



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**EFFECTO DE VARIABLES DE PROCESO EN
PROPIEDADES FÍSICAS Y TEXTURALES DE
BOTANAS FRITAS DE GRANO ENTERO DE MAÍZ
AZUL.**

TRABAJO DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

RAYMUNDO JESÚS DURÁN OLIVIER

ASESORES:

I.B.Q NORMA BEATRIZ CASAS ALENCASER

I.B.Q. JOSÉ JAIME FLORES MINUTTI

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



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

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



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

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

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

Efecto de variables de proceso en propiedades físicas y texturales de botanas fritas de grano entero de maíz azul.

Que presenta el pasante: Raymundo Jesús Durán Olivier
Con número de cuenta: 410028506 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería 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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautilán Izcalli, Méx. a 29 de Abril de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	<u>I.B.Q. Norma Beatriz Casas Alencaster</u>	
VOCAL	<u>Dra. María Elena Vargas Ugalde</u>	
SECRETARIO	<u>I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa</u>	
1er. SUPLENTE	<u>M. en C. Julieta González Sánchez</u>	
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Virginia López García</u>	

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

IHM/mmgm*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, **Rosa Martha Olivier Valdez**, por ser la mejor madre de este mundo, por darme la vida, por tu apoyo incondicional, por ser la persona que me da los ánimos necesarios para seguir adelante en todos mis proyectos. Te amo mamá.

A mi padre, **Raymundo Manuel Durán Becerril**, por ser el pilar de esta familia, por apoyarme pues para ti es importante que tus hijos cumplan sus sueños, por ser a veces el papá firme, pero que detrás de eso lo hace con todo el amor. No tengo palabras el cómo agradecerte todo lo que he recibido de ti. Te amo papá.

A mis hermanos (**Diana, Lucía y Josue**), por ser los mejores hermanos que Dios me pudo dar, por todos los momentos divertidos que me han brindado y los que aún nos faltan, por ser esas personas que me toco que me compartieran su vida.

A **Arthur Alvarado**, por tu cariño, por todos los momentos de risas y otras que no tanto, pero que sin importar la situación siempre me das el sostén para seguirle “hechando ganas”. Gracias por siempre estar ahí.

A mis amigos, con los que compartí momentos maravillosos en esta etapa que jamás olvidare. **Ivonne, Paty, Mont, Mike, Viry, Ale y Karencia**. A ustedes muchas gracias por brindarme su amistad, risas y locuras.

A la profesora **Norma Casas**, por ser una profesora nata, tener pasión por lo que hace, por brindarme su dedicación y conocimiento en la realización de este proyecto. Muchas gracias.

A la **UNAM** por darme mi formación profesional, amigos, experiencias y proyectos.

*A la **DGAPA-UNAM**, Programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza, **PAPIME PE101313** “Fortalecimiento de la enseñanza en la determinación de la estabilidad de sistemas dispersos en el Taller Multidisciplinario de Reología y Textura en Alimentos”, por el apoyo financiero para el desarrollo de este proyecto.*

“Por mi raza hablará el espíritu”

Índice

Resumen	XIII
Introducción	XV
I. Antecedentes	1
1.1 Industrias de botanas a base de cereales	1
1.1.1 Botanas a base de cereales y leguminosas de grano entero	3
1.1.2 Maíz frito y su composición química	3
1.2 Aspectos generales del maíz	4
1.2.1 Origen del maíz	4
1.2.2 Semilla de maíz	6
1.2.3 Proceso de germinación	8
1.2.4 Cocción y remojo del maíz	9
1.2.5 Maíz azul	10
1.2.6 Composición química del maíz azul y su valor nutricional	14
1.2.7 Evaluación física de los cereales	15
1.3 Fritura	20
1.3.1 Proceso de fritura por inmersión	20
1.3.2 Mecanismo general de la fritura por inmersión	21
1.3.3 Factores que afectan a la absorción de aceite	22
1.3.4 Proceso de producción del maíz frito	26
1.3.5 Textura de botanas fritas a base de cereales	29
II. Metodología	38
2.1 Objetivos	38
2.1.1 Objetivo general	38
2.1.2 Actividades preliminares	38

2.1.3 Objetivo particular 1	38
2.1.4 Objetivo particular 2	38
2.1.5 Objetivo particular 3	39
2.2 Materiales	39
2.3 Métodos	39
2.3.1 Clasificación y selección con base en el tamaño del grano	39
2.3.2 Humedad del grano	40
2.3.3 Determinación de color	41
2.3.4 Densidad	43
2.3.5 Peso de cien granos	45
2.3.6 Textura	45
2.3.7 Cinéticas de absorción de agua	47
2.3.8 Elaboración de la botana de maíz azul	50
2.3.8.1 Elaboración de la botana de maíz con congelación previa al freído	52
2.3.9 Porcentaje de absorción de aceite	52
2.3.10 Retención de condimento	54
2.4 Tabla de variables	55
2.5 Diseño experimental	56
III. Resultados	61
3.1 Actividades preliminares	61
3.1.1 Selección del grano de maíz azul	61
3.1.2 Caracterización del grano del maíz azul	62
3.1.3 Establecimiento de condiciones para pruebas de textura en los granos fritos	64
3.2 Objetivo particular 1 – Cinéticas de absorción de agua	65

3.2.1 Cinéticas de absorción	65
3.2.2 Humedad después del remojo-freído y absorción de aceite después del freído	70
3.2.3 Densidad.....	71
3.2.4 Color y apariencia del grano	71
3.2.5 Textura.....	73
3.3 Objetivo particular 2 – Influencia de variables de proceso en botana	74
3.3.1 Humedad después del remojo.....	75
3.3.2 Humedad después del freído	76
3.3.3 Textura en maíces después del remojo.....	77
3.3.4 Apariencia maíces remojados	78
3.3.5 Absorción de aceite.....	79
3.3.6 Densidad.....	80
3.3.7 Color	81
3.3.8 Apariencia maíces fritos	82
3.3.9 Retención de condimento.....	83
3.3.10 Textura.....	84
3.3.11 Análisis del diseño Taguchi para las propiedades físicas	90
3.3.12 Análisis del diseño Taguchi para las propiedades de textura	98
3.4 Objetivo particular 3 – Efecto de la congelación previa al freído	103
3.4.1 Propiedades físicas	103
3.4.2 Propiedades de textura	105
IV. Conclusiones	107
V. Referencias	109

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Composición química del maíz frito (Othón, 2001).	4
Cuadro 2. Variables físicas del grano en maíz azul Chalqueño de endospermo suave del Edo. México y de regiones tropicales y subtropicales del estado de Oaxaca (Salinas y col., 2010; Salinas y col., 2013).	12
Cuadro 3. Composición química del maíz azul por cada 100 g (Véles, 2004).	15
Cuadro 4. Características físicas del grano de maíz entre grupos con diferente textura de endospermo (Salinas y Aguilar, 2010). Finalidad según su dureza (INTA 2010).	19
Cuadro 5. Definición y técnicas para la evaluación sensorial de crispness, crunchiness y crackliness (Chauvin y col., 2008).	32
Cuadro 6. Identificación de variables conforme a los objetivos.	55
Cuadro 7. Ejemplo de un arreglo ortogonal del diseño estadístico Taguchi de niveles mixtos L18 ($2^1 3^3$).....	59
Cuadro 8. Clasificación del maíz respecto a su tamaño y forma.	61
Cuadro 9. Dimensiones de los granos de maíz empleados en el desarrollo experimental.	62
Cuadro 10. Densidad real, peso hectolítrico, peso de cien granos y humedad del maíz azul empleado en la experimentación.	63
Cuadro 11. Parámetros de textura de dos marcas comerciales de maíz frito.	65
Cuadro 12. Ajuste de las cinéticas de absorción al modelo de la potencia a las diferentes temperaturas.	68
Cuadro 13. Peso hectolítrico de las muestras de maíz frito después del remojo por 10 horas a diferentes temperaturas y frito a 170 °C.	71
Cuadro 14. Parámetros L, a, b, del maíz frito sometido a remojo por 10 horas antes del freído.	72
Cuadro 15. Parámetros de textura del maíz azul después del freído a 170 °C.	74
Cuadro 16. Número de corridas y condiciones del estadístico Taguchi.	75
Cuadro 17. Humedad del grano después del remojo y del freído de las corridas del diseño Taguchi.	76
Cuadro 18. Parámetros de textura en los maíces después del remojo.	78

Cuadro 19. Porcentaje de absorción de aceite de la botana de maíz frito.	79
Cuadro 20. Parámetros de color L, a, b, de las corridas del estadístico Taguchi.	82
Cuadro 21. Adhesión de condimento de los maíces fritos del estadístico Taguchi.	83
Cuadro 22. Parámetros de textura de las corridas del estadístico Taguchi.	86
Cuadro 23. Resultados del análisis de varianza del estadístico Taguchi para la humedad después del remojo y las propiedades físicas de las botanas fritas de grano entero de maíz azul.	91
Cuadro 24. Resultados del análisis de varianza del diseño Taguchi para las propiedades de textura en las botanas fritas de grano entero de maíz azul.	98
Cuadro 25. Efecto de la congelación en las propiedades físicas del maíz azul.	104
Cuadro 26. Efecto de la congelación en los parámetros de color L, a, b del maíz azul frito.	104
Cuadro 27. Efecto de la congelación en los parámetros de textura del maíz azul frito.	105

