



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR EN LAS
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y SENSORIALES DE LOS CEREALES EXPANDIDOS**

José Rodolfo Reyes Boche

Asesorado por la Inga. Hilda Piedad Palma Ramos

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR
EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y SENSORIALES DE LOS
CEREALES EXPANDIDOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ RODOLFO REYES BOCHE
ASESORADO POR LA INGA. HILDA PIEDAD PALMA RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoní Ramirez Ramirez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. César Adolfo García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y SENSORIALES DE LOS CEREALES EXPANDIDOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 14 de noviembre de 2016.


José Rodolfo Reyes Boche

Guatemala, 9 de febrero de 2017

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Wong Davi:

Por este medio hago constar que he revisado el informe final de trabajo de graduación en la modalidad de tesis titulado "**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR EN LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS Y SENSORIALES DE LOS CEREALES EXPANDIDOS**", el cual fue realizado por el estudiante **José Rodolfo Reyes Boche**, quien se identifica con el número de carné **2011-13960**, así mismo se identifica con el CUI **2414 83808 1601**. Haciendo constar que luego de revisarlo considero satisfactorio el informe y lo apruebo para que pueda seguir con los trámites necesarios.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Hilda Piedad Palma Ramos
Ing. Química
Colegiada No. 453

Hilda Piedad Palma de Martini
Ingeniera Química
Colegiado No. 453



Guatemala, 20 de abril de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.016.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 090-2015 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **José Rodolfo Reyes Boche**.
Identificado con número de carné: **2011-13960**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y SENSORIALES DE LOS CEREALES EXPANDIDOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Hilda Piedad Palma Ramos de Martíni**.

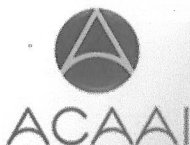
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.024.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JOSÉ RODOLFO REYES BOCHE** titulado: **"DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y SENSORIALES DE LOS CEREALES EXPANDIDOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wong Davis, A. C.
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, mayo 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.240-2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL EXTRUSOR EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y SENSORIALES DE LOS CEREALES EXPANDIDOS**, presentado por el estudiante universitario: **José Rodolfo Reyes Boche**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2017

/cc



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por la bendición que nos da de vivir cada día y el regalo de acompañarnos en cada viaje que emprendemos.

Mis padres

Rodolfo Reyes y Patricia Boche por siempre estar ahí, para apoyarme en los momentos difíciles y celebrar mis alegrías.

Mi hermana

Rosa María Reyes por haber sido un apoyo tan importante en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por acogerme durante los años de mi preparación académica
Facultad de Ingeniería	Por todo lo aprendido dentro y fuera de sus salones de clases.
Mis amigos de la Facultad	Por todos los buenos momentos que compartimos, y el apoyo brindado en los momentos más difíciles.
Familia Reyes Villatoro	Por todos que de alguna manera, ayudaron a la conclusión de esta meta.
Ingeniero Julio Reynosa	Por la amistad y el apoyo brindado a nuestra familia todos estos años.
Ingeniero Edin Sierra Roca	Por sus oraciones y cariño brindado durante mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. EXTRUSIÓN DE ALIMENTOS.....	3
2.1 Cocción por extrusión	3
2.2 Componentes de la extrusora.....	5
2.2.1 Clasificación de los extrusores.....	7
2.2.2 Principales variables del proceso de extrusión	8
2.3 Energía mecánica específica (eme).....	9
3. CAMBIOS QUÍMICOS Y NUTRICIONALES DURANTE LA EXTRUSIÓN.....	11
3.1 Proteínas	11
3.2 Gelatinización de almidones	12
4. ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL	13
4.1 Medición de proteínas (AOAC 1998, patrón primario)	13
4.2 Medición de humedad (AOAC 1998, patrón primario)	14

5.	EQUIPO DE MEDICIÓN NIR (MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE MUESTRA).....	15
6.	ANÁLISIS SENSORIAL	17
6.1	Pruebas de evaluación de intensidad de escalas.....	17
7.	METODOLOGÍA.....	19
7.1	Variables	19
7.2	Delimitación de campo de estudio.....	19
7.3	Recursos humanos disponibles.....	20
7.4	Recursos materiales disponibles.....	20
7.4.1	Medición de análisis proximal.....	20
7.4.2	Medición de densidad.....	21
7.4.3	Medición de porcentaje de humedad.....	22
7.4.4	Medición de grosor de la partícula.....	22
7.5	Técnica cualitativa.....	23
7.6	Técnica cuantitativa.....	23
7.7	Recolección y ordenamiento de la información	24
7.8	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	24
7.9	Análisis estadístico	25
7.10	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables	25
7.11	Programas a utilizar para el análisis de datos	25
8.	RESULTADOS	27
9.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	39

CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	51
APÉNDICES	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Esquema de los componentes de una extrusora	7
2. Densidad sin cobertura en función de la velocidad del tornillo.....	28
3. Tamaño de la partícula sin cobertura en función de la velocidad del Tornillo.....	29
4. Porcentaje de proteínas sin cobertura en función de la velocidad de Tornillo.....	30
5. Humedad sin cobertura en función de la velocidad del tornillo	31
6. Sensorial promedio en función de la velocidad del tornillo.....	32
7. EME (energía mecánica específica) promedio en función de la velocidad del tornillo	33
8. Densidad con cobertura en función de la velocidad del tornillo.....	35
9. Tamaño de la partícula con cobertura en función de velocidad del Tornillo.....	36
10. Porcentaje de proteínas con cobertura en función de la velocidad del Tornillo.....	37
11. Humedad con cobertura en función de velocidad del tornillo	38

TABLAS

I. Cambios químicos y fisicoquímicos durante la extrusión de alimentos	11
II. Cambios en las proteínas durante la extrusión	12
III. Variables a medir para la investigación.....	19

IV. Tabla para ordenamiento de datos.....	24
V. Valores promedio de factores fisicoquímicos de cereales sin cobertura en función de la velocidad del tornillo	27
VI. Sensorial promedio en función de la velocidad del tornillo	32
VII. EME promedio en función de la velocidad del tornillo	33
VIII. Valores promedio de factores fisicoquímicos con cobertura en función de la velocidad del tornillo	34

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
EME	Energía mecánica específica
kg	Kilogramo
m³	Metro cúbico
rpm	Revoluciones por minuto
Wh	Watt hora

GLOSARIO

Amilopectina	Estructura ramificada que forman los almidones.
Amilosa	Estructura helicoidal que forman los almidones.
Bombeo	Sobrepresión en el extrusor que genera partículas de tamaño no uniforme.
Crunch	Palabra del inglés que significa crujido.
Desnaturalización	Pérdida de las propiedades fisicoquímicas y organolépticas de las proteínas por efectos mecánicos o térmicos.
Extrusión	Operación unitaria utilizada para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada.
Gelatinización	Expansión producida por la absorción de agua caliente en las cadenas de almidones.
Harina	Polvo que resulta de la molienda de los cereales y otras semillas.
NIR	Espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano.

Proceso HTST	Proceso de pasteurización flash (alta temperatura/ tiempo corto).
Reflectancia	Capacidad de un cuerpo de reflejar la luz.
<i>Snack</i>	Palabra del inglés que significa aperitivo.

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar el efecto que tiene la velocidad del tornillo del extrusor sobre las variables de respuesta en las propiedades fisicoquímicas y el valor sensorial para la fabricación de cereales expandidos.

Para lo cual se contó con un extrusor y una línea de producción en la cual se producen cereales a base de harina de arroz. Las variables a las que se les determinó el efecto que tiene la velocidad del tornillo fueron: densidad, tamaño de la partícula y porcentaje de proteínas y humedad.

También se determinó el efecto que tiene la velocidad del tornillo en las propiedades organolépticas del producto por medio de un análisis sensorial realizado por un grupo de panelistas entrenados.

Por lo cual se tomaron muestras de cereal a una alimentación de 1 350 kg/h de harina con un flujo de agua de 82,8 kg/h. Con estas variables fijas se varió la velocidad del extrusor en un rango entre 170 a 220 rpm, ya que era el rango importante de estudio. Se tomaron muestras con cobertura y sin cobertura del cereal a cada velocidad durante 4 meses para tener un estudio representativo de lo que realmente sucede en el producto.

Para la medición de densidad y tamaño de la partícula se utilizó la metodología del manual de procedimientos estándar de la empresa, mientras que para el porcentaje de proteínas y de humedad se utilizó tecnología NIR.

Al final de la investigación, se logró determinar que la velocidad a la cual trabaja el tornillo del extrusor tiene influencia directa sobre la densidad del producto ya que esta densidad es producto de la gelatinización de los almidones en la harina. Se determinó que, a menor velocidad del tornillo, menor expansión del cereal y, por ende, mayor densidad del producto; mientras que, a mayor velocidad, la densidad disminuye.

Con respecto al tamaño de la partícula se determinó que la velocidad del tornillo no tiene influencia directa sobre esta característica; sin embargo, junto a otros factores como el bombeo o el desgaste de los moldes de corte, se producen algunos cereales que no son uniformes, por lo que pueden afectar la calidad final del producto.

El porcentaje de proteínas en el cereal sí es influenciado por la velocidad del tornillo ya que la deformación mecánica y térmica dentro del extrusor desnaturaliza las proteínas presentes en la harina. Por otro lado, no se tiene una influencia directa sobre el porcentaje de humedad en el cereal. Sin embargo, estas propiedades sí varían entre el producto con cobertura y sin cobertura, ya que el recubrimiento hace variar el porcentaje final de las proteínas en el producto. La humedad del producto final es más constante ya que en ese punto se vuelve una variable crítica.

Por último, se determinó el efecto sobre la medición sensorial de las muestras, con el cual se pudo determinar la velocidad óptima de operación del extrusor que es de 200 rpm. Esto debido a que esta velocidad obtuvo la calificación más alta del valor sensorial de calidad promedio de las muestras evaluadas.

OBJETIVOS

General

Determinar el efecto que tiene la velocidad del tornillo del extrusor sobre las variables respuesta en las propiedades fisicoquímicas y el valor sensorial para la fabricación de cereales expandidos.

Específicos

1. Determinar el efecto de la velocidad del tornillo de un extrusor en la densidad y el tamaño de la partícula de cereales expandidos a base de harina de arroz sin cobertura.
2. Definir el efecto de la velocidad del tornillo de un extrusor en la humedad y porcentaje de proteínas de cereales expandidos a base de harina de arroz sin cobertura.
3. Describir el efecto de la velocidad del tornillo de un extrusor en el valor obtenido en un análisis sensorial de escala nominal de 0 a 5.
4. Identificar la velocidad del tornillo más adecuada para la producción de cereales expandidos a base de harina de arroz.

INTRODUCCIÓN

Según lo descrito por González, “la extrusión es una operación utilizada para expandir harinas que se utilizan en la producción de snacks y cereales. Puede definirse como un proceso que involucra el transporte de un material bajo ciertas condiciones controladas, forzándolo a pasar por una boquilla de una dada geometría y con un caudal masivo pre-establecido, durante este transporte se produce la cocción parcial o total de los componentes de la mezcla”.¹

El cocimiento de las harinas se produce en condiciones de alta presión y temperatura; además de que se produce en una pequeña cantidad de tiempo, debido a esto se observan cambios considerables en las características del producto final.

Existen distintos tipos de extrusores, como los del tornillo y los de huso simple. Debido a que el extrusor utilizado en la empresa es del tornillo, la presente investigación se hará para este tipo de extrusor.

Durante el proceso de extrusión existen ciertas variables de operación que afectan de manera directa o indirecta las propiedades fisicoquímicas del producto final. Principalmente afecta condiciones como la humedad y la densidad del producto; también tiene un efecto en la composición y distribución de almidones y proteínas en la harina cocida.

¹ GONZALEZ R.J. et al. *Extrusión-cocción de cereales*. p.104.

Estos cambios influyen considerablemente en el aspecto sensorial del producto, el cual es una parte muy importante en la fabricación de los productos de esta empresa. Todas estas variables pueden relacionarse para tener una mejor perspectiva y un mayor control durante el proceso de fabricación de cereales expandidos desde sus puntos críticos de producción.

