



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Estandarización del proceso de extrusión en la  
elaboración de un cereal de amaranto.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERIA EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A N:**

**GALINDO CRUZ LORENZO ANTONIO**

**MORALES DOMINGUEZ JOVANI DANIEL**

**ASESOR: MNH. FRIDA ROSALIA CORNEJO GARCIA.**

**COASESOR: M en C. ENRIQUE FUENTES PRADO.**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2014.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

**M. en C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
ASUNTO: **VOTO APROBATORIO**



**ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

**Estandarización del proceso de extrusión en la elaboración de un cereal de amaranto**

Que presenta el pasante: Lorenzo Antonio Galindo Cruz

Con número de cuenta: 403073003 para obtener el Título de: Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 06 de Agosto de 2014.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

|                      | NOMBRE                                 | FIRMA |
|----------------------|--|-------|
| <b>PRESIDENTE</b>    | M. en I. Fernando Beristain            |       |
| <b>VOCAL</b>         | Dra. Elsa Gutiérrez Cortez             |       |
| <b>SECRETARIO</b>    | M.N.H. Frida Rosalía Cornejo García    |       |
| <b>1er. SUPLENTE</b> | Dra. María del Carmen Valderrama Bravo |       |
| <b>2do. SUPLENTE</b> | Dr. Enrique Martínez Manrique          |       |

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

UNAM  
ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

**Estandarización del proceso de extrusión en la elaboración de un cereal de amaranto**

Que presenta el pasante: Jovani Daniel Morales Domínguez

Con número de cuenta: 304217234 para obtener el Título de: Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE**

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 06 de Agosto de 2014.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

|                      | NOMBRE                                 | FIRMA |
|----------------------|--|-------|
| <b>PRESIDENTE</b>    | M. en I. Fernando Beristain            |       |
| <b>VOCAL</b>         | Dra. Elsa Gutiérrez Cortez             |       |
| <b>SECRETARIO</b>    | M.N.H. Frida Rosalía Cornejo García    |       |
| <b>1er. SUPLENTE</b> | Dra. María del Carmen Valderrama Bravo |       |
| <b>2do. SUPLENTE</b> | Dr. Enrique Martínez Manrique          |       |

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

## DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo principalmente a mis padres Lorenzo Galindo García y Alicia Cruz Gachuz por haberme dado la vida, apoyarme, confiar en mí y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis hermanas Alicia, Merle y Brenda por demostrarme siempre su amor y creer en mí para lograr mis metas durante cada etapa de mi vida.

En especial a mi tía Esmirna Cruz quien quiero como a mi madre mi primo Daniel Rodríguez, mi prima Mayra Rodríguez y Crescencio Rodríguez quienes me mostraron un afecto especial.

A mi hijo Fernando por ser una inspiración en mi vida y hacerme sentir el valor de la vida y a Elizabeth Haro por darme la oportunidad de compartir momentos significativos conmigo su afecto y por siempre estar dispuesta a escucharme en cualquier momento.

Agradezco a mi compañero Jovanni Daniel Morales por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo junto a él, así como a mi profesora Frida Rosalía Cornejo mostrando el profesionalismo y compromiso dando un ejemplo a seguir en la formación de sus alumnos.

De igual forma estoy agradecido con la vida por ser quien soy y a mis familiares, compañeros y amigos cercanos que con su apoyo pude extraer lo mejor de cada uno para darme el coraje, las ganas de salir adelante y fijarme nuevos retos hacia el futuro.

Con afecto: Lorenzo Antonio.

## AGRADECIMIENTOS.

*Le agradezco a dios por haberme permitido terminar mi carrera, haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino. Por haberme dado fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.*

*A mis padres, pero sobre todo a mi madre por ser mi mejor amiga, mi aliada, mi ejemplo a seguir, gracias por todo el apoyo en esta tesis y a lo largo de toda mi vida.*

*A mis abuelos maternos, por su fortaleza, cariño y entrega que siempre me han brindado sin cambio alguno.*

*A mi hermano Josué Arturo, por ser el mejor amigo y compañero de toda mi vida.*

*A mis mejores amigos, que me han enseñado el valor de la amistad y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare y a mi compañero de tesis Lorenzo Antonio por terminar de manera exitosa esta meta alcanzada*

*Profesores y UNAM.*

*Les agradezco a todos por el apoyo brindado a lo largo de mi etapa profesional y en especial a mi asesora de tesis Frida Rosalía, por su valioso tiempo, su amistad y por los conocimientos que me ha brindado.*

*Con cariño: Jovani Daniel.*



# SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO, A.C.

extiende la presente

## Constancia

A:

Licenciatura, Frida Rosalía Cornejo García; p. Licenciatura, Jovani Daniel Morales Domínguez; pasante Licenciatura, Lorenzo Antonio Galindo Cruz; pasante Licenciatura, Maira Alejandra Rosas Raya; pasante Licenciatura, Valeria Medrano-Alcantara; pasante Licenciatura, Walter Roberto Muñoz Mota; pasante Licenciatura, Berenice Jiménez-Pérez; Licenciatura, Draucin Jiménez-Celi.

Por el trabajo:

“Estandarización del proceso de extrusión de un cereal de amaranto para desayuno”

que presentaron en el marco de las actividades científicas del

48° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA  
32° CONGRESO NACIONAL DE EDUCACIÓN QUÍMICA  
celebrados en Guanajuato, Gto., 31 de agosto al 4 de septiembre, 2013.

Dr. Benjamín Velasco Bejarano  
Presidente de Congresos

Dr. Juvencio Robles García  
Presidente del Comité Organizador Local

## ÍNDICE.

|                     |      |
|---------------------|------|
| <b>Resumen</b>      | viii |
| <b>Introducción</b> | ix   |

### Capítulo I. Antecedentes.

|   |    |
|---|----|
| <b>1.1 Extrusión</b>                        | 1  |
| 1.1.1 Elementos del extrusor                | 1  |
| 1.1.2 Etapas en el proceso de extrusión     | 3  |
| 1.1.3 Clasificación de extrusores           | 4  |
| 1.1.3.1 Extrusores húmedos de mono tornillo | 4  |
| 1.1.3.1.1 Aplicaciones                      | 5  |
| 1.1.3.2 Extrusores secos                    | 5  |
| 1.1.3.2.1 Aplicaciones                      | 5  |
| 1.1.3.3 Extrusores de doble tornillo        | 6  |
| 1.1.3.3.1 Aplicaciones                      | 7  |
| 1.1.4 Ventajas del proceso de extrusión     | 8  |
| 1.1.5 Control del proceso de extrusión      | 8  |
| 1.1.5.1 Requisitos del producto             | 9  |
| 1.1.5.1.1 Textura                           | 10 |
| 1.1.5.1.2 Aromas y colores                  | 10 |
| 1.1.5.1.3 Humedad                           | 10 |
| 1.1.5.1.4 Calidad microbiológica            | 10 |
| <b>1.2 Los cereales</b>                     | 11 |
| 1.2.1 El almidón de los cereales            | 12 |
| 1.2.1.1 Amilosa y amilopectina              | 12 |
| 1.2.1.2 Gelatinización del almidón          | 14 |
| 1.2.2 Las proteínas de los cereales         | 14 |
| 1.2.3 El amaranto                           | 16 |
| 1.2.3.1 Morfología de la semilla            | 16 |
| 1.2.3.2 Composición química                 | 17 |
| 1.2.3.2.1 Carbohidratos                     | 17 |
| 1.2.3.2.2 Proteínas y aminoácidos           | 18 |
| 1.2.3.2.3 Lípidos                           | 19 |
| 1.2.3.2.4 Vitaminas y minerales             | 19 |
| 1.2.4 El trigo                              | 20 |



|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1.2.4.1 Morfología del grano      | 20 |
| 1.2.4.2 Composición química       | 21 |
| 1.2.4.2.1 Carbohidratos           | 21 |
| 1.2.4.2.2 Proteínas y aminoácidos | 22 |
| 1.2.4.2.3 Lípidos                 | 23 |
| 1.2.4.2.4 Vitaminas y minerales   | 23 |

## Capítulo II: Diseño experimental.

|   |    |
|---|----|
| 2.1 Problema                                | 24 |
| 2.2 Hipótesis                               | 24 |
| 2.3 Objetivos.                              |    |
| 2.3.1 General                               | 24 |
| 2.3.2 Particulares                          | 24 |
| 2.4 Variables                               | 25 |
| 2.5 Diseño Estadístico                      | 25 |
| 2.6 Cuadro metodológico                     | 26 |
| 2.7 Metodología                             |    |
| 2.7.1 Análisis granulométrico               | 27 |
| 2.7.2 Presencia de colonias en el cultivo   | 28 |
| 2.7.3 Determinación del índice de expansión | 31 |
| 2.7.4 Determinación de humedad              | 32 |
| 2.7.5 Grado de gelatinización del almidón   | 33 |
| 2.7.6 Determinación de porosidad            | 35 |
| 2.7.7 Determinación de absorción de leche   | 36 |
| 2.7.8 Determinación de la dureza            | 37 |
| 2.7.9 Parámetros sensoriales                | 39 |

## Capítulo III: Resultados

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Análisis granulométrico.   |    |
| 3.1.1 Harina de amaranto  | 42 |
| 3.1.2 Harina de trigo   | 43 |
| 3.2 Elaboración del cereal para desayuno de amaranto  |    |
| 3.2.1 Formulación y acondicionamiento de las materias primas en la elaboración del cereal de amaranto | 44 |
| 3.2.1.1 Mezclado  | 47 |
| 3.2.1.2 Amasado   | 47 |
| 3.2.1.3 Extrusión   | 47 |
| 3.2.1.4 Corte y/o moldeado  | 47 |
| 3.2.1.5 Horneado  | 48 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.1.6 Empaque _____   | 48 |
| 3.2.1.7 Almacenamiento _____  | 48 |
| 3.3 Análisis de resultados para el cereal de amaranto                                     |    |
| 3.3.1 Resultados y análisis de presencia de colonias en el cultivo del cereal _____       | 48 |
| 3.3.2 Resultados de variables del proceso _____   | 49 |
| 3.3.2.1 Resultados y análisis del índice de expansión _____                               | 50 |
| 3.3.2.2 Resultados y análisis del grado de gelatinización del almidón _____               | 51 |
| 3.3.2.3 Resultados y análisis de porosidad _____  | 52 |
| 3.3.2.4 Resultados y análisis del índice de absorción de leche (IAL) _____                | 54 |
| 3.3.2.5 Resultados y análisis de dureza _____   | 54 |
| 3.3.3 Resultados y análisis de evaluación sensorial en cereal de amaranto _____           | 55 |
| 3.3.4 Comparativo de análisis de dureza cereal comercial vs cereal de amaranto _____      | 57 |
| 3.3.5 Resultados y análisis de las variables estudiadas en los cereales comerciales _____ | 58 |
| 3.3.6 Resultados y análisis de evaluación sensorial en cereales comerciales _____         | 59 |
| Contrastación de Hipótesis _____  | 61 |
| Conclusiones _____  | 62 |
| Referencias _____   | 64 |

## ÍNDICE DE FIGURAS.

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Doble tornillo inter-engranados A) Contra-rotación; B) Co-rotación   | 6  |
| Figura 2. A) Extrusor de un solo tornillo; B) Tornillos gemelos  | 7  |
| Figura 3. Interacción de las propiedades del material, las variables de proceso y las características del producto   | 9  |
| Figura 4. Representación de las partes de la semilla de un cereal  | 11 |
| Figura 5. A) Estructura lineal de la amilosa; B) Estructura ramificada de amilopectina   | 12 |
| Figura 6. Estructura del grano de amaranto   | 16 |
| Figura 7. Estructura del grano del trigo   | 20 |
| Figura 8. Tamices  | 27 |
| Figura 9. Resultados de coloración de microorganismos; A) mohos y levaduras, B) coliformes totales/ <i>Escherichia Coli</i> , C) mesofílicos aerobios, en las placas Petrifilm <sup>MR</sup> | 31 |
| Figura 10. Prueba de determinación de humedad en el cereal de amaranto   | 33 |
| Figura 11. Prueba de determinación de porosidad del cereal de amaranto   | 36 |
| Figura 12. Aditamentos del texturómetro Brookfield CT3   | 38 |
| Figura 13. Prueba de muestra del texturómetro Brookfield CT3   | 38 |
| Figura 14. Test hedónico de preferencia para el perfil de textura (dureza)   | 41 |
| Figura 15. Test hedónico de preferencia para el perfil sensorial sabor   | 41 |
| Figura 16. Test hedónico de preferencia para el perfil sensorial color   | 41 |
| Figura 17. Test hedónico de preferencia para el perfil sensorial apariencia  | 41 |
| Figura 18. Análisis acumulativo fracción total retenida vs fracción total pasada de la harina de amaranto  | 43 |
| Figura 19. Análisis acumulativo fracción total retenida vs fracción total pasada de la harina de trigo   | 44 |
| Figura 20: Diagrama de proceso en la elaboración del cereal para desayuno a base de amaranto   | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21. Gráfico de resultados de las determinaciones de humedad final (%), índice de expansión (%), porosidad (%), índice de absorción de leche (%) y grado de gelatinización del almidón (%) en el cereal de amaranto  | 49 |
| Figura 22. Efectos principales de las variables: A) humedad final, B) tamaño de partícula y C) diseño del tornillo, con respecto a la expansión (%)  | 50 |
| Figura 23. Efectos principales de las variables: D) humedad final, E) tamaño de partícula y F) diseño del tornillo, con respecto a grado de gelatinización   | 51 |
| Figura 24. Interacción entre las variables: GH) humedad final-tamaño de partícula, IJ) humedad final-diseño del tornillo y KL) tamaño de partícula-diseño del tornillo con respecto al grado de gelatinización   | 52 |
| Figura 25. Efectos principales de las variables: M) humedad final, N) tamaño de partícula y O) diseño del tornillo, con respecto a la porosidad (%)  | 53 |
| Figura 26. Interacción entre las variables: PQ) humedad final-tamaño de partícula, RS) humedad final - diseño del tornillo y TU) tamaño de partícula – diseño del tornillo con respecto a la porosidad (%)   | 53 |
| Figura 27. Efectos principales de las variables: V) humedad final, W) tamaño de partícula y X) diseño del tornillo, con respecto al índice de absorción de leche (%)   | 54 |
| Figura 28. Efectos principales de las variables: Y) tamaño de partícula Z) humedad inicial y ZA) diseño del tornillo, con respecto a dureza (N*m)  | 55 |
| Figura 29. Diagrama de evaluación sensorial para el cereal de amaranto   | 55 |
| Figura 30. Gráfico de resultados ANOVA con dos vías para los parámetros dureza, sabor, color y apariencia  | 56 |
| Figura 31. Gráfico comparativo de dureza instrumental (N*m) vs dureza sensorial en cereales comerciales y cereales de amaranto   | 57 |
| Figura 32. Gráfico de resultados de las determinaciones de humedad final (%), porosidad (%), índice de absorción de leche (%) y grado de gelatinización del almidón (%) cereales comerciales (Choco Pops <sup>®</sup> , Corn Pops <sup>®</sup> y Nesquick <sup>®</sup> ) | 58 |

Figura 33. Gráfica de test de prueba descriptiva y de preferencia de los panelistas en los cereales comerciales (Nesquick®, Choco Krispis Pops® y Corn Pops®) \_\_\_\_\_ 59

## ÍNDICE DE TABLAS.

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Características de algunos almidones usados en la industria de alimentos _____          | 13 |
| Tabla 2. Distribución de las proteínas del endospermo de los cereales según su solubilidad _____ | 15 |
| Tabla 3. Composición de aminoácidos esenciales de diferentes cereales _____                      | 15 |
| Tabla 4. Comparación de la composición proximal de algunos cereales con el amaranto _____        | 17 |
| Tabla 5. Aminoácidos esenciales de tres especies de amaranto _____                               | 18 |
| Tabla 6. Composición del aceite de la semilla de amaranto _____                                  | 19 |
| Tabla 7. Composición de vitaminas y minerales presentes en el amaranto _____                     | 19 |
| Tabla 8. Características de las proteínas de la harina de trigo _____                            | 23 |
| Tabla 9. Variables estudiadas _____  | 25 |
| Tabla 10. Secuencia de ecuaciones de análisis granulométrico _____                               | 28 |
| Tabla 11. Dimensión del difusor a tomar para placas Petrifilm <sup>MR</sup> _____                | 30 |
| Tabla 12. Condiciones adecuadas de incubación de los siguientes microorganismos _____            | 30 |
| Tabla 13. Características de coloración de microorganismos Petrifilm <sup>MR</sup> _____         | 30 |
| Tabla 14. Coloración del almidón por yodometría _____  | 34 |
| Tabla 15. Parámetros para medición de dureza _____   | 38 |
| Tabla 16. Test de prueba descriptiva _____   | 39 |
| Tabla 17. Análisis granulométrico de la harina de amaranto de acuerdo a la serie USA _____       | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 18. Análisis granulométrico de la harina de trigo de acuerdo a la serie USA_____                             | 43 |
| Tabla 19. Formulaciones_____   | 45 |
| Tabla 20. Resultados de análisis microbiológico por el método de placas Petrifilm <sup>MR</sup> _____              | 48 |
| Tabla 21. Resultados finales de las variables evaluadas en el proceso de elaboración en un cereal de amaranto_____ | 60 |
| Tabla 22. Resultados finales de las variables involucradas respecto a los cereales comerciales estudiados _____    | 60 |

## RESUMEN

Los cereales para desayuno son productos elaborados a partir de uno y/o diversos granos que son sometidos a procesos tecnológicos de alimentos, para obtener como resultado distintos productos, y muchos de ellos están listos para ser consumidos. Entre las diversas operaciones unitarias con las que se cuenta para la elaboración de alimentos para desayuno a base de cereales, se encuentra la extrusión, dicha operación consiste en pasar una mezcla de materias primas dentro de un cilindro con una presión ejercida entre este y un tornillo sin fin, el material es forzado a salir por la boquilla hasta obtener el producto deseado.

Por otra parte, el control del proceso de extrusión tiene como finalidad optimizar los recursos disponibles de la forma más eficiente y económica obteniendo así productos de calidad. De tal forma, surgió el presente proyecto cuyo objetivo general fue obtener un cereal para desayuno con parámetros mínimos de calidad, a partir de harinas de amaranto y trigo, mediante la evaluación de las condiciones del proceso de extrusión, analizando la relación existente entre el porcentaje de humedad inicial, el tamaño de partícula de la harina de amaranto y el diseño del tornillo, con la finalidad de estandarizar el proceso de transformación de un cereal para desayuno por medio de la operación de extrusión.

A través de la evaluación de las propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas, texturales, sensoriales y microbiológicas del cereal, se demostró que el tamaño de partícula fino de la harina de amaranto repercute en la utilización del agua durante el proceso de transformación, que a su vez favorece la gelatinización del almidón, y como consecuencia a la humedad final del producto, propiciando la mayor expansión y porosidad del cereal. Cabe resaltar que la combinación de partículas finas, con un diseño de tornillo de 9 alabes y con un 33 % de humedad, propició la gelatinización del almidón y la formación de un cereal más poroso. En cuanto a las determinaciones experimentales, el cereal de amaranto es más poroso que los cereales comerciales Nesquick® y Corn Pops® pero menos que el cereal *Choco Pops*®, además presenta una mayor gelatinización comparado con los tres cereales comerciales, que a su vez alcanza mayor Índice de Absorción de Leche (IAL), aunque es menor que el del cereal *Corn Pops*®. Como resultado de las pruebas microbiológicas, el cereal de amaranto, en general, se mantuvo por debajo de los límites de microorganismos permisibles de acuerdo a la NOM-147-SSA1-1996.

## INTRODUCCIÓN.

El proceso de extrusión juega un papel importante en la industria de los alimentos, pues mediante la combinación de ingredientes a determinadas condiciones de proceso, proporciona una amplia gama de productos.

La extrusión también puede ser un proceso a baja humedad, la cocción generada por ésta operación no produce efluentes significantes durante el procesado, esto reduce los costos por tratamientos de agua y niveles de contaminación ambiental. Asimismo, la cocción por extrusión implica la aplicación de altas temperaturas a tiempos cortos, manteniendo muchos componentes termosensibles en el alimento. La extrusión presenta mayor capacidad de procesado con alto rendimiento y cereales con mejores características de textura, sabor e incluso valor nutrimental (Guy, 2002).

Por otra parte, los extrusores más populares y con más éxito en la industria de alimentos son los extrusores de tornillo único. Los extrusores de aperitivos o para cereales, emplean cierto número de fenómenos en un lapso corto de tiempo, bajo condiciones controladas de operación continuas y en estado estacionario. Estos fenómenos pueden incluir: calentamiento, enfriamiento, transporte, alimentación, compresión, mezclado, fusión, cocción, textura y moldeado del producto final (Mian, 2003).

Los cereales para desayuno son productos elaborados por la industria a partir de diversos granos, principalmente trigo, maíz y arroz; sometidos a procesos industriales, algunos de los cuales consiguen que los granos estallen, se expandan, o se aplasten, de manera que, estén listos para ser consumidos. Con frecuencia se enriquecen con diversos ingredientes alimenticios, con los que se puede aumentar, considerablemente, su valor nutricional. Se sabe que estos alimentos constituyen la fuente principal de proteínas, carbohidratos y otros nutrientes para el ser humano, principal razón para su estudio. Además de su valor nutritivo, el almidón es importante por las múltiples propiedades funcionales en los alimentos (Hoseney, 1991). El ritmo de vida de nuestra sociedad se ha ido modificando, surgiendo una mayor demanda en variedad de alimentos de fácil elaboración y consumo. Los cereales expandidos son la base del desayuno en una gran variedad de la población tales como bebés, niños, jóvenes y adultos mayores, constituyendo, por si mismos, un buen alimento.



Hoy en día, el amaranto se conoce principalmente como “alegría”, golosina que gusta mucho a la gente, aunque su consumo no está muy difundido. El grano de amaranto contiene un alto contenido proteico, mayor al 17%, y provee también aceite. Su proteína es de excelente calidad ya que posee un balance casi perfecto de aminoácidos para formar la proteína necesaria para el ser humano, siendo superior al que ofrece el contenido proteínico de la leche (Hernández y Herrerías, 1998).

El almidón es el principal carbohidrato presente en el amaranto y es una gran fuente de energía para los seres humanos, su contenido puede variar entre 52.4 a 70% de acuerdo a la especie de amaranto. Los gránulos de almidón consisten de dos diferentes polímeros de glucosa denominados amilosa y amilopectina. La amilosa es un polímero lineal que consiste en largas cadenas de moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4; y constituye en promedio de 20 a 30% del almidón de los gránulos. El compuesto restante que conforma a los gránulos del almidón es la amilopectina, un polímero ramificado donde las cadenas lineales de moléculas de glucosa están unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4 y las ramificaciones ocurren en los enlaces  $\alpha$ -1,6 (Silva, 2007).

Tiene abundante lisina, que es el aminoácido más escaso en otros cereales como maíz, arroz y trigo, por lo que, al combinar un poco de amaranto con estos cereales, la lisina excedente complementa la proteína de los otros cereales, permitiendo que se asimilen elementos que por falta de lisina se hubieran desechado, logrando una importante mejora en la nutrición (Hernández y Herrerías, 1998).

Otro cereal de estudio en este proyecto es el trigo, el cual es uno de los cereales de mayor consumo a nivel mundial, siendo su principal aplicación en productos de panificación, ya que su proteína principal, el gluten resiste los esfuerzos mecánicos que se somete a los procesos de transformación de los alimentos (Valenzuela, 2011). El trigo se caracteriza por poseer una buena cantidad y calidad de fibra necesaria para el buen funcionamiento gastrointestinal, además proporciona importantes cantidades de proteínas, carbohidratos (almidón), vitaminas del complejo B y minerales (Serna-Saldivar, 1996).

El cereal a base de amaranto que se propone en este trabajo, como se ha mencionado es una fuente rica de carbohidratos y proteínas de calidad que puede satisfacer, en parte, las necesidades nutrimentales de quien lo consume, que acompañado con leche y frutas es posible que conforme un desayuno ligero y completo para cualquier consumidor siendo un producto innovador.

## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.**

### **1.1. Extrusión**

La extrusión es un proceso donde el alimento es forzado a fluir, bajo una o más condiciones de mezclado, calentamiento y cizallamiento, el cual es conducido por un tornillo sin fin que lo hace fluir hasta salir por un pequeño orificio de un dado o boquilla, y este último da forma al producto final (Riaz, 2003). En el caso de los productos expandidos, generalmente la combinación de ingredientes y niveles altos de almidón maximizan la expansión del producto final. Cuando los niveles totales de almidón son de alrededor del 60 % o menos, presentan una menor expansión en el producto (Huber, 2001).

De manera general, en el proceso de extrusión, los ingredientes son previamente mezclados y acondicionados, para luego pasar al extrusor donde son transformados a un producto con propiedades propias. Una buena cocción durante la extrusión está definida por la combinación de algunos parámetros, por ejemplo la relación entre la temperatura, el tiempo de residencia y el contenido de humedad, y que tiene como objetivo la gelatinización del almidón. Huber en 2001 señala que el producto viscoelástico que se forma durante el proceso de extrusión, es moldeado al pasar por la boquilla, lo que genera un aumento de presión y, finalmente, es expandido al momento de salir ya que existe una caída de presión entre el material dentro y a la salida del extrusor, y en las etapas posteriores a la extrusión.