Índice de Figuras

Figura 1. Industria de botanas a base de cereales. Productos extrudidos (a y b); productos nixtamalizados (c y d); productos de grano entero (e y f).....	2
Figura 2. Maíz frito tipo “botana” (The Tapas Lunch Company, 2011).....	4
Figura 3. Diversidad del maíz (Toche, 2014).....	5
Figura 4. Principales partes estructurales del grano de maíz (<i>Zea mays</i>) (<i>Sociedad y cultura, 2012</i>).....	6
Figura 5. Mazorca de maíz azul (Quintero, 2014).	10
Figura 6. Granos de maíz azul a) sin pericarpio; b) eliminada la capa aleurona pigmentada (Salinas y col., 2010).....	11
Figura 7. Diagrama de la cinética de transferencia simultanea de calor y masa en la fritura (Brennan, 2008).	22
Figura 8. Línea de flujo propuesta para la elaboración de maíz frito tipo “botana” (Hurtado, 2001).....	27
Figura 9. Línea de flujo para la elaboración de frijoles verdes fritos (moon dal) (Holikar y col., 2005).....	28
Figura 10. Estructura de alimentos crujientes; A) Húmedo, B) Secos.	31
Figura 11. Curvas de fractura. a) Fractura frágil o espontánea; b) Fractura dúctil (Casas, 2012).	34
Figura 12. Fragilidad y carácter crujiente en pruebas de compresión con fractura espontánea (The Texture Report, 1998).	35
Figura 13. Fragilidad y carácter crujiente en pruebas de compresión con fractura dúctil (The Texture Report, 1998).....	36
Figura 14. Termobalanza, marca OHAUS, modelo MB45 para la determinación de humedad.....	40
Figura 15. Colorímetro Minolta CR300 para la determinación de parámetros L, a, b.....	41
Figura 16. Espacio de color para ubicar los parámetros L, a, b.	42
Figura 17. Determinación de densidad de maíz azul.....	44
Figura 18. Máquina universal de deformación Stable Microsystem TAXT2.	45
Figura 19. Grafico fuerza-distancia para determinar parámetros texturales en maíz crudo y botana frita de maíz azul.	46

Figura 20. Gráfico fuerza-distancia para determinar parámetros texturales en maíces después del remojo.....	47
Figura 21. Balance de materia para determinar el porcentaje de agua absorbida por el grano durante el remojo.	48
Figura 22. Diagrama de proceso de la elaboración de botana frita de maíz azul de grano entero.	51
Figura 23. Balance de materia para determinar el porcentaje de absorción de aceite.	52
Figura 24. Gráfico lineal para un diseño de tres factores con una sola interacción. ..	59
Figura 25. Gráfico lineal para el diseño de cuatro factores sin interacciones.	60
Figura 26. Diferencias de tamaño en el lote de maíz utilizado. Menores a 16 mm (1); De 16 a 19 mm (2); De 20 a 22 mm (3); Mayores a 22 mm (4).	61
Figura 27. Maíces de tamaño promedio (a) y alargados (b).	62
Figura 28. Color del lote de maíz azul utilizado. a) Ubicación de los parámetros L, a, b, en el espacio de color con Adobe Photoshop. b) Color generado en Adobe Photoshop c) Apariencia de los granos.	64
Figura 29. Gráfico representativo de la textura de las dos marcas comerciales de maíz amarillo.....	65
Figura 30. Gráfico de la velocidad de absorción de agua de maíz azul respecto al tiempo a diferentes temperaturas.....	66
Figura 31. Gráfico de cinéticas de absorción de agua de maíz azul a diferentes temperaturas.....	67
Figura 32. Aplicación del modelo de Peleg a las cinéticas de absorción a diferentes temperaturas.....	68
Figura 33. Relación entre el modelo de la potencia y de Peleg; a) relación k_p con k_2 ; b) relación n con k_2	69
Figura 34. Comportamiento de la humedad final y absorción de aceite del maíz frito respecto a la humedad del grano después del remojo por 10 horas y diferentes tiempos de freído a 170 °C.....	70

Figura 35. Degradación del color de los granos de maíz frito sometidos a remojo por 10 horas a diferentes temperaturas antes del freído a 170 °C. a) Freído por 5 minutos. b) Freído por 7 minutos.	72
Figura 36. Gráfico de textura del maíz frito sometido a diferentes temperaturas de remojo y freído.	73
Figura 37. Curvas representativas de la textura de los maíces remojados a diferentes tiempos.	77
Figura 38. Apariencia del interior del maíz remojado a diferentes temperaturas y tiempos.	78
Figura 39. Efecto de la humedad después del remojo en la absorción de aceite.	79
Figura 40. Aumento del peso hectolítrico respecto al % de absorción de aceite.	80
Figura 41. Desplazamiento de los parámetros “a” y “b” del maíz frito bajo diferentes condiciones de proceso, respecto al maíz crudo. Los números se refieren a las corridas.	82
Figura 42. Apariencia de la botana de maíz a diferentes tiempos y temperaturas de remojo. C2: condiciones leves (60 °C y 5 h de remojo); C10: condiciones intermedias (70 °C por 10 h); C18: condiciones extremas (80 °C por 15 h).	83
Figura 43. Gráficas de textura de las corridas del diseño Taguchi clasificadas respecto a su contenido de humedad. a) corridas con humedad de 1.9 a 3%; b) corridas con humedad de 3.1 a 7%; c) corridas con humedad de 7.1 a 16.5%.	85
Figura 44. Relación del contenido de humedad de la botana frita con la dureza. A) con un contenido de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3 %; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.	87
Figura 45. Relación del contenido de humedad de la botana frita con el trabajo de fractura. A) con un contenido de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3 %; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.	88
Figura 46. Relación del contenido de humedad de la botana frita con la distancia de fractura. A) con un contenido de humedad de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3%; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.	89

Figura 47. Relación del contenido de humedad de la botana frita con el carácter crujiente. A) con un contenido de humedad de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3%; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.	90
Figura 48. Influencia del tiempo y temperatura de remojo en la humedad después del remojo.....	92
Figura 49. Influencia de las condiciones de proceso en el peso hectolítrico a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	94
Figura 50. Influencia de las condiciones de proceso en la humedad después del freído a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	94
Figura 51. Influencia de las condiciones de proceso en la absorción de aceite a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	96
Figura 52. Influencia de las condiciones de proceso en la retención de condimento a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	96
Figura 53. Influencia en el cociente b/a; a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.....	97
Figura 54. Influencia de las condiciones de proceso en la dureza a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	100
Figura 55. Influencia de las condiciones de proceso en la distancia de fractura a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	100
Figura 56. Influencia de las condiciones de proceso en el carácter crujiente a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	101
Figura 57. Influencia de las condiciones de proceso en el trabajo de fractura a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.	102
Figura 58. Efecto de la congelación en el maíz azul en los parámetros de color L, a, b.....	104
Figura 59. Efecto que tuvo la congelación en la apariencia del maíz frito.....	105
Figura 60. Efecto que tuvo la congelación en los parámetros de textura del maíz azul.	106

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la influencia de las condiciones de proceso (tiempo y temperatura de remojo, tiempo y temperatura de freído), sobre los cambios en las propiedades físicas (densidad, humedad, absorción de aceite, retención de condimento) y de textura (dureza, carácter crujiente, distancia de fractura, trabajo de fractura) de una botana frita de grano entero de maíz azul.

El lote de maíz azul utilizado se clasificó según su tamaño (mayores a 22 mm, de 20 a 22 mm, de 16 a 19 mm y menores a 16 mm), se eligió trabajar con los de 20 a 22 mm y los de 16 a 19 mm, que juntos constituyeron el 77% del total, tratando de que la materia prima sea homogénea para la similitud de los resultados. Se caracterizó el maíz elegido con base en humedad, peso hectolítrico, densidad real, color, dureza. El valor de 58.5 kg/hL de peso hectolítrico refleja que es un grano muy suave y absorbe gran cantidad de agua; tiene una humedad de 13.7% lo que indica que está dentro del intervalo de humedad que permite una buena conservación y almacenamiento (NOM-247-SSA1, 2008); los parámetros de color L, a, b, se encuentran en 20, -0.5, -0.2 respectivamente, teniendo la luminosidad (L) en tonalidades gris-negro, los parámetros “a” y “b” con tonalidades muy débiles de verdes y azules.

Se elaboraron gráficos de cinética de absorción de agua en el maíz a temperaturas de remojo de 30, 45, 60, 70 y 80 °C durante 10 horas. Estas curvas se ajustaron a los modelos potencial y de Peleg para poder predecir a cada temperatura la humedad a diferentes tiempos, describir el comportamiento de la velocidad de absorción y la cantidad de agua absorbida en el equilibrio respecto al cambio de temperatura.

Por medio del diseño estadístico de Taguchi se analizó la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en las propiedades físicas y de textura. Las propiedades físicas que tuvieron influencia significativa fueron el tiempo de remojo en el peso hectolítrico; la temperatura de freído en el cociente de color b/a; y la temperatura de remojo en la humedad después del freído, en el porcentaje de

absorción de aceite, en el cociente de color b/a , en la diferencia del parámetro de color b (Δb) y en la retención de condimento. Las propiedades texturales que tuvieron influencia significativa fue la temperatura de remojo en el carácter crujiente y trabajo de fractura; ninguna variable influyó en la dureza y la fragilidad. Durante este estudio se encontró que a medida que la humedad de remojo aumenta, también lo hace el porcentaje de absorción de aceite.