1. ANTECEDENTES

Debido a las normas de calidad de los productos realizados en la empresa es necesario contar con ciertas especificaciones que le dan un límite a las propiedades fisicoquímicas y sensoriales en los productos que son llevados al mercado. La empresa ha realizado estudios sobre el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas de los cereales en función del tiempo para identificar variaciones considerables durante la producción.

Se han realizado evaluaciones en otros productos para relacionar las variables de proceso con las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del producto. Por medio de regresiones de multivariantes se han logrado obtener curvas de nivel donde se representen las tres variables a estudiar del producto.

Se sabe que el proceso de extrusión afecta a las propiedades químicas de la materia prima que ingresa. Perez-Navarrete junto a otros autores ha realizado estudios que demuestran mediante análisis proximal se pueden apreciar los cambios en la composición de proteínas, cenizas y humedad en harina durante su extrusión. Se determina que la extrusión es la causante de este cambio químico en la harina.

José Guerra ha realizado una investigación similar evaluando el efecto del tiempo de cocimiento del maíz sobre las propiedades físicas y sensoriales de las tortillas como medida de control. En este trabajo de investigación se obtuvieron una serie de regresiones de variable múltiple para determinar el

comportamiento del producto final en función de la variable de proceso que es el tiempo de cocimiento del maíz.

Por último, en la misma empresa se realizó un estudio sobre la veracidad de utilizar un equipo de medición de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) para la realización de análisis proximales demostrando que es una opción viable si previamente se le ha realizado una calibración con resultados de un laboratorio externo.

2. EXTRUSIÓN DE ALIMENTOS

La extrusión en alimentos es una operación unitaria que se ha estado practicando por más de 50 años. Inicialmente solo se utilizaba para realizar mezclas y para producir macarrones y cereales listos para comer. “Actualmente se utiliza para una gran gama de productos alimenticios tales como alimentación animal, acuicultura, *snacks* y aperitivos, cereales para desayuno, productos para confitería, alimentación infantil, análogos de carne, sopas, etc.”²

Así mismo, se trata de una actividad compatible con otras aplicaciones de mejora de los productos existentes (sensoriales, nutricionales, ingredientes funcionales, estabilidad, etc.), o con actividades de valoración de la aptitud de nuevos ingredientes, al procesarlos mediante extrusión.

2.1 Cocción por extrusión

La cocción por extrusión es una forma especializada y única en el procesado de materiales amiláceos debido a que se trata de una cocción a relativamente bajos niveles de humedad, comparado con el horneado convencional o la cocción de masas y pastas. Los niveles normales de humedad utilizados están en el intervalo del 10 % al 40 % y a pesar de estos bajos valores de humedad el material se transforma en un fluido dentro del extrusor.

²MERCIER, C. *Extrusion cooking*. p.1.

Bajo estas condiciones las características físicas de las materias primas, tales como el tamaño de la partícula, la dureza y el grado de plastificación alcanzado durante el proceso de extrusión, llegan a ser determinantes para la transformación final del material.

Otra característica de la cocción por extrusión, como ya se dijo, es que resulta ser un proceso HTST pero que, además, debido a los esfuerzos de corte que se desarrollan durante el transporte del material en el extrusor, la temperatura se eleva rápidamente (conversión de energía mecánica en calor por flujo viscoso) y así la estructura del material sufre transformaciones profundas en pocos segundos.

La masa de la partícula (harina de cereales y/o legumbres) con una cantidad de agua es convertida en un fluido de muy alta viscosidad.

A medida que ese fluido es transportado, los elevados esfuerzos de corte en combinación con la alta temperatura, transforman a los elementos estructurales del material, es decir, a los gránulos de almidón y a las estructuras proteicas. Por ejemplo: en la elaboración de productos expandidos tipo *snack* el almidón no solo pierde la estructura cristalina sino también la mayor parte de la estructura granular desaparece y los componentes del gránulo (moléculas de amilosa y amilopectina), son dispersados en la matriz; en la elaboración de proteína vegetal texturizada (PVT), las partículas proteicas (o cuerpos proteínicos) son dispersadas y las reacciones proteicas desnaturalizadas, alineándose en las corrientes de flujo.

De esta manera se facilita la formación de nuevos enlaces entre cadenas (*cross links*), los cuales otorgan al producto la resistencia a la disgregación por hidratación durante la preparación del alimento del que forma parte la (PVT).

En la cocción por extrusión de materiales amiláceos, el término “grado de cocción” (GC) implica, no solo la pérdida de la estructura cristalina (mayor digestibilidad) sino también el grado de destrucción de la estructura granular del almidón.

2.2 Componentes de la extrusora

- El tornillo de extrusión

El tornillo o husillo es un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal. Este es considerado como una de las partes más importantes ya que transporta el material, lo mezcla y lo calienta.

La velocidad a la que se hace girar el tornillo es considerada una variable de proceso, ya que de esta manera se ingresa energía mecánica al sistema la cual tiene pérdidas en función de la disipación por medio de fricción que exista en este.

- Cilindro

El cilindro alberga en su interior al tornillo. La superficie es rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportarán el material y permitir así que fluya a través de la extrusora.

- Garganta de alimentación

Se encuentra debajo de la tolva y se encarga de conectar la tolva con el extrusor.

- Tolva

La tolva es el contenedor que se utiliza para introducir el material a la máquina. Se diseñan con un volumen para albergar material para dos horas de trabajo.

- Cabezal y boquilla

Se encuentra al final del cilindro. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros.

Su función principal es la de moldear la forma final del producto que se esté realizando.

Las boquillas se pueden clasificar por la forma del producto: boquillas anulares, planas, circulares, etc.

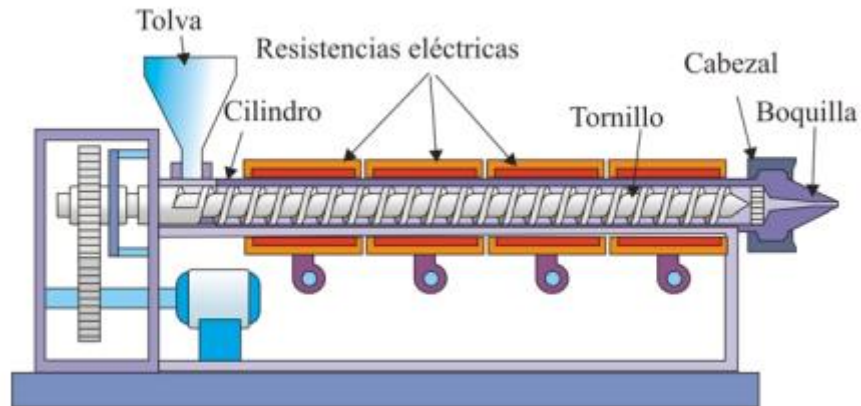
Se pueden distinguir tres partes diferenciadas en todas las boquillas: el canal de entrada, el distribuidor y la zona de salida.

Las dimensiones de la boquilla no son necesariamente las del producto extruido.

Esto es debido a varias razones: la recogida del material, el enfriamiento y el fenómeno de relajación contribuyen a que el material cambie de tamaño.

A continuación, se presenta el esquema de un extrusor:

Figura 1. **Esquema de los componentes de una extrusora**



Fuente: Beltran, R. *Tecnología de polímeros*. p. 104.

2.2.1. **Clasificación de los extrusores**

Existen dos tipos de extrusores: simple o de doble tornillo. Cada tipo de extrusor tiene un distinto principio de operación y aplicaciones en el proceso.

Los extrusores pueden clasificarse desde un punto de vista termodinámico, dependiendo del desarrollo de presión o de la intensidad de corte. Desde un punto de vista termodinámico, los extrusores pueden trabajar bajo las siguientes propiedades:

- **Autógenos:** cercanamente adiabáticos. Los extrusores generan su propio calor por la conversión de la energía mecánica durante el flujo del proceso.
- **Isotérmicos:** por lo cual pueden mantener una temperatura constante.

- Politrópicos: es decir, que operan bajo condiciones tales que la energía mecánica se puede disipar y es transferida por calor.

“Esta clasificación se torna importante solamente en el modelado del comportamiento de la cocción en el extrusor. Este modelo puede resultar complicado ya que la mayoría de extrusores son politrópicos.”³

2.2.2 Principales variables del proceso de extrusión

El grado de cocción de la harina es directamente proporcional a la temperatura y la compresión del tornillo e inversamente proporcional a la humedad y el diámetro de la boquilla. Al aumentar la velocidad a la que trabaja el tornillo, esta se refleja en un menor tiempo de residencia dentro del extrusor y, por ende, en un menor grado de cocción de la harina.

Se debe considerar también el hecho de que, a un mayor gradiente de velocidad, los esfuerzos de corte y de fricción aumentan, generándose pérdidas de calor en este proceso que a su vez depende de la temperatura y presión a la que se trabaja. Estas pérdidas de energía dependerán considerablemente del tipo de material (dureza, forma, distribución de las partículas) que se utilice.

Las características de la masa que fluye dentro del extrusor y sus propiedades finales dependen de su composición: humedad, materia grasa, fibra, almidón, proteína, sales, emulsionantes y del diseño particular que provoca mayor o menor interacción partícula-partícula.

³ RIAZ, N. *Extruders in food applications*. p 84.

Definidas las condiciones de extrusión (relación de compresión del tornillo, velocidad de rotación, diámetro de la boquilla, nivel de temperatura a controlar (tanto en la zona del cilindro como de la boquilla), material a extrudir (tamaño de la partícula, humedad, etc.), la operación es comenzada alimentando material con una humedad suficiente para evitar una excesiva presión inicial; luego, se introduce el material en estudio manteniendo siempre llena a la zona de alimentación del tornillo. La toma de muestras se realiza una vez que se alcanza el estado estacionario, es decir, cuando el caudal de salida (Q_s), la presión y el torque (medido sobre el eje del motor), se mantienen constantes. Este caudal de salida se refiere a la humedad de alimentación (Q_a), tras haber sido previamente determinado el caudal másico de sólido seco (Q_{ss}).

Típicamente los experimentos sobre extrusión examinan solamente dos o tres variables de proceso, pero muchos factores son importantes. Las operaciones de extrusión pueden seleccionar parámetros identificados como parámetros primarios y a su vez determinar un segundo set de factores: energía mecánica específica, temperatura del producto y presión.

2.3 Energía mecánica específica (EME)

Un análisis general del proceso de extrusión puede ser utilizado para relacionar el grado de conversión del material con la energía de los valores involucrados. En el balance general de energía presente en el extrusor se considera lo siguiente:

- La energía mecánica proporcionada por el motor, P_m
- La energía en forma de calor proporcionada por el medio calentante, P_h
- El calor absorbido por el medio enfriante, P_l
- Las pérdidas debidas a la fricción y disipación de calor, P_p

- La energía absorbida por el material durante la cocción, P_c

La ecuación general de energía dentro del extrusor queda, entonces, de la siguiente manera:

$$P_m + P_h = P_l + P_p + P_c \text{ (Ecuación 1)}$$

Esta ecuación determina que la energía transferida al material o tiene un origen calorífico o mecánico. Un producto extruido es usualmente medido cualitativamente en el grado de transformación y cocimiento del producto final por la energía mecánica específica (EME). Esta energía es el promedio de la energía mecánica suministrada para el flujo del material a extruir. El EME tiene dimensionales de Wh/t, Wh/kg o J/kg.

3. CAMBIOS QUÍMICOS Y NUTRICIONALES DURANTE LA EXTRUSIÓN

Durante el modelado de la extrusión de alimentos se consideran las variaciones en la humedad, proteínas y almidones como cambios experimentales. Cinco cambios químicos o fisicoquímicos pueden ocurrir durante el proceso de extrusión: la unión, escisión, pérdida de la conformación original, recombinación de fragmentos y degradación térmica.

Tabla I. **Cambios químicos y fisicoquímicos durante la extrusión de alimentos**

Cambios químicos	Cambios fisicoquímicos
Escisión Recombinación de fragmentos Degradación térmica	Unión de moléculas pequeñas Pérdida de la composición original Pérdida de la matriz

Fuente: RIAZ, N. *Extruders in food application*. p. 128.

El tipo de extrusor usado ciertamente afecta sobre las reacciones químicas que se producen. Extrusores largos tienden a tener cilindros más y relativamente mayor tiempo de residencia que los utilizados en una planta piloto.

