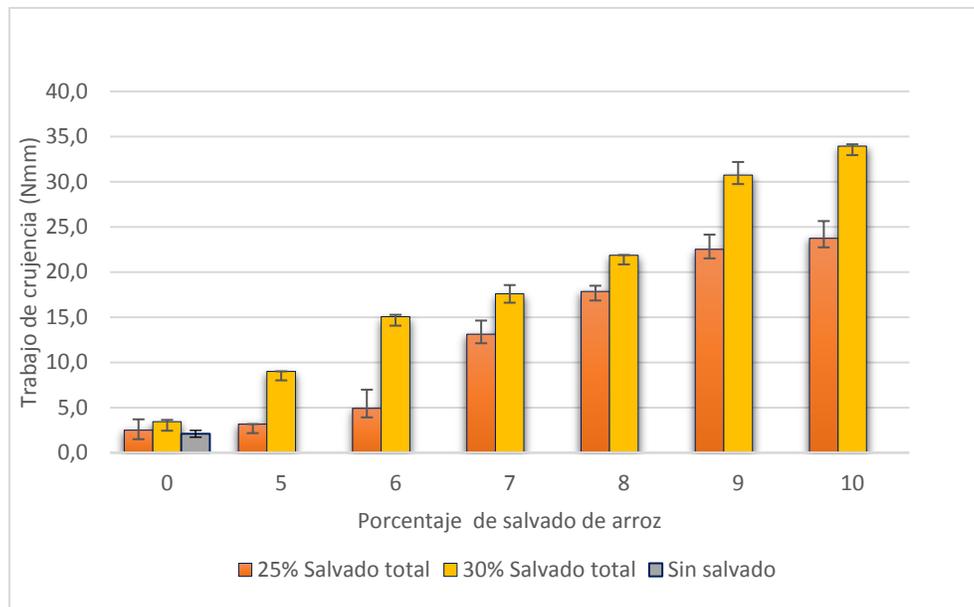


Figura 13. Trabajo de compresión a diferentes porcentajes de salvado total y salvado de arroz en la formulación.

Una vez conocido el comportamiento del trabajo de compresión en las diferentes proporciones del diseño experimental, se realizó un análisis estadístico Anova (Anexos A) el cual evidenció que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) para los factores de porcentaje de salvado total, porcentaje de salvado de arroz e interacción de los dos factores anteriormente mencionados. Motivo por el cual se realizó una prueba post-ANOVA por el método Tukey con un nivel de confianza del 95%, que evidenció entre qué niveles del diseño experimental existen diferencias significativas (Ver tabla 6).

Tabla 6. Comparación por el método de Tukey y una confianza de 95%, para el trabajo de compresión.

| Factor | N | Media | Agrupación |
|-------------------|---|---------|------------|
| %ST 30 con %SA 10 | 2 | 33,95 | A |
| %ST 30 con %SA 9 | 2 | 30,75 | A |
| %ST 25 con %SA 10 | 2 | 23,740 | B |
| %ST 25 con %SA 9 | 2 | 22,52 | B |
| %ST 30 con %SA 8 | 2 | 21,850 | B C |
| %ST 25 con %SA 8 | 2 | 17,8550 | C D |
| %ST 30 con %SA 7 | 2 | 17,61 | C D E |
| %ST 30 con %SA 6 | 2 | 15,07 | D E |
| %ST 25 con %SA 7 | 2 | 13,125 | E F |
| %ST 30 con %SA 5 | 2 | 9,01500 | F G |
| %ST 25 con %SA 6 | 2 | 4,915 | G H |
| %ST 30 con %SA 0 | 2 | 3,440 | H |
| %ST 25 con %SA 5 | 2 | 3,170 | H |
| %ST 25 con %SA 0 | 2 | 2,50 | H |
| %ST 0 con %SA 0 | 2 | 2,095 | H |

* (%SA): salvado de arroz, (%ST): salvado total

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Con base en la tabla 6, se pudo observar los valores de trabajo de compresión que presentaron diferencias significativas entre sí. Obteniendo que las formulaciones con (% 25 ST con % 6 SA), (% 30 ST con % 0 SA), (% 25 ST con % 5 SA) y (% 25 ST con % 0 SA), no presentaron diferencias significativas con respecto a la formulación patrón (% 0 SA con % 0 ST), motivo por el cual se consideró adecuada la inclusión de salvado en dichas proporciones, con el fin de realizar una fortificación del producto final, sin afectar la dureza del pasaboca.

Cuando se incrementó la proporción de salvado total y salvado de arroz en la formulación, se obtuvo un aumento en el trabajo de compresión, lo cual evita que se genere un mayor número de picos (rupturas espaciales) en el proceso de compresión del pasaboca, las representaciones obtenidas para las pruebas de compresión con la formulación de 30% de salvado total con 10% de salvado de arroz y 0% de Salvado total se muestran en la figura 14.

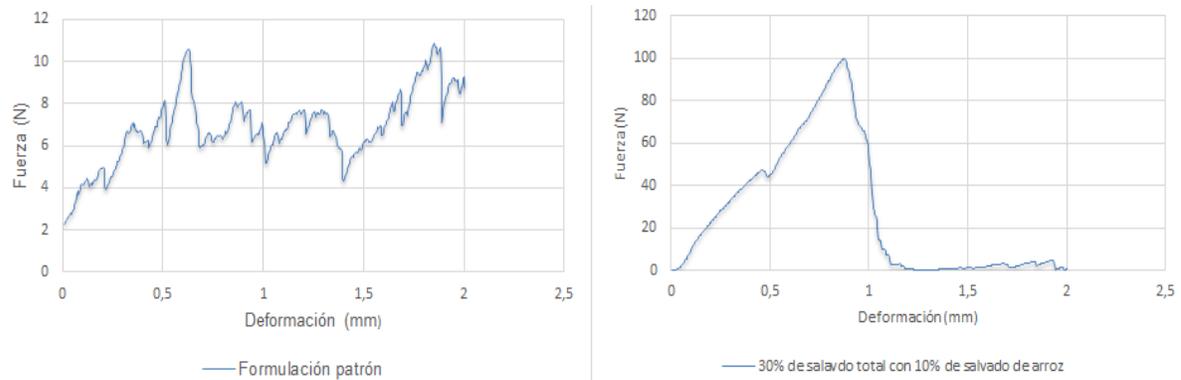


Figura 14. Curva de comportamiento de fuerza vs deformación, para extruidos preparados con 0% de salvado total y 30% de salvado total con 10% de salvado de arroz