Se seleccionó la corrida 8, (remojo de 70 °C por 5 h y freído de 180 °C por 6 minutos) del diseño de Taguchi con base en valores bajos de humedad después del freído y absorción de aceite, dureza y trabajo de fractura media, y carácter crujiente alto; para evaluar la influencia de agregar la congelación a velocidad de congelación de 4 m/s, temperatura de -20 °C por 2 ciclos previa al freído. En las propiedades físicas, se encontró una humedad menor; y un peso hectolítrico y porcentaje de absorción de aceite mayor. En las propiedades de textura la botana fue más porosa, esto se reflejó en valores menores de dureza, carácter crujiente y trabajo de fractura, manteniendo el mismo valor de distancia de fractura.

Se concluyó que con una temperatura de remojo mayor, se reducen tiempos en la operación, asegurando el cocimiento y gelatinización del almidón. La temperatura de remojo es la variable que tiene mayor influencia en la mayoría de las propiedades físicas y de textura que obtendrá la botana de maíz al final del proceso. La congelación puede mejorar las propiedades finales de la botana de maíz azul, pues disminuye su humedad, peso hectolítrico y la degradación de color; conserva su fragilidad, disminuye su dureza, trabajo de fractura y carácter crujiente, sin embargo la disminución de este último no es deseable, ya que es el principal atractivo en las botanas, el mejorar las características físicas es sacrificar las propiedades de textura, además de incrementar el costo del proceso.

Introducción

Las botanas son alimentos consumidos entre comidas en pequeñas porciones considerados como platillos secundarios (Hurtado, 2001). La industria de botanas a base de cereales es cada vez más importante y su producción se clasifica en tres categorías: nixtamalizados, extrudidos y enteros; generalmente horneados o fritos por inmersión. Esta última, tiene poco impacto dirigido al grano de maíz (Othón, 2001). Parte de la población está en contra de dichos alimentos por su alto contenido en carbohidratos y grasas, sin tomar en cuenta que actualmente se lleva un ritmo de vida más activo, por lo que las botanas forman parte importante en el desarrollo de actividades gracias a su alto aporte energético (Holikar y col., 2005).

El maíz (*Zea mays*) forma parte de los alimentos básicos de México, ocupando el primer lugar de producción agrícola en el país (Luna y col., 2012). El maíz azul constituye parte de la diversidad genética que existe de esta gramínea, sin embargo, su producción se da en volúmenes bajos, pues estas variantes criollas han sido menospreciadas, teniendo una baja demanda y aplicación industrial (Salinas y col., 2013).

En la elaboración de alimentos sólidos y semisólidos, éstos se someten a diferentes condiciones de procesamientos afectando las características físicas y texturales finales (Othón, 2001). Para las botanas fritas a base de granos enteros, las características texturales son fundamentales en la aceptación por el consumidor, el cual espera una textura crujiente, que es además un indicio de frescura. El proceso de elaboración de botanas fritas a base de granos secos enteros implica una etapa de remojo para hidratar y cocer parcialmente el grano previo al freído. Estudios del remojo de maíz a diferentes temperaturas indican que la hidrofiliidad de las gliadinas controla el hinchamiento del grano, cuando el proceso de gelatinización comienza, la restricción al hinchamiento que ejerce la matriz proteica es el factor que controla el proceso y el grado de restricción está directamente relacionado con la dureza del endospermo (Gonzalez y col., 2005). El proceso de freído por inmersión es el cocinado de alimentos mediante la inmersión en un fluido comestible (aceite) a

una temperatura mayor al punto de ebullición del agua. La fritura provoca cambios microestructurales que se desean en el alimento como una capa externa seca, porosa y crujiente con el interior cocinado como en las papas, o crujiente como en botanas de grano entero (Brennan, 2008). La congelación es la operación de reducción de la temperatura por debajo de aquella en la que se comienzan a formar cristales donde el tamaño y estructura de ellos depende de la velocidad y grado de sub-enfriamiento del sistema en un material alimenticio (Orrego, 2008).

Por ello es importante analizar la influencia de las variables de proceso, con el fin de identificar bajo qué condiciones en la elaboración de botanas fritas de grano de maíz azul se obtiene la textura característica de una botana así como su influencia en la humedad, color, densidad, adhesión de condimento y % de absorción de aceite.

I. Antecedentes

1.1 Industrias de botanas a base de cereales

Se entiende por botana aquel producto de fácil consumo, accesible, de tamaño pequeño, sólido o líquido, que requiere poca o ninguna preparación y su finalidad es satisfacer la sensación de hambre o necesidad de energía que se produce entre comidas. Las botanas por lo general no se consideraban como verdaderos alimentos, ya que eran cuestionados por su bajo valor nutritivo. Sin embargo, estos productos han ido evolucionando de acuerdo a las exigencias de los consumidores. Debido al auge que han tomado en los últimos tiempos los productos naturales, la producción de botanas se orienta a la búsqueda de productos más nutritivos, con un buen aporte de proteínas, calorías, fibra, ácidos grasos esenciales, vitaminas y minerales. Se han realizado muchos intentos para elevar el valor nutritivo de la proteína en los productos a base de maíz (Hurtado, 2001).

Las industrias de botanas a partir de cereales son de las más versátiles y tecnificadas, siendo cada día más grande e importante; en general, su manufactura se divide en tres categorías: productos extrudidos (Figura 1, *a* y *b*), productos nixtamalizados (Figura 1, *c* y *d*) y productos de grano entero (Figura 1, *e* y *f*). Los productos terminados son más convenientes, prácticos y con una vida prolongada de conservación, por su bajo contenido en humedad gracias al horneado o freído que pueden tener en su proceso. Actualmente ha habido un considerable crecimiento en el consumo de botanas a base de cereales, debido a que la población tiene un ritmo de vida más acelerado. Algunas botanas pueden ser producidas similarmente como plátanos fritos, botanas recubiertas, chicharrón de cerdo, etc. Estos contienen alta cantidad de grasa y sal que son compuestos característicos en las frituras, incluidos como portadores de sabor. Se les consume principalmente en eventos sociales, fiestas y/o entre las comidas (Othón, 2001).

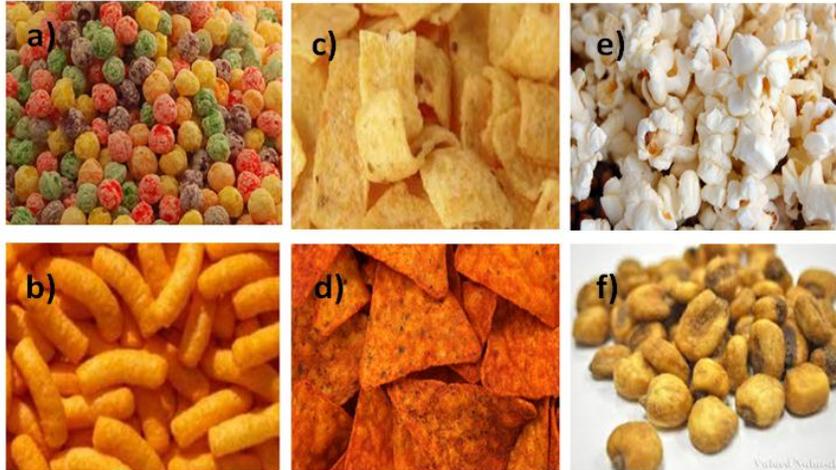


Figura 1. Industria de botanas a base de cereales. Productos extrudidos (a y b); productos nixtamalizados (c y d); productos de grano entero (e y f).

La extrusión de botanas tiene como objetivo cocer, expandir y formar el producto, para finalmente freírlo. Posteriormente el producto se recubre con saborizantes, se seca y se envasa; el extrusor opera bajo un alto esfuerzo mecánico, requerido para optimizar la expansión del almidón, por su parte, las botanas con proceso de nixtamalización, generalmente maíz, se cuecen con agua y cal para formar nixtamal, posteriormente se les fríe, hornea o se someten a ambos procesos, produciendo fritos, tortillas, doritos, tostitos o tostadas (Othón, 2001).

Para su manufactura se requiere una selección apropiada, combinación de las materias primas, buenas prácticas de producción y estándares de calidad. Las botanas se caracterizan por contener baja humedad, que es indispensable para preservar sus características de textura e impedir su deterioro. La sal, azúcar y otros edulcorantes, colorantes y saborizantes se incluyen para mejorar tanto la apariencia como la palatabilidad dentro del producto terminado. Últimamente las industrias botaneras se han diversificado debido a la fuerte competencia resultante de la creciente demanda de productos con alto contenido de fibra producidas a partir de granos enteros, pulidos o descascarados. Las propiedades fisicoquímicas del grano afectan tanto las prácticas de producción como las propiedades del producto terminado (Othón, 2001).

1.1.1 Botanas a base de cereales y leguminosas de grano entero

Indudablemente, las palomitas de maíz constituyen uno de los productos más importantes de esta categoría. Las palomitas son consideradas como la botana más antigua y en la actualidad sigue siendo ampliamente consumida y comercializada (Othón, 2001), sin embargo, últimamente se ha notado un incremento en el consumo de botanas a base de cereales y leguminosas fritos de grano entero, tal es el caso del maíz y leguminosas, como frijoles, garbanzos, cacahuates, chicharos y muchos otros, disfrutados con mayor impacto en la India. Todos ellos de manera general elaborados a partir de una operación de remojo y posteriormente fritos lo que les concede la textura seca y crujiente, característicos de una botana (Holikar y col., 2005).