3.1 **Proteínas**

Se producen cambios muy drásticos en las proteínas durante la extrusión, la desnaturalización de las mismas es la variación más considerable.

La mayoría de las enzimas pierden su actividad dentro del extrusor a menos que se produzca estabilidad de calor y de corte. La solubilidad en agua o en soluciones salinas del producto desciende luego de la extrusión.

El tema de los efectos de la extrusión en proteínas ha sido nombrado en artículos realizados por Arêas y Camire. Se conoce que durante la extrusión los puentes disulfuro son rotos y pueden reformarse. Esto ayuda a la formación de agregados insolubles. Las proteínas de mayor peso molecular se rompen en subunidades más pequeñas.

Tabla II. **Cambios en las proteínas durante la extrusión**

Cambios funcionales	Cambios nutricionales
Disminución de la solubilidad en agua y buffer diluido Textura	Reducción de la lisina Mejora la digestibilidad

Fuente: RIAZ, N. *Extruders in food application*. p. 128.

3.2 **Gelatinización de almidones**

Se conoce como gelatinización al proceso donde los gránulos de almidones presentes que son insolubles en agua fría se calientan a temperaturas entre los 60 °C y 70 °C. En este momento se inicia un proceso de absorción de agua en las zonas menos organizadas y más accesibles de la cadena de almidones.

A medida que se incrementa la temperatura se absorbe una mayor cantidad de agua y el gránulo se hincha y aumenta su volumen hasta un punto máximo en el que estos se romperán parcialmente y la amilosa y la amilopectina se dispersan en el seno de la disolución.

4. ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL

El análisis químico proximal es una metodología por la cual es posible cuantificar el valor nutricional de un alimento o materia prima y sirve para la formulación específica de un alimento para consumo humano y animal, así como para el tipo de producción.

4.1 Medición de proteínas (AOAC 1998, patrón primario)

Cuando se habla de la composición de las proteínas se puede decir que tienen un contenido relativamente constante de elementos individuales como:

- Carbono 50 % – 55 %
- Hidrógeno 5 % – 8 %
- Oxígeno 20 % – 25 %
- Nitrógeno 15 % – 17 %
- Azufre 1 % – 03 %
- Fósforo 0.2 % – 1.5 %

De estos el nitrógeno distingue a las proteínas de las grasas y carbohidratos, por el hecho que considera que el nitrógeno esté presente en las diferentes proteínas en porcentajes más o menos constantes al 16%, de tal manera que lo que se obtiene a través del Kjeldahl es el porcentaje de nitrógeno presente en la muestra.

4.2 Medición de humedad (AOAC 1998, patrón primario)

Para la medición de humedad se pesaron 2 gramos de la muestra para ingresarlos en un horno que se calentaron entre 98 °C y 100°C. La muestra se contuvo durante dos horas y se calculó el diferencial de masa en la muestra.

5. EQUIPO DE MEDICIÓN NIR (MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE MUESTRA)

La espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano (por sus siglas en inglés NIR, o ERI) es utilizada como un método rápido y exacto para la medición de la composición química de cereales y forrajes.

En los últimos años se han desarrollado numerosas aplicaciones para evaluar la composición, el procesamiento y la certificación de la calidad de los alimentos consumidos por los humanos, así como para los animales.

Para certificar esta metodología es necesario determinar valores de referencia de las propiedades a evaluar; por eso, primero, se realizan análisis por medio de metodologías certificadas que son ingresadas como los valores de referencia en el aparato de medición NIR. Se ha demostrado la validez de los resultados que ofrece este aparato.

6. ANÁLISIS SENSORIAL

Para determinar las características sensoriales de un alimento es necesario realizar pruebas sensoriales orientadas al producto. La identificación y desarrollo de las pruebas sensoriales es un factor muy importante en la industria alimentaria ya que con este se puede realizar el desarrollo de nuevos productos y la reformulación de productos existentes. También, es posible determinar cómo afectan los cambios realizados en el producto, tal es el caso de nuevas formas de procesado y de empaque. La función principal es el mantenimiento de las normas de control de calidad.

En las pruebas orientadas hacia el producto, se emplean pequeños paneles entrenados que funcionan como instrumentos de medición. Los paneles entrenados se utilizan para identificar diferencias entre productos alimenticios similares o para medir la intensidad de características tales como el sabor (olor y gusto), textura o apariencia.

6.1 Pruebas de evaluación de intensidad de escalas

En esta prueba se requirió que los panelistas evaluaran la intensidad perceptible de un conjunto de muestras, utilizando escalas lineales o categorizadas. Con estas pruebas se determinó la magnitud de la diferencia entre las muestras y se pudo ordenar la calidad de las muestras en función del grado de intensidad que tuvieron.

Los panelistas marcaron la intensidad de una característica específica, percibida en cada muestra codificada. Para ello se utilizaron una escala de intervalo que va de menor a mayor intensidad. Las muestras fueron presentadas de una en una a cada uno de los panelistas y se les pidió que marcaran el nivel de intensidad que consideran para cada una de las muestras.

Para analizar los datos de la escala de categorías, las categorías se convirtieron en puntajes numéricos, asignando números sucesivos a las categorías. Normalmente, se da el número 1 a la categoría de menor intensidad. Para analizar los resultados de la escala lineal, las marcas de los panelistas se convirtieron en puntajes numéricos midiendo la distancia en cm entre el extremo izquierdo o punto de menor intensidad en la escala y las marcas de los panelistas, convirtiéndolas mediante la proporción de $0,5 \text{ cm} = 1$ unidad del puntaje. Los puntajes numéricos de cada muestra se tabularon y analizaron mediante el análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existieron diferencias significativas entre las muestras.

Estas pruebas se repitieron varias veces para obtener la mayor cantidad de repeticiones de los datos. Esta acción permitió medir mejor el error experimental. El uso de datos repetitivos permitió también que el experimentador calificará el rendimiento del panel, examinando los resultados de cada repetición, para ver si existieron diferencias significativas entre los promedios de cada una.

7. METODOLOGÍA

7.1 Variables

Tabla III. Variables a medir para la investigación

Variable	Dimensional	Tipo de variable	Forma de medición
Velocidad del tornillo de extrusor	RPM	Independiente	Medición en pantalla de extrusor
Densidad	kg/m ³	Dependiente	Método interno
Tamaño de la partícula	Cm	Dependiente	Método interno
Humedad	Adimensional	Dependiente	Equipo NIR
Proteínas	Adimensional	Dependiente	Equipo NIR
Factor de calidad	Adimensional	Dependiente	Grupo de panelistas entrenados

Fuente: elaboración propia.

7.2 Delimitación de campo de estudio

Debido a las especificaciones que se deben cumplir, se evaluaron velocidades tales que los valores obtenidos sean cercanos a los valores aprobados por el departamento de aseguramiento de calidad.

Para la reducción de variables de bloque en el experimento, se tomaron muestras cuando el extrusor trabajó con los mismos tornillos y moldes del cereal.

7.3 Recursos humanos disponibles

- Investigador: José Rodolfo Reyes Boche
- Asesora: Ing. Qca. Hilda Palma
- Asesor externo: Ing. José Miguel Guerra
- Grupo de panelistas entrenados de la empresa
- Se enviaron muestras para análisis patrón a un laboratorio externo

7.4 Recursos materiales disponibles

Para la fabricación del producto a evaluar se contó con un extrusor de doble tornillo al que ingresó materia prima proporcionada por la empresa.

Para los análisis químicos se contó con un equipo de medición de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) proporcionado por la empresa.

Se contó con aparatos y metodologías utilizados por la empresa para la medición de densidades y grosor de cereal.

7.4.1 Medición de análisis proximal

- Materiales y equipo:
Equipo de medición NIR para análisis proximal.

- Procedimiento
 - Calibración: el método utilizado necesita valores de referencia para poder trabajar, es decir se necesita realizar una calibración inicial. Para ello se tomaron muestras representativas de la harina a analizar antes y luego de la extrusión y se hizo una evaluación en un laboratorio externo. Los resultados obtenidos se ingresaron como datos de referencia en el aparato.
 - Procedimiento principal: se tomaron muestras de la harina antes y luego de la extrusión. El aparato NIR determinó los valores del porcentaje de proteínas.

7.4.2 Medición de densidad

- Materiales y equipo

Se utilizó el recipiente utilizado por el departamento de aseguramiento de calidad para la medición de densidad.

El recipiente se taró previamente para conocer su masa inicial. Seguidamente se llenó dicho recipiente totalmente y sin acomodar el producto. Se realizó nuevamente el pesaje del recipiente.

7.4.3 Medición de porcentaje de humedad

- Materiales y equipo

Equipo de medición NIR para análisis proximal.

- Procedimiento
 - Calibración: el método utilizado necesita valores de referencia para poder trabajar, es decir se necesita realizar una calibración inicial. Para lo cual se tomaron muestras representativas de la harina a analizar antes y luego de la extrusión y se hace una evaluación en un laboratorio externo. Los resultados obtenidos se ingresaron como datos de referencia en el aparato.
 - Procedimiento principal: se tomaron muestras de la harina antes y luego de la extrusión. El aparato NIR determinó los valores de humedad.

7.4.4 Medición de grosor de la partícula

- Materiales y equipo

Equipo de medición de tamaño de cereal proporcionado por la empresa (regla)

- Procedimiento

Se colocaron diez cereales expandidos en línea de la manera más recta posible y se realizó la medición. A esta medición se le determinó el valor promedio de cereal para obtener el valor de grosor unitario del cereal.

7.5 Técnica cualitativa

Para el análisis sensorial de las muestras se utilizó un grupo de panelistas entrenados, quienes realizaron una evaluación de intensidad de escalas con valores del cero al cinco. La boleta utilizada se presenta en la sección de anexos.

Se evaluó el aroma, color, apariencia, textura y sabor para cada muestra. Se realizó este procedimiento a todas las velocidades utilizadas en el estudio. El valor que se utilizó para las gráficas es el resultado promedio de todas las secciones evaluadas.

7.6 Técnica cuantitativa

Para la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de las muestras y para la evaluación de los valores de calidad sensorial se utilizaron métodos estadísticos.

- Regresión no lineal: a los resultados obtenidos se les realizó un modelado matemático, de tal manera que se obtuvieran funciones que relacionaran las variables de respuesta con la velocidad del tornillo del extrusor.

7.7 Recolección y ordenamiento de la información

Se tomaron muestras a seis velocidades de extrusión, con tres repeticiones para cada variable. Se realizaron un total de cuatro corridas haciendo un total de 72 casos a evaluar.

Las velocidades evaluadas fueron las siguientes: 170, 180, 190, 200, 210 y 220 rpm. Los rangos utilizados por la empresa actualmente están incluidos dentro de este rango de operación.

7.8 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se utilizó la siguiente tabla para el ordenamiento de los datos a evaluar:

Tabla IV. **Tabla para ordenamiento de datos**

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales

Fuente: elaboración propia.

7.9 Análisis estadístico

Se realizaron métodos de análisis de regresión no lineal para poder realizar gráficas que relacionan las propiedades fisicoquímicas: densidad, humedad, porcentaje de proteínas y tamaño de la partícula y que demostraron el comportamiento de los fenómenos. Se utilizó Excel 2007 para realizar estas gráficas.

7.10 Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Se utilizaron modelos de regresión no lineales para evaluar los datos, para lo cual se escogió entre regresiones polinomiales y exponenciales. Se determinó la mejor regresión en los datos, lo que significa el mayor ajuste de la curva al comportamiento obtenido.

7.11 Programas a utilizar para el análisis de datos

Se utilizó Excel 2007 de Microsoft Corp ®.

8. RESULTADOS

A continuación, se presenta el efecto que tiene la velocidad del tornillo del extrusor sobre las variables respuestas en las propiedades fisicoquímicas y el valor sensorial en cereales expandidos.