Los productos extruidos expandidos consisten en burbujas de aire que están encerradas por paredes frágiles. Estas paredes pueden fracturarse con la aplicación de una fuerza externa (Duizer, 2001). Cuando se comprime un alimento crujiente, se puede observar un aumento lineal de la fuerza aplicada hasta que se produce el primer evento de fractura (Dogan & Kokini, 2007). La fractura se detiene debido a burbujas llenas de aire que dan como resultado una caída de la fuerza aplicada (Saeleaw & Schleining, 2011). A medida que la muestra se comprime más, se necesita un aumento en la fuerza hasta que ocurra el siguiente evento de fractura. Los picos de fuerza observados en una curva de fuerza-deformación corresponden a la fractura de las paredes y la altura del pico depende de las propiedades estructurales del extruido. Los alimentos crujientes atraviesan muchas fracturas, lo que resulta en una curva de desplazamiento de fuerza irregular (Roudaut et al., 2002).

Valles et al., 2000 esquematizó los resultados obtenidos de un proceso de compresión de pasabocas, mostrando que el número de rupturas espaciales tiene una relación directa con los atributos de textura del producto final. Lo anterior se relaciona con los resultados obtenidos del presente estudio, ya que cuando se incrementó la proporción de salvado en la formulación, se generó una disminución del número de rupturas espaciales, indicando que el producto adquirió dureza.

Las muestras extruidas sin contenido de salvado, se caracterizaron por curvas de desplazamiento de fuerza irregular, mientras que para las muestras con alto contenido de salvado se exhibió una curva de fuerza-desplazamiento con una pendiente pronunciada y un pequeño número de eventos de fractura, sugiriendo una fractura similar a un "chasquido", lo anterior concuerdan con los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas por Philipp et al. (2017) y Chassagne et al. (2011), las cuales mostraron un aumento en la fuerza necesaria para fracturar los pasabocas al adicionar fuentes de fibra insoluble en la formulación.

4.3. Efecto contenido de salvado total y el contenido de salvado de arroz sobre el Índice de expansión

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el índice de expansión, mostraron que a medida que se incrementa el contenido de salvado en la formulación, genera una disminución en tal característica física, la figura 15 mostró los valores de índice expansión para las distintas formulaciones del diseño experimental.

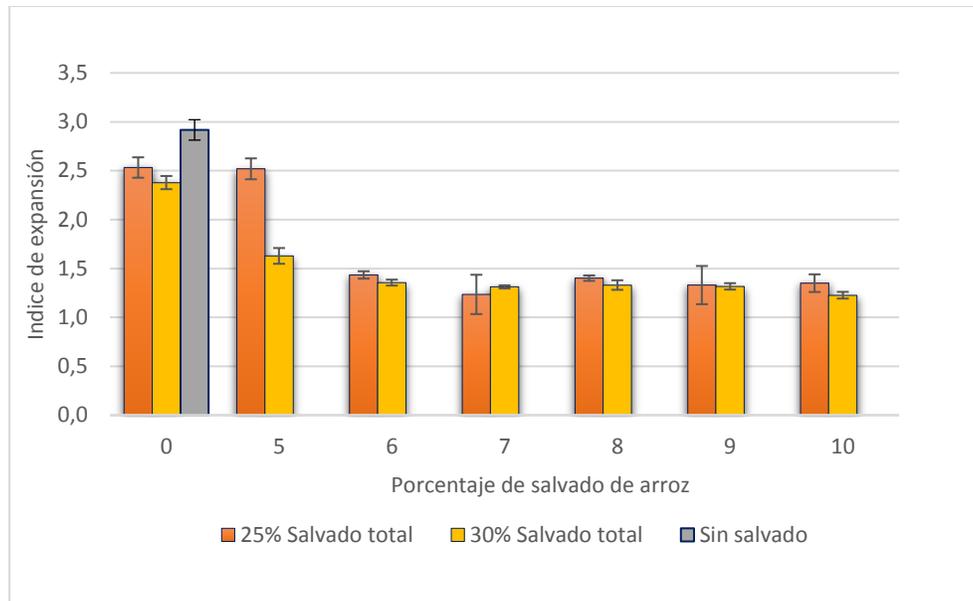


Figura 15. Índice de expansión a diferentes porcentajes de salvado total y salvado de arroz en la formulación.

Una vez conocido el comportamiento del índice de expansión en las diferentes proporciones del diseño experimental, se realizó un análisis estadístico Anova (Anexos A). Se evidenció que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) para los factores de porcentaje de salvado total, porcentaje de salvado de arroz e interacción de los dos factores anteriormente mencionados. Por este medio, se realizó una prueba post-ANOVA por el método Tukey con un nivel de confianza del 95%, que mostró entre qué niveles del diseño experimental existen diferencias significativas (ver tabla 7).

Tabla 7. Comparación por el método de Tukey y una confianza de 95%, para el índice de expansión

| Factor | N | Media | Agrupación |
|--------------------|---|---------|------------|
| %ST 0 con %SA 0 | 5 | 2,9173 | A |
| %ST 25 con %SA 0 | 5 | 2,5327 | B |
| %ST 25 con %SA 5 | 5 | 2,5194 | B |
| %ST 30 con %SA 0 | 5 | 2,3788 | B |
| %ST 30 con %SA 5 | 5 | 1,6288 | C |
| %ST 25 con %SA 6 | 5 | 1,4342 | C D |
| %ST 25 con %SA 8 | 5 | 1,4012 | D |
| %ST 30 con %SA 6 | 5 | 1,3558 | D |
| %ST 25 con %SA 10 | 5 | 1,3498 | D |
| %ST 30 con %SA 8 | 5 | 1,3308 | D |
| %ST 25 con %SA 9 | 5 | 1,3304 | D |
| %ST 30 con %SA 9 | 5 | 1,3173 | D |
| %ST 30 con %SA 7 | 5 | 1,31154 | D |
| %ST 25 con %SA 7 | 5 | 1,2348 | D |
| %ST 30 con %SA 10* | 5 | 1,2269 | D |

* (%SA): salvado de arroz, (%ST): salvado total

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Con base en la tabla 7, se pudo observar los valores de índice de expansión que presentaron diferencias significativas entre sí. Obteniendo que las formulaciones con (% 30 ST con % 0 SA), (% 25 ST con % 5 SA) y (% 25 ST con % 0 SA) obtuvieron valores cercanos a la formulación patrón (% 0 ST con % 0 SA), la cual tuvo en promedio una relación de expansión de 2,9173 y un intervalo de confianza con significancia de 95% entre 2,82 y 3,00.