Por tal motivo, durante la extrusión es indispensable tener el control de las variables de proceso, como, flujo másico, perfil del tornillo, temperatura de acondicionamiento, humedad, velocidad de alimentación, tamaño y diseño de la boquilla. El control del proceso, hace que las propiedades físicas, químicas y estructurales de las materias primas individuales cambien y determinen así los atributos de calidad del producto alimenticio (Sharman *et al.*, 2003).

#### **1.1.1 Elementos del extrusor**

Es importante entonces determinar los efectos que ocasiona el proceso de extrusión sobre el producto a elaborar, para ello es necesario conocer lo que sucede en el extrusor y antes que nada identificar las partes que lo componen (Barraza, 1993):

- Tolva cilíndrica: Su función es asegurar la alimentación constante al extrusor y que no exista pérdida de materias primas.

- Alimentador: En algunos casos viene incluido en la tolva de las materias primas del extrusor y en otros se utiliza un mezclador donde se adicionan otros ingredientes en forma de pastas o líquidos considerando el contenido de humedad.
- Pre-acondicionador-mezclador: La etapa del pre-acondicionamiento consiste en elevar la temperatura alrededor de 93 °C aproximadamente, y de esta manera obtener el vapor de agua dentro del extrusor a presión elevada, para proporcionar al material alimenticio una estructura homogénea, disminuyendo su viscosidad y contribuyendo también en la cocción del material.
- Sección extrusora: Diseñada para trabajar el producto y formar una masa, en ocasiones elevando su temperatura hasta la salida del extrusor que consta de los siguientes componentes:
  - Tornillo discontinuo o rotor del extrusor: Es el corazón del extrusor, que ejecuta las operaciones de mezclado, amasado, cizallado, cocimiento y formado final del producto.
  - Barril-Cañón o cilindro del extrusor: En esta parte del extrusor se realizan operaciones muy importantes como el mezclado, corte y cizallamiento del material y la elevación de la temperatura del producto que se está elaborando.
  - Inyectores de agua y vapor: Son utilizados en algunos extrusores para la elaboración de productos en los cuales el vapor y/o agua a alta presión se inyecta directamente a la cabeza del extrusor para aumentar el contenido de humedad y temperatura de acuerdo al producto deseado.
- Dado, troquel o boquilla final: Además de generar la contrapresión, está diseñado para formar el producto extrudido al tamaño y forma deseada. Esto es determinante en muchos alimentos, como lo son los alimentos para mascotas, botanas o cereales para desayuno. Para lograrlo, se requieren boquillas que contienen diferentes diseños.
- Cortador de velocidad variable: Permite cortar el producto extruido en segmentos a la longitud deseada. El tamaño del producto se obtiene con una o varias cuchillas cortadoras que giran en un eje fijo al dado y son movidas por un reductor de velocidad variable (Barraza, 1993).

### **1.1.2 Etapas en el proceso de extrusión**

En breve se describirá el proceso convencional de extrusión, mediante la explicación de las zonas de alimentación, amasado, cocción y formado.

- **Zona de alimentación**

En esta área se introduce al extrusor un material granulado crudo de baja densidad, comúnmente harinas de cereales (trigo, cebada, maíz, arroz, centeno, avena y otros materiales relacionados) o tubérculos que son ricos en almidón, legumbres como fuentes ricas en proteínas, semillas oleaginosas, entre otras materias primas. La velocidad de alimentación total es limitada por la capacidad de los tornillos de esta sección, para transportar una alimentación seca (Sharman *et al.*, 2003). Entonces el material es transportado por la acción del tornillo y comienza a formarse una masa (al mezclar un material alimenticio con agua o vapor inyectado directamente al cilindro), conforme avanza, el nuevo material formado, va incrementando su temperatura (Barraza, 1993). El cilindro y el tornillo tienen diseños que reciben al alimento y entonces el material preacondicionado entra en la siguiente zona que es la de amasado (Guy, 2002).

- **Zona de amasamiento**

En esta zona se lleva a cabo la compresión, alcanzando los tornillos del extrusor un mayor grado de llenado, conforme disminuye el paso del tornillo. Las materias primas cambian sus propiedades particulares como la densidad y viscosidad que empiezan a aumentar debido a la adición de agua y vapor, entonces, se incrementa la presión al interior del cilindro. El esfuerzo de corte adquiere importancia conforme el material ocupa el espacio entre tornillo y cilindro, en este caso se puede inyectar vapor o agua para ayudar a su desarrollo, mejorando así la transferencia de calor.

La zona de amasado es una zona de transición entre las harinas de cereales granuladas y el material viscoelástico homogéneo (viscoamorfo) que se obtendrá en la zona de cocción (Sharman *et al.*, 2003).

- **Zona de cocimiento**

Esta sección es la más importante del extrusor debido a que recibe el material que fue transportado durante el cizallamiento para ser comprimido y obtener el producto extrudido (Barraza, 1993). En esta área, comúnmente la temperatura y presión aumentan muy rápido, debido a la distancia entre alabes del tornillo con la presencia de la boquilla.

La transformación final de la materia prima también ocurre aquí, esto afecta de manera importante a la densidad, al color y, las propiedades funcionales del producto final (Sharman *et al.*, 2003). En esta región, la relación temperatura-presión aumenta muy rápidamente, entonces el cizallamiento es mayor, así como la temperatura del producto, manteniéndose alrededor de 5 segundos antes de que el producto sea forzado a pasar a través del troquel (Guy, 2002).

- **Formado**

El producto realmente se forma al pasar a través de un dado, boquilla, troquel o matriz y utilizando un mecanismo de corte como parte del extrusor para fijar la longitud y forma final del producto (Sharman *et al.*, 2003). El dado o boquilla tiene una función importante, al salir el producto por ella se presenta una caída de presión, al enfrentarse a la presión atmosférica, cambio que provoca una vaporización inmediata en el producto, creando una estructura porosa y con menor densidad, siendo estas propiedades importantes de los productos inflados.

### **1.1.3 Clasificación de extrusores**

Las partes básicas de un extrusor, así como la descripción del proceso de extrusión que ya fueron señaladas de forma general, sin embargo existen diferentes diseños entre los extrusores, debido a las necesidades y a la diversidad de productos que se generan actualmente en la industria de los alimentos.

#### **1.1.3.1 Extrusores húmedos de mono tornillo**

Los extrusores de tornillo simple son los que más ampliamente se aplican en las industrias de alimentos. El término “húmedo” significa que el vapor y el agua se pueden inyectar al interior del cilindro durante el procesado. Este tipo de extrusor procesa mayor tonelaje de productos extrudidos que cualquier otro diseño (Guy, 2002). En este extrusor, la única fuerza que mantiene al material girando con el tornillo y avanzando hacia adelante, es la fricción contra la superficie interna del barril. Este hecho tiende a limitar las formulaciones con un alto contenido de humedad y ricas en grasas podrían ser difíciles de extrudir en un extrusor de monotornillo. Esto debido a que el flujo en este extrusor es una combinación de flujo viscoso y viscoelástico (resultado del arrastre viscoso del producto al interior), que es proporcional a la velocidad del tornillo y por lo que la presión aumenta conforme avanza el flujo en el extremo del dado del extrusor (Sharman *et al.*, 2003).

### **1.1.3.1.1 Aplicaciones**

La primera y principal aplicación comercial de este tipo de extrusor en la industria del procesado de alimentos había sido la conversión de harina de sémola de trigo en pasta, utilizando tornillos sólidos, hasta que aparecieron desarrollos nuevos en su diseño que han aumentado su eficiencia y versatilidad. Guy en 2002 presenta una lista breve de los productos elaborados en extrusores de tornillo simple: Aperitivos de maíz expandidos directamente, cereales para desayuno, producción de soya de grasa completa, alimentos para animales domésticos, producción de alimentos infantiles, harinas y granos precocidos o térmicamente modificados. Sin embargo, estos extrusores tienen algunas limitaciones en el procesador de alimentos, como es su capacidad para procesar materiales que se vuelven pegajosos y/o gomosos durante el calentamiento y la compresión del material, en la cual, este extrusor reacciona desfavorablemente al cizallamiento externo, en comparación con un extrusor de cocción (Mian, 2003).

### **1.1.3.2 Extrusores secos**

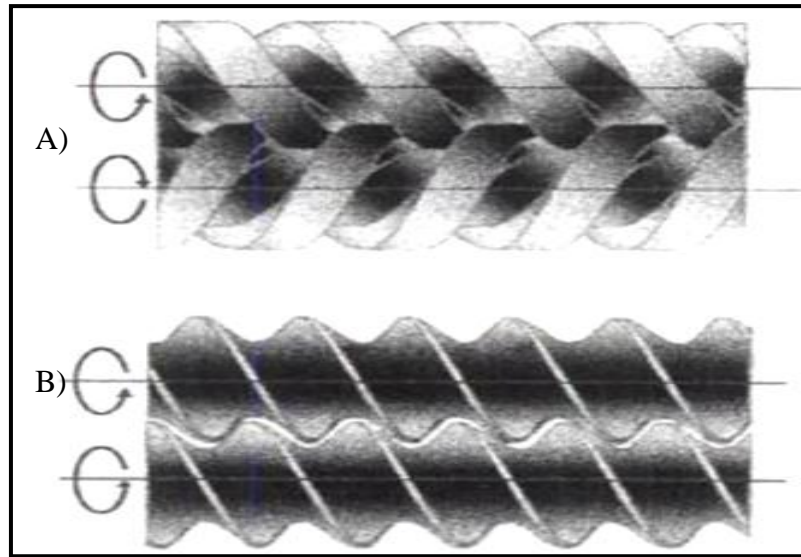
Los extrusores secos pueden procesar ingredientes que tiene un amplio intervalo de contenidos de humedad, es decir del 10 al 40%, dependiendo de la formulación premezclada. El termino extrusión “seca” significa que este tipo de extrusor no necesita una fuente externa de calor o vapor por inyección y el calentamiento de todo el producto se consigue mediante fricción mecánica (Mian, 2003). Los extrusores secos son extrusores de doble tornillo con segmentos de tornillo y cierre de vapor (placas de corte) en el eje para aumentar el cizallamiento y crear calor. En la extrusión seca, la presión y la temperatura están en su máximo nivel antes de la salida del dado. El intervalo de cocción puede ser entre 82-160 °C con una presión muy alta. Tan pronto como el material sale del extrusor, la presión de los productos es liberada, provocando que la humedad interna se pierda en forma de vapor haciendo que el producto se expanda (Guy, 2002).

#### **1.1.3.2.1 Aplicaciones**

Aunque el extrusor se diseño inicialmente para la cocción en la granja de granos de soya y piensos de cereales, hoy en día su utilización en numerosas aplicaciones, refleja su versatilidad y capacidad para obtener el objetivo necesario de una forma costo-efectividad (Mian, 2003). El uso del extrusor seco es la preparación de granos de soya y semillas de algodón. Las aplicaciones incluyen los siguientes alimentos: Cereales para desayuno, proteína vegetal, alimentos para animales domésticos y piensos de cultivos acuáticos (Guy, 2002; Mian, 2003).

### 1.1.3.3 Extrusores de doble tornillo

Estos tipos de extrusores son los comúnmente mas utilizados en la industria de alimentos y aperitivos alimentarios (Mian, 2003). El termino doble tornillo, se aplica a los extrusores con dos tornillos de igual longitud situados en el interior del mismo cilindro. Los extrusores de doble tornillo son más complicados que los extrusores de tornillo simple, pero al mismo tiempo proporcionan mayor flexibilidad y mejor control, generalmente están catalogados de acuerdo a la dirección de rotación del tornillo y al grado en el que se intercalan los tornillos, como se observa en la Figura 1 (Guy, 2002).



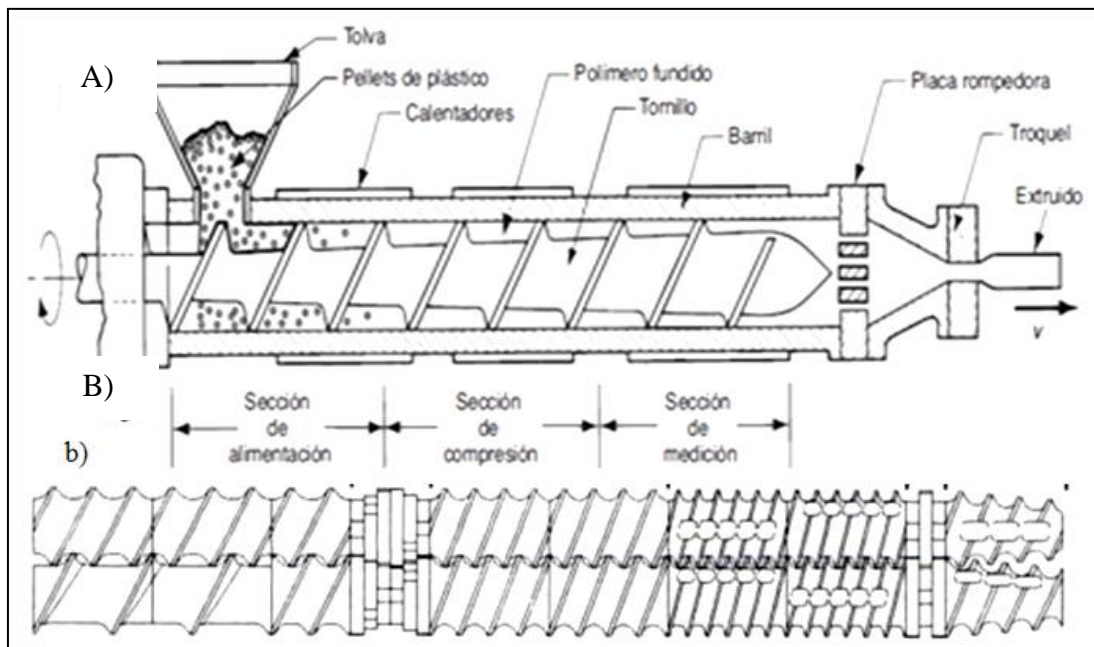
**Figura 1. Doble tornillo inter-engranados A) Contra-rotación; B) Co-rotación** (Mian, 2003).

Según la dirección relativa de la rotación del tornillo, estos extrusores se dividen en los que giran en el mismo sentido y los que giran en sentido contrario. Por lo general, los tornillos que giran en dirección contraria funcionan como una bomba de desplazamiento positivo debido a una cámara cerrada en forma de “C” constituida por los dos tornillos, que procesa material desde la alimentación hasta el extremo del dado. En los extrusores de tornillos gemelos que giran en el mismo sentido, las vueltas del tornillo combinadas producen pasajes que permiten que el material se mueva entre los alabes de un tornillo a otro. Los tornillos que giran en este sentido pueden operarse a velocidades altas en comparación con los extrusores de tornillos que giran en dirección contraria, y por lo tanto resultan apropiados para los procesos de cocimiento por extrusión de alto esfuerzo cortante (Sharman *et al.*, 2003).

### 1.1.3.3.1 Aplicaciones

Como se ha mencionado, son extrusores muy empleados en la industria de alimentos, ya que las ventajas de este extrusor son manejar materiales viscosos, aceitosos, pegajosos o muy húmedos (Mian, 2003). Originariamente se desarrollaron para el procesamiento de plásticos, pero las compañías de alimentos comenzaron a utilizar los extrusores de doble tornillo en productos como caramelos y dulces. Actualmente los extrusores de doble tornillo se están utilizando para los siguientes alimentos: gomas alimentarias, pasta precocida, fideos, espaguetis y macarrones, galletas, alimentos semihidratados, proteínas y vegetales texturizadas (soya), sopa y mezcla de salsas, queso y productos de caseína, productos de malvavisco, arroz y/o fideos instantáneos, bebidas en polvos y palitos de dulce (Adaptado Guy, 2002).

A continuación, en la Figura 2, se presentan los diagramas del extrusor de tornillo sencillo (A) y de doble tornillo (B) con las diferencias entre ellos en cuanto a diseño y etapas del proceso de extrusión. Los extrusores de tornillos gemelos que giran en el mismo sentido, se consideran los más



**Figura 2. A) Extrusor de un solo tornillo; B) Tornillos gemelos** (Adaptado Sharman *et al.*, 2003; Mian, 2003).

útiles para las industrias dado que producen una gran variedad de productos, por sus buenas características de mezcla, velocidades de giro altas y velocidades de producción aceptables, han hecho que los extrusores de tornillos gemelos sean una opción para la industria de alimentos en productos como botanas y los cereales para desayuno (Sharman *et al.*, 2003).



#### **1.1.4 Ventajas del proceso de extrusión**

La tecnología de la extrusión proporciona ventajas sobre los métodos tradicionales de procesado, tales como: amplia gama de productos con diversas formas que pueden ser obtenidos a través de las variables de operación con diversas materias primas con formas, texturas, colores, sabores y un bajo costo ya que los requerimientos de la mano de obra y espacio por unidad son menores en relación con otros sistemas de cocción-formación, mejorando la calidad del producto debido a que la cocción se realiza en un tiempo muy corto y tiene lugar una menor destrucción de los componentes sensibles al calor (Adaptado Mian, 2003; Barraza, 1993).

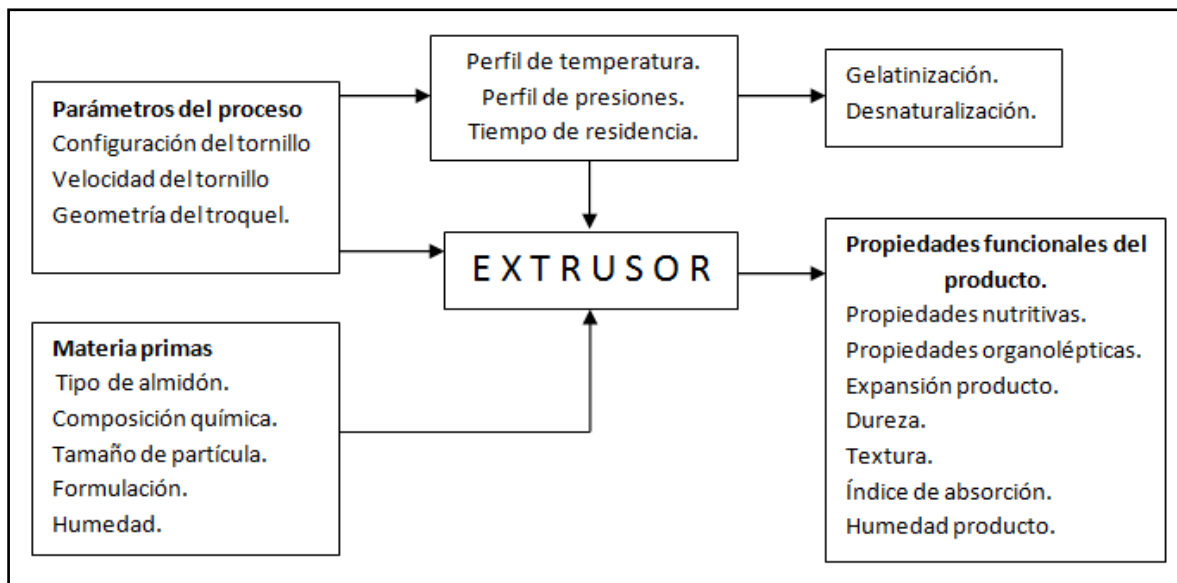
Además, la extrusión minimiza la degradación de nutrientes alimentarios mientras que mejora la digestibilidad de las proteínas (por desnaturalización) y de los almidones (por gelatinización). Sin embargo, la cocción por extrusión a altas temperaturas también destruye las enzimas no deseables, tales como lipasas y lipoxidasas, pero lo más importante es la destrucción de microorganismos presentes en los alimentos.

#### **1.1.5 Control del proceso de extrusión**

Por conciencia se ha solicitado a la industria de los alimentos, poner más énfasis en cuanto a la calidad de los productos. Sin embargo, para alcanzarlo, es necesario controlar el proceso de extrusión, por ejemplo, en la cocción por extrusión, los biopolímeros, principalmente el almidón y las proteínas, se plastifican con agua cuando son sometidos a un tratamiento mecánico y de energía térmica, para desarrollar así propiedades de textura deseada en los productos finales.

Diversos parámetros son fundamentales durante el proceso de extrusión como pueden ser: la velocidad de alimentación, ingredientes alimentados, el contenido de humedad inicial, humedad del proceso, caudal másico, velocidad de tornillo, temperatura, presión, viscosidad, configuraciones del tornillo y troquel, entre otros (Barraza, 1993; Adaptado Guy, 2002).

En otro sentido, para la mayoría de las aplicaciones del extrusor, la presión generada por el troquel y el cambio de temperatura durante el proceso son utilizadas como variables evaluables a la salida del extrusor para el registro de la calidad del producto. En este sentido son diversas las variables involucradas, que intervienen en el proceso de extrusión, las cuales están relacionadas entre sí, así como se muestra en la Figura 3 (adaptado de Guy, 2002).



**Figura 3. Interacción de las propiedades del material, variables de proceso y las características del producto**  
(adaptado, de Guy, 2002).

De forma general en el sistema de extrusión con una formulación determinada y para la obtención de un determinado producto, se contemplan variables que son resumidas en el cuadro anterior. Estas variables no pueden ser vistas de forma aislada, por ejemplo, la configuración del tornillo afecta el grado de la mezcla, la fuerza de cizalla introducida, la cantidad de calor generado por la fricción y la distribución del tiempo de residencia. Guy en 2002 reporta, que todos estos factores afectan el grado de cocción y la reología de la mezcla.

El diseño de la cuchilla giratoria y su velocidad afectan no sólo el tamaño y forma del producto, todos estos factores combinados afectan la calidad y consistencia del producto. Por ello, es importante entender y determinar los cambios y/o efectos que se llevan a cabo dentro del extrusor, desde que el material es alimentado a lo largo del tornillo, hasta la obtención del producto final requerido, de esta manera, se podrá tener conocimiento y control en las variables de proceso de la extrusión (Barraza, 1993).

### 1.1.5.1 Requisitos del producto

Las características del producto final son medidas de la calidad del producto final que resulta de los cambios producidos en los procesos y la forma en que se controlan las variables del proceso. Estos parámetros pueden ser establecidos como requisitos del consumidor, que consisten en los atributos sensoriales tales como el sabor, color, textura, olor, diferentes formas (cereales para desayuno), apariencia, humedad y seguridad microbiológica (Guy, 2002; Mian, 2003).

La mayoría de los requisitos del consumidor y regulatorios como puede ser el peso del producto en el embalaje, composición en ingredientes y demandas nutritivas, entre otros, pueden estar afectados por la composición de las materias primas, condiciones de operación del extrusor y de operaciones post extrusión en la calidad final del producto (Guy, 2002).

#### **1.1.5.1.1 Textura**

La textura es uno de los atributos sensoriales más importantes de los productos extrudidos. Por una parte la rápida evaporación del agua forma la textura característica de los productos extrudidos, cuando el almidón gelatinizado sale por el dado del extrusor. Como la presión se reduce súbitamente en el extrusor desde una alta presión hasta una presión atmosférica, el agua cambia su estado líquido a vapor. Las propiedades reológicas de la mezcla se desarrollan y controlan mediante la formulación, el perfil de temperatura a lo largo del proceso, el contenido de humedad en la mezcla, así como por la velocidad y el diseño del tornillo. Cabe señalar que también la textura del producto se ve afectada por el diseño de la boquilla y las operaciones post extrusión, tales como secado y tostado (Guy, 2002).

#### **1.1.5.1.2 Aromas y colores**

La cocción por extrusión es un proceso de alta temperatura, en el cual no se producen aromas esto debido al corto tiempo de residencia y a la evaporación súbita de los compuestos volátiles del aroma a medida que el producto se expande. Los aromas usualmente se añaden después de la extrusión para mejorar estos productos (Guy, 2002).

#### **1.1.5.1.3 Humedad**

La humedad es un catalizador crítico en los procesos de cocción por extrusión. Es necesaria para la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas. La extrusión de baja humedad puede dar como resultado, desnaturalización del almidón, dextrinización del almidón, degradación de las proteínas. Mian en 2003 señala, que también la pérdida de vitaminas y la reducción de la disponibilidad de aminoácidos se acelera, a medida que las humedades de extrusión disminuyen.