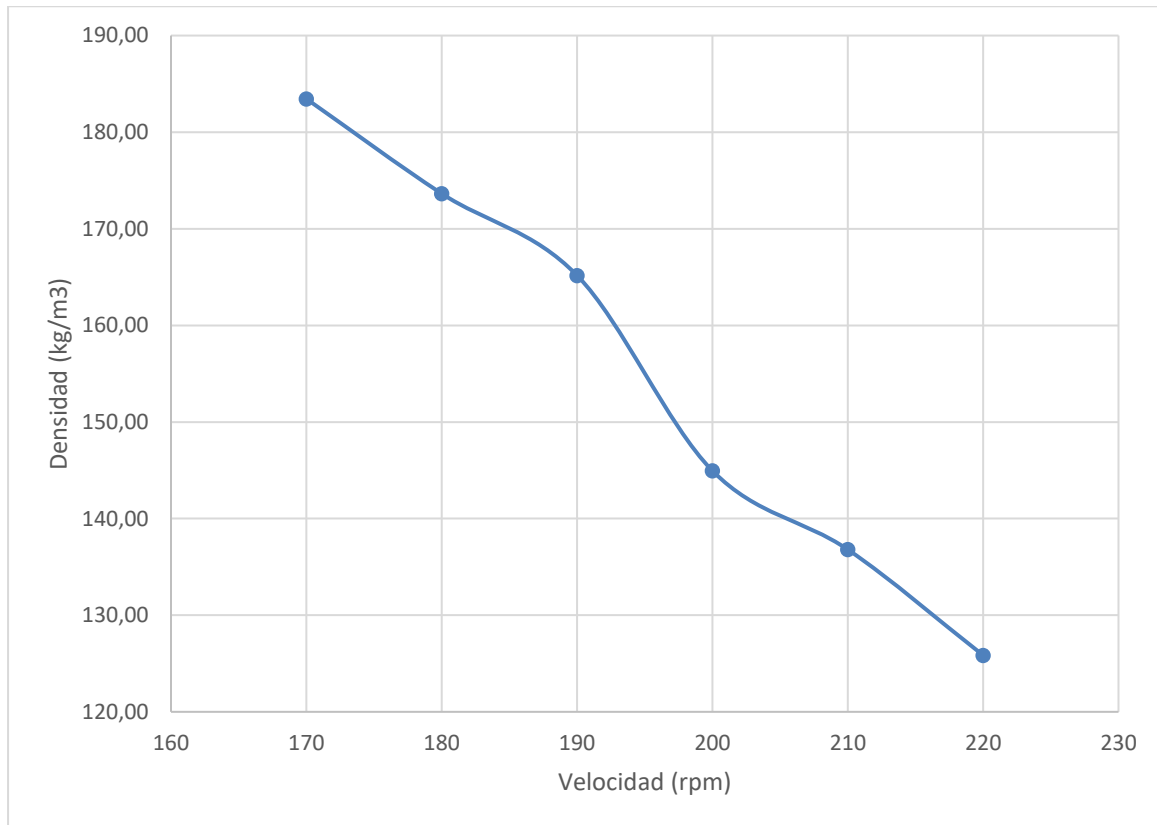
Tabla V. **Valores promedio de factores fisicoquímicos de cereales sin cobertura en función de la velocidad del tornillo**

Velocidad (rpm)	Densidad (kg/m ³)	Tamaño de la partícula (cm)	Porcentaje de proteínas	Humedad
170	183,45	0,83	7,86	7,88
180	173,64	0,85	7,69	7,60
190	165,17	0,83	7,65	7,78
200	144,95	0,86	7,40	7,71
210	136,80	0,87	7,39	7,52
220	125,85	0,89	7,38	7,53

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura se puede observar el efecto de la velocidad del tornillo del extrusor en la densidad de cereales expandidos.

Figura 2. **Densidad sin cobertura en función de la velocidad del tornillo**

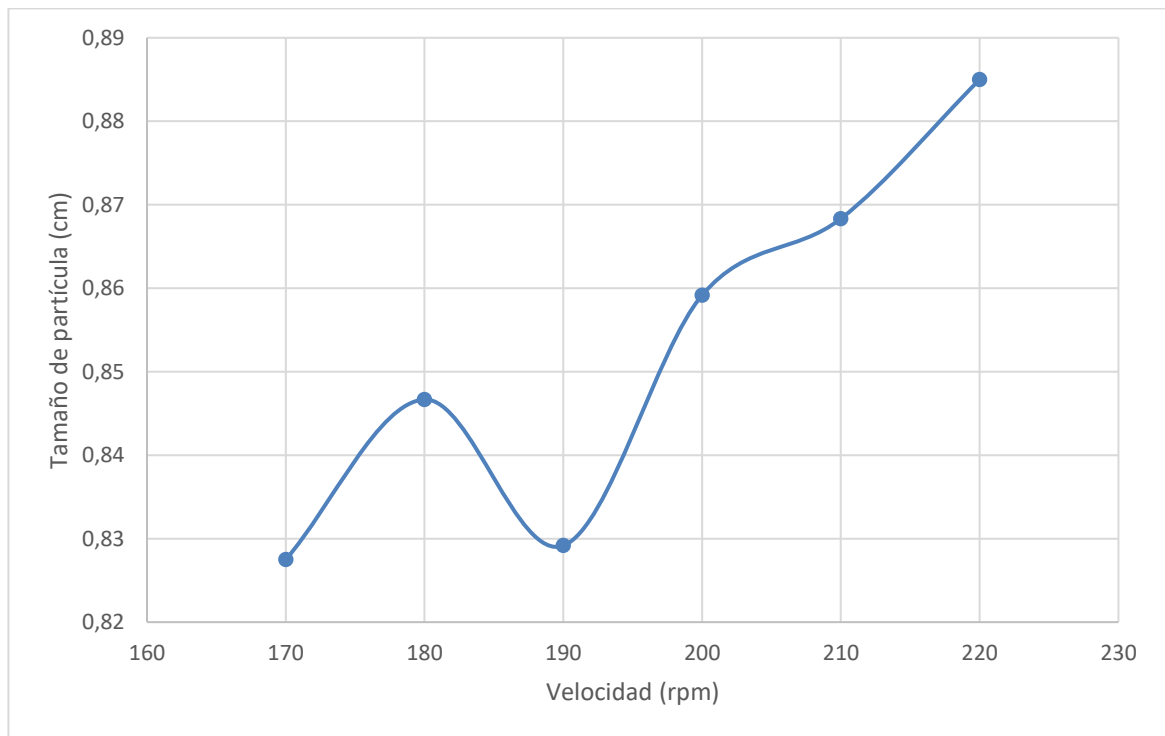


Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y = 0,0005x^3 + 52,474x - 3079,2$	[170-220]	0,991

Fuente: elaboración propia

Así mismo se observa el efecto de la velocidad del tornillo del extrusor en el tamaño de la partícula de cereales expandidos.

Figura 3. Tamaño de la partícula sin cobertura en función de la velocidad del tornillo

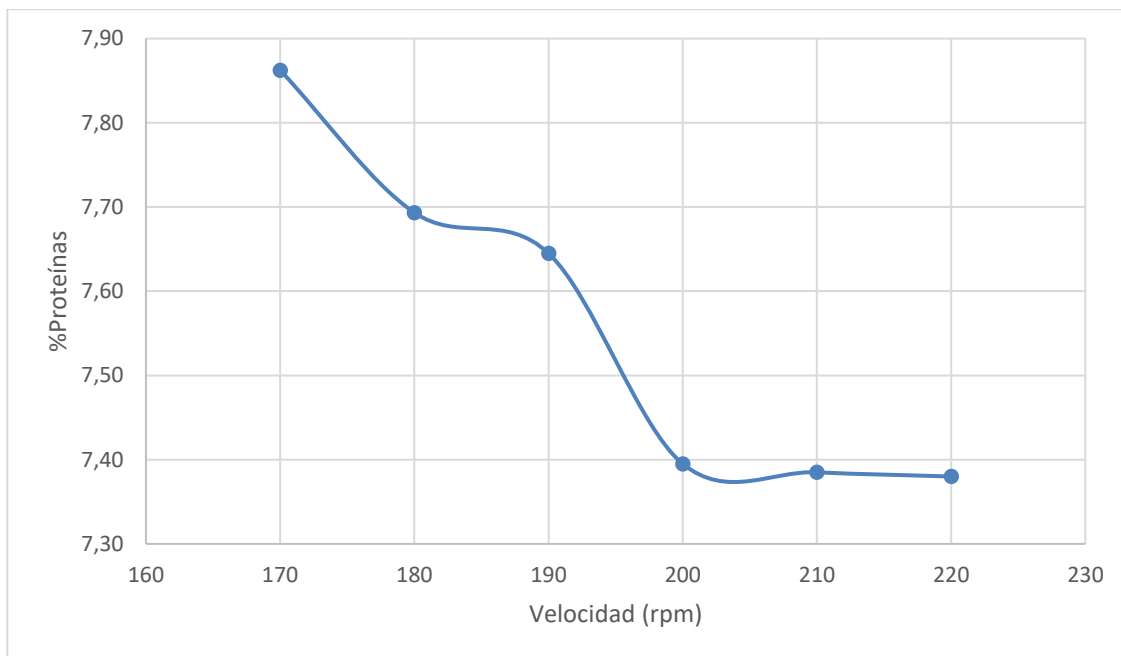


Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y = -1E-7x^4 + 9E-5 - 0,026x^2 + 3,43x - 164,99$	[170-220]	0,90

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el efecto de la velocidad del tornillo del extrusor en el porcentaje de proteínas de cereales expandidos.

Figura 4. **Porcentaje de proteínas sin cobertura en función de la velocidad del tornillo**

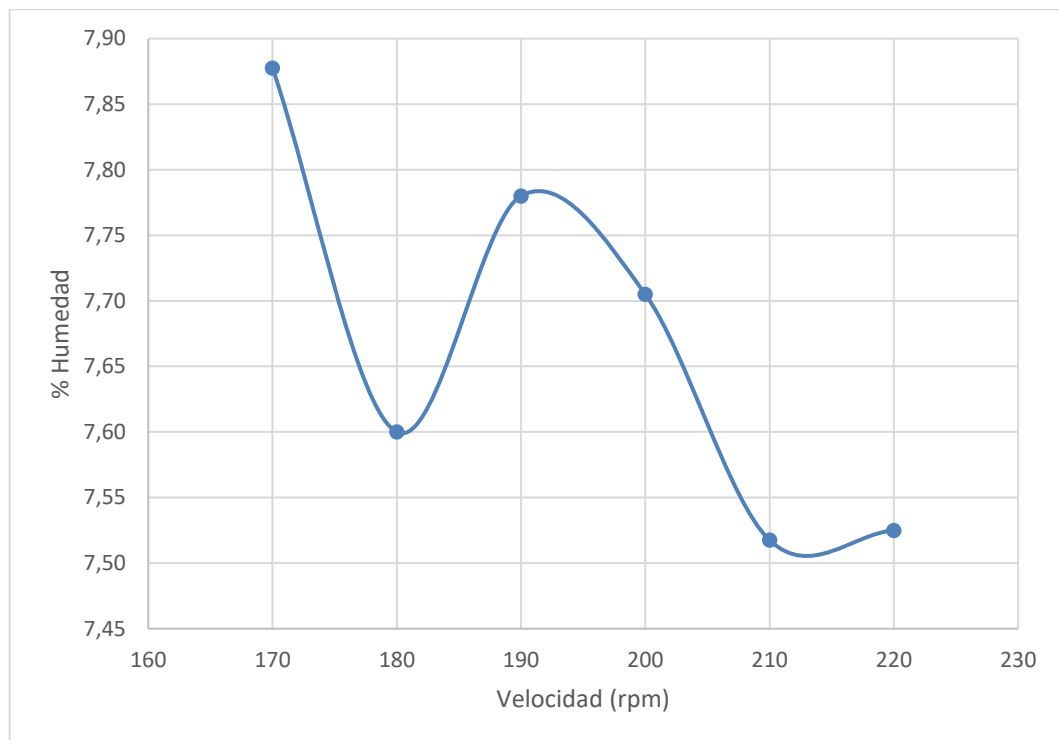


Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y= 30,9x^{0.264}$	[170-220]	0,90

Fuente: elaboración propia.

Así mismo se observa el efecto de la velocidad del tornillo del extrusor en la humedad de cereales expandidos.

Figura 5. **Humedad sin cobertura en función de la velocidad del tornillo**



Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y = 2E-6x^4 - 0,001x^3 + 0,48x^2 - 63,39 + 3086,3$	[170-220]	0,98

Fuente: elaboración propia.