El grado de expansión está relacionado con el tamaño, el número y la distribución de las celdas de aire rodeadas por la matriz. La baja expansión volumétrica de materiales extruidos a base de almidón es consecuencia de la poca evaporación extensiva de la humedad interna y del grado de gelatinización que está determinado por las condiciones de procesamiento y composición de la materia prima (Mendonca, Grossmann, & Verhe, 2000). El agua actúa como un plastificante de las regiones amorfas del grano de almidón, además promueve la ruptura de los enlaces de hidrógeno y la formación de nuevos enlaces con las cadenas de almidón asociadas. Cuanto mayor es el contenido de proteína, fibra y lípidos de las formulaciones, mayor será la viscosidad de la masa resultante. Esto hace que se disipe la energía mecánica en el proceso de extrusión, lo que resultó en mayores

contrapresiones en la matriz, dificultando la expansión radial de los pasabocas elaborados a la salida del extrusor (Harper, 1981).

La fibra dietaria tiene la capacidad de hidratarse a sí misma y en consecuencia de competir por el agua y restringir la disponibilidad de este plastificante, perjudicando el proceso de gelatinización en comparación a una formulación sin contenido de salvado (Yanniotis, Petraki, & Soumpassi, 2007). Estudios previos que involucraron la extrusión de materiales fibrosos demostraron el efecto significativo de la adición de fibra. Mostrando una menor expansión para los niveles más altos de fibra (Onwulata et al., 2001).

Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con los reportados por (Brennan, Monro, & Brennan, 2008), mostrando la disminución de la relación de expansión, para muestras extruidas con contenido de salvado en su formulación. Sin embargo un estudio realizado por Trevisan & Areas (2012) señaló la implementación de linaza como fuente de fibra, obteniendo valores de relación de expansión sin diferencias significativas respecto a una formulación patrón.

De hecho, el efecto de la expansión en los cereales no solo depende del contenido de fibra. También puede depender del peso molecular y la estructura de los hidrocoloides. Por ejemplo, autores como (Kaur et al., 1999) informaron un aumento significativo en la expansión de la sección de arroz extruido al aumentar los hidrocoloides, tales como Caboximetilcelulosa (CMC), Alginato de sodio y goma arábica de 0 a 3%.

4.4. Efecto contenido de salvado total y el contenido de salvado de arroz sobre la densidad aparente del extruido

Los resultados obtenidos con las diferentes formulaciones propuestas para la determinación de la densidad mostraron que a medida que se incrementa la proporción del porcentaje de salvado, se genera un aumento en los valores de densidad, lo anterior se observó en las figura 16, la cual mostró los resultados obtenidos para la variable de densidad al variar las diferentes formulaciones del diseño experimental.

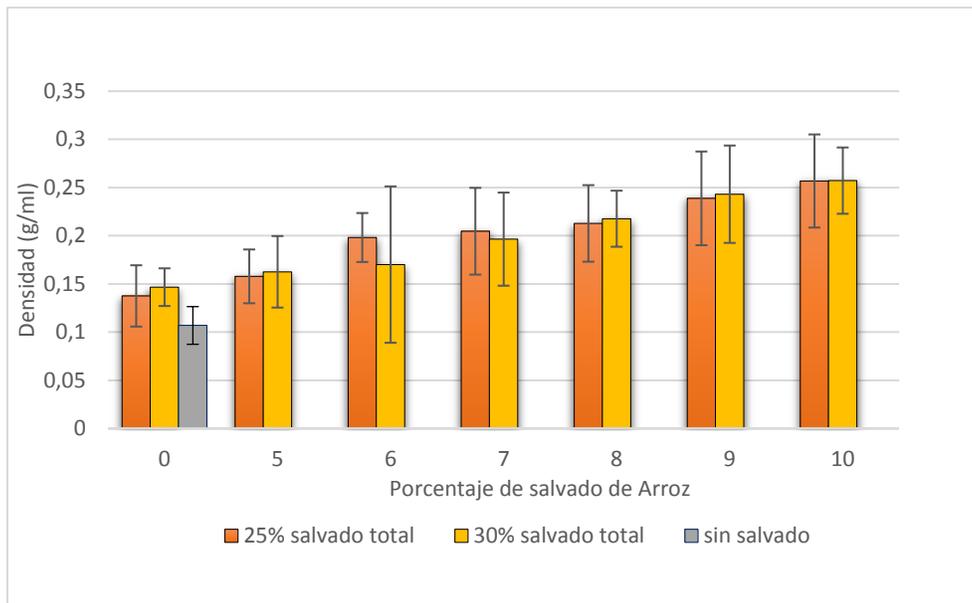


Figura 16. Densidad a diferentes porcentajes de interacción entre salvado total y salvado de arroz en la formulación.

Una vez conocido el comportamiento de la densidad en las diferentes proporciones del diseño experimental, se realizó un análisis estadístico Anova (Anexos A) el cual evidenció que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) para el factor de porcentaje de salvado de arroz. Motivo por el cual se realizó una prueba post-ANOVA por el método Tukey con un nivel de confianza del 95% para observar entre que niveles del diseño experimental existen diferencias significativas (Ver tabla 8).

Tabla 8. Comparación por el método de Tukey y una confianza de 95%, para la densidad.

| Factor | N | Media | Agrupación |
|-------------------|---|---------|------------|
| %ST 30 con %SA 10 | 5 | 0,2572 | A |
| %ST 25 con %SA 10 | 5 | 0,2568 | A |
| %ST 30 con %SA 9 | 5 | 0,2431 | A B |
| %ST 25 con %SA 9 | 5 | 0,2388 | A B C |
| %ST 30 con %SA 8 | 5 | 0,2177 | A B C |
| %ST 25 con %SA 8 | 5 | 0,2128 | A B C |
| %ST 25 con %SA 7 | 5 | 0,2047 | A B C D |
| %ST 25 con %SA 6 | 5 | 0,1982 | A B C D |
| %ST 30 con %SA 7 | 5 | 0,1965 | A B C D |
| %ST 30 con %SA 6 | 5 | 0,1701 | A B C D |
| %ST 30 con %SA 5 | 5 | 0,1626 | A B C D |
| %ST 25 con %SA 5 | 5 | 0,1579 | A B C D |
| %ST 30 con %SA 0 | 5 | 0,1467 | B C D |
| %ST 25 con %SA 0 | 5 | 0,1376 | C D |
| %ST 0 con %SA 0 | 5 | 0,10697 | D |