1.1.2 Maíz frito y su composición química

El consumo de botanas a nivel mundial y nacional es cada vez más importante. La idea es que estos productos además de sabrosos, sean nutritivamente más atractivos, por lo cual se ha trabajado, entre otros aspectos, en su producción mediante fritura profunda de granos, obteniendo botanas crocantes y de excelente apariencia y sabor (Hurtado, 2001). Para la producción de maíz frito (Figura 2) elaborado en Chile, se utiliza maíz gigante tipo cuzco caracterizado por poseer granos de tamaño grande y endospermo de textura suave. Los granos son cocinados en una solución alcalina similar a la utilizada para producir tortillas. El grano cocido es lavado, parcialmente secado y después freído. Durante el freído el grano absorbe aceite (14% en producto final), pierde la mayoría de su humedad (2% en el producto terminado) y adquiere su textura y sabor característicos (Othón, 2001).

El maíz frito se caracteriza por contener alto contenido de aceite y sal. Su valor nutritivo depende principalmente de la cantidad de aceite absorbido durante el proceso de freído ya que un alimento alto en aceite contiene en proporción menos vitaminas, minerales y proteína y además una mayor densidad calórica (Othón, 2001). El Cuadro 1 muestra la composición química del maíz frito.



Figura 2. Maíz frito tipo “botana” (The Tapas Lunch Company, 2011).

Cuadro 1. Composición química del maíz frito (Othón, 2001).

Compuesto	Maíz frito
Carbohidratos (%)	71.4
Grasa (%)	14.1
Proteína (%)	8.5
Cenizas (%)	2.7
Fibra cruda (%)	2.0
Humedad (%)	1.3
Energía (kcal)	439.0

1.2 Aspectos generales del maíz

1.2.1 Origen del maíz

Maíz, palabra de origen indio caribeño, significa literalmente «*lo que sustenta la vida*». El maíz, que es junto con el trigo y el arroz uno de los cereales más importantes del mundo, suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales y es una materia prima básica de la industria de transformación, con la que se producen además de su consumo como alimento (cereales, tortillas, tostadas, tamales) subproductos como almidón, aceite, proteínas, bebidas alcohólicas, edulcorantes alimenticios, materiales de embarque biodegradables y combustible. (FAO, 1993).



Figura 3. Diversidad del maíz (Toche, 2014).

El cultivo del maíz tuvo su origen, con toda probabilidad, en América Central, especialmente en México, de donde se difundió hacia el norte hasta Canadá y hacia el sur hasta Argentina. Botánicamente, el maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las gramíneas y es una planta anual alta. El maíz es a menudo de color blanco o amarillo, aunque también hay variedades de color negro, rojo y jaspeado (Figura 3). Hay varios tipos de grano, que se distinguen por las diferencias de los compuestos químicos depositados o almacenados en él. La evidencia más antigua de la existencia del maíz, de unos 7 000 años de antigüedad, ha sido encontrada por arqueólogos en el valle de Tehuacan (México) pero es posible que hubiese otros centros secundarios de origen en América. Este cereal era un artículo esencial en las civilizaciones maya y azteca y tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición; ambos pueblos incluso afirmaban que la carne y la sangre estaban formadas por maíz (FAO, 1993). La gran diversidad de dicho fruto, obligó a científicos a estudiarlos y clasificarlos. Los términos raza y variedad son expresados en las siguientes definiciones (Reyes, 1990).

- **Raza:** Poblaciones de individuos de una misma especie con genotipos similares; que manifiestan ciertos rasgos diferenciales, heredables y que a su vez, permiten separarlas de otras poblaciones. La formación de razas diferentes se originó por distintas modalidades de aislamiento que restringen la reproducción a un cierto número de individuos; estas barreras generalmente son ecológicas en la naturaleza (Reyes, 1990).

- *Variedad*: Grupo de individuos de una especie y raza con rasgos diferenciales más estrechos que aquellos manifestados por las razas. Las variedades agronómicas son producto de la selección humana que tiende a formar grupos de plantas similares con tendencia a su explotación económica (Reyes, 1990).

1.2.2 Semilla de maíz

La semilla de maíz, es el conjunto formado básicamente por el embrión o germen en estado latente, acompañado por sustancias de reserva y protegido por una cubierta seminal o pericarpio como se muestra en la Figura 4. Es un óvulo transformado y maduro, después de la fecundación. La semilla es el envoltorio del germen que le proporciona alimento y protección (Seguí, 2010). En general una semilla típica está formada por un germen, el pericarpio y cantidades variables de endospermo, el contenido nutricional de reserva.

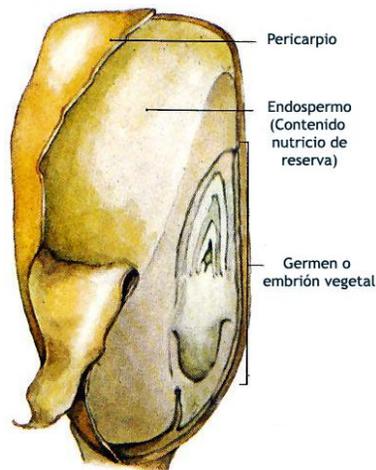


Figura 4. Principales partes estructurales del grano de maíz (*Zea mays*) (Sociedad y cultura, 2012).

- *Embrión o germen*: Planta en miniatura con la estructura para originar una nueva planta, al germinar una semilla (Reyes, 1990). El embrión crece y madura en paralelo al crecimiento de la semilla. Durante las etapas de mayor crecimiento de las semillas, el embrión está en su fase madurativa, caracterizada por la acumulación de sustancias de reserva, y por su preparación para el reposo. Los cotiledones (monocotiledóneas) se

especializan para actuar como reserva alimenticia, proporcionando nutrimentos para la generación de la energía hasta la aparición de las primeras hojas verdaderas (Seguí, 2010).

- *Pericarpio*: Es la capa más externa de la semilla. Su función principal es la de proteger al germen y las sustancias de reserva, sobre éste se puede distinguir un micrópilo, el pequeño poro, pues por ésta saldrá la radícula cuando germine la semilla (Seguí, 2010).

- *Endospermo*: Tejido de reserva de la semilla que alimenta al embrión durante la germinación. Es la parte de mayor volumen. Dos regiones bien diferenciadas hay en el endospermo: suave o harinoso y duro o endospermo vítreo. La proporción depende de la variedad del maíz (Reyes, 1990). Las semillas albuminadas o endospermadas como el maíz, acumulan las reservas en el endospermo, además de sintetizar enzimas hidrolíticas que ayudan a movilizar las sustancias de reserva presentes en otros lugares (Seguí, 2010). En la parte exterior del endospermo de la semilla se encuentra la capa de aleurona, que es un conjunto de gránulos proteicos.
 - El endospermo vítreo se encuentra en los lados y en la parte superior (opuesta al germen) del grano, presentando un aspecto corneo, amarillo, traslúcido y muy compacto (duro), los gránulos de almidón adquieren estructura poligonal y están fuertemente empaquetados por una matriz de proteínas, siendo las delta-zeinas las más superficiales, sin espacios de aire entre los gránulos. Por el contrario el endospermo harinoso es blando, de color blanco, los gránulos de almidón están débilmente empaquetados, son casi redondos y están asociados con capas delgadas de proteínas y muchos espacios de aire entre los gránulos. Éste se sitúa en el centro del grano y también puede observarse unido a las partículas del endospermo vítreo (Sala y Barroeta, s.f.; Pérez y col., 2007). Estos dos tipos de almidones se

encuentran en todas las razas y variedades del maíz pero en diferentes proporciones, lo cual hace la diferencia entre las características y usos que se le puede dar a cada tipo de maíz; el maíz con predominio del almidón suave es el favorito para el consumo humano pues es fácil de moler o cocinar para preparar alimentos (MAyR, 2006).

1.2.3 Proceso de germinación

La germinación es el proceso final del ciclo de la semilla. Una vez que todos los condicionantes endógenos y exógenos son propicios, el embrión de la semilla sale de la fase de reposo y retoma un crecimiento que dará lugar a un nuevo individuo (Seguí, 2010).

El primer paso de la germinación consiste en la hidratación de la semilla (imbibición). Ésta comienza a captar agua del entorno para volver a unos niveles hídricos adecuados sobre todo en el embrión, aunque también en las diferentes capas que lo rodean (Seguí, 2010). Aumentando la cantidad de agua en la semilla arriba del 10 al 15%, se activan fuertemente las enzimas de la célula. Cuando las semillas han tomado suficiente agua para su germinación, contienen alrededor del 40% de agua, como en el maíz. Las enzimas presentes en las semillas secas, son activadas cuando se hallan en el agua en movimiento dentro de la semilla. A medida que la temperatura aumenta, la intensidad del metabolismo también lo hace (Stanley y Butler, 1963). Proceso que se relaciona con la elaboración de la botana ya que los granos de maíz pasan por la imbibición.

Las enzimas hidrolíticas (amilasas, glucanasas, maltasa, peptidasas y lipasas) descomponen los nutrimentos almacenados en los tejidos de reserva en sus componentes esenciales (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Éstos son transportados hacia zonas de crecimiento del embrión. La disponibilidad de los nutrimentos en estas zonas permite su crecimiento en tamaño por medio de divisiones celulares (Seguí, 2010). La temperatura en las semillas aumenta después de que la respiración se activa, a temperaturas mayores de 48.8°C (Stanley y Butler, 1963).