#### **1.1.5.1.4 Calidad microbiológica**

Los extrudidos convencionales como aperitivos y cereales para desayuno son seguros para su consumo por estar sujetos a temperaturas mayores 120 °C y la actividad de agua (Aw) es baja

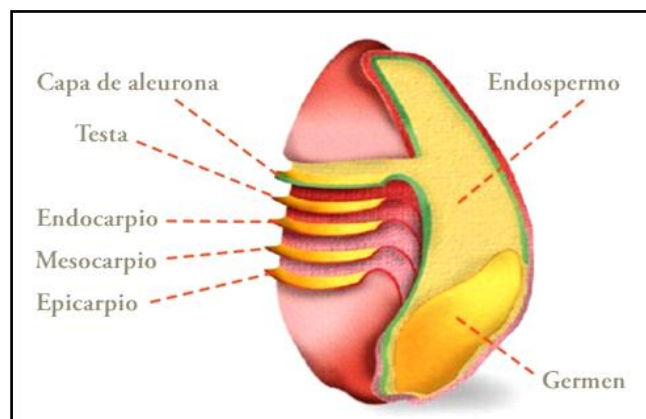
debido a que el producto se seca hasta un contenido de humedad menor al 5 %. Además, la vida de anaquel del producto es superior con respecto a otros productos elaborados por diferentes procesos (Barraza, 1993).

Como en cualquiera de las otras operaciones del procesado de los alimentos. Guy en 2002 señala que es importante tener presente otros procedimientos de seguridad e higiene, como buenas prácticas de manufactura (GPM) y planes de análisis de riesgo y control de puntos críticos (HACCP), para reducir el riesgo de contaminación durante los procesos a los que se somete el producto referente NOM-147-SSA1-1996.

## 1.2 Los cereales

Ahora bien, los cereales para desayuno están elaborados a base granos que son miembros de la familia de las “gramíneas”, las cuales producen frutos con una sola semilla. La cariópside o grano está formada por una cubierta del fruto o pericarpio que rodea a la semilla y se adhiere fuertemente a la semilla. La semilla se compone a su vez por embrión o germen y endospermo encerrados en la cubierta de la semilla (Hoseney, 1991). Entre los principales cereales se encuentra el trigo, arroz, maíz, avena, cebada, centeno, mijo y sorgo, de los cuales, los tres primeros se consideran los más importantes en la alimentación humana. Los cereales contribuyen con alrededor del 45 % en calorías y son fuente de proteínas en la dieta mundial (Desrosier, 1983). Un grano de cereal está formado por tres partes claramente diferenciadas como se observa en la Figura 4:

- Cascarilla, salvado o pericarpio (cubierta externa): Estas contienen principalmente fibra. Se conocen popularmente como salvado y está formado por varias capas (epicarpio, mesocarpio y endocarpio) que constituyen al pericarpio y la testa.



**Figura 4. Representación de las partes de la semilla de un cereal** (Contreras *et al.*, 2010).

- Endospermo o núcleo central del grano: Es rico en almidón y en menor medida en proteínas, el endospermo amiláceo constituye entre un 70-80 % del grano y una capa de aleurona (reserva de almidón) que lo rodea, excepto en el caso de la cebada; es una monocapa.
- El germen y/o embrión: Contiene lípidos y proteínas, pigmentos naturales, almidón, enzimas y vitaminas fundamentalmente del complejo B. Se localiza cerca de la base del grano y se encuentra unido al endospermo (Contreras *et al.*, 2010).

### 1.2.1 El almidón de los cereales

Los cereales almacenan energía en el grano en forma de almidón, esta cantidad de almidón que contiene cada grano del cereal varía, pero generalmente oscila entre el 65 y 75 % del peso del grano. Gran parte de los carbohidratos consumidos por los humanos, están en forma de almidón, el cual es una fuente rica de energía, además de su valor nutritivo, el almidón es importante por las múltiples propiedades funcionales en los alimentos (Hoseney, 1991). El almidón se encuentra como una mezcla de dos diferentes polímeros: la amilosa y la amilopectina.

#### 1.2.1.1 Amilosa y amilopectina

En la Figura 5, se presentan las estructuras de la amilosa así como de la amilopectina, en donde la amilosa presenta una estructura lineal y la amilopectina una estructura ramificada.

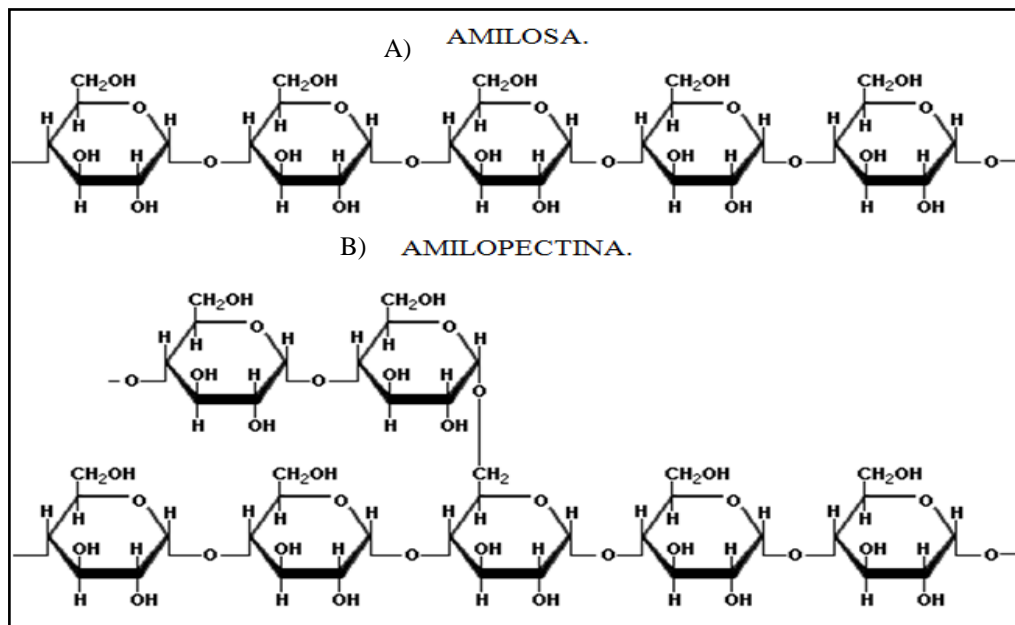


Figura 5. A) Estructura lineal de la amilosa; B) Estructura ramificada de amilopectina (Adaptación Serna-Saldivar, 1996).

En términos generales los almidones constan de dos fracciones de polisacáridos: amilosa y amilopectina, en particular la amilosa, representa de un 15 a un 30 % del almidón y es responsable de la textura arenosa, considerado un polímero lineal con más de 200 glucosas, mientras que el porcentaje restante de almidón es de amilopectina con formas ordenadas en estructuras paralelas creando zonas amorfas y porosas siendo la responsable de que el almidón sea pegajoso. Según Silvia en 2007, la amilosa consiste en largas cadenas de moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4; y constituye en promedio entre el 20-30 % del gránulo de almidón. En la amilopectina las cadenas lineales de moléculas de glucosa están unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4 y las ramificaciones ocurren en los enlaces  $\alpha$ -1,6. La concentración relativa de estos polímeros se rige por factores genéticos típicos de cada cereal (Tabla 1).

**Tabla 1. Características de algunos almidones usados en la industria de alimentos.**

| Tipo cereal          | Amilopectina (%) | Amilosa (%) | Temperatura de gelatinización (°C) | Tamaño del gránulo (µm.) |
|----------------------|------------------|-------------|------------------------------------|--------------------------|
| Maíz                 | 73               | 27          | 62-72                              | 5-25                     |
| Maíz rico en amilosa | 20-45            | 55-80       | 67-80                              | 5-25                     |
| Papa                 | 78               | 22          | 56-67                              | 5-10                     |
| Arroz                | 83               | 17          | 62-78                              | 2-5                      |
| Tapioca              | 82               | 18          | 51-65                              | 5-35                     |
| Maíz céreo           | 99-100           | 0-1         | 63-72                              | 5-25                     |
| Sorgo céreo          | 99-100           | 0-1         | 67-74                              | 5-25                     |
| Trigo                | 76               | 24          | 58-64                              | 11-41                    |

Fuente: Badui (1999).

Algunos cereales, como el maíz, sorgo y arroz, tienen variedades llamadas “cereas” que están constituidas casi únicamente por amilopectina, sin embargo hay otras que tiene hasta el 90 % de amilosa. En tanto, la amilosa como la amilopectina influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización (Badui, 1999). Además, la relación entre la amilosa y la amilopectina, tiene una gran influencia en las propiedades de textura en los productos expandidos: la amilopectina promueve el inflado dando productos muy claros en coloración del producto y con poca dureza. Por el contrario, los almidones ricos en amilosa tienden a elaborar productos más duros y con poca expansión (Barraza, 1993).

### 1.2.1.2 Gelatinización del almidón

La gelatinización del almidón es el “rompimiento del orden molecular dentro del grano de almidón” de las cadenas poliméricas. Cuando el almidón se encuentra en condiciones de temperatura de entre

los 60 y 75 °C, en un medio acuoso los gránulos absorben cierta cantidad de agua aproximadamente del 30 %, al continuar el proceso térmico se hinchan liberando amilosa y amilopectina, convirtiéndose en un gel al retener hasta 20 veces su peso en agua. Este proceso es reversible antes de que se alcance la temperatura de gelatinización de la amilosa (70 -75 °C) (Rojas y Molina, 2007). Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a que su estructura está altamente organizada en una conformación con dobles hélices y por presentar una gran estabilidad como consecuencia de las múltiples interacciones de sus dos polisacáridos constituyentes. Sin embargo, cuando se calientan en presencia de humedad empiezan estos gránulos un proceso lento de absorción de agua en las zonas intercelulares amorfas. A medida que se incrementa la temperatura, se retiene más agua y el gránulo empieza a hincharse, aumentando su volumen, fenómeno que se puede observar en el microscopio. Si se administra más calor, el gránulo hinchado, incapacitado para retener más agua se rompe parcialmente y la amilosa así como la amilopectina, ambas fuertemente hidratadas se dispersan en el seno de la disolución (Badui, 1999).

### 1.2.2 Las proteínas de los cereales

Las proteínas de los cereales se clasifican de acuerdo con su solubilidad, en distintos disolventes en cuatro diferentes fracciones (Tabla 2) según Serna-Saldivar (1996). Posteriormente, se clasificaron las propiedades de solubilidad de las proteínas de los cereales por Badui (1999):

- Albúminas: Solubles en agua
- Globulinas: Soluciones salinas diluidas.
- Pro laminas: Soluciones alcohólicas.
- Gluteninas: Soluciones diluidas en ácidos o álcalis.

**Tabla 2. Distribución de las proteínas del endospermo de los cereales según su solubilidad**

| Especie   | Albuminas                              | Globulinas        | Prolaminas       | Glutelinas        |
|-----------|--|-------------------|------------------|-------------------|
|           | Porcentaje sobre proteínas totales (%) |                   |                  |                   |
| Avena     | 5-10                                   | 50-60 (Avenalina) | 10-15            | 5 (avenina)       |
| Trigo     | 5-10                                   | 5-10              | 40-50 (gliadina) | 30-40 (glutenina) |
| Maíz      | 2-10                                   | 10-20             | 50-55 (zeina)    | 30-45             |
| Cebada    | 3-4 (leucosina)                        | 10-20 (edestina)  | 35-45 (hordeína) | 35-45             |
| Arroz     | 6                                      | 10                | 3                | 81                |
| Centeno   | 20-30 (leucosina)                      | 5-10 (edestina)   | 20-30 (secalina) | 30-40             |
| Triticale | 20-30                                  | 5-10              | 20-30            | 30-40             |

Fuente: Callejo (2002).

De las cuatro fracciones proteicas, las albúminas y las globulinas tienen el mejor balance de aminoácidos esenciales. Por otra parte, las legumbres, son ricas en aminoácidos como la lisina pero pobres en aminoácidos azufrados, en cambio, las proteínas de los cereales son ricas en aminoácidos esenciales como la leucina (Callejo, 2002).

**Tabla 3. Composición de aminoácidos esenciales de diferentes cereales.**

| <b>Aminoácido (g/100g Proteína)</b> | <b>Trigo</b> | <b>Maíz</b> | <b>Arroz</b> | <b>Sorgo</b> | <b>Cebada</b> | <b>Centeno</b> | <b>Avena</b> |
|-------------------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|----------------|--------------|
| Fenilalanina                        | 4.6          | 4.8         | 5.2          | 5.1          | 5.2           | 5.0            | 5.4          |
| Histidina                           | 2.0          | 2.9         | 2.5          | 2.1          | 2.1           | 2.4            | 2.4          |
| Isoleucina                          | 3.0          | 3.6         | 4.5          | 4.1          | 3.6           | 3.7            | 4.2          |
| Leucina                             | 6.3          | 12.4        | 8.1          | 14.2         | 6.6           | 6.4            | 7.5          |
| Lisina                              | 2.3          | 2.7         | 3.9          | 2.1          | 3.5           | 3.5            | 4.2          |
| Metionina                           | 1.2          | 1.9         | 1.7          | 1.0          | 2.2           | 1.6            | 2.3          |
| Treonina                            | 2.4          | 3.5         | 3.7          | 3.3          | 3.2           | 3.1            | 3.3          |
| Triptófano                          | 1.5          | 0.5         | 1.3          | 1.0          | 1.5           | 0.8            | ND           |
| Valina                              | 3.6          | 4.9         | 6.7          | 5.4          | 5.0           | 4.9            | 5.8          |

ND: No detectable

Fuente: Serna –Saldivar (1996).

Desde Charley en 1987, se ha estudiado que las harinas de los cereales también contribuyen con estructura o rigidez a los productos horneados. Esta rigidez se debe al gluten que se coagula por el calor, mientras que el almidón gelatiniza. Las harinas difieren en la cantidad y calidad del gluten que producen y esto a su vez, afecta la capacidad para fijar o mantener la humedad mediante la formación de diversas estructuras, al respecto el amaranto contiene un alto contenido proteico, como veremos a continuación.

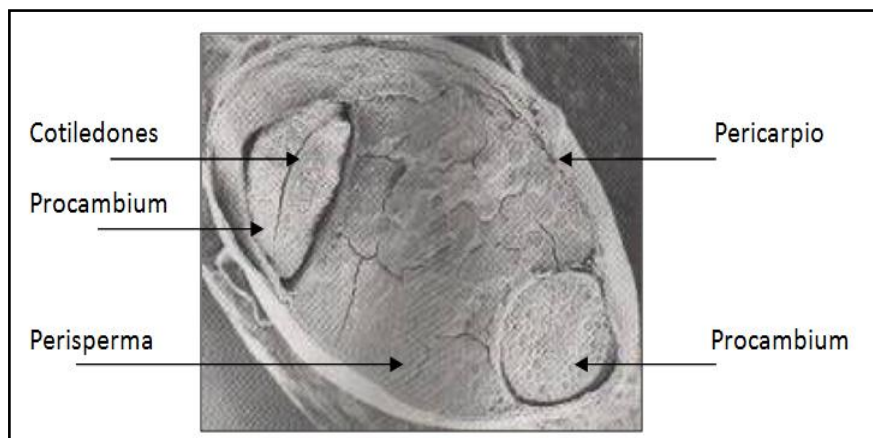
### **1.2.3 El amaranto**

Actualmente, el amaranto es cultivado en varios estados de la república Mexicana como son: Distrito Federal, Guanajuato, Hidalgo, Estado de México, Morelos Nayarit, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala, con una producción anual de 2,959.98 toneladas (Calleado *et al.*, 1996). Estudios recientes afirman que la semilla del amaranto es muy nutritiva ya que ésta posee minerales como calcio, fosforo, magnesio, hierro y vitaminas como la A y C, además de tener un alto contenido de proteínas con aminoácidos esenciales como la lisina (Kirk *et al.*, 1999).



### 1.2.3.1 Morfología de la semilla.

El grano del amaranto es muy pequeño, mide de 1 a 2 mm., de diámetro, pesa de 0.2 a 1.1 mg., y el número de granos por gramo oscila entre 1000 a 3000. Tiene forma lenticular y el color varía desde blanco, blanco amarillento, dorado, rosado hasta negro (Lara, 1999). Todas las especies silvestres presentan granos negros y cubiertas muy duras. Las especies cultivadas tiene el grano blanco y se caracterizan por el almidón presente, el cual favorece la capacidad del reventado (Kigel, 1994). En la Figura 6, se pueden apreciar las características estructurales de la semilla de amaranto.



**Figura 6. Estructura del grano de amaranto** (Adaptado Silva, 2007).

A diferencia del trigo, arroz o avena, en el amaranto el embrión tiene forma circular y está rodeado por el perisperma. El embrión del amaranto puede contener aproximadamente el 30% de proteína y el 20% de aceite (Becker, 1994).

### 1.2.3.2 Composición química

La composición química de la semilla de amaranto se puede comparar con otras semillas convencionales como el maíz, trigo y arroz (Tabla 4).

**Tabla 4. Comparación de la composición proximal de algunos cereales con el amaranto.**

| AQP                | <i>Amaranto</i><br>(%) | <i>Maíz</i><br>(%) | <i>Trigo</i><br>(%) | <i>Arroz</i><br>(%) |
|--------------------|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Proteínas          | 17.1 - 19.4            | 10.3 - 12.6        | 9 - 12.2            | 8                   |
| Grasas             | 8.0 - 8.6              | 4.6 - 5.7          | 1.1 - 3.4           | 1.1                 |
| Carbohidratos      | 66 - 71                | 73.6 - 92          | 71.9 - 87           | 89.8                |
| Fibras             | 3.7 - 5.7              | 2.3                | 2.6                 | 1                   |
| Calorías / 100 gr. | 391                    | 404                | 390                 | 409                 |

Fuente: Hernández y Herrerías (1998).

Los análisis de composición indican que los contenidos de proteína, grasa y fibra de amaranto son generalmente más altos que en los demás cereales, sin embargo el contenido de carbohidratos en este cereal es más bajo comparado con los otros cereales, y de los que hablaremos a continuación.

### **1.2.3.2.1 Carbohidratos**

El contenido de almidón en el grano de amaranto varía del 48 al 69 % y es el constituyente más abundante. Presenta una naturaleza caracterizada por el predominio de las cadenas ramificadas de amilopectina (Bressani, 1994). Este almidón presenta propiedades funcionales especiales asociadas al contenido de amilopectina, además su temperatura de gelatinización varía entre los 54 a 75 °C (López *et al.*, 1996). Otros carbohidratos presentes en el grano de amaranto son monosacáridos y oligosacáridos (Bressani, 1994).

El contenido de monosacáridos está en nivel de trazas y parece ser que la glucosa es la más representativa (0.12 a 0.67 %) seguida de la fructosa (0.05 a 0.13 %). Los valores antes mencionados son altos al compararlos con los datos reportados para el trigo (0.01 a 0.04 %) o para el maíz (0.02 a 0.09 %).

También esto indica que el contenido de algunos carbohidratos como arabinosa, xilosa, manosa, galactosa es muy similar entre las variedades de *Amarantus caudatus*.

En cuanto a los oligosacáridos, se ha determinado que la sacarosa está presente en mayor cantidad (1.08 a 2.26 %), seguida en importancia por la rafinosa con 0.45 a 1.23 % (Bressani, 1994). Por otro lado, la rafinosa es el oligosacárido más abundante con el 1.65 % en promedio, en alrededor de ocho diferentes especies (López *et al.*, 1996).

El poder de hinchamiento, la solubilidad y la capacidad de absorción de agua son propiedades importantes de los almidones y han sido evaluadas en diferentes especies de amaranto y en otras fuentes amiláceas. El alto contenido de amilopectina y el tamaño de los gránulos confieren al almidón de amaranto útiles y especiales aplicaciones relacionadas con la viscosidad y la temperatura de gelatinización. El bajo contenido de amilosa en el amaranto limita su utilización (López *et al.*, 1996; Lara, 1999).

### 1.2.3.2.2 Proteínas y aminoácidos

Una de las características más importantes del amaranto es sin duda, su valor nutritivo, el grano de amaranto contiene un alto contenido proteico, entre el 17.1 y el 19.4 %. Su proteína es de excelente calidad ya que posee un balance casi perfecto de aminoácidos para formar proteínas en el ser humano, siendo superior al contenido proteínico de la leche (Hernández y Herrerías, 1998).

La calidad nutricional de la proteína del grano es importante por los aminoácidos azufrados y lisina, permitiendo la asimilación de nutrientes (Ometto y Brunini, 1991; Hernández y Herrerías, 1998).

Los aminoácidos esenciales no se pueden producir en el organismo por lo que se obtienen de alimentos como huevo, leche, carne, leguminosas y cereales (maíz, arroz, trigo, avena y el amaranto).

El amaranto es un alimento rico en aminoácidos esenciales como podemos observar en la Tabla 5, que se presenta a continuación.

**Tabla 5. Aminoácidos esenciales de tres especies de amaranto.**

| Aminoácido                 | <i>Amaranthus hypochondriacus</i>          | <i>Amaranthus cruentus</i> | <i>Amaranthus caudatus</i> |
|----------------------------|--|----------------------------|----------------------------|
|                            | Cantidades expresada en g/100g de proteína |                            |                            |
| Isoleucina                 | 2.8 - 3.8                                  | 3.4-3.7                    | 3.6-4.1                    |
| Leucina                    | 5.0 - 5.8                                  | 4.8-5.9                    | 5.9-6.3                    |
| Lisina                     | 3.2-6.0                                    | 4.8-5.9                    | 5.7-6.4                    |
| Met + Cis <sup>b</sup>     | 2.6-5.5                                    | 3.8-5.4                    | 4.7                        |
| Fenila + Tiro <sup>c</sup> | 6.9-8.5                                    | 5.6-8.5                    | 6.2                        |
| Treonina                   | 2.6-4.3                                    | 3.2-4.2                    | 3.8                        |
| Triptófano                 | 1.1-4.3                                    | Nd                         | 1.1                        |
| Valina                     | 3.2-4.2                                    | 2.4-4.0                    | 4.1-4.7                    |

*Nd*: Cantidad no detectada

Fuente: Silva (2007).

En general, el contenido de aminoácidos esenciales del amaranto, tiene niveles adecuados en cuanto a los aminoácidos azufrados (2.6 a 5.5 %) y lisina (3.2 a 6.4 %); este último corresponde casi al doble de lo que contiene el maíz y el trigo (2.2 a 4.5 %) y algo menos de lo encontrado en leguminosas importantes como chícharos, frijoles y soya alrededor del 1.4 % (Silva, 2007).

### 1.2.3.2.3 Lípidos

Contiene entre un 7 y 8 % de grasas saludables. Destaca la presencia de escualeno, el cual en el aceite de amaranto es de buena calidad y el contenido de aceites es superior al de maíz (Tabla 6).

**Tabla 6. Composición del aceite de la semilla de amaranto.**

| <b>Acido graso</b>  | <b>Contenido (g / 100g)</b> |
|---------------------|-----------------------------|
| Ácido oleico        | 29.3                        |
| Ácido linoleico     | 44.0                        |
| Ácido palmítico     | 18.4                        |
| Ácido linolénico    | 1.3                         |
| Ácido mirístico     | 0.2                         |
| Ácido miristoleíco  | 0.1                         |
| Ácido miristolénico | 0.1                         |
| Ácido palmitoleíco  | 0.8                         |
| Ácido palmitolénico | 0.9                         |
| Ácido esteárico     | 3.8                         |

Fuente: Chagaray (2005).

### 1.2.3.2.4 Vitaminas y minerales

El amaranto es un alimento rico en vitaminas y minerales importante en el tratamiento de la osteoporosis, ya que contiene calcio y magnesio como se muestra en la Tabla 7. Las hojas tienen más hierro que las espinacas (Chagaray, 2005). Contienen mucha fibra, vitamina A y C así como hierro, calcio y magnesio.

**Tabla 7. Composición de vitaminas y minerales presentes en el amaranto.**

| <b>Componente</b> | <b>Cantidad*</b> |
|-------------------|------------------|
| Cenizas (g.)      | 2.6              |
| Calcio (mg.)      | 267              |
| Fósforo (mg.)     | 67               |
| Hierro (mg.)      | 3.9              |
| Potasio (mg.)     | 411              |
| Vitamina A (IU)   | 6100             |
| Tiamina (mg.)     | 0.08             |
| Riboflavina (mg.) | 0.16             |
| Niacina (mg.)     | 1.4              |
| Vitamina C (mg.)  | 80               |

\*Cantidad expresada por 100 g de porción comestible. Fuente: Chagaray (2005).

## 1.2.4 El trigo

Trigo es el nombre común de los cereales de un género de la familia de las gramíneas cultivado como alimento desde tiempos prehistóricos por los pueblos de las regiones templadas; actualmente es el cereal más importante de dichas regiones.

A nivel mundial el trigo es el cereal más consumido con un promedio de 67 *per capita* (kg/persona/año); en la república mexicana el consumo *per capita* es de 47. La producción del trigo ha mantenido una tendencia creciente, colocándose en el tercer lugar en el ranking mundial de los cereales, se estima que los cereales aportan energía a la dieta humana, por su alto contenido de almidón.

Los cereales se caracterizan por poseer una buena cantidad y calidad de fibra necesaria para el correcto funcionamiento gastrointestinal, además, proporcionan importantes cantidades de proteínas, vitaminas de complejo B y minerales (Serna-Saldivar, 1996).

### 1.2.4.1 Morfología del grano

En general el grano de trigo está compuesto por endospermo, salvado o afrecho y germen. Este tiene la siguiente composición en porcentaje medio: endospermo 85 %, salvado 12.5 %, germen 2.5 % (Kirk *et al.*, 1999), como se muestra a continuación en la Figura 7.