* (%SA): salvado de arroz, (%ST): salvado total

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Con base en la tabla 8, se observó los valores de densidad que presentaron diferencias significativas entre sí. La menor densidad se encontró cuando se trabajó a bajas proporciones de salvado de arroz, como es el caso de las formulaciones (% 0 ST con % 0 SA), (% 25 ST con % 0 SA), (% 25 ST con % 5 SA) y (% 30 ST con % 0 SA), lo anterior debido a que bajo estas condiciones los extruidos presentaron un mayor índice de expansión, por lo tanto una mayor cantidad de aire en su interior, generando un mayor volumen y por consiguiente una menor densidad. Para el efecto contrario se encontró que la mayor densidad ocurrió cuando se incrementó la proporción de salvado de arroz en la formulación, ya que a estas condiciones los extruidos presentaron una estructura interna más compacta y de menor volumen, generando valores de alta densidad (Albán & Montero, 2011).

El método utilizado para la determinación de la densidad fue el principio de desplazamiento en un medio conformado por granos de mijo; este método es el más adecuado ya que las semillas son pequeñas, obteniendo una mejor medición del volumen desplazado, esto se debe a que el extruido al ser un sólido poroso, higroscópico e irregular, no se recomienda usar un medio líquido para medir su volumen, ni tampoco aproximar su volumen al de un cilindro. Por otro lado, es importante verificar que el extruido se encuentre completamente cubierto por las

semillas de mijo, ya que en ocasiones queda aire atrapado, dando así una medición errónea del volumen del extruido.

La fabricación de productos con alto contenido de fibra dietaria está directamente relacionada con los cambios tecnológicos y el mantenimiento de las propiedades reológicas deseadas. La adición de fibra dietaria en cereales extruidos puede producir efectos adversos en las características físicas del producto final, reduciendo el volumen de expansión y aumentando la densidad (Robin, Schuchmann, & Palzer, 2012). Estudios realizados por Brennan et al., (2008) mostraron que la utilización de fibra insoluble (salvados) tiene incidencia directa en las características físicas del cereal a desarrollar, obteniendo una reducción en el volumen del producto final. Lo anterior concuerdan con los valores reportados por Robin et al., 2012 los cuales obtuvieron que el aumento de fibra insoluble genera una disminución sistemáticamente en la expansión de la sección, generando un aumento en la densidad aparente. De hecho, el efecto de la adición de fibra no solo depende del contenido, sino también del peso molecular y la estructura del polímero.

Los resultados obtenidos en el presente informe están en concordancia con lo reportado por (Jin, Hsieh, & Huff, 1995), los cuales obtuvieron un aumento en los valores de densidad aparente, al incluir fibra de soja en harina de maíz extruida. Sin embargo estudios realizados por (Stojceska et al., 2009) mostraron que la densidad aparente estaba altamente correlacionada con la humedad del alimento ($r=0,84$) y el índice de expansión ($r=0,82$). Hallazgos similares fueron informados por (Baik, Powers, & Nguyen, 2004) para expandidos de cebada en donde la densidad aparente aumentó linealmente a medida que aumento el contenido de humedad de la alimentación.

4.5. Relación entre los parámetros físicos estudiados

Se quiso conocer la relación de las diferentes variables de respuesta con relación al trabajo de compresión, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 17 y 18.

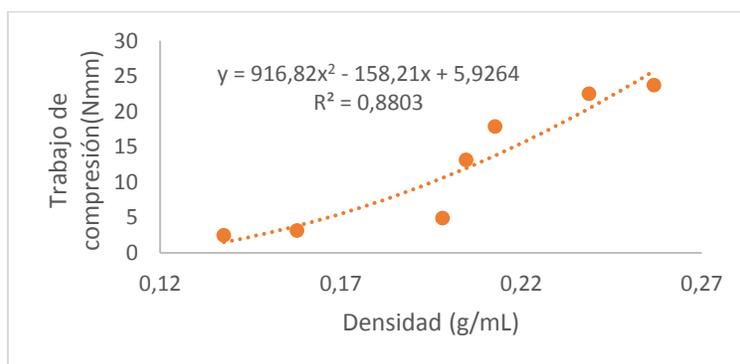


Figura 17. Relación del trabajo de compresión con respecto a la densidad

El trabajo de compresión puede ser relacionado con la densidad aparente de acuerdo con un polinomio de grado dos como se ilustra en la figura 17, lo anterior

se debe a que los productos que cuentan con densidades más altas requieren una mayor fuerza de compresión para romper las paredes de la estructura que lo conforman, como consecuencia de la poca conformación de aire (baja expansión) al interior del extruido, generando un esfuerzo mayor en el proceso de compresión.

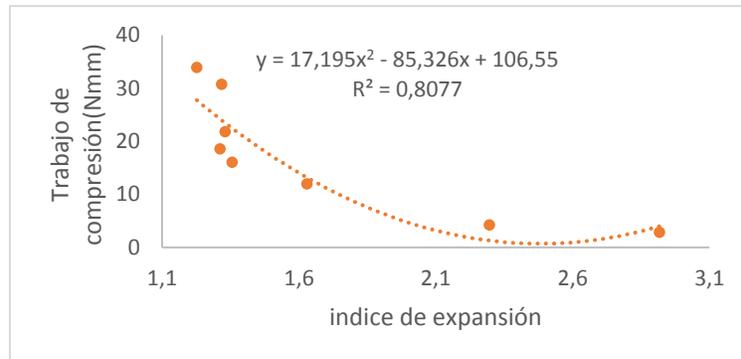


Figura 18. Relación del trabajo de compresión con respecto al índice de expansión

El caso inverso ocurre cuando se relaciona el trabajo de compresión con respecto al índice de expansión (Ver figura 18), esto se debe a que los productos que presentan mayor expansión generan a una mayor conformación de aire al interior del producto, creando una estructura fina y crujiente, lo cual facilita el proceso de compresión del producto, generando un mayor número de rupturas espaciales aplicando menor fuerza durante el proceso.