1.2.4 Cocción y remojo del maíz

El remojo es una operación importante durante el procesamiento de algunos alimentos, como el inicio de la cocción de cereales o leguminosas, la elaboración de la leche vegetal, etc. Ha habido muchos estudios para evaluar la tasa de consumo de agua por los alimentos. El análisis de los datos experimentales ha mejorado la comprensión de cómo se transporta el agua en los alimentos y, por tanto, la optimización de las condiciones de absorción. Inicialmente este análisis se basaba en la Ley de Fick, sin embargo, posteriormente también se desarrolló una ecuación empírica propuesta por Peleg para ajustar los datos de absorción (Sopade y col., 1991).

Para el cocimiento de los granos de maíz se requiere del conocimiento de las propiedades de hidratación y del comportamiento durante la cocción. Gonzalez y col. (2005) encontraron que el poder de hidratación del maíz a baja temperatura, se debe a la mayor hidrofiliidad de las gliadinas (glucoproteínas encontradas en cereales), son las responsables de la hidratación del maíz, el grado de hidratación depende de la variedad de genotipos. Sopade y col. (1991) observaron al utilizar el modelo de Peleg, que los granos de maíz tenían una baja de absorción de agua, mientras que el sorgo, exhibió mayor capacidad de absorción. Se dedujo que los cereales absorben menos agua que las legumbres.

Durante la cocción, una vez que el proceso de gelatinización comienza, la restricción al hinchamiento de las partículas de almidón dentro del grano que ejerce la matriz proteica es el factor que controla el proceso y el grado de restricción está directamente relacionado con la dureza del endospermo y ésta variará dependiendo del tipo de maíz. En maíces de endospermo más duros, el almidón se hincha menos que en los gránulos de maíces blandos (Gonzalez y col., 2005). Sin embargo, la temperatura dará una indicación en el efecto de la velocidad de agua absorbida, por ello la importancia en el control de la temperatura tiene que ser cuando el maíz está en el proceso de absorción de agua (Sopade y col., 1991).

1.2.5 Maíz azul

El maíz tiene una amplia base genética como resultado de los múltiples procesos de selección, adaptación y manejo. En México se han clasificado al menos 59 razas con base en caracteres morfológicos y polimorfismos de isoenzimas. Dentro de las razas se tienen variantes en función del tipo de coloración del grano, el cual se determina por la presencia de carotenoides, antocianinas y flobafenos. Uno de los componentes de la diversidad fenotípica es precisamente el color del grano. El grano de maíz con pigmento tipo antociano (rojo, azul, morado y negro) debe su coloración a las antocianinas, que representan uno de los principales grupos de pigmentos vegetales visibles al ojo humano (Salinas y col., 2012).



Figura 5. Mazorca de maíz azul (Quintero, 2014).

La mayoría de los maíces azules (Figura 5), son típicamente de grano harinoso. El endospermo es de textura suave. El color azul se encuentra en la capa aleurona, rica en proteínas y se encargan de liberar enzimas hidrolíticas cuando empieza la germinación para hidrolizar el almidón en azúcar y alimentar al embrión, ahí se localiza la mayor concentración de pigmentos de antocianinas lo que hace que los granos parezcan negros. En la Figura 6a se puede apreciar con claridad que el pericarpio del grano de maíz azul es translúcido, en tanto que en la Figura 6b apartado número uno, se observa el pericarpio incoloro retirado del maíz, en el número dos el maíz azul sin el pericarpio, en el tres el colorante compuesto por antocianinas que se localiza en la capa aleurona y el número cuatro el maíz al cual

se le retiro parte de la capa aleurona, observando que el resto del endospermo carece de pigmentación (Salinas y col., 2010).

Los maíces azules del Estado de México derivan principalmente de las razas Chalqueño y Cónico, aunque también se pueden encontrar maíces azules de Cacahuacintle y Palomero Toluqueño, pero se aprovechan muy poco comercialmente. La raza Chalqueño (proveniente de Chalco, Edo. México), de ciclo más largo y con adaptación a mayores alturas que Cónico, posee en sus granos un mayor contenido de antocianinas (Salinas y col., 2010).

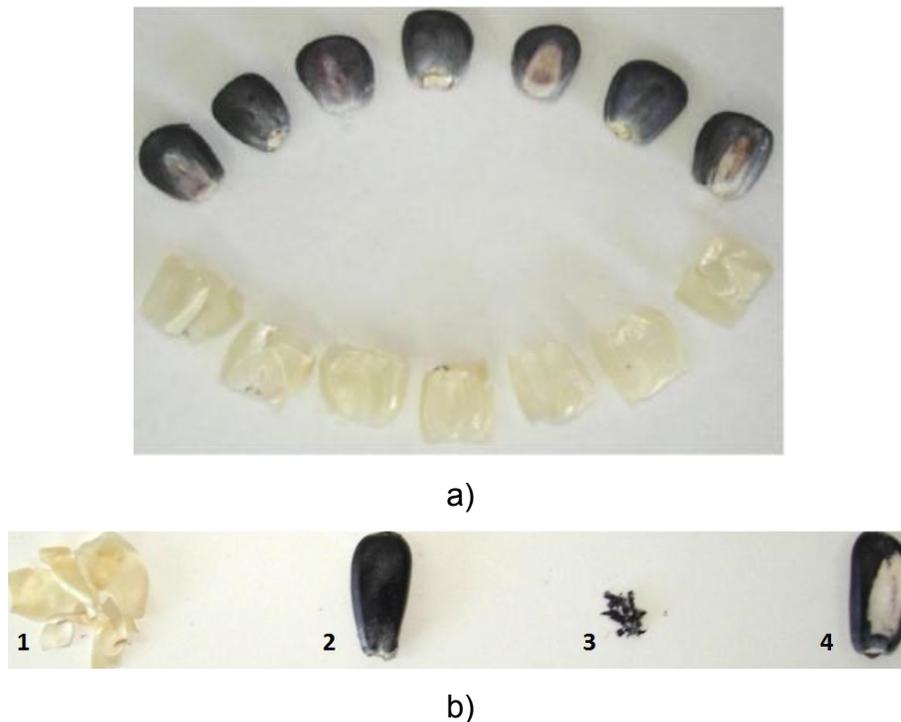


Figura 6. Granos de maíz azul a) sin pericarpio; b) eliminada la capa aleurona pigmentada (Salinas y col., 2010)

Las características físicas del grano en el maíz azul de endospermo suave de la raza Chalqueño se presentan en el Cuadro 2, al igual que las distintas razas de maíz azul proveniente de regiones tropicales y subtropicales del estado de Oaxaca, donde

Salinas y col. Realizaron las determinaciones físicas del grano cuando las muestras alcanzaron humedad del 12% para uniformar el efecto de este factor en dichas determinaciones (Salinas y col., 2010; Salinas y col., 2013).

Cuadro 2. Variables físicas del grano en maíz azul Chalqueño de endospermo suave del Edo. México y de regiones tropicales y subtropicales del estado de Oaxaca (Salinas y col., 2010; Salinas y col., 2013).

Razas	Peso hectolítrico (kg / hL)	Peso de cien granos (g)	Indice de flotación (%)
Chalqueño	73.4	32.4	74
Tropicales			
Conejo	75.1	32.9	61
Elotes occidentales	79.9	27.2	16
Olotillo	77.7	33.4	37
Tepecintle	78.8	30.1	35
Tuxpeño	76.0	33.7	51
Zapalote chico	76.4	29.6	73
Subtropicales			
Chiquito	80.7	34.5	22
Elotes occidentales	77.9	40.6	41
Elotes cónicos	79.0	36.5	37
Mushito	80.0	37.3	33

1.2.5.1 Antocianinas

Las antocianinas son un grupo de pigmentos de color rojo, hidrosolubles, ampliamente distribuidos en el reino vegetal. Químicamente las antocianinas son glucósidos de las antocianidinas, es decir, están constituidas por una molécula de antocianidina, que es la aglicona, a la que se le une un azúcar por medio de un enlace β -glucosídico. La estructura química básica de estas agliconas es el ión flavilio, también llamado 2-fenil-benzopirilio, que consta de dos grupos aromáticos: un benzopirilio y un anillo fenólico (Aguilera y col., 2011)

Las antocianinas están presentes en diferentes órganos de las plantas, tales como frutas, flores, tallos, hojas y raíces. Estos pigmentos se encuentran normalmente disueltos uniformemente en la solución vacuolar de células epidérmicas. Sin embargo, en ciertas especies, las antocianinas se localizan en regiones discretas de la vacuola celular, llamadas antocianoplastos. La principal fuente de antocianinas son

las frutas rojas, principalmente bayas y uvas rojas, cereales, principalmente maíz morado, vegetales y vino rojo entre las bebidas (Aguilera y col., 2011)

El color del grano en los maíces azules, rojo claro y rojo magenta se debe a que las antocianinas se localizan en las capas periféricas, ya sea en la capa de aleurona o en el pericarpio. El tono de color depende del tipo de antocianinas que dominen en el grano. En los maíces azules y morados prevalecen los derivados de cianidina, en los rojos predominan los de pelargonidina, y en los rojo magenta los de cianidina, pero también contiene derivados de pelargonidina y peonidina (Salinas y col., 2012).