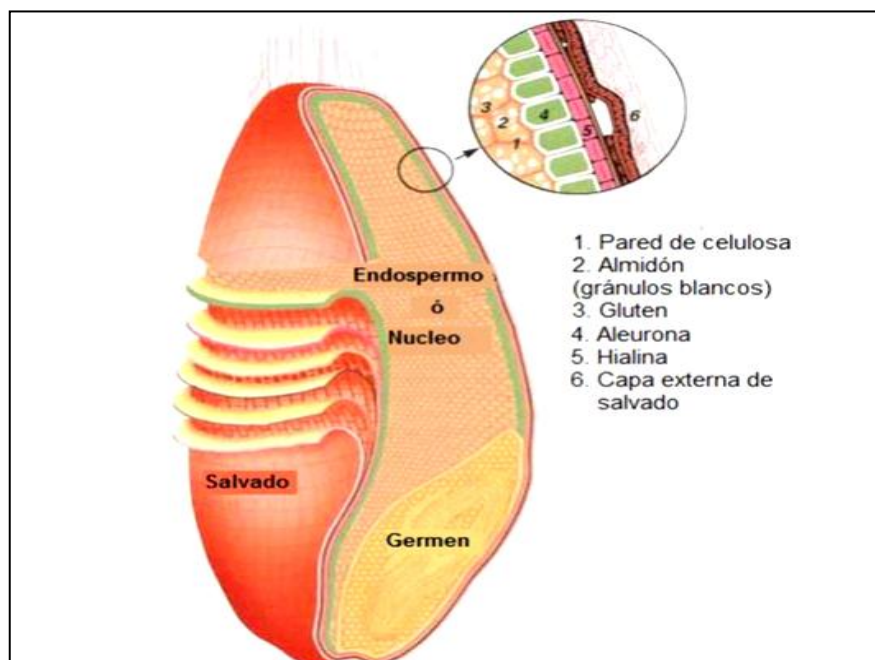


Figura 7. Estructura del grano del trigo (Valenzuela, 2011).

En el endospermo se encuentra presente, almidón, proteínas y en menor cantidad de lípidos totales, en la cascarilla la fibra cruda y más de la mitad de las sustancias minerales totales están presentes en el pericarpio, testa y aleurona (Valenzuela, 2011).

El germen se encuentra en un extremo, mientras que en el otro hay un grupo de finas vellosidades, además, a lo largo de la cavidad del grano existe un repliegue o surco llamado aleurona y varias capas envoltoras, existiendo en el fondo una zona pigmentada (Kirk *et al.*, 1999).

Los minerales en el grano del trigo están concentrados en el salvado y en áreas adyacentes a este. Los alimentos que tienen un alto contenido de cenizas, son más oscuros y se puede suponer que contienen más partículas finas de salvado o más de la porción del endospermo adyacente al salvado (Pomeranz, 1988).

#### **1.2.4.2 Composición química**

La composición química del trigo en promedio se constituye de un 74 % de carbohidratos, 11 % de proteína, 1.25 % de lípidos y 0.4 % de vitaminas y minerales.

El grano maduro del trigo está formado por: hidratos de carbono (fibra cruda, almidón, maltosa, sucrosa, glucosa, melibiosa, pentosanos, galactosa y rafinosa), compuestos nitrogenados que principalmente son proteínas (albúmina, globulina, prolamina y gluteínas estas últimas también llamadas gluteninas), lípidos (ácidos grasos como mirístico, palmítico, esteárico, palmitooleico, oléico, linoléico), sustancias minerales (K, P, S, Cl ) y agua junto con pequeñas cantidades de vitaminas (inositol, colina y del complejo B), enzimas ( $\beta$ -amilasa, celulasa) y de otras sustancias como pigmentos. Estos nutrientes se encuentran distribuidos en las diversas áreas del grano de trigo, y algunos se concentran en regiones determinadas (Kirk *et al.*, 1999).

##### **1.2.4.2.1 Carbohidratos**

El 72 % del peso de la cariósida del trigo está constituido por carbohidratos y este a su vez conformado por alrededor del 60 al 68 % de almidón, 6.5 % de pentosas, del 2 al 2.5 % de celulosa y del 1.5 % de azúcares reductores. El carbohidrato principal es el almidón y desde el punto de vista tecnológico es el más importante debido a su capacidad de retener agua.

Como se ha venido mencionando en general, los gránulos de almidón del trigo están formados por dos tipos de moléculas, lineales conocida como amilosa y ramificadas como lo es la amilosa y amilopectina. Este almidón contiene del 19 al 26 % de amilosa y del 74 al 81 % de amilopectina. Su intervalo de temperatura de gelatinización del almidón generalmente está entre los 56 y 60 °C (Quaglia, 1991).

El almidón, que contiene el trigo en conjunto con las proteínas, es sumamente importante para lograr la expansión deseada en el cereal para desayuno, caso contrario al almidón del amaranto que carece de estas características resultando benéfica la presencia de trigo a la expansión del cereal de amaranto.

#### **1.2.4.2.2 Proteínas y aminoácidos**

Como sabemos el contenido proteico de los cereales es importante por dos motivos, desde el valor nutricional, así como del funcional, esto debido a la cantidad y tipo de proteína que contiene (Hoseney, 1991).

Cabe resaltar que entre las harinas de los cereales, principalmente la del trigo tiene la habilidad de formar una masa fuerte, cohesiva, capaz de retener gas y rendir por cocción un producto esponjoso. Esto se atribuye fundamentalmente a las proteínas del trigo y en especial a las proteínas que forman el gluten.

El trigo posee un contenido de proteínas del 12 al 14 %, estas proteínas son básicamente gluteninas y gliadinas, ambas suman el 85 % (Badui, 1999). En general, las gliadinas tienen poca resistencia a la extensión, pero son responsables de darle cohesividad a las masas y por otra parte la glutenina confiere propiedades de resistencia a la extensión.

Las proteínas de reserva del trigo son únicas, porque son también proteínas funcionales, además de que no poseen actividad enzimática, sin embargo, tienen la facultad de formar una red tridimensional denominada gluten.

A continuación se presentan, en la Tabla 8, las proteínas presentes en el trigo, así como sus características y propiedades funcionales de acuerdo con su tipo y naturaleza, debida a la composición de sus aminoácidos.

**Tabla 8. Características de las proteínas de la harina de trigo**

| Proteínas                        | Gluten<br>(85%)   |   | No gluten<br>(15%)    |                   |
|----------------------------------|---|---|-----------------------|-------------------|
|                                  | tipo de proteína y proporción   | glutenina<br>40 a 45 %                                    | gliadina<br>55 a 60 % | albúminas<br>60 % |
| grupos iónicos (moles por 100g.) | - poco iónicos.<br>relativamente ricos en aminoácidos básicos.        | - muy poco iónico.<br>- pobres en lisina.                 | -                     | ricas en lisina.  |
| grupos amida<br>grupos hidroxilo | explica la fuerte hidratación y el gran número de enlaces hidrógeno.  |   |                       | -                 |
| grupos no polares                | - muchos de estos aminoácidos están disponibles para enlazar lípidos. | - ricos en prolina (proporción alta de $\alpha$ -hélice). | -                     | -                 |

Nota: Harina con contenido aproximadamente del 12% de proteínas.

Fuente: Quaglia (1991).

### 1.2.4.2.3 Lípidos

En la composición química del trigo los lípidos se encuentran en pequeños porcentajes alrededor del 1.5 y 2 % y están localizados principalmente en el germen. Los lípidos más importantes son los glicéridos, los fosfolípidos y los esteroides como el sitosterol y el campesterol, en la composición de los ácidos grasos en cuanto a los glicéridos y fosfolípidos, sobresalen los ácidos grasos insaturados, como el ácido oleico y el linoleico; el germen es particularmente rico en tocoferol, que toma comúnmente el nombre de vitamina E (Quaglia, 1991).

### 1.2.4.2.4 Vitaminas y minerales

Con respecto a las vitaminas y precursores, el trigo contiene cantidades apreciables de ciertas vitaminas tales como la tiamina (vitamina B<sub>1</sub>), la riboflavina (vitamina B<sub>2</sub>), la niacina (vitamina B<sub>3</sub>), el ácido fólico (vitamina B<sub>9</sub>), la biotina (vitamina B<sub>8</sub>), la colina (B<sub>7</sub>), el inositol (B-h), los tocoferoles (vitamina E) y la xantofila (carotenoide) y precursores de la vitamina A; A su vez es completamente carente en otras como las vitaminas C y D. Las vitaminas están presentes en la capa aleurona y/o en el escutelo y los minerales solo en la aleurona del grano.

Las vitaminas se encuentran en gran parte en el producto de desecho de la molienda: el 24 % del total de la tiamina se encuentra contenida en el endospermo, el 13 % en el germen y el 61 % en otras capas. El contenido de cenizas está fuertemente relacionado con los componentes de la harina que sabemos influyen en el color (Pomeranz, 1988; Quaglia, 1991; Hosney, 1991).



## **CAPÍTULO II. DISEÑO EXPERIMENTAL.**

En el presente capítulo se desarrollará la propuesta de investigación entorno al estudio de la operación de extrusión, a partir de la elaboración de un cereal para desayuno.

### **2.1 Problema**

Estandarización del proceso de extrusión de un cereal para desayuno de amaranto-trigo, que cumpla con parámetros mínimos de calidad.

### **2.2 Hipótesis**

El endospermo de la semilla del cereal es rico en almidón y fuente de proteínas, el pericarpio contiene la fibra. Y los niveles altos de almidón maximizan la expansión del producto final. Este almidón alcanza su gelatinización en un intervalo de temperatura y en humedad inicial alta. En el proceso de extrusión, la temperatura y presión aumentan debido al cizallamiento del material con la configuración del tornillo, provocando así una vaporización inmediata y creando una estructura porosa con una menor densidad en el producto. Por lo tanto, si se controla en el proceso de extrusión la interacción de la harina de amaranto con un tamaño de partícula fino, una humedad inicial del 33 % y con el diseño de tornillo de 11 alabes, se obtendrá el mayor grado de gelatinización del almidón y, esto maximizará la expansión del cereal, la porosidad será mayor por el cambio de presión y temperatura a la salida del extrusor, lo cual generará menor dureza y densidad en el producto final.

### **2.3 Objetivos**

#### **2.3.1 General**

Evaluar el efecto de la humedad inicial, el tamaño de partícula de la harina de amaranto y el diseño del tornillo, en el proceso de extrusión de un cereal para desayuno a partir de amaranto, con el fin de obtener un producto con las mejores propiedades de calidad.

#### **2.3.2 Particulares**

- Determinar la distribución de tamaños de la harina de amaranto, mediante el análisis granulométrico, para el establecimiento de los niveles de variación del tamaño de partícula.

- Establecer la formulación y los parámetros de acondicionamiento de las materias primas mediante la evaluación del tiempo-nivel de mezclado y el contenido de humedad inicial (28 y 33%), en la elaboración de un cereal para desayuno a base de amaranto.
- Evaluar un cereal comercial a través de la determinación de la humedad, índice de absorción de leche, grado de gelatinización, porosidad y dureza, así como las características sensoriales y microbiológicas, para comparar las propiedades del cereal de amaranto con este cereal comercial.

## 2.4 Variables.

A continuación se presentan, de manera esquemática, las variables estudiadas.

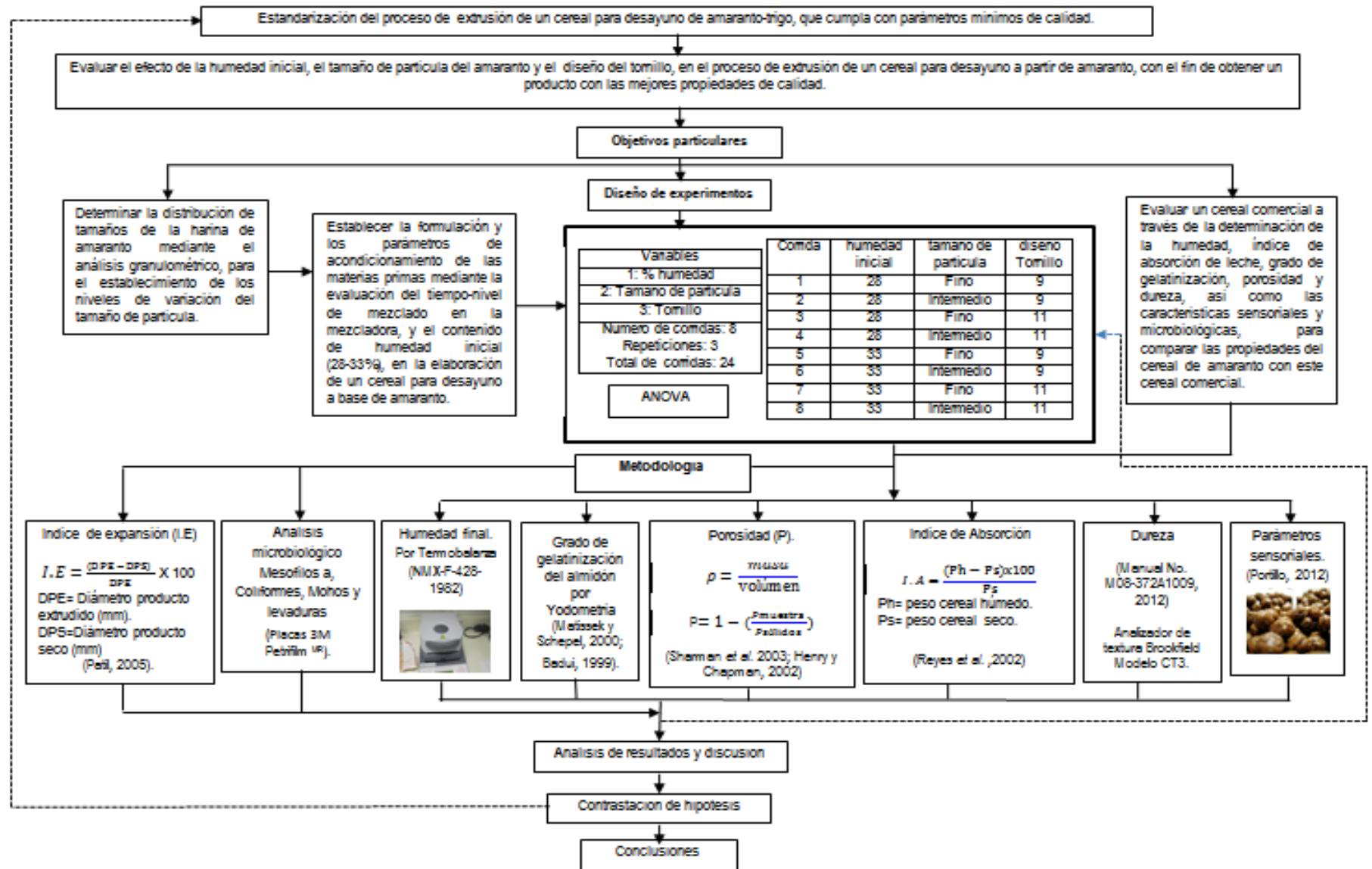
**Tabla 9. Variables estudiadas.**

| <b>Independiente y Niveles</b>  | <b>Dependiente</b>                   | <b>Respuesta</b>   |
|---|--------------------------------------|--|
| Humedad inicial.<br>Niveles: 28 y 33 %  | Humedad final del cereal.            | Presencia de colonias en el cultivo del cereal               |
| Tamaño de partícula de la harina de amaranto.<br>Niveles: Finos e Intermedios | Grado de gelatinización del almidón. | Índice de expansión.   |
|   |                                      | Índice de absorción.   |
|   |                                      | Textura (dureza).  |
| Diseño de tornillo.<br>Niveles: 9 y 11 alabes                                 | Porosidad.                           | Parámetros sensoriales (textura, sabor, color y apariencia). |

## 2.5 Diseño Estadístico (Gutiérrez y Salazar, 2008).

El diseño de experimentos aplicado fue un factorial  $2^3$ , en donde se estudian tres factores con dos niveles cada uno (Tabla 9); con 8 corridas base, con 3 repeticiones y un total de 24 corridas. Con respecto al análisis sensorial se realizó un ANOVA, para ver diferencias entre corridas con respecto a cada atributo evaluado por el panel. El siguiente cuadro metodológico representa de manera sucinta, el planteamiento del diseño experimental, así como el desarrollo en cada método, para establecer la estandarización del proceso de elaboración del cereal de amaranto.

## 2.6 Cuadro metodológico.



## **2.7 Metodología.**

Con el propósito de dar seguimiento al problema y conforme a los objetivos planteados originalmente, la metodología experimental es la siguiente:

### **2.7.1 Análisis granulométrico (Adaptación: Norma Técnica Colombiana No. 77)**

El tamizado es una operación unitaria que nos permite clasificar por tamaños una muestra de partículas sólidas, lo más empleado para realizarlo es una serie de tamices colocados en cascada por orden decreciente de luz o abertura de malla, en un agitador de tamices. En este caso se determinó la distribución del tamaño de partícula de la harina de trigo y de la harina de amaranto reventado a través de un tamizado.

#### **Materiales, instrumentos y equipos**

Tamices de acero inoxidable (U.S. Standard Sieve Series, ASTM E-11), agitador de tamices (Rotap, W. S. Tyler), tapones de goma, brochas de cerdas suaves y una balanza digital (Ohaus, TC30RS).

#### **Procedimiento**

Se pesaron 100 g., de harina de amaranto y la serie de tamices (USA) de las mallas No. 20, 30, 40, 50, 70 y 100, con 5 tapones de goma en cada malla. Se colocaron los 100 g., de harina en el primer tamiz (malla No.20). Los tamices ya ordenados en forma decreciente (Figura 8), con la charola se llevaron al agitador Rotap, se colocó la tapa sobre ellos y se programó un tiempo de 10 min en el agitador. Una vez transcurrido el tiempo, se pesaron los tamices con la muestra retenida en cada uno de ellos. Después se llevó a cabo con la harina de trigo.



**Figura 8. Tamices.**

## Tratamiento de los resultados

Para el análisis granulométrico tabulado, se realizaron los siguientes cálculos mediante las ecuaciones presentadas en la Tabla 10. Posteriormente, se realizó una gráfica de fracción total retenida (FTR) y fracción total pasada (FTP) vs fracción masa (Xi) para obtener el gráfico acumulativo de cada una de las harinas de trigo y amaranto.

**Tabla 10. Secuencia de ecuaciones de análisis granulométrico.**

| No.   | Parámetro                       | Ecuación:   |
|-------|---------------------------------|---|
| Ec. 1 | masa retenida                   | masa retenida = peso de tamiz con harina – peso de tamiz                                      |
| Ec. 2 | fracción masa                   | $X_i = \frac{\text{masa retenida}}{\text{masa total}}$  |
| Ec. 3 | diámetro promedio               | $D_{pi} = \frac{\text{abertura de malla que pasa} + \text{abertura de malla que retiene}}{2}$ |
| Ec. 4 | fracción total de masa retenida | FRA = Fracción acumulada en el tamiz anterior + Fracción del tamiz actual                     |
| Ec. 5 | fracción total de masa pasada   | FP = 1 – FRA  |

Fuente: Norma técnica colombiana NTC-77 2007-09-26.

### 2.7.2 Presencia de colonias en el cultivo (Método de placas Petrifilm<sup>MR</sup>)

Las placas Petrifilm<sup>MR</sup> son recubiertas con una combinación patentada de medios de cultivo deshidratados y un indicador que facilita el conteo de colonias como: mesofílicos aerobios, coliformes totales, *Escherichia Coli*, mohos y levaduras, esto ofrece la facilidad en el manejo, un largo periodo en vida útil de los conteos, con un mínimo requerimiento de espacio para almacenaje e incubación, con alta sensibilidad y especificidad. Este método es rápido, listo para usarse, debido a que no requiere de preparación de medios y esto, agiliza los procesos de análisis.

#### Materiales, reactivos y equipo

Pipeta electrónica de 1 a 9 mL., (Marca 3M; Modelo 40351), puntas estériles para pipeta electrónica (3M), muestreadores, cucharones, espátulas, cuchillos, pinzas (acero inoxidable e inocuo), bolsas de polietileno estériles, aspersor con etanol o isopropanol al 70 % (p/v), aspersor con benzal al 10 % (p/v), solución diluyente (buffer de fosfatos o agua peptonada), hidróxido de sodio 1 N (NaOH), ácido clorhídrico 1 N (HCl), difusor de plástico de 20 cm<sup>2</sup>., o 30 cm<sup>2</sup>., frascos de boca ancha con tapa de rosca o tapón esmerilado de material estéril no

tóxico, etiquetas auto adheribles y algodón, cinta adhesiva (masking tape), marcadores indelebles y encendedor, bata, cubre bocas, cofias y guantes estériles.

### **Aparatos e instrumentos**

Balanza digital (Ohaus, AV812), incubadora a 35 °C (precisión, PR205225G), incubadora a 23 °C (Felisa, FE-131AD), baño maría (Labtech, LWB-311D), autoclave automática (Labtech, LAC5060S) equipada con sensor de temperatura y calibrada a  $121 \pm 1$  °C., termómetro de Hg (-20 °C A 110 °C) y mufla (Thermolyne, F-6020C) a una temperatura de hasta 180 °C.

### **Procedimiento**

Se midieron 90 mL., de solución reguladora de fosfatos en los frascos de boca ancha con tapa de rosca de material estéril, se taparon y se marcaron las muestras en los frascos hasta el final de la cuerda de la boquilla del frasco.

### **Recomendaciones**

- Para hacer las diluciones se realizaron las mediciones en tubo con 9 mL., del diluyente y 1 mL., de disolución.
- Las placas rápidas en las bolsas cerradas, se almacenaron en refrigeración de 0 a 7 °C.
- Antes de utilizarlas se sacaron de refrigeración y se dejaron a temperatura ambiente.
- Se utilizaron tijeras para abrir las bolsas de aluminio que contienen las placas según el microorganismo a determinar.

Posteriormente, se tomaron las placas que se requerían para el análisis, se dobló la bolsa de aluminio, se selló después de la apertura con cinta masking tape.

Se desinfectó la campana con alcohol etílico incluyendo las zonas laterales, parte superior y superficie del área de trabajo. Se tomaron los 10 g., muestra ya preparada, para inocular dentro de la campana de flujo laminar, se realizó la dilución primaria en relación 1:10 y las diluciones posteriores (1:100).

Las placas se colocaron sobre la superficie de trabajo de la campana de flujo laminar, se colocó expandiendo 1 mL., de muestra con el difusor para inocularlas, como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11. Dimensión del difusor a tomar para placas Petrifilm<sup>MR</sup>.**

| Placa                | Difusor 20 cm <sup>2</sup> | Difusor 30 cm <sup>2</sup> |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| cuenta total         | •                          |                            |
| mesófilicos aerobios | •                          |                            |
| mohos y levaduras    |                            | •                          |

Fuente: Distribuciones biotecnológicas S.A de C.V (2013).

**Procedimiento para la siembra de la muestra en la placa Petrifilm<sup>MR</sup>**

Se levantó la película superior y se tomó 1 mL., de la dilución 10<sup>-1</sup> con la pipeta, de forma perpendicular a la placa se colocó en el centro de la placa. Posteriormente, se tomó la película de la placa de un extremo para bajarla lentamente, evitando la formación de burbujas dispersando la muestra utilizando el difusor de plástico (20 o 30 cm<sup>2</sup>). Se sembró la muestra por placa Petrifilm<sup>MR</sup> presionando sobre el centro hasta que se distribuyó en el área de contacto, hasta gelificar la placa, durante 5 a 10 min. Finalmente, se incubaron las placas sembradas a las condiciones establecidas en la Tabla 12.

**Tabla 12. Condiciones adecuadas de incubación de los siguientes microorganismos.**

| Microorganismos.                     | Temperatura de incubación (°C). | Tiempo de incubación (horas). |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Cuenta total (mesofilicos aerobios). | 35 ± 2                          | 48                            |
| Coliformes totales.                  | 35 ± 2                          | 24                            |
| <i>Escherichia Coli.</i>             | 35 ± 2                          | 24                            |
| Mohos y levaduras.                   | 25 ± 2                          | 72                            |

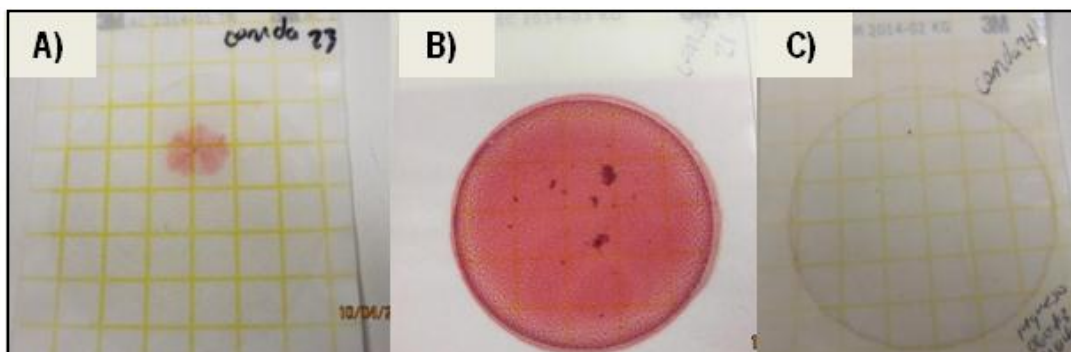
Fuente: Distribuciones biotecnológicas S.A de C.V (2013).