5. Conclusiones

- El contenido de salvado de arroz presentó un efecto significativo en las propiedades físicas de los extruidos (índice de expansión, densidad y trabajo de compresión).
- Para el contenido de salvado total de 30% con 10% salvado de arroz se presentó un aumento en el trabajo de compresión, densidad, y un menor índice de expansión en comparación a la formulación de 25% de salvado total con 10% de salvado de arroz; lo cual confirma la influencia del salvado total en el aumento de características físicas como trabajo de compresión y densidad debido al contenido de fibra, además de una reducción del índice de expansión.
- Las formulaciones con (% 25 ST con % 6 SA), (% 30 ST con % 0 SA), (% 25 ST con % 5 SA) y (% 25 ST con % 0 SA), no presentaron diferencias significativas con respecto a la formulación patrón (% 0 SA con % 0 ST),

motivo por el cual se consideró adecuada la inclusión de salvado en dichas proporciones, con el fin de realizar una fortificación del producto final, sin afectar la dureza del pasaboca.

- El perfil de trabajo de compresión vs densidad aparente presentó un aumento polinomial de segundo orden.
- Cuando se obtuvo valores de índice de expansión altos, se presentó una disminución en el trabajo de Compresión.
- Para futuros estudios se recomienda realizar un análisis proximal con el fin de cuantificar el contenido nutricional del producto final. Además de un análisis de color el cual permita observar si el contenido de aceites del salvado tiene incidencia en el color del producto a desarrollar

BIBLIOGRAFÍA

- Albán, R., & Montero, J. (2011). Caracterización física de extruidos preparados con mezcla de sémola de maíz y harina de yuca. *Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería*.
- Arisitizabal, J., Combariza, A., Fernández, A., & Sánchez, D. (2013). The effect of extrusion and drying on roller techniques concerning the rheological characteristics of rice-, corn-, sweet potato-, bean- and cassava root- and leaf- based composite flour. *Ingeniería e Investigación*, 33(1), 29-34.
- Baik, B., Powers, J., & Nguyen, L. (2004). Extrusion of regular and waxy barley flours for production of expanded cereals. *Cereal Chemistry*, 81 (1), 94–99.
- Bienvenido, J. (1994). *El arroz en la nutrición humana*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bouvier, J., & Campanella, O. (2014). Extrusion Processing Technology: Food and Non-food Biomaterials. *Wiley-Blackwell*.
- Bregenzer, B. (1998). Sales Data. *Petfood Industry*, 40(6), 7.
- Brennan, M. A., Monro, J. A., & Brennan, C. S. (2008). Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. *International Journal of Food Science and Technology*, 43 (12), 2278–2288.

- Chassagne, S., Leitner, M., Melado, A., Barreiro, P., Correa, E. C., Blank, I., . . . Chanvrier, H. (2011). Effect of fibers and whole grain content on quality attributes of extruded cereals. *Procedia Food Science*, 1, 17 – 23.
- Comboriza, A., & Sánchez, D. (2006). *Estudio de la obtención de un alimento a partir de cultivos biofortificados*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- consumer, E. (2009). *Harina de maíz*. Obtenido de www.consumer.es/web/es/alimentacion/guia-alimentos/cereales-y-derivados/2001/04/10/35013.php
- De Cruz, C. R., Kamarudin, M. S., Saad, C. R., & Ramezani-Fard, E. (2015). Effects of extruder die temperature on the physical properties. *Animal Feed Science and Technology*, 199(2015), 137-145.
- Delahaye, P., Pino, E., Parra, J., & Herrera, A. (2006). CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y NUTRICIONALES DE EXTRUDIDOS DE PLÁTANO VERDE (*Musa spp*) , OCUMO CHINO (*Colocasia esculenta*) Y MAÍZ (*Zea mays L.*). *Acta Científica Venezolana*, 57(4), 144-148.
- Dogan, H., & Kokini, J. (2007). Psychophysical markers for crispness and influence of phase behaviour and structure. *Journal of Texture Studies*, 38 (3), 324–354.
- Duizer, L. (2001). A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. *Trends in Food Science and Technology*, 12(1), 17–24.
- Espinal, C., Martínez, H. J., & Acevedo, X. (2005). *La cadena de arroz en Colombia. Una mirada global de su estructura dinámica*. Disponible en: [Http:// www.agrocadenas.gov.co](http://www.agrocadenas.gov.co) (Fecha de revisión 8 de noviembre). Caracas: Disponible en: [Http:// www.agrocadenas.gov.co](http://www.agrocadenas.gov.co) (Fecha de revisión 8 de noviembre).
- FAO. (2010). *Estadísticas mundiales sobre cultivos*. Disponible en: <http://www.faostat.org> (Fecha de revisión: Noviembre 8 de 2016) Accedido, Recuperado.
- Gil, A. (2010). *Tratado de nutrición: Composición y calidad nutritiva de los alimentos (Vol. 2)*. Madrid: Editorial medica panamericana.
- Grande, C. D., & Orozco, B. (2013). *Producción y procesamiento del maíz en Colombia*. Cali, Colombia: Revista Científica Guillermo de Ockham.
- Guevara, B., & Fernández, A. (2015). Establización del salvado de arroz: Tratamiento térmico por extrusión para inactivación enzimática (Lipasa). *Alimentos Hoy*, 23(36), 88-96.

- Gutierrez, J. (2005). *Calidad de vida, alimentos y salud humana. Fundamentos científicos*. Madrid: Diaz de Santos, S.A.
- Guy. (2001). *Extrusión de los alimentos*. Zaragoza (España): Editorial Acribia S.A.
- Guy, R. (2003). *Extrusion cooking. Principles and practice*. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. Second edition.
- Haller, D. (2007). *Determinación de las condiciones de extrusión adecuadas para elaborar harina de maíz con características similares a una harina nixtamalizada. Tesis de magister en ciencias y tecnología de alimentos*. . Santa fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Harper, J. (1981). *Extrusion of foods Volume II*. Florida, USA: CRC Press.
- Horvat, M., Azad Emin, M., Hochstein, B., Willenbacher, N., & Schuchmann, H. (2013). Influence of medium-chain triglycerides on expansion and rheological properties of extruded corn starch. *Carbohydrate Polymers.*, 93(2), 492-498.
- Jin, Z., Hsieh, F., & Huff, H. (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *Journal of Cereal Science*, 22 (2), 185-194.
- Julian, B., & Betchel, D. (1985). *The rice grain and its gross composition*. In: *Rice Chemistry and Technology*.
- Juliano, B. (1994). *EL ARROZ en la nutrición humana*. Roma: FAO organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación .
- Kaur, K., Singh, N., Sekhon, K., & Singh, B. (1999). Effect of hydrocolloids and process variables on the extrusión behaviour of rice grits. *Journal of Food Science and Technology*, 36(2), 127-132.
- Martinez, C., & Cuevas, F. (1989). *Evaluación de la calidad culinaria y molinera del arroz*. Cali, Colombia: Centro internacional de agricultura tropical (CIAT).
- Maskan, M., & Altan, A. (2011). *Advances in Food Extrusion Technology*. CRC Press.
- Mendonca, S., Grossmann, M., & Verhe, R. (2000). Corn bran as a fibre source in expanded snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 33(1), 2-8.
- Ministerio de agricultura, .. (2017). *SECTOR MAÍZ TECNIFICADO Indicadores e Instrumentos*. Colombia.
- Mjoun, K., Kalscheur, K., Hippen, A., & Schingoethe, D. (2008). Ruminant phosphorus disappearance from corn and soybean feedstuffs. *Journal of Dairy Science*, 91(10), 3938-3946. doi:http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0688