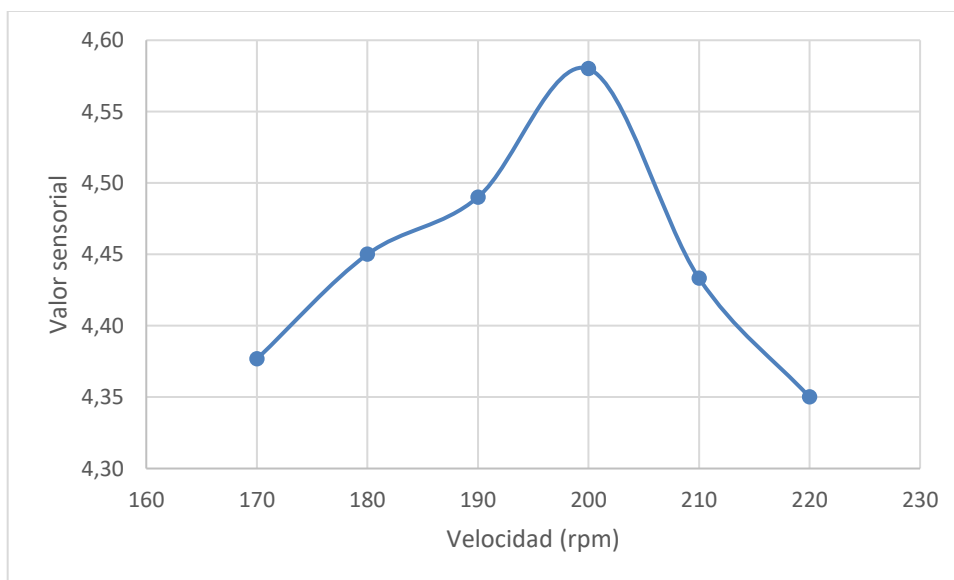
El efecto de la velocidad del tornillo del extrusor también afecta el valor sensorial de los cereales expandidos.

Tabla VI. **Sensorial promedio en función de la velocidad del tornillo**

Velocidad (rpm)	Sensorial
170	4,38
180	4,45
190	4,49
200	4,58
210	4,43
220	4,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Sensorial promedio en función de la velocidad del tornillo**



Fuente: elaboración propia.

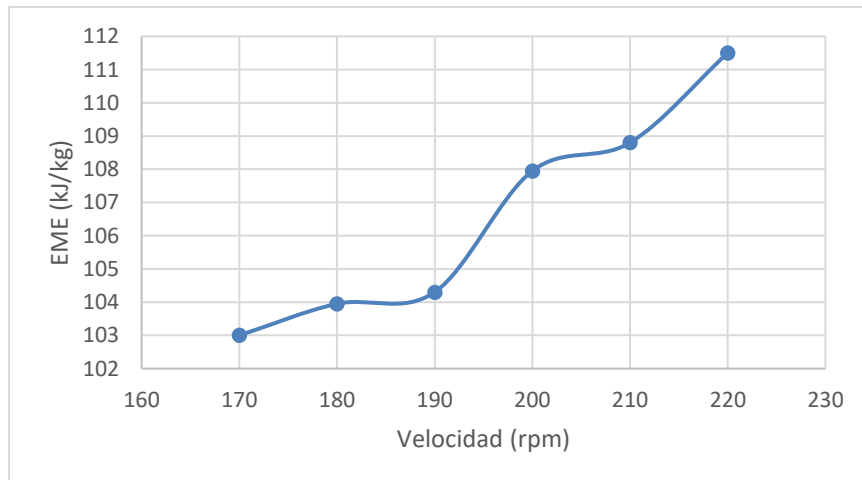
A continuación, se identifica la velocidad del tornillo adecuada para la producción de cereales expandidos a base de harina de arroz.

Tabla VII. **EME promedio en función de la velocidad del tornillo**

Velocidad (rpm)	EME (Wh/kg)
170	103
180	103,95
190	104,3
200	108,8
210	107,95
220	111,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **EME (energía mecánica específica) promedio en función de la velocidad del tornillo**



Fuente: elaboración propia.

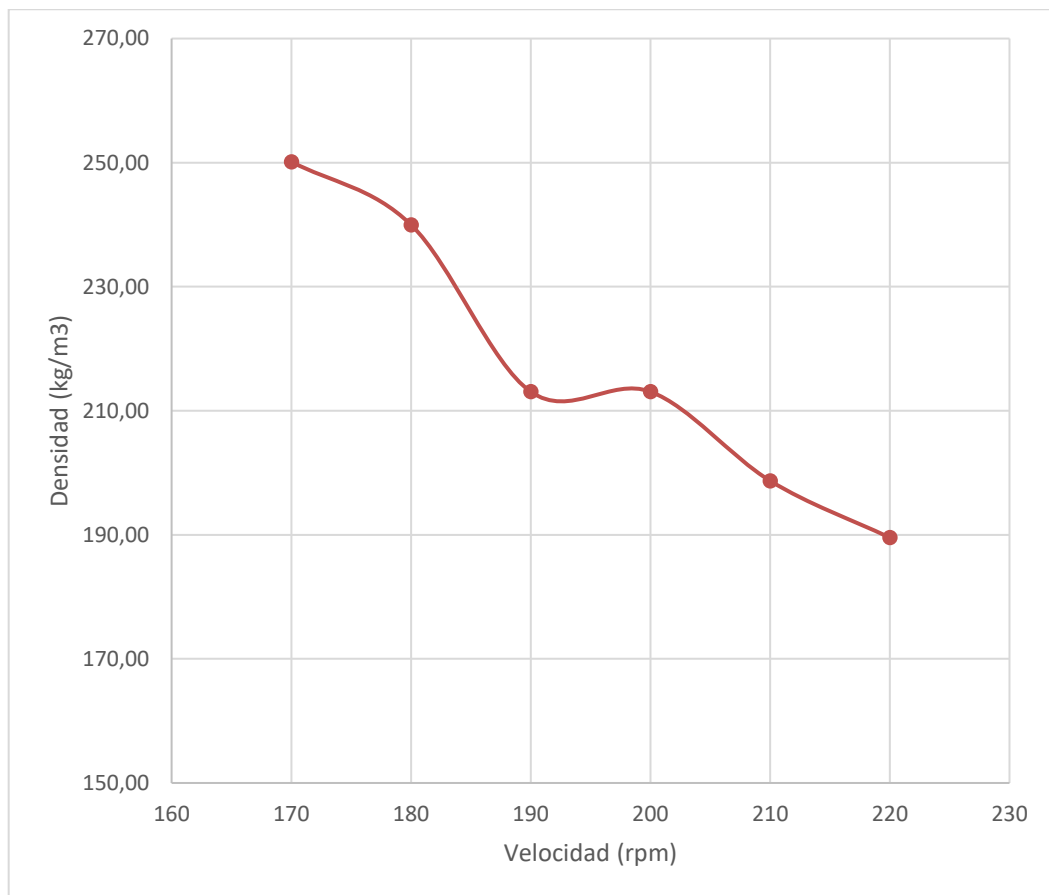
Tabla VIII. **Valores promedio de factores fisicoquímicos con cobertura en función de la velocidad del tornillo**

Velocidad (rpm)	Calificación sensorial	Densidad (kg/m ³)	Tamaño de la partícula (cm)	Porcentaje de proteínas	Humedad
170	4,38	250,15	0,79	5,13	2,81
180	4,45	239,99	0,83	4,99	2,65
190	4,49	213,07	0,85	5,14	2,37
200	4,58	213,08	0,86	4,86	2,07
210	4,43	198,71	0,83	5,17	2,01
220	4,35	189,55	0,88	5,35	2,10

Fuente: elaboración propia

Por último, se presenta el efecto de la velocidad del tornillo sobre las variables fisicoquímicas de los cereales expandidos con cobertura.

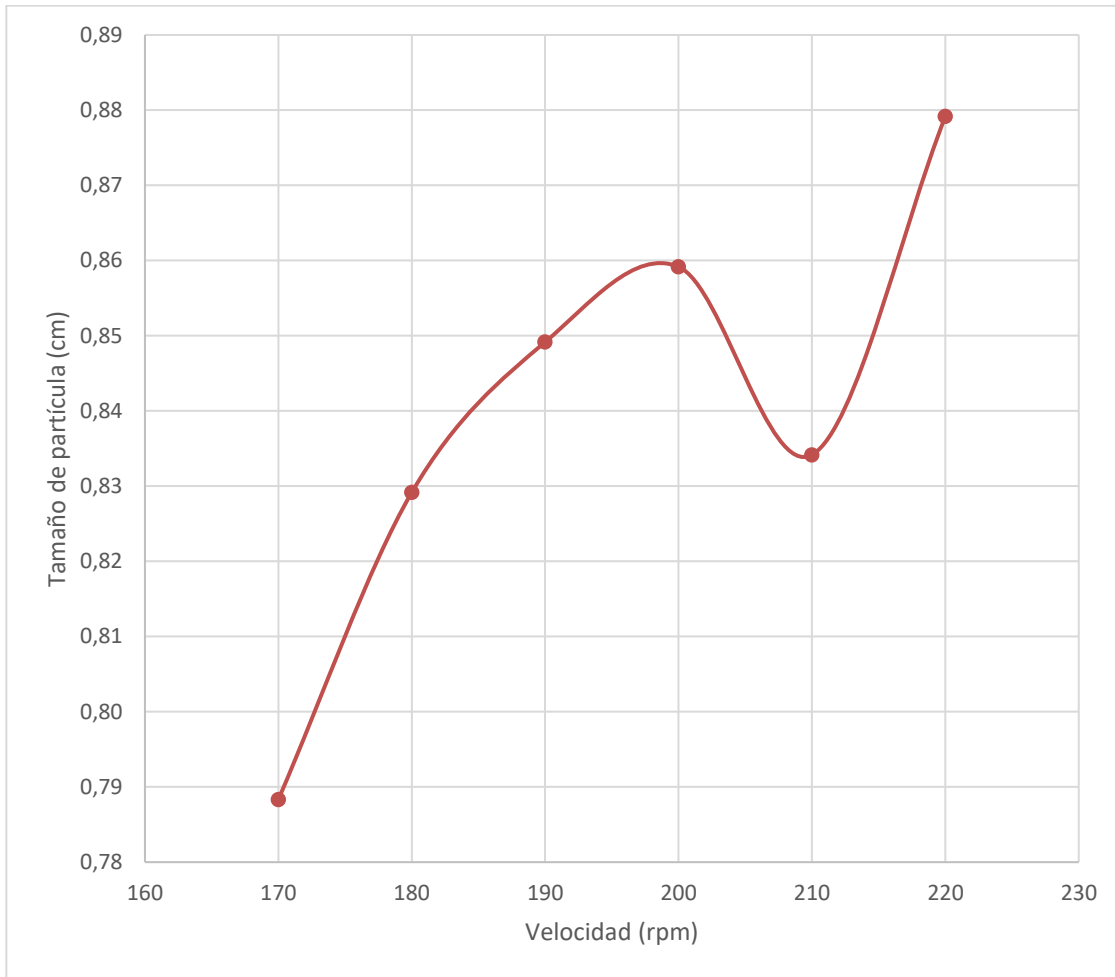
Figura 8. **Densidad con cobertura en función de la velocidad del tornillo**



Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y = -5E-5x^4 + 0,039x^3 - 11,33x^2 + 1455x - 69519$	[170-220]	0,9692

Fuente: elaboración propia.