**Interpretación de resultados.** Después del periodo de incubación se realizó el recuento de microorganismos de cada placa, para identificar las colonias presentes, tal como se muestra en la Tabla 13 y Figura 9.

**Tabla 13. Características de coloración de microorganismos Petrifilm<sup>MR</sup>.**

| Microorganismo.                      | Características de la colonia                           |
|--------------------------------------|---|
| Cuenta total (mesófilicos aerobios). | colonias rojas de diferentes tamaños                    |
| Coliformes totales.                  | colonias rojas de diferentes tamaños asociadas con gas  |
| <i>Escherichia Coli.</i>             | colonias azules de diferentes tamaños asociadas con gas |
| Mohos y levaduras.                   | colonias de color azul/verde                            |

Fuente: Distribuciones biotecnológicas S.A de C.V (2013).



**Figura 9. Resultados de coloración de microorganismos; A) mohos y levaduras, B) coliformes totales/*Escherichia Coli*, C) mesofilicos aerobios, en las placas Petrifilm<sup>MR</sup>**

### **Contar unidades formadoras de colonias (UFC/g.)**

#### **A. Cuenta total de coliformes totales/*Escherichia Coli* y mesofilicos aerobios**

- Cuando el número de colonias está entre 25 y 250 UFC/g., se estima el valor en cada placa, contando el número de colonias en 2 o más cuadros y se calcula el promedio de las colonias para ser multiplicadas por el área del difusor de 20 cm<sup>2</sup>., y dicho resultado por el factor de dilución en el que se realizó el recuento.

#### **B. Mohos y levaduras**

- Se realizó lo mismo en el recuento de mohos y levaduras, se multiplicó por el área del difusor de 30 cm<sup>2</sup>., y el resultado por el factor de dilución.

Cuando no se observó desarrollo en las placas, se expresaron los resultados como <10 UFC/g., o mL.

### **2.7.3 Determinación del índice de expansión (Adaptado: Patil, 2005)**

Es un parámetro que permite observar el incremento del tamaño del cereal de amaranto por efecto de la diferencia de presión-temperatura a la salida del dado del extrusor y durante la cocción en el horno (Patil, 2005).

#### **Material y equipo**

Horno de alta temperatura (Didacta Italia, TA2D), vernier digital (Truper, 6s6cmd), papel aluminio, guantes, tijeras de aluminio.



## Procedimiento

A la salida del extrusor, se cortaron 15 bolitas del cereal de amaranto lo más homogéneamente posible con tijeras, en el cual se midió el diámetro inicial a cada bolita del cereal expresado en mm con la ayuda del vernier y fueron colocadas en una charola de aluminio para su posterior cocción, utilizando guantes limpios en su manipulación. Las 15 bolitas se colocaron en el horno a una temperatura de cocción de 125 °C en un lapso de tiempo de 90 min. Posteriormente, a la salida del horno, nuevamente se midieron las 15 bolitas con el vernier y se calculó el incremento del diámetro, así como la expansión del cereal mediante la siguiente ecuación (Ec. 6).

## Cálculo

$$I.E = \frac{(DPE - DPS)}{DPE} \times 100 \quad \text{Ec. 6}$$

### Donde:

I. E = Índice de expansión (%)

DPE = Diámetro de producto extrudido (mm).

DPS = Diámetro de producto seco (mm).

### 2.7.4 Determinación de humedad final (Método de la termobalanza NMX-F-428-1982)

El método por termobalanza se basa en evaporar de manera continua la humedad de la muestra con un registro continuo de la pérdida de peso, hasta que la muestra se sitúe a peso constante, donde la humedad relativa no afecta la lectura del equipo.

### Materiales y equipo

Termobalanza (Ohaus, MB45-240), charolas de aluminio, mortero de porcelana, espátula y pinzas.

### Procedimiento

Se programaron las condiciones de la prueba en la termobalanza digital marca (Ohaus, MB45-240), solicitando el porcentaje de humedad final en el producto. El cereal se tritura con la ayuda de un mortero de porcelana (Figura 10-D). Después en el porta charolas del equipo, se colocó la charola de aluminio y se pesaron 5 g., de la muestra. Se registraron los datos hasta que el porcentaje humedad en el producto se mantuvo constante (Figura 10-E).

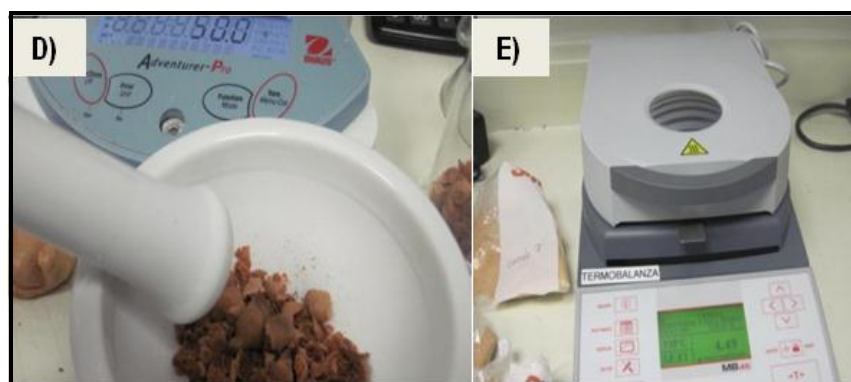


Figura 10. Prueba de determinación de humedad en el cereal de amaranto.

### Tratamiento de los resultados

Tomar la lectura y observar el resultado directo del display del equipo.

### 2.7.5 Grado de gelatinización del almidón (Método yodometría. Adaptación: Matissek y Schepel, 2000; Badui, 1999)

Es una reacción específica del almidón, donde el reactivo del lugol, que contiene yodo ( $I_2$ ), se intercala con la molécula del almidón y esto se detecta por la coloración en la muestra; cuando reacciona con la amilosa genera un fuerte color azul que se establece por la inclusión de  $I_2$  en la hélice  $\alpha$ , y cuando es la amilopectina la que interacciona, solo acompleja una pequeña cantidad de  $I_2$ , lo que desarrolla una coloración roja.

### Material, instrumentos y equipos

Microscopio binocular (Olympus, CX31), balanza digital (Ohaus, TC30RS), parrilla magnética, barra magnética, portaobjetos, cubreobjetos, mortero de porcelana, espátula, dos frascos de color ámbar (50 mL., tapa normal y 25 mL., con tapa con gotero), probeta de 50 mL., vidrio de reloj, vaso de precipitado de 150 mL., pipeta graduada de 1 mL., propipeta y agitador de vidrio.

### Reactivos

Para esta prueba se ocuparon 0.5 g., de yodo, 1 g., de yoduro potásico y agua destilada. Al momento de la determinación se hace una disolución de yodo, con un 0.1 mL., de la solución madre en 5 mL., de agua destilada y se agitó la solución.

## Procedimiento

Se colocaron 50 mL., de agua en el vaso de precipitado y se agregó 1 g., de yoduro potásico previamente pesado y se agitó en una parrilla con barra magnética. Después se le agregaron 0.5 g., de yodo y se agitó hasta observar un sistema homogéneo. Se vertió esta disolución en un frasco de 25 mL., de color ámbar con tapón.

Con un plumón indeleble, se marcaron los cubreobjetos con cuadros de 1 cm<sup>2</sup>., y este a su vez en 4 cuadros más pequeños y cada uno de estos a su vez en otros 4 cuadrantes más. Se tomó una muestra del cereal y se molturó el cereal al menor tamaño posible en el mortero de porcelana. Una medida fija de muestra molida se colocó en el portaobjetos ocupando siempre la misma área cuadrículada, se cubrió con 10 gotas de la disolución y se esperó 1 min.

Por otra parte se encendió el microscopio, se enfocó el objetivo de 10x, se centró la plataforma y se ajustó la intensidad de la lámpara. Se llevó el portaobjetos con la muestra y se cubrió con el cubreobjetos y se colocó en el microscopio, se fijaron los cuadrantes de lectura y se contaron todos los gránulos de almidón por color observados.

## Interpretación de resultados

Las fracciones del almidón toman un intervalo de color desde amarillo a verde cuando el almidón no se encuentra gelatinizado; una coloración roja cuando el almidón gelatinizado se debe a la fracción de amilopectina, que es la mayor proporción del amaranto; un color azul índigo por el almidón gelatinizado por la fracción de amilosa y morado cuando el almidón es parcialmente gelatinizado que es lo predominante en la harina de trigo (Tabla 14).

**Tabla 14. Coloración del almidón por Yodometría.**

| Coloración      | Fracción del almidón | Gelatinización   |
|-----------------|----------------------|------------------|
| Verde /Amarillo | Almidón              | No gelatinizado  |
| Roja            | Amilopectina         | Gelatinizado     |
| Azul            | Amilosa              | Gelatinizado     |
| Morado          | Almidón              | Pre-gelatinizado |

Fuente: Adaptado Badui, (1999).

### 2.7.6 Determinación de porosidad (Adaptado: Sharman *et al.*, 2003; Henry y Chapman, 2002)

La porosidad de los extrudidos se determina a partir de la densidad aparente del aire total en el material, es decir, los poros con respecto a las partículas sólidas del mismo. Estos poros son células de aire que se crean con el proceso de extrusión; el volumen final de los productos varía con el tamaño y número de poros producidos tanto por el cizallamiento del material como por la configuración del diseño de tornillo y la liberación de vapor de agua a la salida del extrusor, así como los que se producen durante la etapa de cocción en el producto final.

#### Material y equipo

Balanza digital (OHAUS, EP6102C), dos vasos de precipitados 500 mL., dos vidrios de reloj grandes, arena de mar seca a 180 °C y tratada con agua regia, embudo, probeta graduada de 100 mL.

#### Procedimiento

Se pesó la probeta de 100 mL. Se pesaron 20 g., de arena en un vidrio de reloj, se midió su volumen en la probeta, se dejaron 5 g., de arena en la probeta (Figura 11-F y 11-G). Se pesaron 5 g., de cereal entero y se vertió la muestra en la probeta (Figura 11-H), alternando con el resto de arena hasta cubrir los espacios vacíos (Figura 11-I). Se midió el volumen que ocupó la muestra con arena.

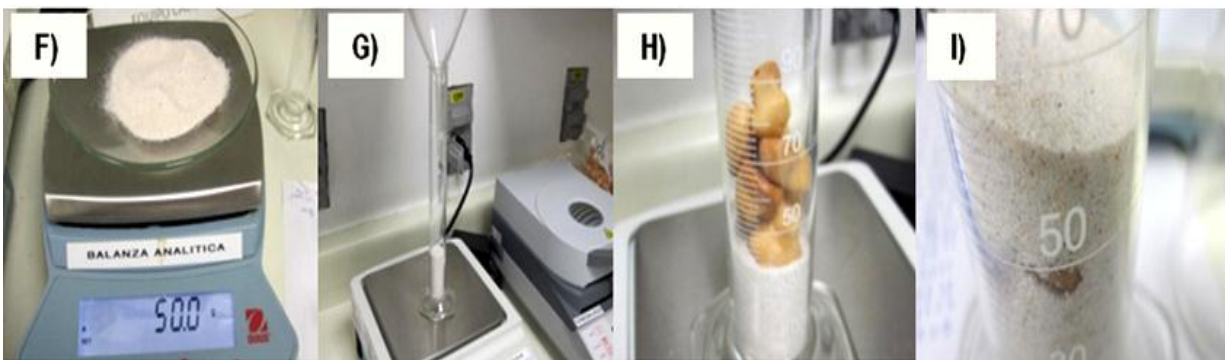


Figura 11. Prueba de determinación de porosidad del cereal de amaranto.

Se calculó la densidad del cereal de acuerdo con la Ec. 8 y por último se separó el cereal de la arena y este se molturo. Se repitió lo anterior para evaluar la densidad de la materia sólida.

## Cálculos

Reconociendo que la densidad es una propiedad física de un material, que relaciona su masa con el volumen que ocupa en el espacio y que se puede expresar como:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ec. 7}$$

**Donde:**

m = masa (g.).

v = volumen (cm<sup>3</sup>.).

Y que la densidad relativa es la relación entre la densidad de un cuerpo (pieza de cereal) y la densidad de un material de referencia, como se muestra a continuación:

$$S = \frac{\rho_p}{\rho_r} \quad \text{Ec. 8}$$

**Donde:**

S = densidad relativa

$\rho_p$  o  $\rho_s$  = densidad del cereal entero o de los sólidos del cereal

$\rho_r$  = densidad del material de referencia

De acuerdo con las ecuaciones anteriores se puede conocer tanto la densidad del cereal entero, (poroso) como la densidad únicamente de los sólidos del cereal.

A partir de esto se sustituyen ambas densidades para determinar la porosidad del cereal.

$$\text{Porosidad} = 1 - \left( \frac{\rho_p}{\rho_s} \right) \times 100 \quad \dots \quad \text{Ec. 8Ec. 9}$$

**Donde:**

Porosidad [=] %

$\rho_p$  = densidad verdadera del cereal entero (g/cm<sup>3</sup>).

$\rho_s$  = densidad de los sólidos del cereal (g/cm<sup>3</sup>).

### 2.7.7 Determinación de absorción de leche (Adaptado: Reyes, 2002)

El índice de absorción, se considera como la capacidad de absorción de agua por parte del cereal, esta es generada por las propiedades estructurales, fisicoquímicas, así como de la formulación y homogenización de todos los ingredientes del producto (Reyes et al., 2002).

## Material y equipo

Balanza digital (OHAUS, EP6102C), 2 vasos de precipitados de 250 mL., colador, cuatro vidrios de reloj, cronómetro y 1 L., de leche entera Alpura<sup>MR</sup>.

## Procedimiento

Primero se pesaron 10 g., de cereal de amaranto en un vaso de precipitados y fueron agregados en 200 mL., de leche Alpura<sup>MR</sup>. Se accionó el cronómetro y se dejó reposar el cereal de amaranto durante 5 min., en la leche. Posteriormente se colocó el colador sobre un vaso de precipitados y se vertió el cereal con la leche. Por último se registró el peso del cereal en un vidrio de reloj y de la leche filtrada y se hicieron los cálculos con la siguiente ecuación:

## Cálculo

$$\% I.A = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad \text{Ec. 10}$$

### Donde:

I.A = índice de absorción

P<sub>h</sub> = peso cereal húmedo (g.)

P<sub>s</sub> = peso cereal seco (g.)

## 2.7.8 Determinación de la dureza (Manual M08-372A1009, 2012)

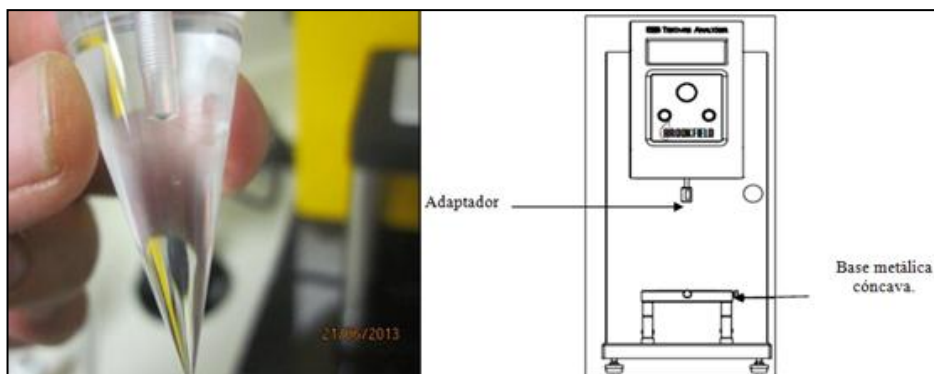
La dureza es la resistencia u oposición que ofrece un material a la penetración, y se expresa como la cantidad de energía que absorbe un material ante un esfuerzo antes de romperse o deformarse. Una vez que se vence el modulo de tensión en el cereal, este deja de oponerse y se rompe y/o fractura.

### Materiales y/o equipo

Texturómetro (Brookfield, CT3 4500), dispositivo cónico de acrílico para dureza (TA15/1000) y base para accesorios (TA-BT-KIT).

## Procedimiento

Se colocó el accesorio de acrílico, en el adaptador de la base metálica cóncava mostrada en la Figura 12.



**Figura 12. Aditamentos del texturómetro Brookfield CT3** (Manual M08-372A1009, 2012).

Posteriormente se establecieron las distancias de prueba de acuerdo con la muestra de cereal y el aditamento de la base metálica, para accesorios TA-BT-KIT en la “forma cóncava”, para evitar que el cereal quedara fijo, tal como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13. Prueba de muestra del texturómetro Brookfield CT3.** (Manual M08-372A1009, 2012).

Una vez colocada la muestra, se procedió a encender el equipo (Texturómetro de Brookfield, CT3) por la parte trasera del panel. Se presionó el botón select/scroll de “forma manual” el tipo: Prueba requerida normal, el cual se obtendrá con parámetros establecidos por el equipo. Después se fijaron los parámetros de medición mostradas en la Tabla 15, girando la perilla de select/scroll.

**Tabla 15. Parámetros para medición de dureza.**

| Parámetro       | Magnitud |
|-----------------|----------|
| Fuerza de carga | 10 N.    |
| Deformación     | 10 mm.   |
| Velocidad       | 10 m/s.  |

Fuente: Analizador de textura Brookfield (2012)

Finalmente, se presionó el botón START. Una vez transcurrida la prueba de forma manual, el equipo expresó los siguientes resultados:

- Carga máxima (N.)
- Deformación (mm.)
- Trabajo (mJ.)

### **2.7.9 Parámetros sensoriales (Adaptado; Portillo, 2012)**

Es la medición y evaluación de las propiedades organolépticas de los productos alimenticios mediante uno o más sentidos involucrados: la degustación de alimentos sensorialmente, con la vista intervienen en el cerebro humano, el cual integra las sensaciones recibidas (color, tamaño, sabor, aroma, etc.).

#### **Materiales**

8 muestras de cereal de amaranto, 50 mL., de agua purificada, vasos desechables, plumón negro y hojas blancas de 10 X 10 cm.

#### **Procedimiento**

Se elaboró un test de tipo descriptivo (Tabla 15), para obtener una descripción cualitativa y cuantitativa de cada atributo del producto y posteriormente con prueba hedónica. Se seleccionaron 15 jueces de tipo no entrenados.

**NOTA:** Antes de realizar las pruebas hedónicas, se debe cumplir las siguientes condiciones:

- ✓ Deben beber agua purificada antes y después de probar cada muestra, con la finalidad de eliminar los residuos del producto.
- ✓ No sentir hambre ni haber comido media hora antes de la prueba para no afectar el resultado.
- ✓ Tener buena salud, no padecer enfermedades como diabetes, sinusitis, afecciones hepáticas y tener disponibilidad para este test.
- ✓ Cumplir con una edad promedio en los jueces entre 15 y 45 años, debido a que en este intervalo de edades se ha desarrollado plenamente el potencial gustativo y el nivel de escolaridad es de mínimo sexto de primaria terminado para facilitar la comprensión de la prueba.



✓ Evitar fumar por lo menos 30 minutos antes de la prueba.

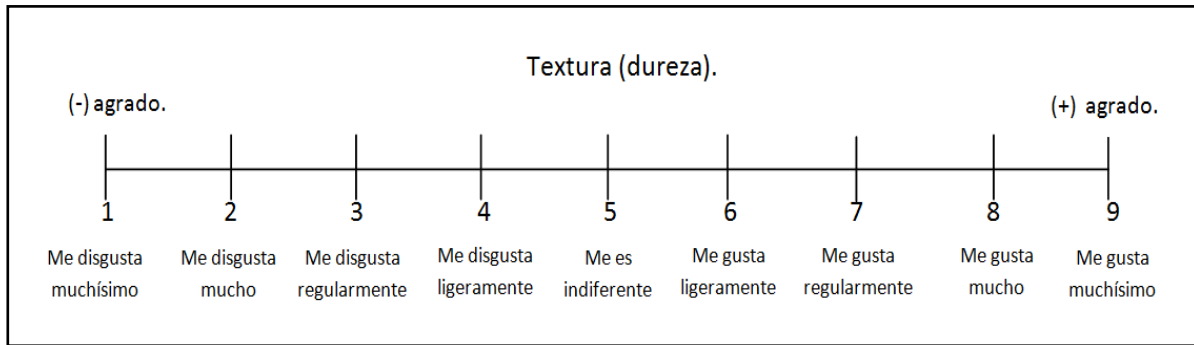
La prueba descriptiva que se utilizó, describió las diferencias entre muestras durante estudios de calidad, definiendo los atributos y parámetros que más influyen en la calidad sensorial del producto (Tabla 16).

**Tabla 16: Test de prueba descriptiva.**

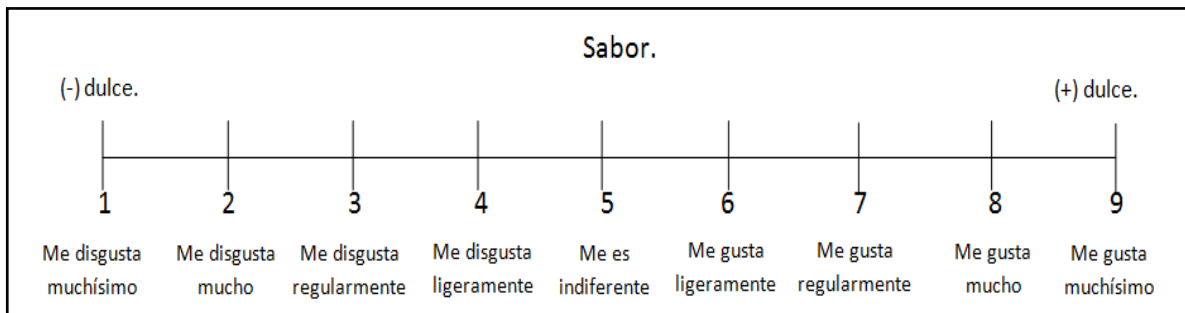
|   |           |           |                |
|---|-----------|-----------|----------------|
| <b>PRUEBA DESCRIPTIVA.</b>  |           |           |                |
| Nombre: .....   | Sexo..... | Edad..... | Profesión..... |
| Escolaridad: .....  |           |           |                |
| ❧   |           |           |                |
| <b>Introducción:</b> Estamos realizando una investigación sobre la preferencia del consumo para los siguientes productos. |           |           |                |
| Cata hedónica de cereal para desayuno.  |           |           |                |
| 1. ¿Consume habitualmente cereales?.....  |           |           |                |
| 2. ¿Qué cereal prefieres de los siguientes productos comerciales? .....   |           |           |                |
| • Nesquick®   |           |           |                |
| • Choco Krispis Pops®   |           |           |                |
| • Corn Pops®  |           |           |                |
| 3. ¿Estarías dispuesto a probar cereal de amaranto? .....   |           |           |                |
| 4. ¿Te gusta que el cereal sea dulce?.....  |           |           |                |
| 5. ¿Te gusta que tu cereal absorba leche).....  |           |           |                |
| 6. ¿Te agrada la intensidad de color en un cereal?.....   |           |           |                |

Fuente: Portillo (2012).

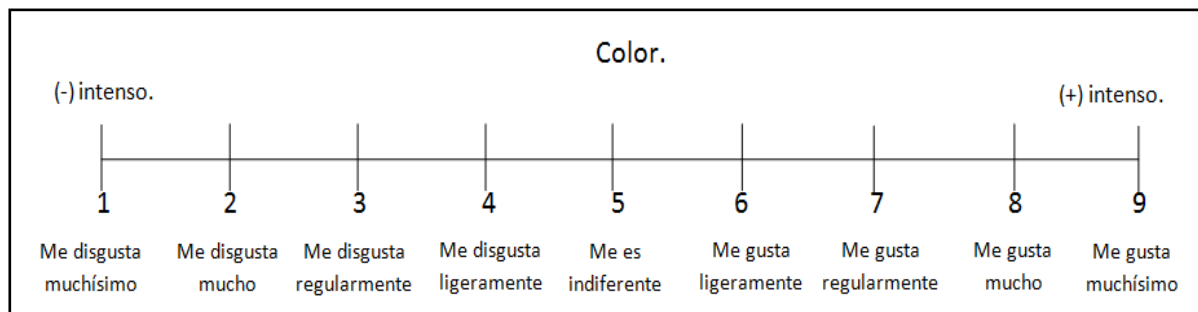
Una vez que los panelistas han contestado afirmativamente las respuestas anteriores (Tabla 16), se procedió a presentarles el test hedónico que va desde “Me disgusta muchísimo” hasta “Me gusta muchísimo” en donde a dicha escala se le asigna un número, que también aparece en la hoja de evaluación del cereal de amaranto, de acuerdo con los siguientes atributos sensoriales: textura (dureza), sabor (dulce), color (intensidad) y apariencia (agradable) que se presentan a continuación en las Figuras 14, 15, 16 y 17 respectivamente.