- Onwulata, C., Konstance, R., Smith, P., & Holsinger, V. (2001). Co-extrusion of dietary fiber and milk proteins in expanded corn products. *LWT - Food Science and Technology*, 34(7), 424–429.
- Oosten, B. (1982.). Tentative hypothesis to explain how electrolytes affect the gelatinization temperatura of starches in water. *Starch*, 34(7), 233-239.
- Ordoñez, I. A. (2006). *Elaboración de suplementos nutricionales con base en el uso integral de las plantas de yuca y batata, por medio de extrusión, para la alimentación de animales monogástricos*. Cali: Facultad de ingeniería, Universidad San Buenaventura.
- Pacheco Delahaye, E., & Peña, J. (2006). Efecto del salvado de arroz sobre parámetros químicos, físicos y sensoriales de arepas precocidas y congeladas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 23(2), 234-245.
- Paes, M. (2006). *Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho (Circular Técnica, No. 75)*. Sete Lagoas: Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento/EMBRAPA.
- Philipp, C., Buckow, R., Silcock, P., & Oey, I. (2017). Instrumental and sensory properties of pea protein-fortified extruded rice snacks. *Food Research International*, 102 , 658–665.
- Riaz, M. (2000). *Extrusores en las aplicaciones de alimentos*. Zaragoza : ACRIBIA S.A.
- Robin, F., Schuchmann, H., & Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 28, 23-32.
- Rosado, J., Camacho-Solís, R., & Bourges, H. (1999). Adición de vitaminas y minerales a harinas de maíz y de trigo en México. *Salud pública de México*, 41 (2), 130-137.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Vallès, B., Colas, B., & LeMeste, M. (2002). Crispness: A critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science and Technology*, 13(6–7), 217–227.
- Saeleaw, M., & Schleining, G. (2011). A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic–mechanical destructive techniques. *Journal of Food Engineering*, 105 (3), 387–399.
- Saunders, R. (1990). The properties of rice brand as a foodstuff. *Cereal foods world*, 35(632), 634-635.
- Sayer, K., Buckner, C., Erickson, G., Klopfenstein, T., & Macken, C. (2013). Effect of corn bran and steep inclusión in finishing diets on diet digestibility, cattle performance, and nutrient mass balance. *Journal of Animal Scien. Journal*

of Animal Science, 91(8), 3847-3858.
doi:<http://dx.doi.org/10.2527/jas.2011-3926>

- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., & Ibanoglu, S. (2009). The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. *Food Chemistry*, 114 (1), 226–232.
- Superintendencia de industria y comercio, .. (2011). *Cadena Productiva del Maíz Industrias de Alimentos Balanceados y Harina de Maíz*.
- Trevisan, A., & Areas, J. (2012). Development of corn and flaxseed snacks with high-fibre content using response surface methodology (RSM). *International Journal of Food Science and Nutrition*, 63(3), 362-367.
- USDA. (2013). *National Nutrient Database for Standard Reference*. Washington DC.
- Valles, P., Roudaut, G., Dacremont, C., Le Meste, M., & Mitchel, J. (2000). Understanding the texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 1679-1685.
- Wang, L., Duan, W., Zhou, S., Qian, H., Zhang, H., & Qi, X. (2016). Effects of extrusion conditions on the extrusion responses and the quality of brown rice pasta. *Food Chemistry*, 204, 320-325.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.053>
- Watson, S. (1987). *Structure and composition in: corn chemistry and technology*. Minnesota, U.S.A.: American Association of Cereal Chemistry, Inc. .
- Wilkes, A., Walter, A., & Hodgen, D. (1998). State of the snack food industry. *Snack world*, 55(6), 6.
- Yanniotis, S., Petraki, A., & Soumpassi, E. (2007). Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 594-595.

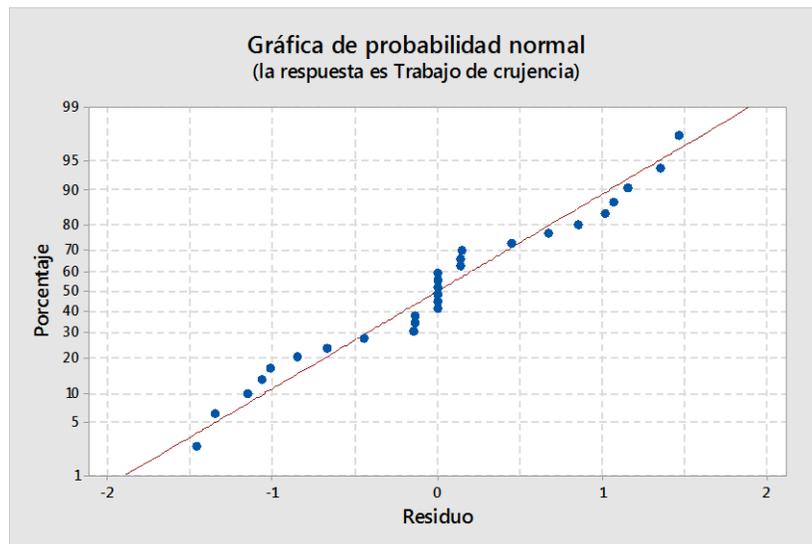
Anexos

Anexo A 1. Análisis de Varianza para el trabajo de compresión

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelo | 13 | 2733,16 | 210,243 | 165,05 | 0,000 |
| Lineal | 7 | 2661,59 | 380,227 | 298,49 | 0,000 |
| % S. Arroz | 6 | 2387,28 | 397,880 | 312,35 | 0,000 |
| % S. Total | 1 | 274,31 | 274,311 | 215,34 | 0,000 |
| Interacciones de 2 términos | 6 | 71,57 | 11,929 | 9,36 | 0,000 |
| % S. Arroz*% S. Total | 6 | 71,57 | 11,929 | 9,36 | 0,000 |
| Error | 14 | 17,83 | 1,274 | | |
| Total | 27 | 2751,00 | | | |

Anexo A 2. Grafica de normalidad de residuos para el trabajo de compresión



Anexo A 3. Intervalos de confianza para el trabajo de compresión de extruidos preparados con diferentes proporciones de salvado total y salvado de arroz.