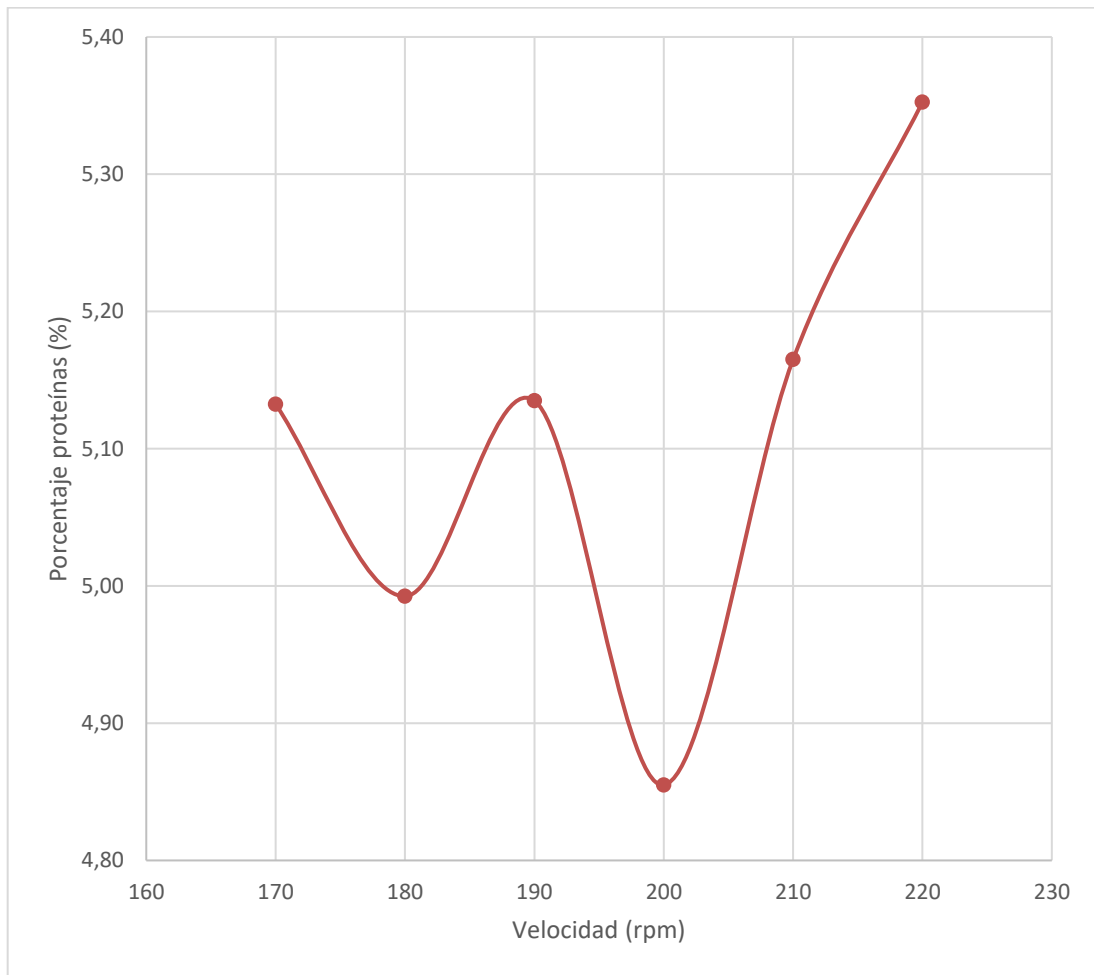
Figura 9. **Tamaño de la partícula con cobertura en función de velocidad del tornillo**



Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y = 2E-7x^4 + 0,0001x^3 - 0,0425x^2 - 5,355x - 252,42$	[170-220]	0,97

Fuente: elaboración propia.

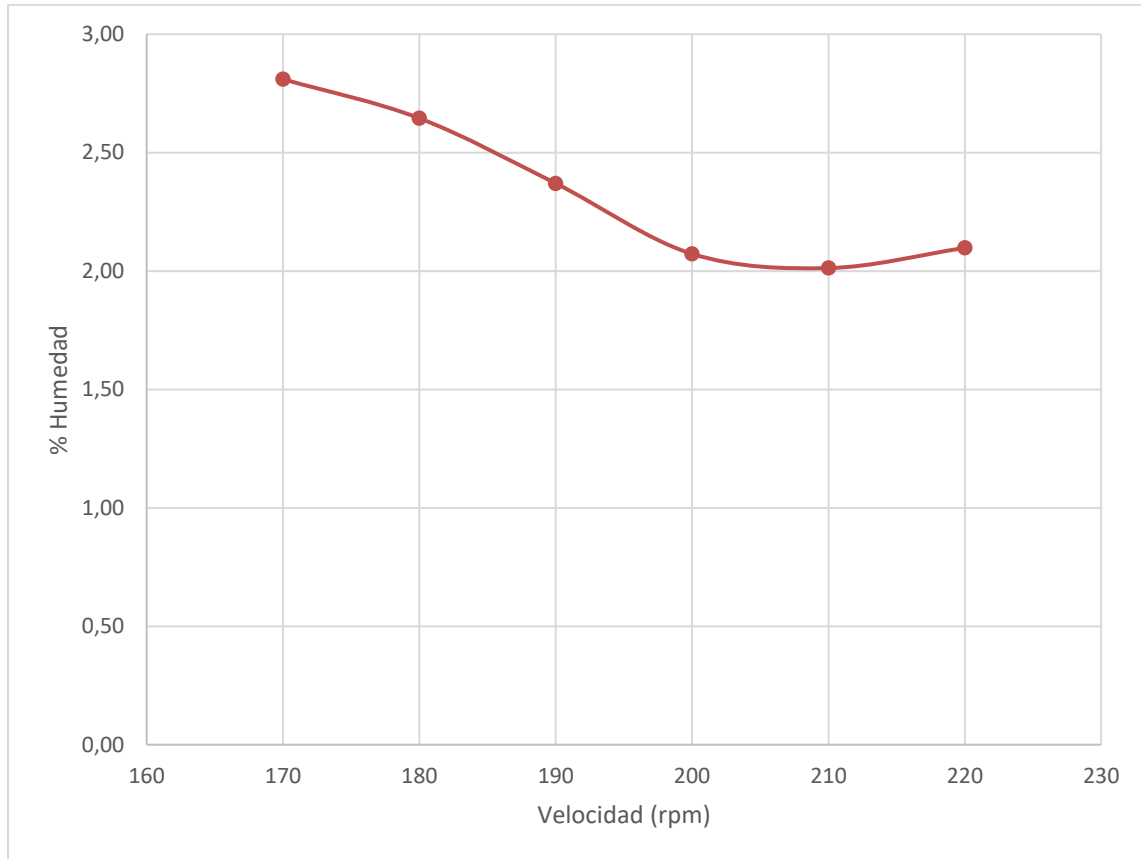
Figura 10. **Porcentaje de proteínas con cobertura en función de la velocidad del tornillo**



Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y=2E-8x^4+2E-5x^3-0,008625x^2+1,367x-70,873$	[170-220]	0,66

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Humedad con cobertura en función de velocidad del tornillo**



Color	Ecuación	Rango	R ²
	$Y = 2E-5x^4 - 0,0108x^2 + 1,997x - 119,46$	[170-220]	0,99

Fuente: elaboración propia.

9. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la figura 2 se observa el comportamiento de la densidad del cereal expandido a base de harina de arroz en función de la velocidad del tornillo. Con los datos obtenidos se determina que la densidad del producto es inversamente proporcional a la velocidad del tornillo. La expansión del cereal es debido a la gelatinización de los almidones presentes en la harina. Se observa que la expansión de los cereales aumenta proporcionalmente a la velocidad del tornillo.

Durante el proceso de extrusión se genera un balance de energía dentro de este. En el balance de energía que se produce dentro del extrusor, la energía mecánica proveniente del torque de los tornillos se combina con la energía térmica proveniente del agua utilizada. Esta energía es utilizada para cocinar la harina dentro del extrusor, pero también existen pérdidas debido a la fricción y el calor que absorbe el cereal durante el cocimiento.

Es decir que al aumentar la velocidad del tornillo se agrega una mayor cantidad de energía que puede usarse para cocinar la harina. Esta energía es absorbida en forma de calor por el cereal lo que aumenta su temperatura. Al tener mayor temperatura se absorbe una mayor cantidad de agua.

Al absorberse el agua se produce la expansión de las cadenas de amilosa y amilopectina en el cereal lo que produce el aumento de volumen en el cereal. Por tal razón cuando el extrusor trabaja a una velocidad de 220 rpm se observa la densidad más baja, es decir, el cereal más expandido. Caso contrario a 170

rpm en el que se produce una menor expansión y, por ende, la mayor densidad de todos los casos observados.

De esta forma se puede determinar que la velocidad del tornillo influye en la densidad final del producto. Así que es un factor importante en la producción de los cereales ya que la densidad determina cómo operará el extrusor. Si la velocidad es muy baja, se puede producir una sobrealimentación en el cilindro del extrusor, lo cual generaría un aumento considerable de la presión dentro de este llegando a tapar. Por otro lado, si la velocidad es muy rápida, se puede llegar al máximo de gelatinización de los almidones presentes en la harina, lo que genera un cereal muy quebradizo o incluso que no se produzca la forma final del cereal.

En la figura 3 se observa el efecto de la velocidad del tornillo en el tamaño de la partícula del cereal. La gráfica demuestra que no existe una influencia directa entre ambas variables ya que no existe una diferenciación muy considerable en el tamaño promedio del cereal para cada una de las velocidades evaluadas. Ya que el molde en la parte final del extrusor es el que determina principalmente el tamaño que tendrá el cereal. Se deduce que la velocidad del tornillo no influye considerablemente en el tamaño de la partícula del cereal.

Sin embargo, se puede apreciar que el bombeo que se produce en el extrusor genera variaciones en el tamaño promedio de la partícula del cereal, ya que este se produce cuando hay una sobrealimentación dentro del extrusor y se generan vacíos dentro del cilindro. Las partículas que se producen por bombeo tienden a ser más pequeñas en forma de esferas o en forma de ocho. A menor velocidad existe mayor sobrealimentación y, por lo tanto, el bombeo es más apreciable.

Existe un segundo factor que afecta el tamaño de la partícula en el cereal. Con el tiempo de uso del extrusor, la harina se va pegando a las aperturas del molde, esto genera que con el tiempo de uso el tamaño de la partícula sea menos uniforme hasta que se detiene la producción. Debido a la granulometría de la harina este problema se produce, afectando al tamaño de la partícula del cereal. De esta manera, se determina que la velocidad del tornillo no influye directamente en el tamaño de la partícula, pero junto a otra serie de factores determinan el tamaño promedio de la partícula del cereal.

En la figura 4 se observa el comportamiento del porcentaje de proteínas en función de la velocidad del tornillo. Los cambios bruscos de temperatura más la fricción que genera el corte en el molde del extrusor induce la desnaturalización de las proteínas. En la figura descrita anteriormente se observa que a 170 rpm existe el mayor porcentaje de proteínas en el cereal expandido y se produce un descenso del 2 % en la cantidad de proteínas a 180 rpm. El descenso continúa hasta la velocidad de 200 rpm en el cual el porcentaje tiende a mantenerse constante. Esto se debe a que se llega a un punto donde la desnaturalización de proteínas es máxima y el porcentaje tiende a estabilizarse. Se determina de esta manera que el porcentaje de proteínas desciende en función de la velocidad del tornillo hasta 200 rpm luego del cual tiende a estabilizarse.

Determinar el efecto que tiene el extrusor sobre el porcentaje de proteínas es importante ya que las proteínas que tiene esta harina tienen una influencia considerable en las propiedades organolépticas del producto. Durante el proceso de extrusión se produce la reacción de Maillard, donde se produce la glicación no enzimática de proteínas en la cual existe una modificación postraduccional de los grupos aminos presentes por la acción de azúcares reductores. Esta reacción produce el cambio de coloración en la harina al

tornarla en un color pardo claro y agregando un ligero sabor a cocido al cereal extruido.

En la figura 5 se muestra la variación del porcentaje de humedad en función de la velocidad del tornillo. Se puede observar que no existe una tendencia fija en este caso ya que la velocidad del tornillo no es el influyente directo del porcentaje de humedad presente en el cereal, pues en el proceso de extrusión se le agrega agua a la harina. Sin embargo, para la realización del experimento se mantuvo constante el flujo másico de agua durante el proceso. La variación puede deberse a la cantidad de agua que absorbe la harina durante su cocimiento y la transferencia de calor que se produce dentro del extrusor. Así se determina que la velocidad del tornillo no influye en el porcentaje de humedad del cereal expandido.