El interés en los pigmentos antociánicos se ha intensificado recientemente debido a sus propiedades farmacológicas y terapéuticas. Durante el paso del tracto digestivo al torrente sanguíneo de los mamíferos, las antocianinas permanecen intactas y ejercen efectos terapéuticos conocidos que incluyen la reducción de la enfermedad coronaria, efectos anticancerígenos, antitumorales, antiinflamatorios y antidiabéticos; además del mejoramiento de la agudeza visual y del comportamiento cognitivo. Los efectos terapéuticos de las antocianinas están relacionados con su actividad antioxidante (Aguilera y col., 2011)

1.2.5.2 Estabilidad de antocianinas

Los pigmentos enfrentan un problema, que es la degradación del color, la cual se puede presentar como consecuencia de la exposición a la luz (fotodegradación), por la acción de la temperatura efecto conocido como oxidación térmica o descomposición térmica (Almeida, 2012).

La degradación de los pigmentos se debe especialmente a reacciones de oxidación, las mismas que pueden ser o no enzimáticas. Los colorantes naturales, como las antocianinas, pueden oxidarse al estar en contacto con el oxígeno atmosférico, la luz y el calor. Este último es muy importante, tanto en ausencia de agua (productos

deshidratados) como en su presencia (productos hidratados), pues siempre acelera la velocidad de la reacción de degradación (Almeida, 2012).

La estabilidad de las antocianinas depende principalmente de la presencia de luz, oxígeno, pH, presencia de iones metálicos (Ca^{2+}) y de la temperatura, por ello los maíces que contienen estas biomoléculas son difíciles de procesar. Durante la nixtamalización u otros procesos similares, ocurren varios de los factores antes mencionados. El maíz sometido a condiciones de alto contenido de humedad, alta temperatura y un pH básico, reduce significativamente el contenido de antocianinas en los maíces pigmentados, pérdida que se debe a que gran cantidad de estos compuestos se solubilizan en el agua de cocción con pH básico y temperatura elevada, lo que degrada a los compuestos (Escalante y col., 2013).

Se ha dicho que las antocianinas son susceptibles al pH y que de acuerdo al valor de este factor es el color que adquieren cuando están en solución. En general, a pH muy ácido (cercano a 1) todas las antocianinas son de color rojo, y bajo estas condiciones, la estructura química que prevalece es la de catión flavilium. Si el pH está entre 2 y 4, la forma predominante es como base quinonoidal y el color azulado predomina. A un pH de 5 se presenta la estructura de pseudo base chalcona, que es también incolora. Si el pH se incrementa arriba de 7, la antocianina se degrada manteniendo coloración azul (Véles, 2004).

1.2.6 Composición química del maíz azul y su valor nutricional

Estudios de la Universidad de Colorado indican que el maíz azul presenta un 30% más de proteína que los maíces blancos y amarillos. En una evaluación realizada en 1990 por la cooperativa de extensión de servicios de Nuevo México en cinco variedades de maíz azul, en todas se determinó un contenido mayor en lisina (2.3 mg/g peso seco) que las dos variedades de maíz blanco (1.6 mg/g) y amarillo (1.4 mg/g). Casanueva y col. (citado en Véles, 2004), reportaron la composición proximal y el valor energético del maíz azul mostrada en el Cuadro 3 (Véles, 2004).

Cuadro 3. Composición química del maíz azul por cada 100 g (Véles, 2004).

Compuesto	Maíz azul
Carbohidratos (g)	74.6
Fibra (g)	12.2
Humedad (g)	10.6
Proteína (g)	8.0
Grasa (g)	4.3
Cenizas (g)	0.6
Energía (kcal)	366.0

El maíz es un cereal rico en carbohidratos, además de contener niacina, fósforo y calcio, que permiten el buen funcionamiento de los sistemas respiratorios, nervioso y cardiovascular; interviniendo en la formación y mantenimiento de huesos y dientes, además de ayudar en la coagulación de la sangre. El maíz y sus derivados contienen casi todos los nutrimentos en mayor o menor cantidad, y su composición cambia según la variedad y otros factores ambientales. Los tipos de maíz azul que se producen en México reportan una composición promedio del 8% de proteínas y 70% de hidratos de carbono (Véles, 2004).

1.2.7 Evaluación física de los cereales

Los cereales desde su cosecha hasta llegar a la boca del consumidor se sujetan a medidas de calidad. Existen pruebas para granos enteros, productos procesados intermedios (harinas, semolinas almidón, etc), otros ingredientes y para productos terminados. Las pruebas generalmente son discriminatorias, fáciles y sencillas de realizarse. Ésto con el objeto de determinar la calidad de numerosas muestras, para posteriormente hacer una selección de las más sobresalientes. Las propiedades y características del grano juegan un papel muy importante en los procesos de selección. El control de calidad es importante pues está vinculado con las características y rendimientos de productos intermedios y terminados (Othón, 2001). Con estas pruebas se determina la adecuación de cada tipo maíz al proceso al que serán destinados y ayudan a establecer condiciones de proceso.

1.2.7.1 Pruebas de calidad en granos enteros

Los cereales se comercializan y valoran de acuerdo con su contenido de humedad, propiedades físicas y de contaminación con otros granos y materia extraña, estos parámetros dictan su grado y clasificación (Othón, 2001).

- ***Porcentaje de granos rotos o dañados.*** Consiste en la separación y cuantificación de los granos quebrados (granos que carecen de alguna de sus partes) y de las impurezas (cualquier cuerpo o material extraño distinto al grano de maíz, incluyendo olotes u otras partes de la planta) (NMX-FF-034/1-SCFI, 2002).
- ***Humedad.*** Es un paso fundamental en la determinación de la calidad de granos, ya que es especialmente importante en la clasificación y mercadeo. Generalmente se toma un 14% de humedad máxima para ayudar a un mejor almacenamiento y manejo del producto. Determinar el contenido de humedad de los granos es muy importante en la evaluación de la materia prima dentro de los estándares de calidad, ayudando a un óptimo almacenamiento y elaboración de productos terminado, ya que la humedad de los productos terminados (harinas, cereales de desayuno, botanas, etc) está relacionada con las propiedades de textura y aceptación del consumidor hacia el producto (Othón, 2001; NOM-247-SSA1, 2008).
- ***Densidad.*** Los valores de densidad son importantes ya que están relacionados con la condición del grano. Los granos más densos tienen menos probabilidad de estar dañados con insectos (Othón, 2001). También esta propiedad se utiliza para el diseño de equipos de aireación, secado, almacenamiento y transporte de granos (Ordóñez y col., 2012). Existen diferentes formas de expresar la densidad, las cuales se muestran a continuación:
 - La densidad aparente, consiste en determinar el peso en kg de un determinado volumen, expresado en kg/m^3 , considerando los espacios vacíos que se lleguen a dar entre grano y grano (Othón, 2001). La

densidad aparente determina la capacidad de almacenamiento y de sistemas de transporte (Ordóñez y col., 2012)

- La densidad real, consiste en determinar el peso en kg de un volumen determinado, expresado en kg/m^3 , sin considerar los espacios vacíos (Othón, 2001). La densidad real es útil para equipamientos de separación (Ordóñez y col., 2012)
- El peso hectrolítrico (PH) que consiste en determinar el peso en kg de un cierto volumen expresado en hL, da una idea de la calidad del grano y de la finalidad que se le va a dar (Othón, 2001), mostrado en el Cuadro 4. Se han reportado correlaciones positivas de la dureza con el peso hectolitrico (Figuroa y col., 2013)
- Índice de flotación (IF), representa el número de granos de maíz que flotan en una solución de nitrato de sodio de una densidad de 1.25 g/mL. Los granos duros presentan bajos índices de flotación, mientras que los maíces suaves presentan índices altos. Por otra parte, se encontró una correlación negativa entre el índice de flotación y dureza (Figuroa y col., 2013)
- **Dureza:** La dureza puede estar relacionada no solamente con las características químicas del grano, sino con las propiedades físicas. Ambas características afectan la manera en la cual las moléculas y partículas se ensamblan en el grano. El endospermo es el principal componente del grano de maíz y parece contribuir de manera importante en la dureza del grano (Figuroa y col., 2013).

El arreglo estructural del gránulo de almidón dentro del grano es el factor que más afecta a la dureza. La microscopía electrónica ha revelado que los granos de maíces duros presentan diferentes patrones que los granos de maíz suave. En el endospermo del maíz suave los gránulos de almidón son principalmente esféricos y débilmente empaquetados en una matriz proteica, mientras que los de maíz duro son poligonales y altamente empaquetados (Figuroa y col., 2013).

La dureza, como una característica de la textura de los granos de maíz, debe ser considerada como el resultado de la contribución de varias características que incluyen a los compuestos químicos individuales así como a sus interacciones, y a los arreglos moleculares dentro del gránulo de almidón y el grano de maíz (Figuroa y col., 2013).