Medias

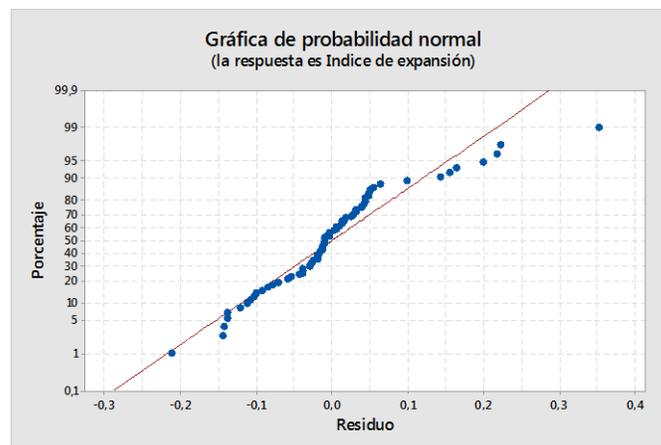
| Factor | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|---------------|---|--------|-----------|---------------------|
| %SA 0*%ST 0 | 2 | 2,095 | 0,375 | (0,443. 3,746) |
| %SA 0*%ST 25 | 2 | 2,5 | 0,198 | (0,789. 4,211) |
| %SA 5*%ST 25 | 2 | 3,17 | 0 | (1,459. 4,881) |
| %SA 6*%ST 25 | 2 | 4,915 | 0,205 | (3,204. 6,626) |
| %SA 7*%ST 25 | 2 | 13,125 | 0,955 | (11,414. 14,836) |
| %SA 8*%ST 25 | 2 | 17,855 | 0,0495 | (16,1442. 19,5658) |
| %SA 9*%ST 25 | 2 | 22,52 | 1,44 | (20,81. 24,23) |
| %SA 10*%ST 25 | 2 | 23,74 | 0,198 | (22,029. 25,451) |
| %SA 0*%ST 30 | 2 | 3,44 | 1,202 | (1,729. 5,151) |
| %SA 5*%ST 30 | 2 | 9,015 | 0,00707 | (7,30416. 10,72584) |
| %SA 6*%ST 30 | 2 | 15,07 | 2,07 | (13,35. 16,78) |
| %SA 7*%ST 30 | 2 | 17,61 | 1,51 | (15,89. 19,32) |
| %SA 8*%ST 30 | 2 | 21,85 | 0,636 | (20,139. 23,561) |
| %SA 9*%ST 30 | 2 | 30,75 | 1,63 | (29,04. 32,46) |
| %SA 10*%ST 30 | 2 | 33,95 | 1,91 | (32,24. 35,66) |

Anexo A 4. Análisis de Varianza para el índice de expansión

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelo | 13 | 14,8133 | 1,13949 | 106,88 | 0,000 |
| Lineal | 7 | 13,2475 | 1,89250 | 177,52 | 0,000 |
| % de salvado de arroz | 6 | 12,6147 | 2,10245 | 197,21 | 0,000 |
| % de salvado total | 1 | 0,6328 | 0,63285 | 59,36 | 0,000 |
| Interacciones de 2 términos | 6 | 1,5658 | 0,26096 | 24,48 | 0,000 |
| % de salvado de arroz*% de salvado total | 6 | 1,5658 | 0,26096 | 24,48 | 0,000 |
| Error | 56 | 0,5970 | 0,01066 | | |
| Total | 69 | 15,4103 | | | |

Anexo A 5. Grafica de normalidad de residuos para el índice de expansión



Anexo A 6. Intervalos de confianza para el índice de expansión de extruidos preparados con diferentes proporciones de salvado total y salvado de arroz.

Medias

| Factor | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|-----------------|---|---------|-----------|--------------------|
| %SA 0*%ST 0 | 5 | 2,9173 | 0,1044 | (2,8288. 3,0058) |
| %SA 0*%ST 25_1 | 5 | 2,5327 | 0,1068 | (2,4442. 2,6212) |
| %SA 5*%ST 25 | 5 | 2,5194 | 0,0379 | (2,4310. 2,6079) |
| %SA 6*%ST 25_1 | 5 | 1,4342 | 0,2011 | (1,3458. 1,5227) |
| %SA 7*%ST 25_1 | 5 | 1,2348 | 0,0278 | (1,1463. 1,3233) |
| %SA 8*%ST 25_1 | 5 | 1,4012 | 0,1954 | (1,3127. 1,4896) |
| %SA 9*%ST 25_1 | 5 | 1,3304 | 0,0904 | (1,2419. 1,4188) |
| %SA 10*%ST 25_1 | 5 | 1,3498 | 0,1361 | (1,2613. 1,4383) |
| %SA 0*%ST 30_1 | 5 | 2,3788 | 0,0674 | (2,2904. 2,4673) |
| %SA 5*%ST 30_1 | 5 | 1,6288 | 0,0806 | (1,5404. 1,7173) |
| %SA 6*%ST 30_1 | 5 | 1,3558 | 0,0304 | (1,2673. 1,4442) |
| %SA 7*%ST 30_1 | 5 | 1,31154 | 0,01609 | (1,22308. 1,40000) |
| %SA 8*%ST 30_1 | 5 | 1,3308 | 0,0488 | (1,2423. 1,4192) |
| %SA 9*%ST 30_1 | 5 | 1,3173 | 0,0326 | (1,2288. 1,4058) |
| %SA 10*%ST 30_1 | 5 | 1,2269 | 0,0344 | (1,1385. 1,3154) |