Además, se determinó la variación en la cantidad de energía mecánica específica (EME) utilizada en cada velocidad del tornillo como se puede apreciar en la figura 6. Aunque las variaciones no son muy considerables, se observa un aumento en la EME utilizada conforme aumenta la velocidad del tornillo. Como se explicó anteriormente, existe un balance de energía dentro del extrusor que relaciona la energía mecánica y térmica que ingresan con la energía absorbida por el cereal y las pérdidas por fricción y disipación de calor.

Conocer estas variaciones es importante ya que la cantidad de energía mecánica que se utilice para realizar el proceso influirá en los costos de energía utilizados por el motor que le proporciona esta energía a los tornillos. Comparando los datos obtenidos con los datos históricos de este extrusor se determina que no existe una gran variación en la EME para este cereal en función de la velocidad del tornillo, pero sí existe variación en relación a otros tipos de cereales que se producen en el mismo extrusor.

En la figura 7 se muestran los resultados promedio obtenidos en las pruebas sensoriales de cada conjunto de muestras en función de la velocidad del tornillo. Para esta parte de la experimentación se utilizó un grupo de panelistas entrenados que proporcionaron mediante su criterio una calificación de los siguientes aspectos en una escala de 0 a 5: aroma, color, apariencia, textura y sabor.

Ya que estas características son evaluadas en el producto que se entrega al consumidor, esta prueba se realizó con el producto final, es decir, con el cereal recubierto de jarabe. Los resultados de esta prueba sensorial son meramente cualitativos y presentan la opinión pura de los panelistas entrenados utilizados durante la realización de las pruebas.

Se puede observar que las velocidades de 190 y 200 rpm tienen las calificaciones más altas en la prueba sensorial ya que, estas tienen las mejores calificaciones en apariencia y textura, los dos aspectos que presentan la mayor variación en cada una de las distintas velocidades seguidas del color final del producto. El aroma del producto es proporcionado por el jarabe así que la velocidad del tornillo no influye en este.

El producto obtenido a velocidades de 170 y 180 rpm tiende a tener problemas de dureza ya que al estar más compactado, la textura pierde un poco del *crunch* característico de este tipo de cereales, además de que se observa un producto más húmedo y con una mayor intensidad de color. También se observa que los resultados dicen que estas velocidades tienen menor uniformidad en las partículas de cereales evaluadas.

Por otra parte, las velocidades de 210 y 220 rpm tienden a tener cereales más porosos y con menor recubrimiento demostrando que la velocidad del tornillo influye en la cantidad de recubrimiento que tenga el producto final, ya que al tener un producto más expandido y, por ende, más poroso, el recubrimiento es menos uniforme en la parte exterior del cereal.

Las mejores calificaciones en el panel sensorial se dan en las velocidades de 190 y 200 rpm ya que el factor de la calidad es un aspecto importante en la realización de un producto; esta evaluación es de suma importancia en la realización de la prueba. Los valores aceptados de densidad para el producto final se encuentran en el rango de estas dos velocidades. La densidad del producto es un factor importante en la calidad final debido a que el empaque se realiza sobre una base volumétrica. Se considera que la velocidad óptima de operación es de 200 rpm.

También, se determina el efecto de la velocidad del tornillo en las propiedades finales del producto; sin embargo, en estos casos la adición del jarabe aumenta la variabilidad en el resultado obtenido. Estos cambios son más observables en las relaciones de densidad y porcentaje de proteínas en función de la velocidad del tornillo ya que el jarabe le agrega masa al producto final la densidad del producto aumenta; se observa un comportamiento parecido en las figuras que relacionan la densidad del producto con la velocidad del tornillo.

Las variaciones en el porcentaje de proteínas en el producto con jarabe son más considerables ya que en el secado del producto final se desnaturalizan más las proteínas provenientes de la harina, pero se agrega cierto porcentaje con la adición del jarabe.

Por último, se observa en la figura 11 que la humedad final del producto tiene una tendencia más definida que la del producto sin cobertura. Esto sucede ya que luego de la aplicación del jarabe, el cereal pasa a un segundo secador donde la humedad presente en el cereal tiende a hacerse más uniforme. La humedad final del producto es un factor imprescindible en la calidad producto que se entrega a los consumidores ya que esta define la vida de anaquel del cereal.

CONCLUSIONES

1. La velocidad del tornillo en el extrusor tiene efecto directo sobre la densidad y porcentaje de proteínas en los cereales expandidos a base de harina de arroz sin cobertura.
2. El efecto de la velocidad del tornillo de un extrusor sobre la densidad de los cereales expandidos a base de harina de arroz es inversamente proporcional. Esto debido a la gelatinización de los almidones presentes en el cereal lo que determina la expansión del producto.
3. La velocidad del tornillo del extrusor no tiene un efecto directo sobre el tamaño de la partícula de los cereales expandidos a base de harina de arroz. Sin embargo, influye en el bombeo de la partícula del cereal y en la cantidad de harina que tiende a taparse en los moldes de corte.
4. La velocidad del tornillo del extrusor no tiene ningún efecto sobre el porcentaje de humedad de los cereales ya que este es influido por la cantidad de agua que se utiliza y del secado en el horno.
5. El porcentaje de proteínas presente en los cereales expandidos a base de arroz disminuye en función del aumento de la velocidad del tornillo hasta un punto constante. Esto debido a que el calor en el cilindro del extrusor desnaturaliza las proteínas y la fricción producida en el proceso de corte en el molde.

6. La reacción de Maillard que se genera dentro del extrusor disminuye el porcentaje de proteínas en la harina; además, genera cambios en las propiedades organolépticas del cereal expandido.
7. La energía mecánica específica que utiliza el extrusor para la fabricación de cereales expandidos a base de harina de arroz aumenta ligeramente con el cambio en la velocidad del tornillo. Sin embargo, este cambio no es tan considerable entre cada velocidad evaluada.
8. La velocidad del tornillo influye en la calificación sensorial de los cereales expandidos a base de harina de arroz. Las mejores calificaciones sensoriales se encuentran en velocidades de 190 y 200 rpm ya que a estas velocidades el producto tiene la mejor textura y apariencia. Además, a estas velocidades se encuentra la mejor aplicación de la cobertura del producto que conlleva a un mejor color.
9. Debido a los cumplimientos de las especificaciones del producto y de que se obtienen las mejores calificaciones al utilizar una velocidad del tornillo del extrusor de 200 rpm, se recomienda esta velocidad para la fabricación de cereales expandidos a base de harina de arroz.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una futura investigación acerca del efecto que tiene la cantidad de agua suministrada en el cilindro del extrusor para determinar el efecto de la adición de energía calorífica en las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de los cereales expandidos a base de arroz.
2. Comparar el efecto que produce la velocidad del extrusor sobre las propiedades fisicoquímicas y sensoriales en otro tipo de harinas, por ejemplo, a base de maíz o trigo, para determinar si las propiedades de estas harinas influyen en el proceso de extrusión.
3. Determinar el efecto de la velocidad del tornillo del extrusor en el porcentaje de almidones en cualquier tipo de harina.
4. Estudiar el efecto de la densidad del producto debido a la cantidad de cobertura añadida.
5. Identificar la influencia de la densidad del producto final sobre los costos de producción.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.O.A.C. *Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemist*. 13a ed. Estados Unidos: Association of Official Analytical Chemist, 1 990. 4 234 p.
2. BELTRAN RICO, M; MARCILLA, A. *Tecnología de polímeros*. España: Publicaciones Universidad de Alicante 2 012. 276 p.
3. COZZOLINO, D. *Uso de la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) en el análisis de alimentos para animales*. Uruguay: Agrociencia. 2 002. Vol. VI No. 2. 266 p.
4. GONZÁLEZ, R.J.; TORRES, R. L.; DE GREEF, D.M. *Extrusión-cocción de cereales*. Brasil: Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos. 2 002. 376 p.
5. GUERRA, JOSÉ. *Efecto del tiempo de cocción del maíz blanco (Zea mays) sobre las propiedades físicas y sensoriales de las tortillas como medida de control de calidad*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2 008. 150 p.
6. MERCIER, C; LINKO, P; HARPER, J. *Extrusion cooking*. Estados Unidos: American Assosiation of Cereal Chemist, Inc, 1989. 471 p.

7. NEWBOL, P; CARLOS, W; THORNE, B. *Estadística para administración y economía*. 6a ed. Madrid: Pearson Education, S.A., 2 008. 578 p.
8. PEREZ-NAVARRETE, C.; BETANCUR-ANCONA, D; CASSOTO, M; CARMONA, A.; TOVAR, J. *Efecto de la extrusión sobre la biodisponibilidad de proteína y almidón en mezclas de harina de maíz y frijol lima*. México: Archivos Latinoamericanos de Nutrición 2 007 Vol. 57 No. 3. 366 p.
9. RIAZ, MIAN N. *Extruders in food applications*. Estados Unidos: CRC Press LLC, 2 000. 240 p.
10. ROQUEL, MERCEDES. *Diseño de una línea de producción para la elaboración de harina de camote (Ipomoea Batata)*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2 008. 66 p.
11. WATTS, B; YLIMAKI, G; JEFFERY, L; ELÍAS, L. *Métodos sensoriales básicos para la evaluación de alimentos*. Canadá: International Development Center, 1 992.170 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Resultados en muestras durante septiembre (sin cobertura)

Velocidad extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	3,16	7,34	174,95	2,69	0,85	0,025	9,41
180	4,26	7,24	158,27	3,47	0,92	0,006	9
190	4,26	7,09	183,28	6,31	0,84	0,026	8,84
200	4,4	7,27	128,73	1,71	0,89	0,040	8,27
210	4,28	7,04	116,68	1,88	0,94	0,021	8,08
220	3,94	7,9	104,62	1,85	0,98	0,025	8

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Resultados en muestras durante septiembre (con cobertura)

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	3,16	1,91	232,53	5,48	0,82	0,052	1,91
180	4,26	1,45	221,87	1,44	0,88	0,029	1,45
190	4,26	1,67	190,28	1,97	0,88	0,026	1,67
200	4,4	1,2	149,17	1,89	0,93	0,020	1,2
210	4,28	1,85	237,32	1,53	0,83	0,029	1,85
220	3,94	1,99	157,20	1,92	0,91	0,075	1,99

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Resultados en muestras durante octubre (sin cobertura)

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	4,2	7,78	222,35	8,41	0,75	0,015	7,71
180	4,3	7,81	196,43	3,93	0,78	0,035	7,55
190	4,525	7,83	190,57	3,54	0,79	0,017	7,44
200	4,475	7,86	169,38	0,77	0,84	0,010	7,37
210	4,45	6,75	168,70	1,13	0,86	0,012	7,43
220	4,35	6,45	154,75	2,54	0,86	0,021	7,49

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Resultados en muestras durante octubre (con cobertura)**

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	4,2	3,45	271,88	4,52	0,76	0,023	6,27
180	4,3	3,29	264,37	2,77	0,76	0,035	6,33
190	4,525	2,97	245,27	3,11	0,80	0,020	6,19
200	4,475	2,46	228,17	2,09	0,86	0,017	6,21
210	4,45	2,27	225,45	5,84	0,82	0,015	6,39
220	4,35	2,3	224,43	0,32	0,83	0,021	6,44

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Resultados en muestras durante noviembre (sin cobertura)**

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	4,43	7,95	145,87	058	0,89	0,017	6,88
180	4,45	6,9	144,03	2,73	0,86	0,021	6,63
190	4,45	8,48	143,42	2,85	0,88	0,023	6,87
200	4,5	7,59	143,58	3,35	0,90	0,026	6,7
210	4,45	7,64	129,12	1,60	0,87	0,025	6,82
220	4,4	8,3	129,62	0,95	0,87	0,061	6,78

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Resultados en muestras en noviembre (con cobertura)**

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	4,43	2,77	229,50	3,15	0,83	0,031	7,52
180	4,45	2,93	223,62	3,31	0,85	0,023	7,66
190	4,45	2,67	202,65	1,99	0,88	0,017	7,66
200	4,5	2,29	202,85	6,18	0,82	0,040	7,41
210	4,45	1,78	184,82	2,18	0,85	0,015	7,6
220	4,4	2,29	183,05	3,25	0,89	0,058	7,37

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Resultados en muestras durante diciembre (sin cobertura)