- *Peso de cien granos:* El peso de cien granos (PCG), es un indicador del tamaño del grano, este valor está relacionado con los rendimientos en la producción en las industrias de transformación (Othón, 2001). Con base en el valor del peso de cien granos, dureza y densidad, es posible recomendar la utilidad que se pudiera dar; los granos aptos para producir atoles y pozoles se caracterizan por tener tamaño grande y valores bajos de dureza y densidad, en tanto que los granos para tortillas tienen valores intermedios en tales características; en contraste, los granos para pinoles se caracterizan por ser cortos, anchos y gruesos, de dureza y densidad baja. Los granos palomeros son pequeños, duros y de alta densidad (Figuroa y col., 2013)

En el Cuadro 4 fue conformado de Salinas y Aguilar (2010) y Robutti (2010), se clasifico el maíz por su dureza de grano para observar la relación con el peso de cien granos, peso hectolítrico e índice de flotación. En la primera parte el tamaño del grano, estimado a través del PCG, los maíces de dureza intermedia fueron los de grano más grande, seguidos de los maíces suaves, y los de grano más pequeño fueron los maíces duros. Los valores de PH de los maíces duros e intermedios cumplen con lo especificado para esta variable en la Norma de calidad para maíz nixtamalizado (NMX-FF-034/1-2002), que es de 74.0 kg/hL; los maíces suaves estuvieron ligeramente por debajo. Respecto al IF, los únicos que satisfacen lo establecido en la norma son los maíces de grano duro (Salinas y Aguilar, 2010). En la segunda parte se muestra la finalidad que se le da al grano, según la dureza y proceso que tenga este, un grano suave se hidratan mejor que los de endospermo duro por tener menor cantidad de cuerpos de zeína (proteína que influye en la dureza del grano), estos son usados en la molienda húmeda; el maíz de grano duro se usa en la molienda seca, debido a que tiene almidones

compactados, reflejado en el peso hectolítrico y en el rendimiento de la producción, como en el de las harinas (INTA, 2010).

Cuadro 4. Características físicas del grano de maíz entre grupos con diferente textura de endospermo (Salinas y Aguilar, 2010). Finalidad según su dureza (INTA 2010).

Grupo	Humedad (%)	Peso hectolítrico (kg/hL)	Peso de cien granos (g)	Índice de flotación (%)	Finalidad
Duros	11,7	78,2	33,0	21	Cervecería, extrusión, harinas, botanas a base de harinas.
Intermedios	11,7	75,0	40,4	50	Almidón, dextrosa, fructosa, gluten, botana de grano entero de maíz.
Suaves	11,9	73,3	40,4	70	

- Color:** Es un factor importante que interfiere significativamente en las propiedades sensoriales de aceptabilidad en muchos alimentos, entre los que se puede mencionar desde granos, harinas, hortalizas, frutas, hasta productos terminados como galletas, pastas, café instantáneo, fórmulas infantiles, chorizo, etc. El color es la única propiedad sensorial que puede ser medida en forma instrumental más efectivamente que en forma visual. Aunque los métodos instrumentales dan resultados rápidos, confiables y de costos accesibles, muchas veces es necesario llevar a cabo la medición de color en forma visual, es decir, un análisis de evaluación sensorial que valide los resultados de los métodos instrumentales y utilizarlos en un momento dado como herramientas en el control de calidad (Romero, 2010). Salinas y col. (2010), reportan los parámetros de color del maíz azul raza Chalqueño, en el espacio de color L, a, b, donde la luminosidad (L) tiene un intervalo de valores de cero a cien; el primer valor representa el negro y el mayor el blanco, el parámetro “a” es un eje donde se encuentran en sus extremos el color rojo con valores positivos y el verde con valores negativos, el parámetro “b” de igual forma es otro eje que tiene en sus extremos el color amarillo con valores positivos y el azul con valores negativos; teniendo el maíz azul una luminosidad de 20.3 lo que indica que está en los valores de negro a gris oscuro, el parámetro “a” y el parámetro “b” tienen valores de -0.6 y -0.7

respectivamente lo que indica que tienen coloraciones verdes y azules, que debido al bajo valor de L, se perciben casi negros.

1.3 Fritura

La fritura por inmersión es un proceso antiguo y popular que se originó y desarrolló en el área mediterránea debido a la influencia del aceite de oliva. Hoy en día muchos de los alimentos procesados se preparan mediante fritura por inmersión en todo el mundo, ya que, además de conseguir el cocinado del alimento, la fritura proporciona aromas y texturas únicas que mejoran la palatabilidad general (Brennan, 2008).

1.3.1 Proceso de fritura por inmersión

La fritura por inmersión puede definirse como un proceso de cocinado de alimentos mediante su inmersión en un fluido comestible (grasa) a una temperatura por encima del punto de ebullición del agua. Las temperaturas de fritura oscilan entre 130 y 190°C, aunque las más comunes varían entre 170-190°C. La fritura por inmersión es un proceso complejo que implica simultáneamente una transferencia de masa y calor dando lugar a un flujo a contracorriente de vapor de agua (burbujas) y aceite en la superficie del alimento. Además la fritura provoca alteraciones físico-químicas y cambios microestructurales significativos en los principales componentes del alimento. Muchas de las características deseables de los alimentos fritos se derivan de la formación de una estructura amalgamada: una corteza o capa externa seca, porosa, crujiente y grasienta con el interior o corazón húmedo o cocinado. La corteza es el resultado de varias alteraciones que principalmente ocurren a nivel celular y subcelular y se localizan en las capas más externas del producto. Estos cambios físicos y químicos incluyen el daño físico cuando se forma una superficie rugosa con salida de material intracelular, la gelatinización del almidón y la consecuente deshidratación, desnaturalización proteica, pérdida de adhesión celular, evaporación del agua y deshidratación rápida del tejido y, finalmente, la absorción del aceite (Brennan, 2008).

La deshidratación, las altas temperaturas y la absorción de aceite distinguen el proceso de fritura de la cocción, ya que este último tiene lugar en un medio húmedo

donde la temperatura no excede el punto de ebullición del agua a menos que se haga a presión. Durante el horneado, los coeficientes de transferencia de calor son mucho más bajos que durante la fritura y, aunque hay deshidratación en superficie y formación de costra, no hay absorción de aceite. Además, las altas temperaturas que se registran durante la fritura (normalmente por encima de los 150°C) permiten la inactivación enzimática, la reducción de aire intercelular y la destrucción de microorganismos, incluidos los patógenos (Brennan, 2008).

1.3.2 Mecanismo general de la fritura por inmersión

La fritura por inmersión es un proceso térmico, en el cual la transferencia de calor y masa tienen lugar de forma simultánea. El proceso consiste en la transferencia del calor por convección desde el medio de fritura a la superficie del producto y posteriormente, la transferencia del calor por conducción tiene lugar dentro del alimento. La transferencia de masa se caracteriza por la pérdida de agua del alimento en forma de vapor de agua y por el paso de aceite al interior del alimento (Brennan, 2008).

Se ha observado que la temperatura en cualquier lugar de la región central del alimento se limita a valores por debajo del punto de ebullición del líquido intersticial (aproximadamente 105°C). Cuando todo el líquido se ha evaporado de esta región central, el aceite se desplaza hacia el interior del alimento y la temperatura comienza a elevarse, acercándose a la temperatura del aceite de la parte exterior. Basándose en las observaciones visuales y en los análisis de perfil de temperatura y los datos de humedad, se sugiere que el proceso de fritura (Figura 7) se compone de cuatro fases diferenciadas (Brennan, 2008) que se describen a continuación:

1. Calentamiento inicial, que dura unos pocos segundos y corresponde con el periodo de tiempo durante el cual la temperatura de la superficie del alimento alcanza el punto de ebullición del líquido. La transferencia de calor se da por convección natural y no hay evaporación del agua.

2. Ebullición en superficie, que se caracteriza por la repentina pérdida de agua, el comienzo de la formación de la corteza y un régimen de convección forzado debido a una elevada tasa de turbulencias, asociadas a la ebullición nucleada.
3. Fase de disminución de las pérdidas, es la fase más larga, en la que la humedad interna abandona el alimento, la temperatura en el centro se eleva hasta el punto de ebullición del líquido del material que se está friendo, la capa de corteza aumenta de grosor y finalmente la transferencia de vapor en la superficie disminuye.
4. Punto final de burbujeo, fase donde ya no existe transferencia de masa entre el agua del alimento y el aceite.

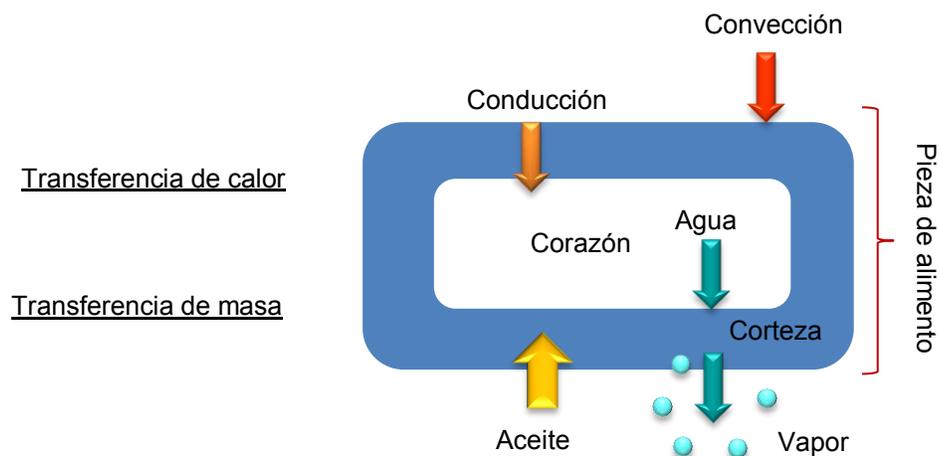


Figura 7. Diagrama de la cinética de transferencia simultánea de calor y masa en la fritura (Brennan, 2008).

1.3.3 Factores que afectan a la absorción de aceite

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones en las que se han examinado los diferentes factores que afectan a la absorción de aceite durante la fritura, así mismo, muchos estudios empíricos han correlacionado las medidas de absorción de aceite con el proceso y/o las características del producto (Brennan, 2008).