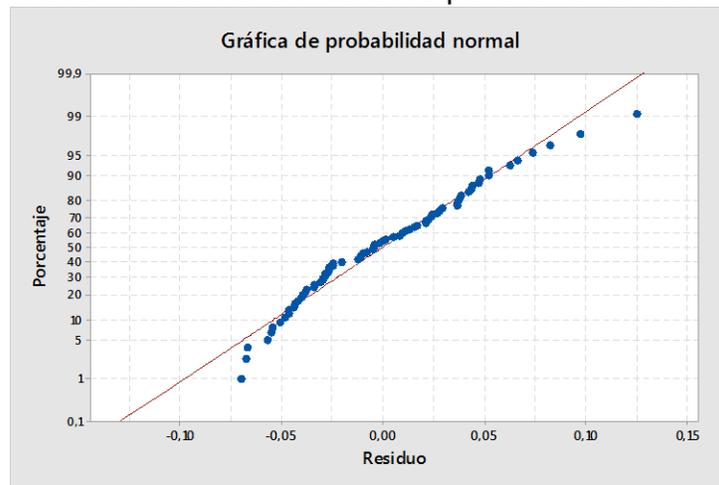
Desv.Est. agrupada = 0,0988866

Anexo A 7. Análisis de Varianza para la densidad del extruido

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelo | 13 | 0,106979 | 0,008229 | 3,58 | 0,000 |
| Lineal | 7 | 0,104281 | 0,014897 | 6,49 | 0,000 |
| % de Salvado de Arroz | 6 | 0,104076 | 0,017346 | 7,55 | 0,000 |
| % de salvado toal | 1 | 0,000205 | 0,000205 | 0,09 | 0,766 |
| Interacciones de 2 términos | 6 | 0,002698 | 0,000450 | 0,20 | 0,977 |
| % de Salvado de Arroz*% de salvado toal | 6 | 0,002698 | 0,000450 | 0,20 | 0,977 |
| Error | 56 | 0,128634 | 0,002297 | | |
| Total | 69 | 0,235613 | | | |

Anexo A 8. Grafica de normalidad de residuos para la variable de densidad



Anexo A 9. Intervalos de confianza para la densidad de extruidos preparados con diferentes proporciones de salvado total y salvado de arroz.

Medias

| Factor | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|-----------------|---|---------|-----------|--------------------|
| %SA 0*%ST 0 | 5 | 0,10697 | 0,01954 | (0,06555. 0,14838) |
| %SA 0*%ST 25_1 | 5 | 0,1376 | 0,0371 | (0,0962. 0,1790) |
| %SA 5*%ST 25 | 5 | 0,1579 | 0,0811 | (0,1165. 0,1993) |
| %SA 6*%ST 25_1 | 5 | 0,1982 | 0,0483 | (0,1567. 0,2396) |
| %SA 7*%ST 25_1 | 5 | 0,2047 | 0,0291 | (0,1633. 0,2461) |
| %SA 8*%ST 25_1 | 5 | 0,2128 | 0,0505 | (0,1714. 0,2542) |
| %SA 9*%ST 25_1 | 5 | 0,2388 | 0,0344 | (0,1974. 0,2802) |
| %SA 10*%ST 25_1 | 5 | 0,2568 | 0,0786 | (0,2154. 0,2982) |
| %SA 0*%ST 30_1 | 5 | 0,1467 | 0,0318 | (0,1052. 0,1881) |
| %SA 5*%ST 30_1 | 5 | 0,1626 | 0,0279 | (0,1212. 0,2040) |
| %SA 6*%ST 30_1 | 5 | 0,1701 | 0,0254 | (0,1286. 0,2115) |
| %SA 7*%ST 30_1 | 5 | 0,1965 | 0,0450 | (0,1551. 0,2379) |
| %SA 8*%ST 30_1 | 5 | 0,2177 | 0,0397 | (0,1763. 0,2591) |
| %SA 9*%ST 30_1 | 5 | 0,2431 | 0,0486 | (0,2017. 0,2846) |
| %SA 10*%ST 30_1 | 5 | 0,2572 | 0,0483 | (0,2158. 0,2987) |

Desv.Est. agrupada = 0,0462990

Anexo B.**Manual de operación del equipo extrusor de doble tornillo**

- Revisar el nivel de los tanques de aceite y de agua que se encuentre llenos al menos unas tres cuartas partes de su altura máxima.
- Encender el interruptor principal del extrusor, que se encuentra ubicado en la caja de interruptores que controlan la corriente que entra al equipo.
- Verificar que el voltaje entre cada una de las fases sea de 220 V aproximadamente.
- Verificar que los interruptores de la unidad de control estén en la posición ON, antes de comenzar a operar el equipo.
- Una vez validado lo anterior se acciona la perilla de prendido del equipo.
- Verificar que la pantalla muestre las ventanas de acuerdo a la programación hecha por el fabricante.
- Pulsar el botón de la bomba de aceite y dejar que lubrique durante 2 minutos, antes de inicializar el motor principal, verificar que el manómetro marque una presión de 2.5 MPa.
- Ajustar las temperaturas de la zona 1, 2, y 3 y esperar que las temperaturas deseadas lleguen lo programado.
- Una vez alcanzadas las temperaturas requeridas, cargar el material a extruir en la tolva de alimentación.
- Dependiendo de la humedad del material a extruir, si es menor a 20%, es necesario inicializar con un material húmedo (preparar suficiente para el inicio y terminación de la operación), esto con el fin de lubricar el barril.
- Prender el motor principal accionando el botón MAIN MOTOR, inmediatamente se prende la alimentación pulsando el botón FEEDING MOTOR y gradualmente se aumenta la velocidad de rotación de los tornillos hasta ajustar el deseado, simultáneamente incrementar hasta alcanzar la taza de alimentación requerida en el experimento. Cabe resaltar que, si se va a operar a distintas humedades, se debe empezar por el material más húmedo.
- Realizar el experimento extruyendo el material de prueba que está en la tolva de alimentación, cargar de nuevo material si no es necesario cambiar las temperaturas. En caso de requerir cambio de temperaturas reprogramar estas y esperar a que alcancen el valor necesario y alimentar de nuevo con material.
- Una vez terminado el experimento apagar el motor de alimentación y disminuir gradualmente la velocidad de rotación de los tornillos. Simultáneamente aflojar y desmontar el dado y dosificar sémola seca de maíz o algún material con características similares, con el fin de limpiar el cilindro y los tornillos, una vez finalice la operación de limpieza, apagar las zonas de calentamiento y finalmente, apagar el equipo.