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	4,5	8,44	199,15	4,54	0,81	0,032	7,45
180	4,6	8,45	168,85	2,76	0,84	0,040	7,44
190	4,5	7,72	167,63	1,98	0,80	0,047	7,43
200	4,75	8,1	154,33	1,39	0,80	0,064	7,24
210	4,4	8,64	152,82	0,45	0,81	0,031	7,21
220	4,3	7,45	135,67	1,19	0,83	0,036	7,25

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Resultados en muestras durante diciembre (con cobertura)**

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Humedad del cereal	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales
170	4,5	3,11	266,70	1,26	0,74	0,015	4,83
180	4,6	2,91	250,12	5,36	0,83	0,021	4,53
190	4,5	2,17	214,08	2,04	0,84	0,015	5,02
200	4,75	2,34	214,65	3,51	0,82	0,021	4,6
210	4,4	2,15	204,72	0,36	0,83	0,047	4,82
220	4,3	1,81	193,52	0,74	0,89	0,010	5,61

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Resultados promedio (sin cobertura)

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Desviación estándar	Humedad del cereal	Desviación estándar	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteína totales	Desviación estándar
170	4,38	0,16	7,88	0,45	183,45	28,80	0,83	0,06	7,86	1,09
180	4,45	0,15	7,60	0,68	173,64	19,58	0,85	0,06	7,69	1,06
190	4,49	0,16	7,78	0,57	165,17	18,85	0,83	0,04	7,65	0,84
200	4,58	0,01	7,71	0,36	144,95	17,41	0,86	0,05	7,40	0,65
210	4,43	0,03	7,52	0,84	136,80	23,14	0,87	0,06	7,39	0,53
220	4,35	0,05	7,53	0,80	125,85	21,49	0,89	0,06	7,38	0,51

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Resultados promedio (con cobertura)

Velocidad del extrusor (rpm)	Calificación del panel	Desviación estándar	Humedad del cereal	Desviación estándar	Densidad del cereal	Desviación estándar	Tamaño de la partícula	Desviación estándar	Proteínas totales	Desviación estándar
170	4,38	0,16	2,81	0,66	250,15	20,81	0,79	0,04	5,13	2,41
180	4,45	0,15	2,65	0,82	239,99	19,72	0,83	0,05	4,99	2,69
190	4,49	0,16	2,37	0,57	213,07	22,81	0,85	0,04	5,14	2,55
200	4,58	0,01	2,07	0,59	213,08	37,27	0,86	0,05	4,86	2,69
210	4,43	0,03	2,01	0,23	198,71	22,80	0,83	0,02	5,17	2,49
220	4,35	0,05	2,10	0,24	189,55	28,10	0,88	0,04	5,35	2,35

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Energía mecánica específica del extrusor**

Velocidad (rpm)	EME1 (Wh/kg)	EME ² (Wh/kg)	EME promedio (Wh/kg)	Desviación estándar
170	104	102	103	1.41
180	103	104,9	103,95	1,34
190	102,5	106,1	104,3	2,55
200	109,9	107,7	107,95	1,56
210	109,2	106,7	108,8	1,77
220	109,6	113,4	111,5	2,69

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Promedio de la densidad sin cobertura (septiembre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	177,15	171,95	175,75	174,95	2,69
180	162,10	155,35	157,35	158,27	3,47
190	190,25	181,65	177,95	183,28	6,31
200	130,70	127,95	127,55	128,73	1,71
210	118,80	115,20	116,05	116,68	1,88
220	106,50	102,80	104,55	104,62	1,85

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Promedio del tamaño de la partícula sin cobertura (septiembre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0,88	0,85	0,83	0,85	0,025
180	0,91	0,92	0,92	0,92	0,006
190	0,81	0,85	0,86	0,84	0,026
200	0,90	0,85	0,93	0,89	0,040
210	0,92	0,95	0,96	0,94	0,021
220	0,95	1,00	0,98	0,98	0,025

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Promedio de la densidad con cobertura (septiembre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	238,00	227,05	232,55	232,53	5,48
180	220,80	223,50	221,30	221,87	1,44
190	192,55	189,30	189,00	190,28	1,97
200	148,00	151,35	148,15	149,17	1,89
210	235,70	238,75	237,50	237,32	1,53
220	159,40	156,35	155,85	157,20	1,93

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Promedio del tamaño de la partícula con cobertura (septiembre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0,76	0,85	0,85	0,82	0,052
180	0,85	0,90	0,90	0,88	0,029
190	0,85	0,90	0,89	0,88	0,026
200	0,95	0,91	0,93	0,93	0,020
210	0,85	0,85	0,80	0,83	0,029
220	1,00	0,87	0,87	0,91	0,075

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Promedio de la densidad sin cobertura (octubre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/cm ³)			Promedio	Desviación
170	220,45	215,05	231,55	222,35	8,41
180	200,25	192,40	196,65	196,43	3,93
190	186,70	191,35	193,65	190,57	3,54
200	169,80	168,50	169,85	169,38	0,77
210	168,15	170,00	167,95	168,70	1,13
220	155,40	151,95	156,90	154,75	2,54

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Promedio del tamaño de la partícula sin cobertura (octubre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0,75	0,74	0,77	0,75	0,015
180	0,81	0,74	0,78	0,78	0,035
190	0,81	0,78	0,78	0,79	0,017
200	0,85	0,83	0,84	0,84	0,010
210	0,85	0,87	0,85	0,86	0,012
220	0,84	0,87	0,88	0,86	0,021

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Promedio de la densidad con cobertura (octubre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	273,4	275,45	266,8	271,88	4,52
180	267,5	262,25	263,35	264,37	2,77
190	248,5	242,30	245,00	245,27	3,11
200	230,45	226,35	227,7	228,17	2,09
210	231,05	219,40	225,9	225,45	5,84
220	224,20	224,30	224,8	224,43	0,32

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Promedio del tamaño de la partícula con cobertura (octubre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0,79	0,75	0,75	0,76	0,023
180	0,74	0,8	0,74	0,76	0,035
190	0,82	0,8	0,78	0,80	0,020
200	0,85	0,85	0,88	0,86	0,017
210	0,8	0,82	0,83	0,82	0,015
220	0,82	0,85	0,81	0,83	0,021

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20.

**Promedio de la densidad sin cobertura
(noviembre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	146,5	145,75	145,35	145,87	0,58
180	144,65	141,05	146,40	144,03	2,73
190	145,40	140,15	144,70	143,42	2,85
200	146,15	139,80	144,80	143,58	3,35
210	129,15	127,50	130,70	129,12	1,60
220	128,90	129,25	130,70	129,62	0,95

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21.

**Promedio del tamaño de la partícula sin cobertura
(noviembre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0,87	0,90	0,90	0,89	0,017
180	0,88	0,84	0,85	0,86	0,021
190	0,87	0,87	0,91	0,88	0,023
200	0,93	0,88	0,89	0,90	0,026
210	0,89	0,84	0,87	0,87	0,025
220	0,91	0,80	0,90	0,87	0,061

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Promedio de la densidad con cobertura (noviembre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	226,25	229,70	232,55	229,50	3,15
180	223,10	220,60	227,15	223,62	3,31
190	201,60	204,95	201,40	202,65	1,99
200	198,40	200,25	209,90	202,85	6,18
210	184,70	182,70	187,05	184,82	2,18
220	179,80	183,05	186,30	183,05	3,25

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Promedio del tamaño de la partícula con cobertura (noviembre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0,8	0,82	0,86	0,83	0,031
180	0,86	0,86	0,82	0,85	0,023
190	0,87	0,87	0,90	0,88	0,017
200	0,87	0,80	0,80	0,82	0,040
210	0,87	0,85	0,84	0,85	0,015
220	0,92	0,82	0,92	0,89	0,058

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Promedio de la densidad sin cobertura (diciembre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	204,05	195,10	198,30	199,15	4,54
180	171,1	167,35	168,10	168,85	2,76
190	169,2	167,15	166,55	167,63	1,98
200	155,00	151,30	156,70	154.33	1.39
210	153.10	153,05	152,30	152.82	0.45
220	136.50	136,20	134,30	135.67	1.19

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Promedio del tamaño de la partícula sin cobertura (diciembre)**

Velocidad (RPM)	Tamaño de la partícula (cm)			Promedio	Desviación
170	0.79	0.85	0.8	0.81	0.032
180	0.8	0,83	0,88	0,84	0,040
190	0,84	0,82	0,75	0,80	0,047
200	0,85	0,73	0,83	0,80	0,064
210	0,8	0,84	0,78	0,81	0,031
220	0,8	0,87	0,82	0,83	0,036

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Promedio de la densidad con cobertura (diciembre)**

Velocidad (RPM)	Densidad (kg/m ³)			Promedio	Desviación
170	265,25	267,55	267,30	266,70	1,26
180	245,15	249,40	255,80	250,12	5,36
190	213,30	212,55	216,40	214,08	2,04
200	218,70	212,50	212,75	214,65	3,51
210	204,90	204,95	204,30	204,72	0,36
220	192,70	194,15	193,70	193,52	0,74

Fuente: elaboración propia

Apéndice 27. **Promedio del tamaño de la partícula con cobertura (diciembre)**

Velocidad (RPM)	Con Sabor			Promedio	Desviación
170	0,76	0,73	0,74	0,74	0,015
180	0,85	0,82	0,81	0,83	0,021
190	0,85	0,82	0,84	0,84	0,015
200	0,83	0,84	0,8	0,82	0,021
210	0,78	0,85	0,87	0,83	0,047
220	0,88	0,9	0,89	0,89	0,010

Fuente: elaboración propia

Apéndice 28.

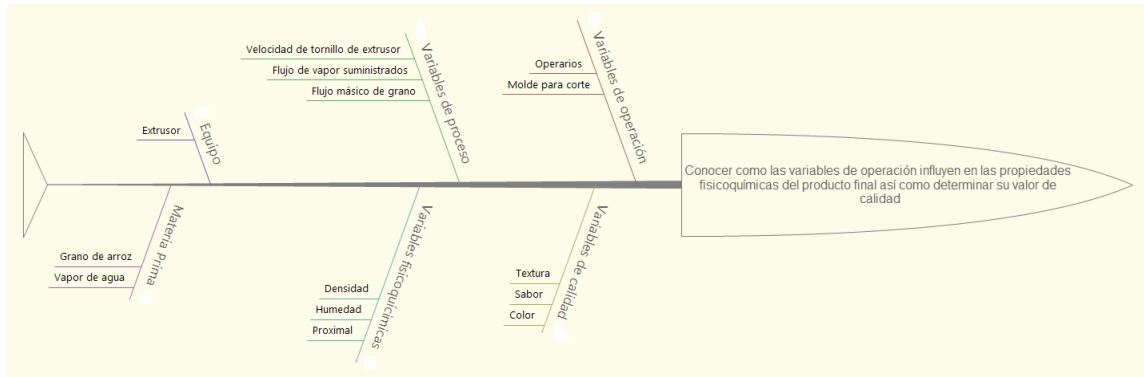
Tabla de requisitos académicos.

Ingeniería y tecnología	Ingeniería química	Ciencias naturales y exactas	Química	Densidad, humedad	Determinar el efecto que tienen la velocidad del tornillo del extrusor sobre las variables de respuesta en las propiedades fisicoquímicas y el valor sensorial para la fabricación de cereales expandidos.
			Estadística	Análisis multivariables	
			Química orgánica	Proteínas	
	Ingeniería y tecnología	Operaciones unitarias	Operaciones complementarias		
		Tecnología de los alimentos	Extrusión, análisis sensorial		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28.

Diagrama de Ishikawa y/o árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia

Apéndice 30.

Hoja a utilizar para el análisis sensorial

Nombre: _____
 Fecha: _____

EVALUACIÓN SENSORIAL

INSTRUCCIONES
 PRODUCTO: Evaluar las muestras presentadas, utilizando los estándares sensoriales.
 EMPAQUE: Colocar un (X) si el parámetro cumple y (O) si no.

MUESTRA	RUC	EMPAQUE					PRODUCTO (1-5)					Observaciones	
		Materia	Color	Oloror	Sabor	Textura	Aroma	C R C R C R					
								1	2	3	4		5

MUCHAS GRACIAS POR SU COLABORACIÓN

Fuente: elaboración propia.