**Figura 14. Test hedónico de preferencia para el perfil de textura (dureza).**



**Figura 15. Test hedónico de preferencia para el perfil sensorial (sabor).**



**Figura 16. Test hedónico de preferencia para el perfil sensorial (color).**



**Figura 17. Test hedónico de preferencia para el perfil sensorial (apariencia).**

### CAPÍTULO III. RESULTADOS.

En el presente capítulo se abordan y discuten los resultados experimentales de la metodología realizada, para la medición de los efectos por cada variable independiente así como las interacciones entre ellas, con respecto a las variables dependientes y de respuesta.

#### 3.1. Análisis granulométrico

##### 3.1.1 Harina de amaranto

Como parte de las actividades preliminares, se realizó el análisis granulométrico de la harina de amaranto, para poder establecer los niveles de variación del tamaño de partícula de esta harina.

**Tabla 17. Análisis granulométrico de la harina de amaranto de acuerdo a la serie USA.**

| No. de malla | Peso tamiz (g.) | Peso tamiz con muestra (100 g.) | Peso de muestra retenida (g.) | Xi    | Abertura que pasa (mm.) | Abertura que retiene (mm.) | Dpi (mm.) | Fracción total retenida | Fracción total pasada |
|--------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------|----------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| 20/30        | 409.13          | 409.67                          | 0.54                          | 0.005 | 0.84                    | 0.59                       | 0.715     | 0.005                   | 0.995                 |
| 30/40        | 395.94          | 397.24                          | 1.30                          | 0.013 | 0.59                    | 0.42                       | 0.505     | 0.018                   | 0.982                 |
| 40/50        | 359.01          | 396.89                          | 37.88                         | 0.379 | 0.42                    | 0.297                      | 0.3585    | 0.397                   | 0.603                 |
| 50/70        | 382.4           | 408.52                          | 26.12                         | 0.261 | 0.297                   | 0.21                       | 0.2535    | 0.658                   | 0.342                 |
| 70/100       | 347.87          | 361.56                          | 13.69                         | 0.137 | 0.21                    | 0.149                      | 0.1795    | 0.795                   | 0.205                 |
| 100/ ch      | 352.59          | 364.60                          | 12.01                         | 0.120 | 0.149                   | 0                          | 0.0745    | 0.915                   | 0.085                 |
| Charola      | 308.01          | 316.48                          | 8.47                          | 0.085 | -                       | -                          | 0         | 1.000                   | 0.000                 |
|              |                 |                                 | Σ100                          |       |                         |                            |           |                         |                       |

Debido al resultado de la Tabla 17, correspondiente al análisis granulométrico de la harina de amaranto, se estableció hacer un corte en la malla No. 50 con una abertura de 0.297 mm., siendo catalogado el material retenido entre la malla No. 30 hasta la 50 con una granulometría intermedia y aquellas partículas que lograron pasar la malla No. 50 hasta la 100, fueron consideradas con una granulometría fina.

A continuación, se presenta la Figura 18 correspondiente al gráfico acumulativo de la harina de amaranto.

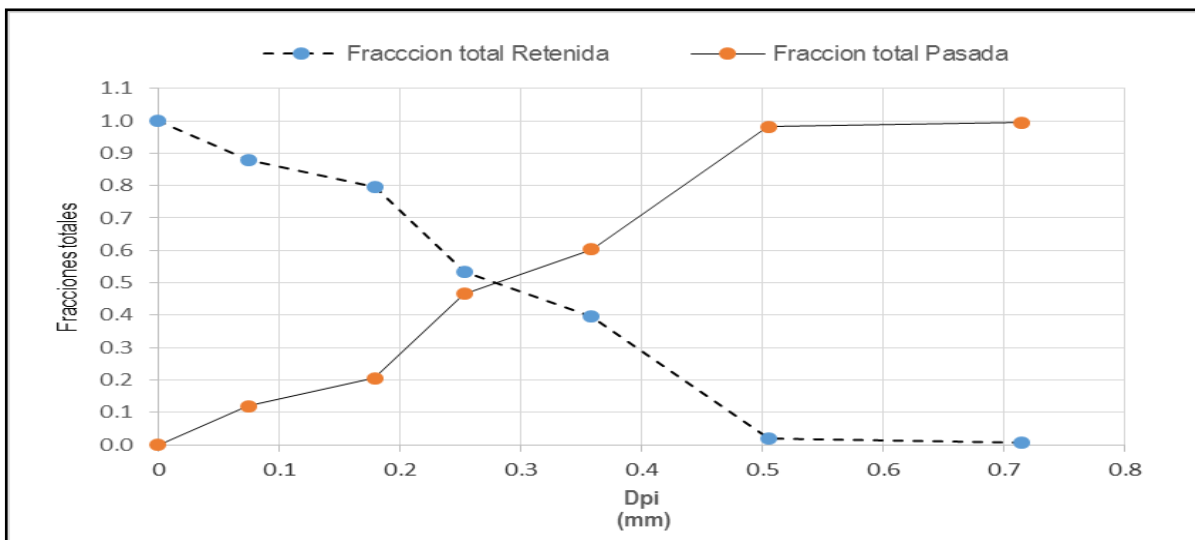


Figura 18. Análisis acumulativo fracción total retenida vs fracción total pasada de la harina de amaranto.

Con base en la Figura 18, se presenta el diámetro de partícula promedio con respecto a la fracción total retenida y pasada, se observa hay una intersección que corresponde al 50 % del material, en un diámetro de partícula de 0.297 mm., estableciendo así que la malla No. 50 fuera el punto de corte del material, para la determinación de finos e intermedios de la harina de amaranto, de acuerdo a la serie USA.

### 3.1.2 Harina de trigo.

El análisis granulométrico de la harina de trigo, permitió la comparación de esta propiedad con respecto a la harina de amaranto.

Tabla 18. Análisis granulométrico de la harina de trigo de acuerdo a la serie USA.

| No. de malla | Peso tamiz (g.) | Peso tamiz con muestra (100 g.) | Peso de muestra retenida (g.) | Xi    | Abertura que pasa (mm.) | Abertura que retiene (mm.) | Dpi (mm.) | Fracción total retenida | Fracción total pasada |
|--------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------|----------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| 20/30        | 376.54          | 382.93                          | 6.39                          | 0.064 | 0.84                    | 0.59                       | 0.715     | 0.064                   | 0.936                 |
| 30/40        | 372.06          | 400.90                          | 28.84                         | 0.288 | 0.59                    | 0.42                       | 0.505     | 0.352                   | 0.648                 |
| 40/50        | 373.56          | 418.48                          | 44.92                         | 0.449 | 0.42                    | 0.297                      | 0.3585    | 0.801                   | 0.199                 |
| 50/70        | 344.5           | 353.04                          | 8.54                          | 0.085 | 0.297                   | 0.21                       | 0.2535    | 0.887                   | 0.113                 |
| 70/100       | 336.73          | 344.45                          | 7.72                          | 0.077 | 0.21                    | 0.149                      | 0.1795    | 0.964                   | 0.036                 |
| 100/ ch      | 343.05          | 346.40                          | 3.35                          | 0.033 | 0.149                   | 0                          | 0.0745    | 0.998                   | 0.002                 |
| charola      | 346.96          | 347.20                          | 0.24                          | 0.002 | -                       | -                          | 0         | 1                       | 0                     |
|              |                 |                                 | Σ100                          |       |                         |                            |           |                         |                       |

De acuerdo con la Tabla 18, se observó que la harina de trigo comparte el comportamiento con la harina de amaranto, en donde la mayor cantidad de harina de trigo también se tuvo en el número de malla 50 con un valor de 44.92 g de harina, con un Dpi de 0.3585 mm.

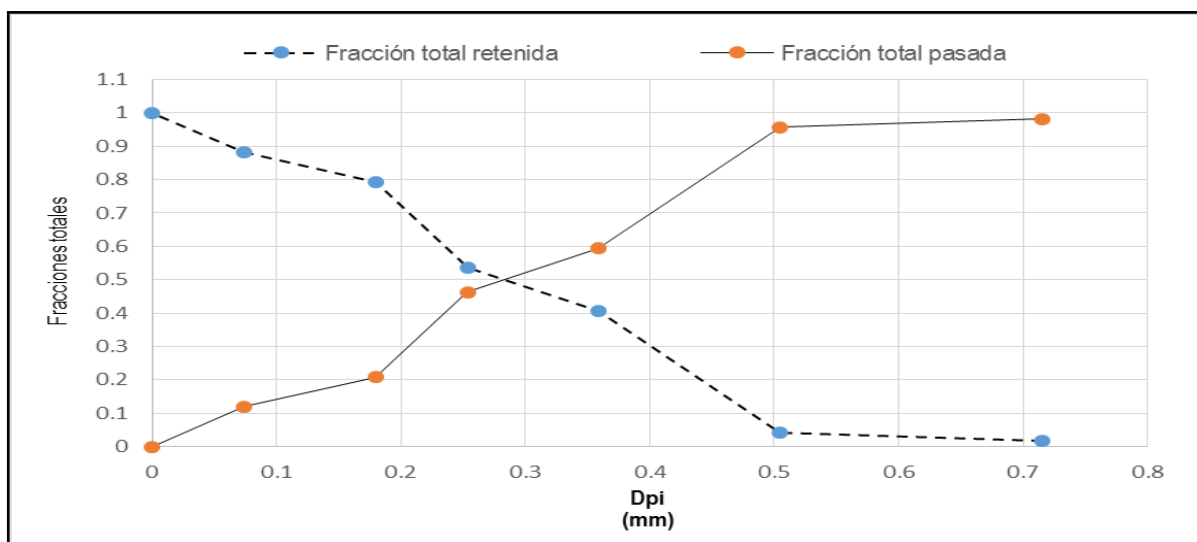


Figura 19. Análisis acumulativo fracción total retenida vs fracción total pasada de la harina de trigo.

Sólo para confirmar lo anterior se presenta en la Figura 19, el gráfico acumulativo, sin embargo, en la harina de trigo no se propuso la realización de algún corte, por ser un bajo porcentaje, se empleó la harina de trigo completa en todas las formulaciones.

### 3.2 Elaboración del cereal para desayuno de amaranto

Como parte del desarrollo de este proyecto fue establecer tanto la formulación como las condiciones de proceso para ser sometidas a la experimentación de acuerdo con el diseño experimental propuesto, asimismo la evaluación y el análisis de todas las variables estudiadas para finalmente llevar a cabo la estandarización del proceso.

#### 3.2.1 Formulación y acondicionamiento de las materias primas en la elaboración del cereal de amaranto

Ahora bien, con base en la normatividad de los productos derivados de cereales, se establecieron los ingredientes y las cantidades a trabajar como formulación, mediante pruebas experimentales fueron confirmados.

Una vez establecida la formulación base, se estableció trabajar con el 70 % de harina de amaranto y el 30 % de harina de trigo (marca Selecta®), debido a que esta combinación de

harinas, permitió obtener una masa resistente al esfuerzo mecánico, capaz de desarrollar cohesividad, tenacidad, elasticidad, plasticidad, adhesividad y expansión durante la formación del cereal ya que su proteína principal, proveniente del trigo, Valenzuela, menciona que el gluten permite resistir esfuerzos mecánicos durante las etapas del proceso de transformación. A partir de esto se establecieron dos niveles de humedad inicial a trabajar, el 28 y 33 % (Tabla 19).

**Tabla 19. Formulaciones**

| <b>Ingredientes</b>       | <b>1er. Nivel</b> | <b>2do. Nivel</b> |
|---------------------------|-------------------|-------------------|
| Tipo de componente        | (%)               | (%)               |
| Humedad inicial           | 33                | 28                |
| Harina de amaranto        | 39.03             | 42.53             |
| Harina de trigo           | 16.73             | 18.23             |
| Jarabe de maíz            | 3.5               |                   |
| Sucralosa                 | 0.036             |                   |
| Maltodextrina             | 3                 |                   |
| Extracto de malta         | 0.5               |                   |
| Aceite de canola          | 2                 |                   |
| Lecitina de soya          | 0.09              |                   |
| Caramelo IV               | 0.1               |                   |
| Sal                       | 0.006             |                   |
| Royal                     | 2                 |                   |
| <b>Total en base seca</b> | 100%              |                   |

Una vez establecida la formulación, se definieron los parámetros del acondicionamiento del material para la elaboración del cereal de amaranto, posteriormente se sometió la masa a un proceso de extrusión mediante un tornillo simple y conforme al diseño experimental, se establecieron la velocidad de alimentación de acuerdo a la masa obtenida a la salida del extrusor, y así seleccionar la placa de restricción, que conecta la tolva de alimentación con la entrada del cilindro y cuya abertura es de dimensiones conocidas. Finalmente, se establecieron las condiciones de trabajo, en cada una de las etapas del proceso de transformación en la obtención de un cereal para desayuno, a base de trigo-amaranto, como se resume en el siguiente diagrama de bloques (Figura 20), que se describe posteriormente.

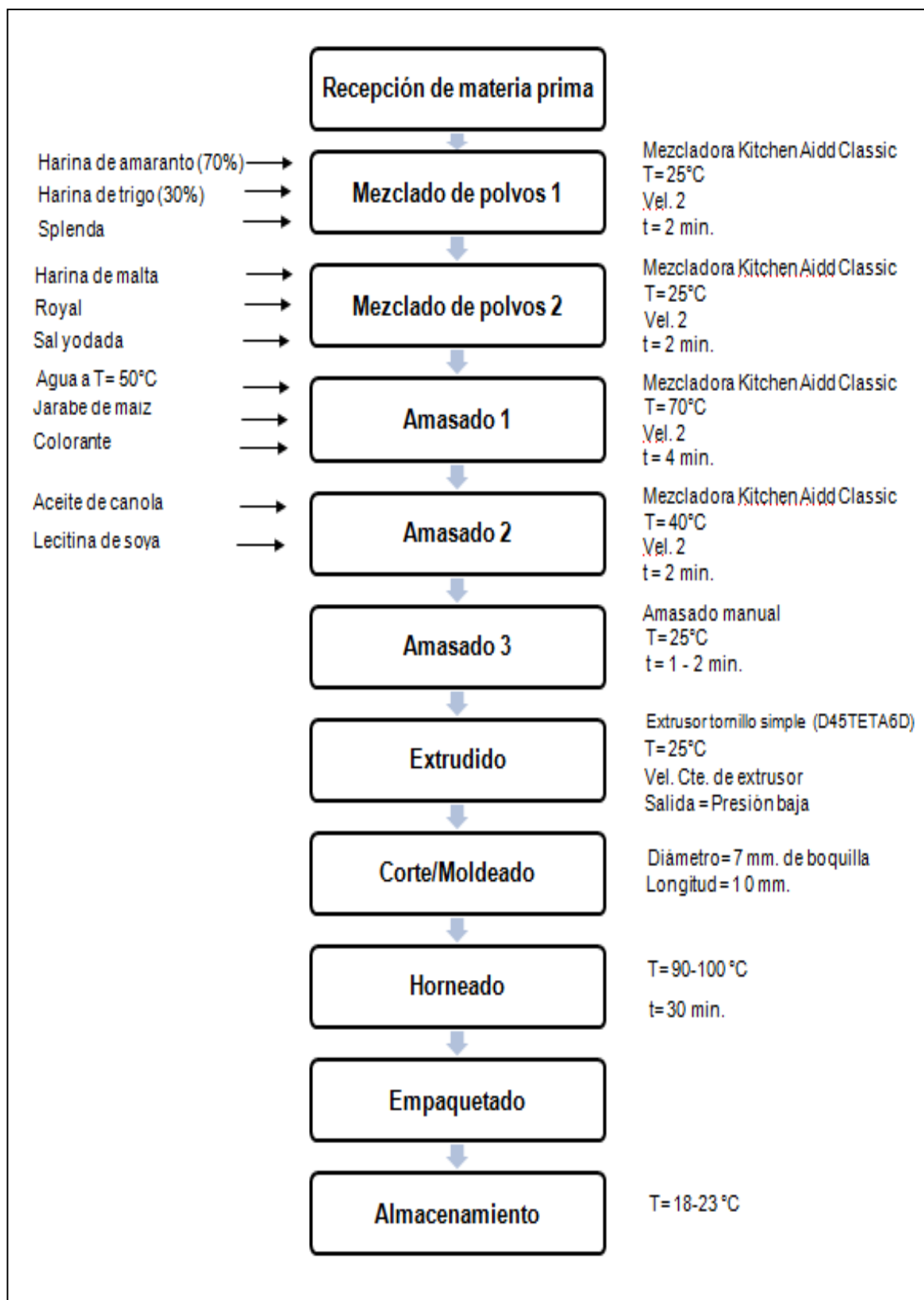


Figura 20: Diagrama de proceso en la elaboración del cereal para desayuno a base de amaranto.

### **3.2.1.1 Mezclado**

Esta operación se llevó a cabo en una mezcladora Kitchen Aid Classic (Modelo K45sswh), en donde se incorporaron primeramente las dos harinas distribuyéndolas, hasta obtener una mezcla homogénea, por ser los ingredientes mayoritarios de la mezcla, con el conocimiento del tamaño de partícula. Posteriormente, el resto de ingredientes sólidos además de establecer las cantidades iniciales, también se definió la forma y orden de adición.

### **3.2.1.2 Amasado**

Todo comienza con la adición del agua y el resto de ingredientes líquidos como lo es el jarabe de maíz, el colorante el contenido de agua es crucial en el desarrollo de las propiedades funcionales y organolépticas, obteniéndose primeramente un granulado húmedo y conforme pasa el tiempo pelotitas de masa. El amasado es el resultado de la integración homogénea de ingredientes que favorece el desarrollo del gluten, obteniendo así características plásticas de fuerza y estabilidad en la masa. Los enlaces disulfuro (-S-S-) del gluten se extienden, generando una red que al hidratarse puede moldearse, acción que favorece a los productos extrudidos según Badui en 2012. Ahora bien, se adicionaron los ingredientes oleosos, y una vez realizado el amasado mecánico se continuó de manera manual, con guantes limpios, para hacer maleable la masa y disminuir su pegajosidad.

### **3.2.1.3 Extrusión**

Esta operación consistió en concluir el amasado por medio de un tornillo sinfín que gira a velocidad constante con diferente configuración de diseño, el cual provocó un cizallado mecánico. El contenido proteico proveniente de la harina de amaranto, con un pequeño cambio de presión al pasar a través de la boquilla, provocó vaporización de agua, comenzando así la expansión, lo que favorece la creación de una estructura porosa para obtener un producto extrudido estable con características finales del cereal para desayuno, esto reafirma lo señalado por Guy, 2002 y Badui, 2012.

### **3.2.1.4 Corte y/o moldeado**

Esta operación unitaria aplica fuerzas de corte para obtener tamaños determinados en combinación con la boquilla, cambia y/o transforma la forma y el tamaño del material de acuerdo con las características de la masa, se estableció el dado con forma circular de 7 mm y el corte de aproximadamente 1 cm.



### 3.2.1.5 Horneado

Esta operación tuvo como finalidad la cocción del cereal y la fijación de la estructura que se comenzó a formar al término de la extrusión por la expansión y que concluye con el incremento de la temperatura durante la cocción del extrudido, para la conservación y presentación del producto.

### 3.2.1.6 Empaque

Durante esta etapa, el objetivo fue la conservación del producto, evitar la contaminación, después del horneado se dejó enfriar el cereal a temperatura ambiente, se propone un empaque de polietileno de alta densidad y posteriormente una caja de cartón, estos impiden su deterioro y facilitan su manipulación, almacenamiento y distribución.

### 3.2.1.7 Almacenamiento

Una vez empaquetado el producto, se almacena en un lugar fresco y seco, que no pueda propiciar plagas y que no se exponga a los rayos del sol.

## 3.3 Análisis de resultados para el cereal de amaranto

### 3.3.1 Resultados y análisis de presencia de colonias en el cultivo del cereal

Conforme la interpretación y al recuento para cada microorganismo, se obtuvieron los siguientes resultados del análisis microbiológico del cereal para desayuno, como se observa en la tabla 20.

**Tabla 20. Resultados de análisis microbiológico por el método de placas Petrifilm<sup>MR</sup>.**

| Condiciones de proceso |                     |                                    |                     | Microorganismo               |                            |                               |               |                   |
|------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------|
| No. de corrida         | Humedad inicial (%) | Diseño de tornillo (No. de alabes) | Tamaño de partícula | mesofilicos aerobios (UFC/g) | coliformes totales (UFC/g) | <i>Escherichia Coli</i> (+/-) | mohos (UFC/g) | levaduras (UFC/g) |
| 1                      | 28                  | 9                                  | Fino                | <10                          | <10                        | -                             | <10           | <10               |
| 2                      | 28                  | 9                                  | Intermedio          | <10                          | <10                        | -                             | <10           | 10                |
| 3                      | 28                  | 11                                 | Fino                | 10                           | <10                        | -                             | <10           | 40                |
| 4                      | 28                  | 11                                 | Intermedio          | 30                           | <10                        | -                             | <10           | 120               |
| 5                      | 33                  | 9                                  | Fino                | <10                          | <10                        | -                             | <10           | <10               |
| 6                      | 33                  | 9                                  | Intermedio          | <10                          | <10                        | -                             | <10           | <10               |
| 7                      | 33                  | 11                                 | Fino                | <10                          | <10                        | -                             | <10           | <10               |
| 8                      | 33                  | 11                                 | Intermedio          | <10                          | <10                        | -                             | <10           | <10               |

\*Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Como se puede observar, en las corridas 3 y 4, estas presentaron el mayor crecimiento de mesófilos aerobios, esto se atribuyó a una mala práctica de manipulación del producto durante la recolección de la muestra en ambas corridas, se deduce que esto no se debe a las materias primas, al equipo o a las condiciones del proceso. Las materias primas, pertenecieron a un solo lote, en el caso del equipo este fue lavado y desinfectado, primeramente con etanol y luego con sales de amonio y en cuanto a las condiciones del proceso, en todas las corridas fueron las mismas. Cabe resaltar que los experimentadores usaron guantes de látex durante todo el proceso de extrusión en cada una de las corridas.

Por otra parte, el crecimiento de levaduras en condiciones de baja humedad y con cantidades elevadas de azúcar, puede ocurrir. Sin embargo, de manera general todas las corridas, en cuanto a los parámetros microbiológicos obtenidos se encuentran dentro de la normatividad de los cereales para desayuno, en donde encontramos los siguientes parámetros mesofílicos aerobios 10 000 UFC/g, coliformes fecales < 30 UFC/g y mohos hasta 300 UFC/g (NOM-147-SSA1-1996).

### 3.3.2 Resultados de variables del proceso

A continuación se presenta la Figura 21, que resume los resultados finales de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas del cereal de amaranto para desayuno, por corrida bajo



Figura 21. Gráfico de resultados de las determinaciones de humedad final (%), índice de expansión (%), porosidad (%), índice de absorción de leche (%) y grado de gelatinización del almidón (%) en el cereal de amaranto.

sus condiciones. Las barras llevan el siguiente orden: humedad final (%), índice de expansión (%), porosidad (%), índice de absorción de leche (%) y el grado de gelatinización de almidón (%). Estos nos permitieron comparar las magnitudes alcanzadas en cada corrida con la finalidad de observar el comportamiento y el efecto entre las variables.

Como podemos observar en la Figura 21, los valores de humedad final del producto se mantienen en promedio alrededor del 3.71 %, este valor se encuentra dentro del intervalo de estos productos, esto se puede sustentar con valores de humedad en cereales comerciales provenientes de los siguientes granos: arroz 3 %, trigo 4 % y maíz 2 % (Prieto F., *et al*, 2005). Por otro lado, el tamaño de partícula fino afecta a la humedad final y al grado de gelatinización del almidón en las corridas 1, 3, 5 y 7 cuya característica en común por la presencia en mayor medida de almidón proveniente del grano. En consecuencia la porosidad está relacionada con la gelatinización del almidón y asimismo, el índice de absorción de leche, con la homogeneidad estructural del cereal y con la porosidad del cereal. A continuación, se presentan los resultados por cada variable estudiada en el proceso, y el comportamiento o similitud con otras.

### 3.3.2.1 Resultados y análisis del índice de expansión

En la Figura 22, se presentan las réplicas de cada tratamiento para los efectos principales de diseño que se realizó en el programa estadístico Minitab, para la propiedad del índice de expansión.

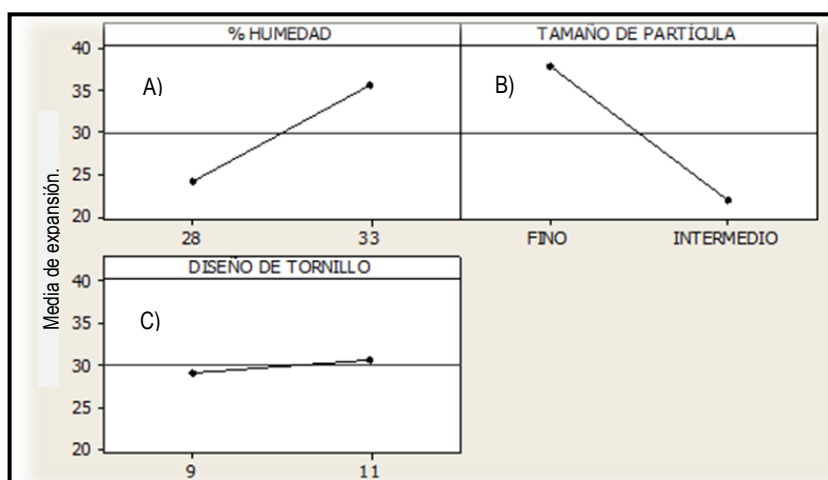
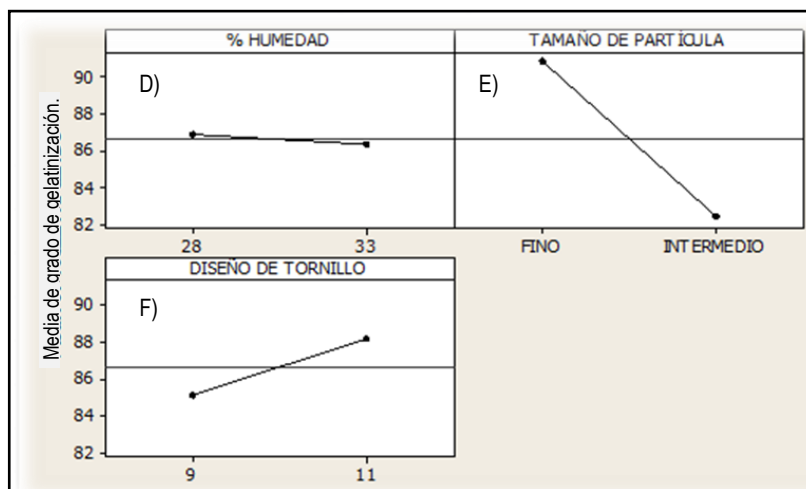


Figura 22. Efectos principales de las variables: A) humedad final, B) tamaño de partícula y C) diseño del tornillo, con respecto a la expansión (%).

Ahora bien, en la gráfica de efecto principal (Figura 22 B), se observa que el tamaño de partícula fino afecta en gran medida a esta propiedad, reflejándose más en la corrida 7 como ya se discutió en la Figura 21, siendo un cereal poroso en condiciones de humedad inicial del 33% y seguido del diseño de tornillo de 11 alabes, lo que propicia la gelatinización del almidón. De igual forma en la Figura 21, los valores de expansión más altos corresponden a las corridas 1, 3, 5 y 7, como consecuencia la mayor expansión en el producto, que se apoya con lo señalado por Huber, 2001.

### 3.3.2.2 Resultados y análisis del grado de gelatinización del almidón

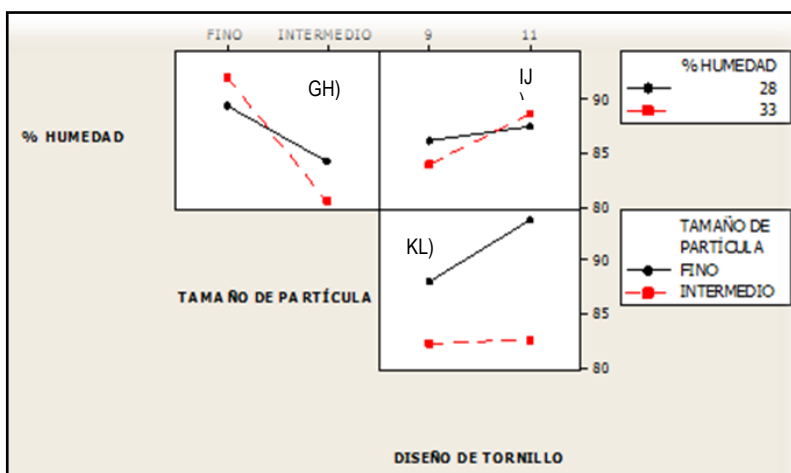
Cabe señalar que un parámetro de control, fue la determinación de la gelatinización del almidón en las dos harinas. La harina de amaranto presentó sólo un 20 % de almidón gelatinizado correspondiente a la fracción de amilopectina; la harina de trigo presentó alrededor del 80 % del almidón pregelatinizado, del cual el 74 % correspondió a la fracción de amilopectina y el 26 % de la amilosa, esto coincide con lo reportado por Badui, 1999 y Bressani, 1994. En la Figura 23, se presentan las medias de las réplicas de cada tratamiento para los efectos principales del diseño que se realizó en el programa estadístico Minitab, para la propiedad del grado de gelatinización.



**Figura 23. Efectos principales de las variables: D) humedad final, E) tamaño de partícula y F) diseño del tornillo, con respecto a grado de gelatinización.**

Durante todo el proceso de elaboración del cereal de amaranto, se monitoreo la gelatinización, y se puede afirmar que alcanzó su máximo grado de gelatinización durante el horneado del cereal.

En la Figura 23-E, se puede analizar que el tamaño de partícula fino, es la variable que tiene el mayor efecto sobre la gelatinización del almidón, esto debido a que esta fracción de la harina es la que tiene un mayor contenido de endospermo y en consecuencia de almidón, seguido del diseño del tornillo de 11 alabes que es el que propicia mayor cizallamiento, lo ideal para este tipo de productos, y en consecuencia con una humedad inicial alta del 33 %, se obtuvieron valores mayores de gelatinización del almidón, a raíz de que el almidón absorbe mayor cantidad de agua disponible y por lo tanto incrementa el granulo de almidón, hasta 20 veces su peso y volumen en agua, según por Rojas y Molina en 2007. Ahora bien, se presenta la gráfica de interacción de variables entre humedad inicial, tamaño de partícula y diseño de tornillo para el grado de gelatinización del almidón.



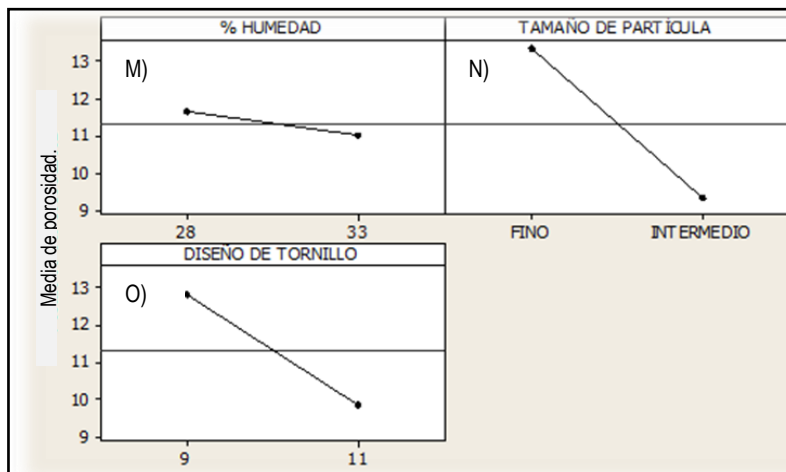
**Figura 24. Interacción entre las variables: GH) humedad final-tamaño de partícula, IJ) humedad final-diseño del tornillo y KL) tamaño de partícula-diseño del tornillo con respecto al grado de gelatinización.**

En esta gráfica confirma que una humedad inicial del 33 % en combinación con el tamaño de partícula fino (Figura 24-GH) tienen un mayor efecto en la gelatinización, y en menor medida, la relación de humedad alta con el tornillo de 11 alabes (Figura 24-IJ). Por otro lado, la gelatinización del almidón no es la única que afecta directamente a la porosidad, si no que esta propiedad se ve afectada en mayor medida por el tamaño de partícula y el diseño de tornillo, esto se analizara a continuación.

### 3.3.2.3 Resultados y análisis de porosidad

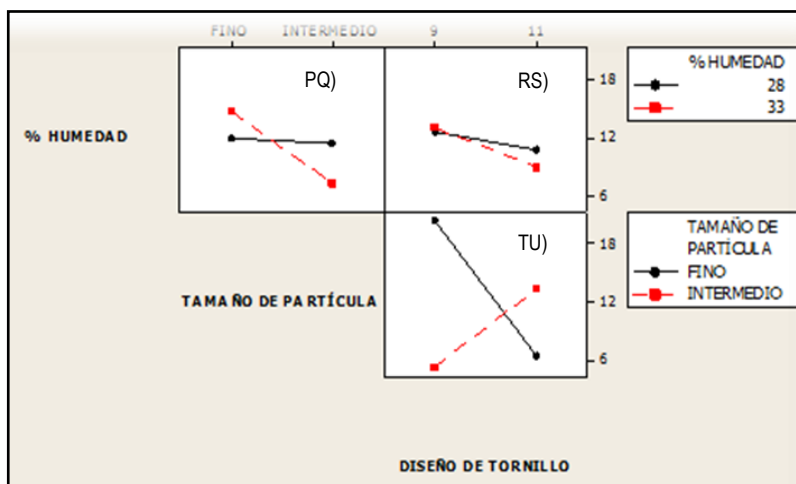
La siguiente variable de estudio es la porosidad del cereal, que sin perder de vista la Figura 21 en cuanto a la porosidad del producto esta, inversamente relacionada con la densidad del

cereal, cumpliéndose que a menor densidad mayor porosidad en el cereal, esto se comprueba en los resultados obtenidos en las corridas 1, 4 y 5 de la Figura 21 del cereal de amaranto.



**Figura 25. Efectos principales de las variables: M) humedad final, N) tamaño de partícula y O) diseño del tornillo, con respecto a la porosidad (%).**

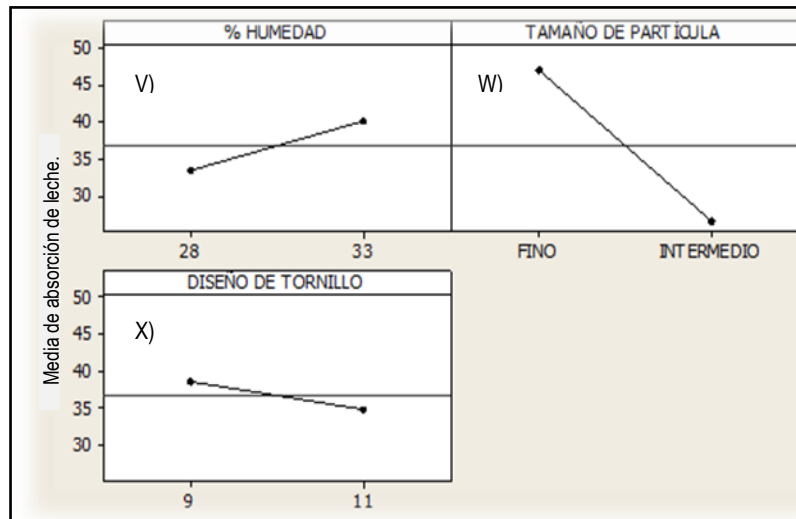
En la Figura 25, se puede observar que el tamaño de partícula fino y el diseño de tornillo de 9 alabes el mayor efecto sobre la porosidad del cereal a la salida del extrusor, por las proteínas del amaranto favorecen la formación de esta porosidad y de acuerdo con Guy *et al.*, 2003, esta propiedad se genera cuando existe una menor compresión en la zona de amasado durante el proceso de extrusión, debida al cizallamiento por parte del diseño de tornillo. La Figura 26, se reafirma que la relación entre tamaño de partícula y el diseño de tornillo, presentan el mayor efecto.



**Figura 26. Interacción entre las variables: PQ) humedad final-tamaño de partícula, RS) humedad final-diseño del tornillo y TU) tamaño de partícula-diseño del tornillo con respecto a la porosidad (%).**

### 3.3.2.4 Resultados y análisis del índice de absorción de leche (IAL)

Ahora bien, en la Figura 27 se presentan los efectos principales de las variables independientes con respecto al índice de absorción de leche, se determinó que la variable que tiene mayor efecto sobre esta propiedad del cereal, es el tamaño de partícula fino (Figura 27-W), ya visualizado anteriormente en la Figura 21.



**Figura 27. Efectos principales de las variables: V) humedad final, W) tamaño de partícula y X) diseño del tornillo, con respecto al índice de absorción de leche (%).**

En cuanto a la humedad y el diseño de tornillo, no tuvieron el mismo efecto sobre el índice de absorción de leche, lo que se atribuye a la obtención de la estructura homogénea debida a la gelatinización del almidón; no se presentó interacción entre las variables de proceso, y por lo cual no se presenta el gráfico. Por otra parte, el índice de absorción, refleja un comportamiento opuesto a los resultados de dureza del cereal, que se presenta a continuación.

### 3.3.2.5 Resultados y análisis de dureza

En la Figura 28, se observa que la variable que afecta considerablemente a la dureza del cereal de amaranto, es el tamaño de partícula intermedio (Figura 19-M), principalmente por su alto contenido en la cascarilla del grano, esto hizo que requiriera mayor masa de carga durante la prueba en el texturómetro Brookfield, seguido de la humedad baja inicial del proceso (28%), son las variables que determinan un producto con mayor dureza. Para esta propiedad, no hubo interacción entre las variables, por lo que no fue necesario presentar el gráfico para esta propiedad.

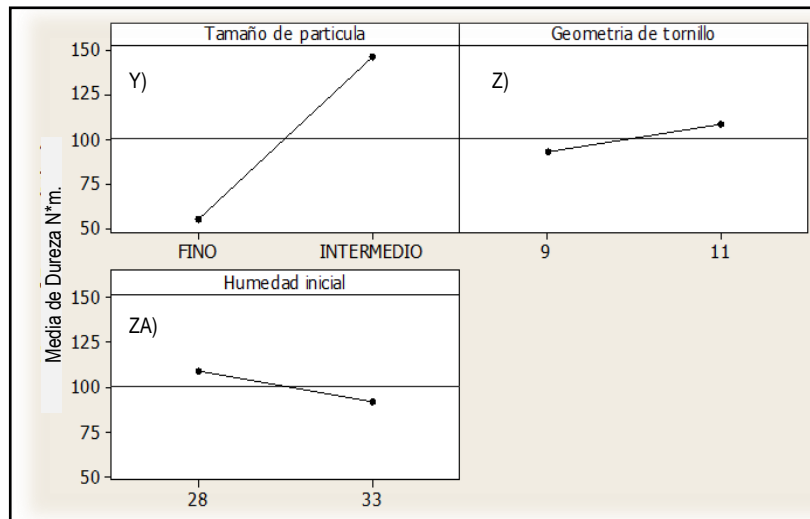


Figura 28. Efectos principales de las variables: Y) tamaño de partícula Z) humedad inicial y ZA) diseño del tornillo, con respecto a dureza (N\*m).

### 3.3.3 Resultados y análisis de evaluación sensorial en cereal de amaranto

A continuación en la Figura 29, se presentan los resultados sensoriales, que fueron evaluados mediante el test hedónico del cereal para desayuno de amaranto, mediante la obtención de medias aritméticas, esto permitió saber las preferencias del consumidor en cuanto al cereal para desayuno a partir de amaranto y así poder establecer las características de agrado.

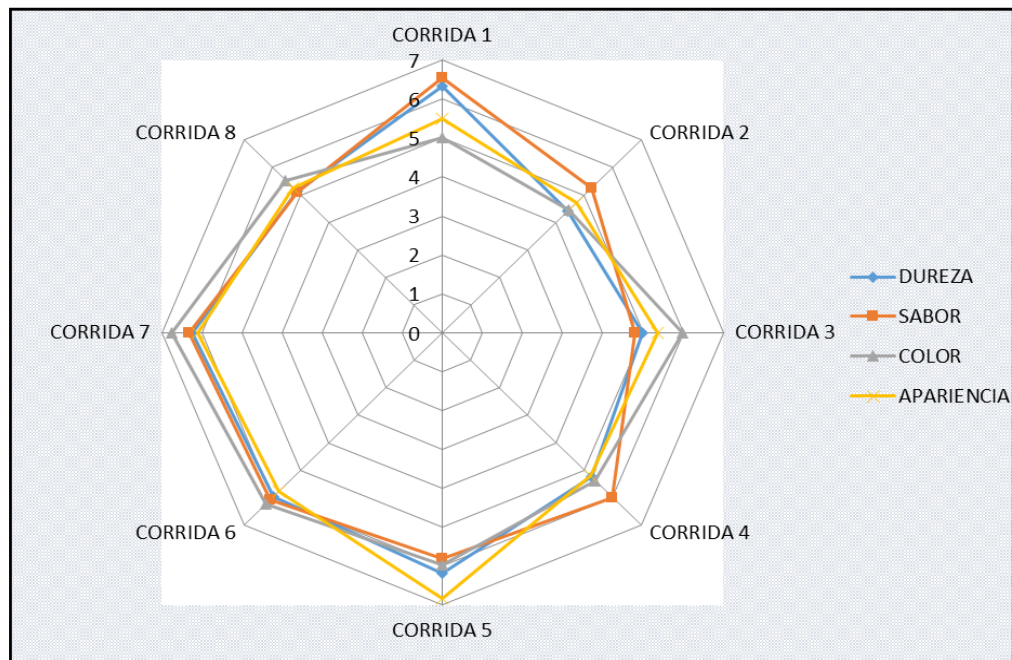
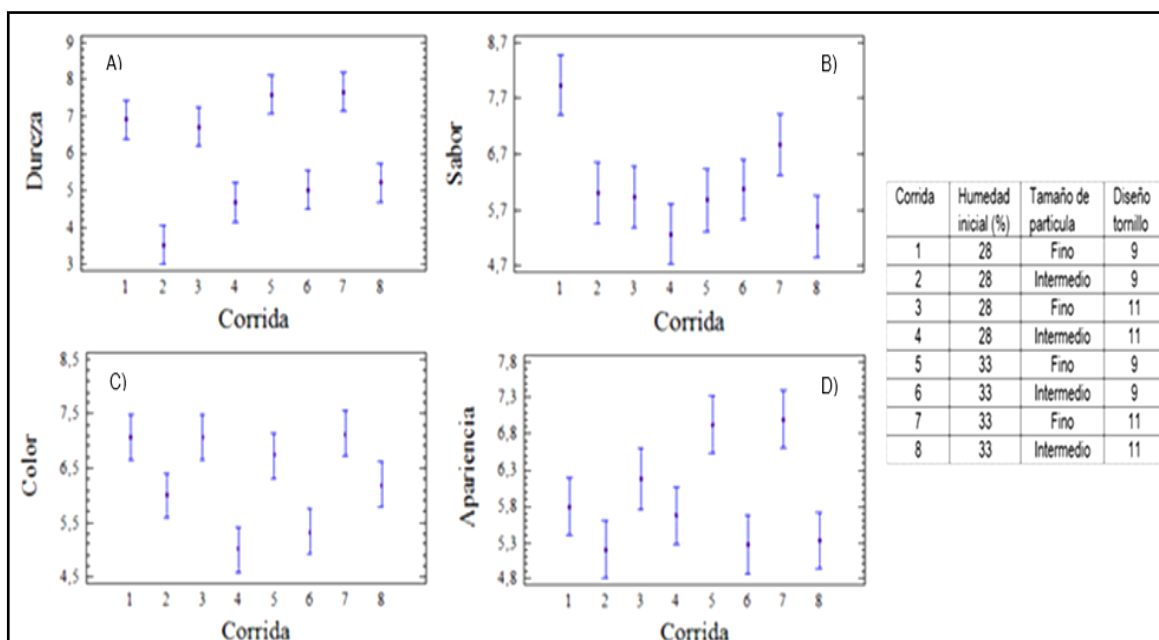


Figura 29. Diagrama de evaluación sensorial para el cereal de amaranto.



Este diagrama muestra la preferencia hacia los parámetros estudiados de dureza, sabor, color y apariencia, que fueron evaluados mediante el test de preferencia propuesto (Figuras: 14, 15, 16 y 17), desde me disgusta muchísimo (indicado con el numero 1 en el centro de la gráfica) hasta me gusta muchísimo (indicado con el numero 9), con ello se determinó que el mayor agrado de aceptación, en cuanto a dureza y apariencia fueron las corridas 1, 5 y 7 presentando como factor determinante el tamaño de partícula fino.

A continuación se muestran las respuestas de cada evaluador para el cereal de amaranto fueron sometidas a un Análisis de Varianza (ANOVA), el comportamiento de cada parámetro evaluado observando, que la dureza es determinante en el agrado de los consumidores (Figura 30), evaluado en cada corrida.

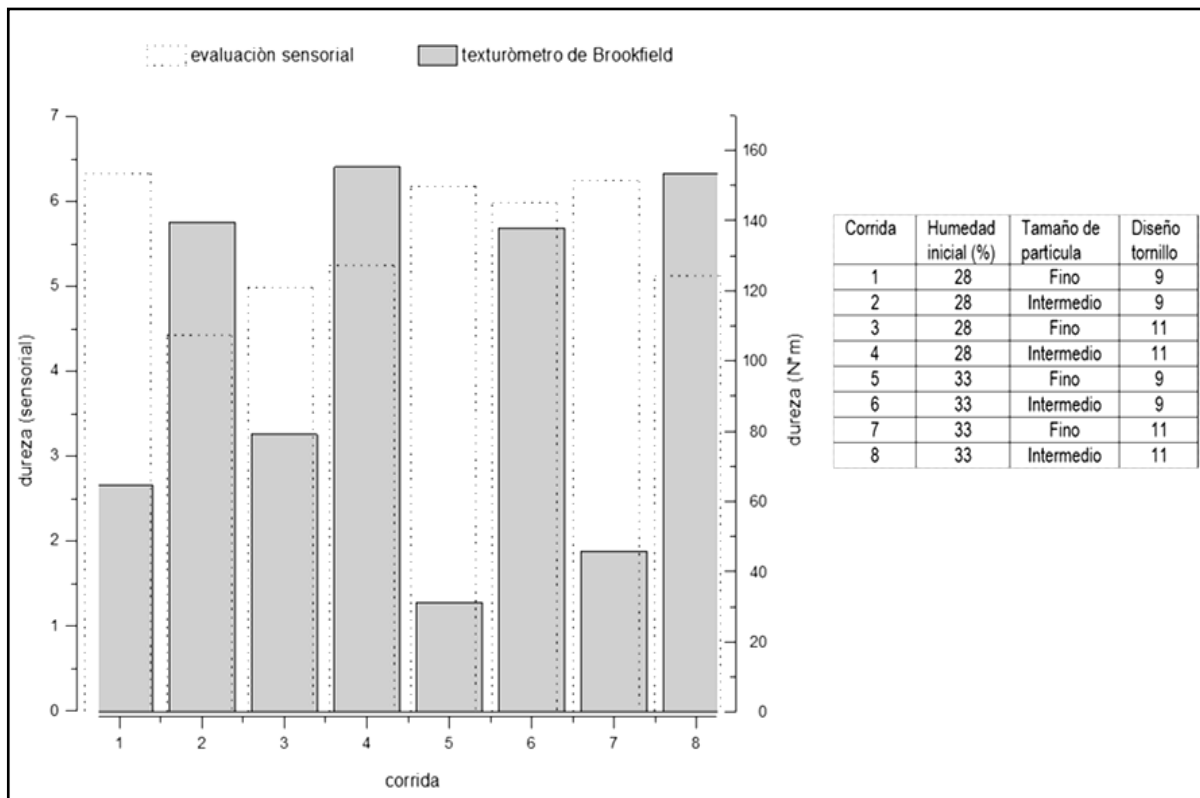


**Figura 30. Gráfico de resultados ANOVA con dos vías para los parámetros dureza, sabor, color y apariencia.**

En el atributo de dureza se observa, que en las corridas 1, 3, 5 y 7, el tamaño de partícula fino repercutió en el mayor agrado para los panelistas, que al ser analizado en el texturómetro de Brookfield, estas corridas requieren, menor masa de carga y por lo tanto menor oposición a ser fracturados. En los parámetros de color y sabor cabe mencionar que en cuanto a las corridas mencionadas anteriormente, aparecen en la preferencia de los consumidores, sin embargo en el caso del atributo de sabor se muestra que hubo mayor agrado en las corridas 1 y 7, en comparación con las demás.

### 3.3.4 Comparativo de análisis de dureza cereal comercial vs cereal de amaranto

En la siguiente representación gráfica (Figura 31), nos muestra la comparación del comportamiento de los cereales evaluados mediante el equipo texturómetro de Brookfield y de la evaluación sensorial, realizadas por corrida, con el fin de poder evaluar el efecto del parámetro de dureza, considerado como variable crítica de control en el producto terminado.



**Figura 31. Gráfico comparativo de dureza instrumental (N\*m) vs dureza sensorial en cereales comerciales y cereales de amaranto.**

En el gráfico comparativo de dureza instrumental y de la dureza sensorial para cada corrida. En cuanto a la dureza sensorial, nos permite apreciar que, conforme la escala aumenta de 0 a 7, nos indica la preferencia por parte de los panelistas evaluadores es hacia el agrado del cereal y con respecto a la dureza instrumental, conforme menor es la barra en la escala de N\*m la dureza es menor, este comportamiento se encuentra en las corridas 1, 3, 5 y 7 del cereal de amaranto, con lo que podemos decir que las partículas finas de la harina de amaranto son las responsables de una menor dureza y de un mayor agrado por parte de los consumidores.

### 3.3.5 Resultados y análisis de las variables estudiadas en los cereales comerciales

De acuerdo con el planteamiento experimental, se realizaron las mismas pruebas físicas, químicas y fisicoquímicas que al cereal de amaranto. Los 3 cereales comerciales empleados, fueron: Choco Pops<sup>®</sup>, Corn Pops<sup>®</sup> y Nesquick<sup>®</sup>, siendo determinantes para analizar el comportamiento que tienen los cereales para desayuno, obteniéndose los siguientes datos, arrojando información que sirvió para la medición de algunas propiedades en el producto, propuestas en este proyecto (Figura 32).

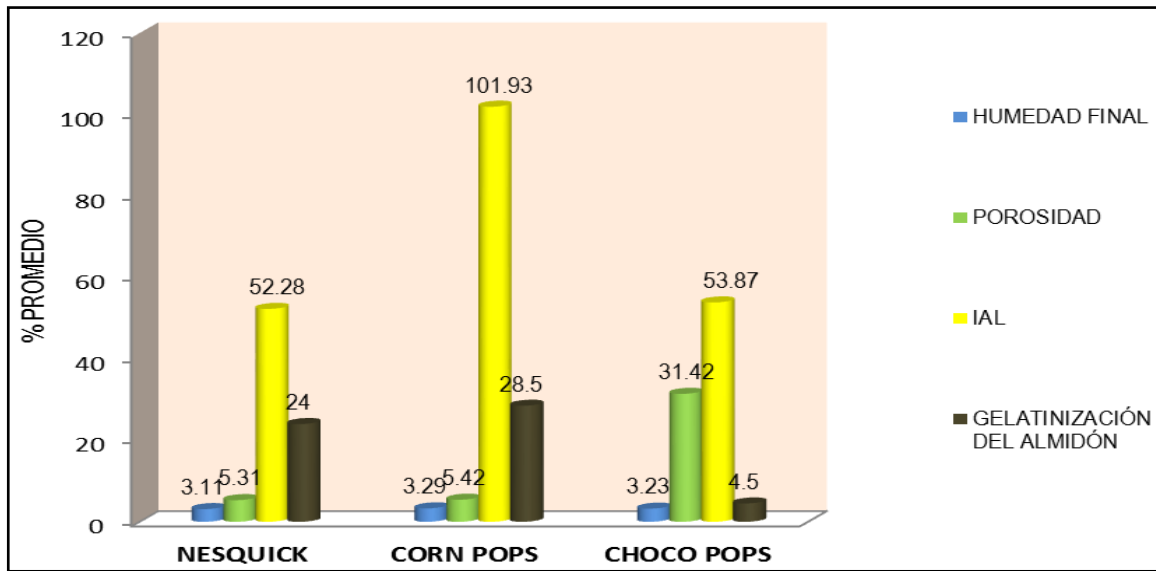


Figura 32. Gráfico de resultados de las determinaciones de humedad final (%), porosidad (%), índice de absorción de leche (%) y grado de gelatinización del almidón (%) cereales comerciales (Choco Pops<sup>®</sup>, Corn Pops<sup>®</sup> y Nesquick<sup>®</sup>).

Con base en la determinación de las propiedades de humedad, índice de absorción de leche, grado de gelatinización y porosidad de los cereales comerciales Nesquick<sup>®</sup>, Choco Krispis Pops<sup>®</sup> y Corn Pops<sup>®</sup>, se observa, que el cereal Corn Pops de Kellogg's<sup>®</sup> fue el que presentó mayor humedad final e índice de absorción de leche, este cereal es fabricado con maíz, en el cual, el tamaño del granulo de almidón es de 5-25  $\mu\text{m}$ , más pequeño, en comparación con los almidones de los otros granos de cereal. Se presume que el cereal elaborado con maíz en su mayor cantidad es rico en amilosa, puesto que puede presentar un mayor % de almidón gelatinizado a diferencia de los otros cereales comerciales estudiados. Se sabe que la amilosa es una cadena lineal y por lo tanto, es más fácil de hidratar su estructura, que la estructura de la amilopectina, que está conformada por cadenas ramificadas.

### 3.3.6 Resultados y análisis de evaluación sensorial en cereales comerciales

De acuerdo a la Figura 33, el cereal comercial que tuvo mayor preferencia por parte de los consumidores, fue el cereal para desayuno Corn Pops de Kellogg's® con 9 panelistas de cada 15.

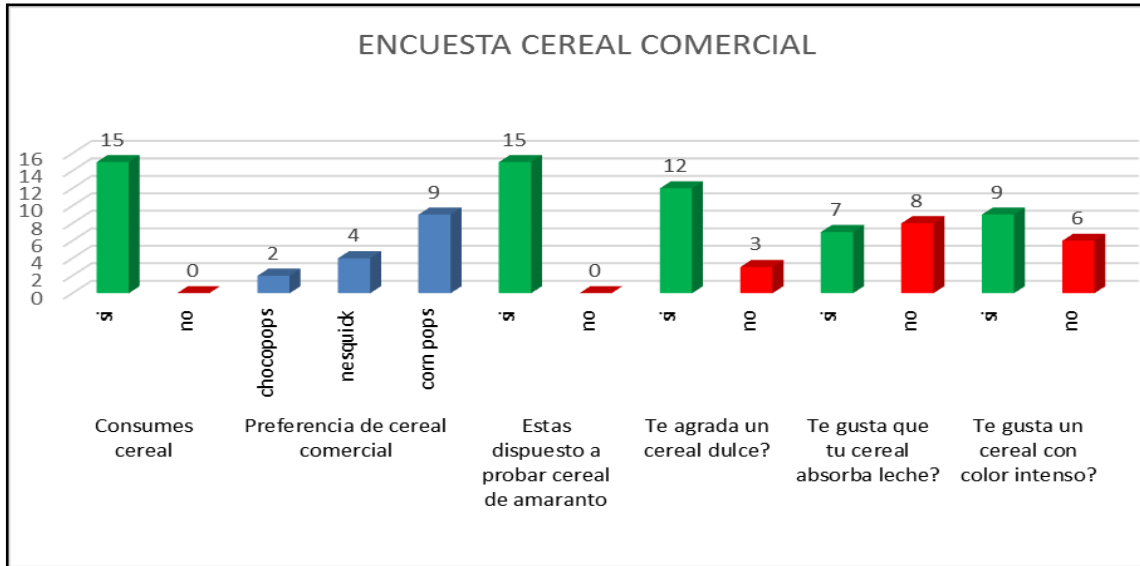


Figura 33. Gráfica de test de prueba descriptiva y de preferencia de los panelistas en los cereales comerciales (Nesquik®, Choco Krispis Pops® y Corn Pops®).

Con respecto al principal agrado de los consumidores fue el cereal Corn Pops de Kellogg's®, debido a la potencialidad de los edulcorantes, contenidos en su formulación. Este cereal contiene azúcar y glucosa, que lo hacen más intenso en cuanto a dulzor a diferencia de los otros dos cereales comerciales.

En cuanto a la dureza, 12 de los 15 panelistas prefieren un cereal con características sensoriales de dureza baja, de color intenso, característica que atribuyen ellos a una buena cocción, sin embargo, este criterio se termina de definir por la caramelización por parte de los carbohidratos durante el horneado. Además a los consumidores no les agrada que su cereal absorba rápidamente leche, debido a que el cereal se ablanda y termina apelmazándose, aspecto que la mayoría de los panelistas consideró desagradable.

A continuación, se presentan los resultados finales de las variables estudiadas en la elaboración del cereal de amaranto y de los cereales comerciales, cuyo objetivo es analizar y concluir las condiciones de proceso adecuadas en la elaboración de este cereal.

**Tabla 21. Resultados finales de las variables evaluadas en el proceso de elaboración en un cereal de amaranto.**

| NUMERO DE CORRIDA | VARIABLES INDEPENDIENTES |                    |                     | VARIABLES DEPENDIENTES Y DE RESPUESTA |      |                     |      |           |      |       |      |                         |      |                   |      |        |      |
|-------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|------|---------------------|------|-----------|------|-------|------|-------------------------|------|-------------------|------|--------|------|
|                   | HUMEDAD INICIAL          | DISEÑO DE TORNILLO | TAMAÑO DE PARTÍCULA | HUMEDAD FINAL                         | C.V. | ÍNDICE DE EXPANSIÓN | C.V. | POROSIDAD | C.V. | IAL   | C.V. | GRADO DE GELATINIZACIÓN | C.V. | DENSIDAD          | C.V. | DUREZA | C.V. |
|                   | %                        | Núm. Alabes        | Granulometría       | %                                     |      | %                   |      | %         |      | %     |      | %                       |      | g/cm <sup>3</sup> |      | N*m    |      |
| 1                 | 28                       | 9                  | FINO                | 3.63                                  | 0.1  | 32.34               | 0.53 | 20.22     | 0.32 | 41.31 | 0.27 | 86.42                   | 0.06 | 0.24              | 0.1  | 64.68  | 0.5  |
| 2                 | 28                       | 9                  | INTERMEDIO          | 2.64                                  | 0.35 | 20.31               | 0.48 | 4.98      | 0.59 | 25.42 | 0.21 | 85.91                   | 0.06 | 0.31              | 0.05 | 139.4  | 0.26 |
| 3                 | 28                       | 11                 | FINO                | 4.71                                  | 0.17 | 24.49               | 0.3  | 3.59      | 1.35 | 43.1  | 0.46 | 92.6                    | 0.04 | 0.26              | 0.02 | 79.04  | 0.83 |
| 4                 | 28                       | 11                 | INTERMEDIO          | 2.44                                  | 0.37 | 19.59               | 0.04 | 17.88     | 0.15 | 23.5  | 0.27 | 82.66                   | 0.05 | 0.26              | 0.04 | 155.22 | 0.18 |
| 5                 | 33                       | 9                  | FINO                | 4.67                                  | 0.35 | 35.73               | 0.46 | 20.59     | 0.33 | 57.53 | 0.72 | 89.51                   | 0.09 | 0.24              | 0.09 | 31.19  | 0.38 |
| 6                 | 33                       | 9                  | INTERMEDIO          | 3.31                                  | 0.6  | 28.28               | 0.75 | 5.53      | 0.21 | 30.36 | 0.29 | 78.58                   | 0.21 | 0.29              | 0.02 | 137.82 | 0.19 |
| 7                 | 33                       | 11                 | FINO                | 5.56                                  | 0.1  | 59.13               | 0.53 | 8.97      | 0.84 | 45.96 | 0.27 | 94.81                   | 0.02 | 0.25              | 0.13 | 45.77  | 0.68 |
| 8                 | 33                       | 11                 | INTERMEDIO          | 2.78                                  | 0.88 | 19.35               | 0.45 | 8.94      | 0.14 | 26.61 | 0.23 | 82.56                   | 0.09 | 0.28              | 0.11 | 153.47 | 0.1  |

**Tabla 22. Resultados finales de las variables involucradas respecto a los cereales comerciales estudiados.**

| CEREAL COMERCIAL         | HUMEDAD FINAL | C.V. | POROSIDAD | C.V. | ABSORCIÓN DE LECHE. | C.V. | GRADO DE GELATINIZACIÓN | C.V. | DUREZA | C.V. | DENSIDAD          | C.V. |
|--------------------------|---------------|------|-----------|------|---------------------|------|-------------------------|------|--------|------|-------------------|------|
| Marca                    | %             |      | %         |      | %                   |      | %                       |      | N*M    |      | g/cm <sup>3</sup> |      |
| Nesquick Nestlé®         | 3.11          | 0.10 | 5.31      | 0.04 | 52.28               | 0    | 24                      | 0.04 | 184.43 | 0    | 0.15              | 0.04 |
| Corn Pops de Kellogg's®  | 3.29          | 0.07 | 5.42      | 0.03 | 101.93              | 0.01 | 28.5                    | 0.05 | 253.31 | 0    | 0.15              | 0    |
| Choco Pops de Kellogg's® | 3.23          | 0.05 | 3.23      | 0.05 | 53.87               | 0.02 | 4.5                     | 0.11 | 179.08 | 0.01 | 0.20              | 0.01 |

Cabe mencionar que los resultados del análisis estadístico, los valores del coeficiente de variación (C.V), se calcularon después de obtener el valor de la desviación estándar entre la media, cuando el valor del coeficiente de variación sea menor, estos valores serán más homogéneos (Sabadias, 1995). Por lo tanto, observando los resultados finales (Tablas 21 y 22), los valores del coeficiente de variación fueron menores al 1%, recordemos que por cada corrida y variable, se realizaron 3 repeticiones, por lo que obtuvimos resultados confiables en la parte experimental.

### **Contrastación de hipótesis.**

Se comprueba que las condiciones de proceso de extrusión que permite obtener un cereal expandido para desayuno a partir de amaranto, en un extrusor de tornillo sencillo, son trabajar a una humedad inicial del 33 %, que el tornillo sea de mayor número de alabes, menor separación entre ellos y con punta.

En cuanto a la harina de amaranto, es conveniente que esta sea de un tamaño de partícula fino y que contenga el 50 % de almidón en promedio, esto con la finalidad de alcanzar la gelatinización del almidón, repercute en la expansión del cereal, ambas están relacionadas con la vaporización del agua de forma inmediata al salir del extrusor, para crear una estructura porosa en el cereal con dureza y densidad baja, esto como consecuencia del control de las condiciones del proceso de elaboración cereal de amaranto.

Huber en 2001, menciona que en productos expandidos se deben controlar las condiciones del proceso, como son el diseño de tornillo con mayor número de alabes y una temperatura de horneado máxima de 100° C durante 30 min., se obtendrá un producto expandido. Adicionalmente, se ha comprobado que el diseño del tornillo influye en la dureza del cereal, debido a que este genera un cizallamiento y compresión en la zona de amasado, de acuerdo con lo mencionado por Guy en 2002 y Sharman *et al.*, en 2003.

## Conclusiones.

En la extrusión, es importante controlar las variables involucradas en el proceso, aunado a las propiedades físicas y químicas de las materias primas, determinan muchas de las propiedades estructurales así como los atributos de calidad del producto final. Por ello, es importante evaluar los efectos del proceso de extrusión, desde que los materiales son alimentados, mientras se encuentran a lo largo del tornillo, hasta la obtención del producto final requerido, de esta manera, se podrá tener conocimiento, para tener el control de las variables en el proceso de extrusión con la finalidad de conseguir siempre el producto con las especificaciones establecidas.

Ahora bien, como parte del proceso es necesario considerar también, la selecta calidad en las materias primas, las buenas prácticas del personal, durante el proceso de transformación, así como de manipulación del producto. Es importante la limpieza y sanidad, el correcto almacenamiento entre muchos otros, son factores determinantes para reducir el riesgo de contaminación microbiológica, física o química y obtener alimentos inocuos para consumo humano.

Al respecto del análisis microbiológico del cereal de amaranto, se concluye que el producto se encuentra dentro de especificación según la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SSA1-1996 de cereales y sus productos. La cuenta total de *Mesofilicos aerobios* (UFC/g) obtenidos de este análisis está por debajo de 10 UFC/g al igual que para los *Coliformes totales*, *hongos* y *levaduras*. Para el caso de *Escherichia Coli*, todas las corridas y en los cereales comerciales, se obtuvieron resultados negativos (-), no presentando crecimiento por parte de este microorganismo, como resultado del correcto uso de las buenas prácticas del manejo de materias primas, en el proceso y de producto terminado y se evitó la contaminación intencionada de este tipo de microorganismos hacia el producto.

Es de saber que el cereal para desayuno, y principalmente de harina de amaranto, provee energía a partir del almidón, la cual es importante para cubrir el 55 % aproximadamente del requerimiento energético diario del ser humano. Además, en su contenido proteico es un balance de aminoácidos esenciales, que permiten la asimilación de nutrientes en el ser humano y desde el punto de vista tecnológico es importante debido a su capacidad de retener agua para ejercer sus propiedades funcionales. Las proteínas, para caso de la harina de trigo, tecnológicamente en especial las que forman el gluten, y también afectan la capacidad para mantener la humedad y también favorecen

la gelatinización del almidón y lograr la expansión deseada en el cereal para desayuno. Estas últimas propiedades se controlan desde la formulación y el acondicionamiento de las materias primas, son parámetros de calidad importantes para el consumidor. Al respecto, se afirma que el tamaño de partícula fino con respecto al porcentaje de humedad del 33 %, se obtiene el mayor grado de gelatinización del almidón y este a su vez, es proporcional a la expansión, la porosidad y absorción de leche del cereal. Con respecto a la dureza el diseño de tornillo fue el más importante.

Desde otra perspectiva la dureza fue estudiada por una evaluación sensorial, la cual permitió definir los atributos y parámetros que más influyen en la calidad sensorial de forma cualitativa y cuantitativa en este cereal. El mayor agrado en cuanto a la dureza y apariencia por parte de los panelistas fue debida al tamaño de partícula fino, coincidiendo con el resto del estudio. En el parámetro de sabor influye, el acondicionamiento de las materias primas, la velocidad y tiempo de mezclado, el contenido de humedad inicial, pero principalmente el tamaño de partícula fino. Para el color, los resultados bajo condiciones similares a las de dureza, tuvieron un mayor agrado por un color intenso el cual se atribuye específicamente por el control en la cocción del cereal en condiciones óptimas de temperatura (90-100 °C) en un tiempo de 30 minutos.

La contra parte de la evaluación sensorial fue el cereal comercial, el mayor agrado por parte de los consumidores fue en el cereal Corn Pops de Kellogg's® con características de mayor dulzor (Azúcar y glucosa), mayor absorción de leche y un color intenso. Sin embargo, las propiedades estudiadas en el cereal de amaranto, con respecto a las del cereal comercial no son comparables, debido a que la formulación y las condiciones de proceso son diferentes, sin embargo son productos en el mercado que son susceptibles a ser caracterizados. Sin perder de vista las variables de estudio, el cereal Corn Pops de Kellogg's® tiene un comportamiento similar al de amaranto con mayor porcentaje de humedad, grado de gelatinización, porosidad y dureza. Se concluye que se ha obtenido un producto innovador que cumple o supera los niveles en cuanto a las propiedades de calidad de algunos cereales comerciales y que son productos actualmente posicionados dentro del mercado.



## REFERENCIAS.

1. Badui, D., (1999) Química de los Alimentos. Editorial Alhambra Mexicana, 2da. Edición. UNAM, México. Páginas 642
2. Badui, D., (2012) La ciencia de los alimentos en la práctica. Editorial Pearson. 2012. México. Páginas 328.
3. Barraza, E., (1993) El proceso de extrusión: Una alternativa tecnológica aplicada en la elaboración de productos alimentarios. Tesis de licenciatura. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
4. Becker, R., (1994) Amaranth oil: Composition, processing and nutritional qualities. In: Amaranth: Biology, Chemistry, and Technology. Editorial Paredes-López. España.
5. Bressani, R., (1994) Composition and nutritional properties of amaranth. Composition, processing and nutritional qualities. In: Amaranth: Biology, Chemistry, and Technology. Editorial. Paredes - Lopez. España.
6. Calleado, G.; Greca G., y S. Albrizio, (1996) Synthesis Amaranth and activity of peptides. History Amaranth. England. Páginas 244.
7. Callejo, G., (2002) Industrias de cereales y derivados. Editorial AMV. Madrid, España. Páginas 337.
8. Chagaray, A., (2005) Estudio de factibilidad del cultivo de amaranto. Tesis de posgrado. México, Universidad Autónoma de Yucatán.
9. Charley, H., (1987) Tecnología de alimentos. Editorial Limusa. México. Páginas 140.
10. Contreras, E.; Porras Martínez, G. y J. Ordaz (2010) Propiedades fisicoquímicas y sensoriales para preparar atole de amaranto. Archivos latinoamericanos de nutrición. 60:002.
11. Desrosier, N., (1983) Elementos de tecnología de alimentos. Editorial CECSA. México. Páginas 783.
12. Distribuciones Biotecnológicas S. A. de C. V. (2013). "3M Placas Petrifilm<sup>MR</sup>". [En línea]. México, disponible en: <http://www.distribucionesbiotecnologicas.com.mx/#!3m-placas-petrefilm/c5hk> [Accesado el día 24 de Noviembre de 2013].
13. Gutiérrez, H. y R. Salazar, (2008) Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc Graw Hill. 2da. impresión. México. Páginas 571.
14. Guy, R., (2002) Extrusión de Alimentos: Tecnología y aplicaciones. Editorial Acribia S.A. 1era edición. España. Páginas 218.
15. Henry, C. y C. Chapman, (2002) The nutrition handbook for food processors. Editorial Woondhed Publishing Limited. Cambridge, England. 1era edición. Páginas 474.
16. Hernández, R. y G. Herrerías, (1998) Amaranto: Historia y promesa. Patrimonio histórico de Tehuacán. México. 1:529.

17. Hosenev, R., (1991) Principios de ciencia y tecnología de los cereales. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. Páginas 321.
18. Huber, R., (2001). "Developments and Trends in Extruded Snacks". [En línea]. México, disponible en: <http://www.foodproductdesign.com/articles/2001/06/developments-and-trends-----in-extruded-snac.aspx> [Accesado el día 06 de junio de 2014].
19. Kigel, J., (1994) Development and ecophysiology of amaranths. In: Amaranth: "Biology, Chemistry, and Technology". *Editorial*. Paredes- Lopez. España. Páginas 328.
20. Kirk R.; Sawyer, R. y H. Egan, (1999) Composición y análisis de los alimentos. Editorial Pearson 2da. edición México. Páginas 285.
21. Lara, V., (1999) (*Amaranthus Caudatus*). Estudio del efecto de la expansión por aire caliente en las propiedades Físicoquímicas, nutricionales y sensoriales de la semilla de amaranto. Tesis de licenciatura. Ecuador, Universidad central del ecuador.
22. López, A; Díaz, A. y L. Rodríguez, (1996) Reventado de grano de amaranto. (*A. hypocondriacus*). *Alimentaria*. 277,39-42.
23. Manual No. M08-372A1009. Analizador de textura Brookfield (2012). Empresa DIA (Distribuidora e Importadora Alsea S.A de C. V). Avenida Zapotitlán número 6768, Santiago Zapotitlán. México, Tláhuac-D.F.
24. Matissek, R. y M. Schepel (2000) Análisis de los alimentos. Editorial Acribia. S.A. España. Páginas 416.
25. Mian, R., (2003) Extrusores en las Aplicaciones de Alimentos. Editorial Acribia, Zaragoza, España. Páginas 227.
26. NMX-F-428-1982. Alimentos. Determinación de humedad (método rápido de la termobalanza).
27. NOM-147-SSA1-1996, Bienes y servicios. Cereales y sus productos. Harinas de cereales, sémolas y semolinas.
28. NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC-77 2007-09-26. Método de ensayo ´para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.
29. Ometto, C. y O. Brunini, (1991) Efecto de las variables micrometeorológicas y la disponibilidad de agua en el suelo en la resistencia estomática la difusión del gas en el frijol común. *Revista interamericana de ciencias agrícolas*. Turrialba. 41:458.
30. Patil, R., (2005) Physical Characteristics of Food Extrudates. A Review. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 23(6):777-783.
31. Pomeranz, Y., (1988) *Wheat Chemistry and Technology*. American Association of cereal Chemists. 3era edición. Vol. II.
32. Portillo, S., (2012) "Evaluación Sensorial para el Control de la Calidad y la Inocuidad de los Alimentos" conferencia dictada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC), 30 de septiembre de 2012.

33. Prieto F. *et al.*, 2005 “Capacidad de hidratación de los cereales para desayuno Kellogg’s. [En línea]. México, disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-75182005000200010](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182005000200010) [Accesado el día 06 de julio de 2014].
34. Quaglia, G., (1991) Ciencia y tecnología de la panificación. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. Páginas 502.
35. Reyes, C.; Milán J., y J. Garzón, (2002) Descascarillado/suavización/extrusión (DSE): *tecnológica para mejorar la calidad nutricional del garbanzo*. *Agrociencia*. 36:002: 181-189.
36. Rojas, I.–Molina (2007) Study of Structural and Thermal Changes in Endosperm of Quality Protein Maize during Traditional Nixtamalization Process. *Cereal chemistry*. 84(4): 304–312.
37. Sabadías, A., (1995) Estadística descriptiva e inferencial. Editorial Universidad de castilla-La mancha. Madrid España. Páginas 576.
38. Serna-Saldivar, (1996) Química, almacenamiento e industrialización de cereales. Editorial México: AGT. México. Páginas 521.
39. Silva, C., (2007) Caracterización fisicoquímica y amaranto nutraceutica de (*Amaranthus hypochondriacus*) cultivado en San Luis Potosí. Tesis de posgrado. México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
40. Sharman, S.; Mulvaney J. y S. Rizvi, (2003) Ingeniería de los alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Editorial Limusa Wiley. Madrid, España. Páginas 360.
41. Valenzuela, A., (2011) Especialidad en almacenamiento y procesamiento de granos. Tesis de maestría. México, Universidad de Sonora.