Gamble y col., (citado en Brennan, 2008) encontraron que una temperatura más baja del aceite daba lugar a un contenido de aceite más bajo en las patatas crujientes, en los primeros estadios de la fritura, con una mayor diferencia entre los 145°C y 165°C

que entre los 165°C y 185°C. Moreira y col., (citado en Brennan, 2008) determinaron diferencias más altas de la absorción de aceite en los nachos (en base húmeda) entre los 130°C y 160°C que entre los 160°C y 190°C. Sin embargo, los resultados expresaron mucha absorción de aceite en base húmeda. Consecuentemente, había una reducción sistemática de la base sobre la que se expresaban los resultados, ya que el contenido en agua se reducía constantemente debido a la mayor deshidratación resultante cuando el producto se freía a una temperatura más alta durante el mismo periodo de tiempo. Por el contrario Bouchon (citado en Brennan, 2008), determinó que el ritmo de absorción de aceite (en base seca) en cilindros de papa no se veía afectado significativamente por la temperatura del aceite (155, 170, 185°C). Además, no se encontraron diferencias significativas respecto a la absorción de aceite entre las dos temperaturas más altas. Sin embargo, cuando se llevaba a cabo la fritura a 155°C, se producía una absorción significativamente menor, comparada con las anteriores. En el mismo sentido, se determinó que la tasa de absorción de aceite no se veía afectada por la temperatura del aceite cuando se freían nachos y que una temperatura de fritura de 190°C daba lugar a un mayor contenido en aceite (3 – 5%) que una temperatura de fritura de 155°C. Hallaron también que el contenido en aceite se incrementaba al aumentar la temperatura de fritura cuando se freían patatas en tiras (Brennan, 2008). Concluyendo que la geometría, el grosor, el contenido de humedad del alimento y la temperatura del aceite antes del freído determina el porcentaje de absorción de aceite.

La influencia del tipo y de la calidad del aceite en la absorción, tanto del mismo aceite como de residuos, por los alimentos fritos está ampliamente documentada. Brennan (2008), encontró que no hay relación entre el tipo de aceite y su absorción, aunque se ha observado que un incremento en la tensión interfacial inicial del aceite disminuye su absorción. Durante la fritura de los alimentos se forman varias clases de surfactantes, ya sea como resultado de la degradación del mismo aceite de fritura o como resultado de las reacciones que tienen lugar entre los componentes del alimento y el aceite. Estos componentes actúan como agentes humectantes, reduciendo la tensión interfacial entre ellos, lo que causa un mayor contacto entre el

alimento y el aceite y finalmente conduce a que el producto frito absorba una cantidad excesiva de aceite.

En la absorción de aceite de las frituras de tortilla (nixtamalizadas) influyen varios factores, incluyendo la variedad de maíz, condiciones de cocimiento y molienda de la masa, tiempo de cocimiento y proceso de enfriamiento después del cocimiento entre otros. El mecanismo de transición de un estado no-rígido a uno rígido durante el freído no está completamente definido. El estado final de la mayoría de los productos fritos que presentan una estructura rígida es generado por los cambios físicos y químicos. Las modificaciones en el almidón y reducción del contenido de humedad contribuyen a hacer rígida la estructura molecular del almidón. El contenido de humedad menor a 2% también estabiliza las configuraciones estructurales. La distribución de aceite en las frituras de tortilla durante y después del freído fueron estudiadas por Gaytán y col. (2000), encontraron que solamente el 20% del aceite fue absorbido por el producto, mientras el 80% permanecía en la superficie de las frituras durante el freído. La mayor parte del aceite fue absorbido por las frituras durante el enfriamiento. Se ha analizado el efecto de varios cambios en el contenido de aceite durante la elaboración de frituras de tortillas (cocimiento, temperatura del aceite, calidad del aceite y distribución de tamaño de partícula de la harina). Con fotografías obtenidas usando la Microscopia Electrónica de Escaneo Ambiental (MEEA), se muestra como la distribución de tamaño del poro que se ha desarrollado durante el freído fue la principal causa de absorción de aceite durante el período de enfriamiento después del freído y que el contenido de aceite es independiente de la temperatura y calidad del aceite. La cantidad de aceite absorbido fue relacionada al tamaño de partícula en la harina nixtamalizada y al contenido inicial de humedad. Al reducir el contenido de humedad de las frituras de tortilla antes del freído, se redujo el contenido de aceite de un 25-27% a un mínimo de 20-18% (base húmeda), sin embargo concluyeron que el contenido de humedad por sí mismo no determina el contenido de aceite de la fritura, que la humedad afecta la estructura, para alternativamente influenciar la absorción de aceite. Esta distribución en frituras

depende de la estructura del alimento, y de la facilidad con la que su humedad es evaporada, donde el aceite absorbido se aloja en áreas de pérdida de humedad.

Se ha observado que algunos tratamientos previos a la fritura reducen significativamente la absorción de aceite durante el proceso de freído. Disminuir el contenido de humedad del alimento mediante el uso de microondas y de aire caliente antes de freírlo tiene como consecuencia una reducción del contenido final de aceite, mientras que la liofilización aumenta la absorción. También se ha observado que algunos tratamientos realizados posteriormente a la fritura, tales como la desecación mediante aire caliente reducen la absorción de aceite (Lawson, 1999). Además en la última década los hidrocoloides se han utilizado como aditivos multifuncionales en la elaboración de alimentos para mejorar las propiedades funcionales tales como la viscosidad, la capacidad de unión de agua y estabilidad de la emulsión. Estos son de especial interés debido a que poseen buena propiedad de barrera contra el oxígeno, dióxido de carbono y lípidos, que podría reducir la absorción de aceite durante la fritura por inmersión (Singthong y Thongkaew, 2009). El uso de hidrocoloides formadores de películas tales como carboximetil celulosa (CMC), hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), hidroxipropilcelulosa (HPC) y metilcelulosa (MC) son particularmente eficaces para reducir el contenido de aceite en alimentos fritos por inmersión. Esto se atribuye a la gelificación térmica de estos hidrocoloides a la temperatura de fritura, esto crea una película resistente al aceite alrededor de los alimentos que se fríen, lo que reduce el grado de absorción. En estudios previos se ha investigado el uso de hidrocoloides para reducir el contenido de aceite en botanas tradicionales de la India elaboradas a base de diferentes legumbres como frijoles y garbanzos (conocidas como sev, papadams y boondi), que muestran una reducción significativa de la absorción de aceite. El uso de hidrocoloides de recubrimiento tales como la pectina, sal sódica del ácido algínico y CMC en combinación con cloruro de calcio fue eficaz en la reducción del aceite contenido en las papas fritas. Legumbres fritas tales como frijoles, garbanzos, cacahuates, chicharos y muchos otros se disfrutan en la India a cualquier momento como aperitivos. Sin embargo, sus altos contenidos de aceite no son deseables para los consumidores conscientes de la

salud (Holikar y col., 2005). Entre estas leguminosas, los frijoles verdes son particularmente apreciados. Holikar y col. (2005), estudiaron que el remojo de frijoles verdes en 7.5 g/L de cloruro de calcio en una proporción de 1:5 por 180 min seguido de un único recubrimiento en 30 g/L solución de pectina durante 10 min y secado de la superficie por 30 min, observando la reducción del contenido de aceite en la fritura de 335 g/kg a 212 g/kg. Concluyendo que la elaboración de la botana de frijoles verdes mediante esta técnica tenga relevancia desde el punto de vista nutricional además que la técnica es simple, fácil de usar, económica y favorable a los consumidores y podría ser adoptada por la industria de botanas.

1.3.4 Proceso de producción del maíz frito

Hurtado (2001), da una base para la elaboración de la botana de maíz frito. En su estudio, los granos de maíz amarillo se sometieron a una solución de remojo, donde primero se usó NaOH al 0,5% por 4 minutos a 70°C, luego se lavó con agua hasta la total eliminación de la reacción alcalina, y posteriormente los granos se dejaron remojando en sal disódica de EDTA al 0,03% durante 16 horas. El EDTA se utiliza como sal disódica en alimentos como secuestrante de metales pesados para prevenir la oxidación lipídica o bien como estabilizante del color y sabor (Cagnasso, 2007). La ingesta diaria permitida del EDTA es de 2.5 mg/kg. Después del remojo, una parte de los granos se sometieron a un sancochado (cocción en una olla de presión) por 5 minutos, con una relación agua-grano de 3:1. La otra parte de los granos se mantuvo en estado crudo hasta la operación de pelado. Esta operación se realizó en forma manual tanto para los granos crudos como para los cocidos a presión. La operación de fritura se realizó en una freidora Philips modelo HD 4253, por un tiempo de 5 minutos, con una temperatura de 190°C y en una relación aceite-grano de 4:1. Posteriormente se dejó escurrir el exceso de aceite y los granos se pusieron sobre papel absorbente, y se les adicionó un 2% de sal y se envasaron en bolsas de polipropileno transparente. En la Figura 8 se muestra el proceso que siguió Hurtado para elaborar botanas fritas de maíz.



Figura 8. Línea de flujo propuesta para la elaboración de maíz frito tipo “botana” (Hurtado, 2001).

Hurtado (2001), encontró diferencias después del remojo de los dos procesos y en el producto final; en el contenido de humedad encontró diferencia significativa, donde el tratamiento de sancochado alcanzó el mayor valor debido a que los granos fueron sometidos a un proceso de precocción, aumentando el contenido de agua final. La apariencia de los productos elaborados presentó diferencia significativa calificando

como apariencia "buena" al tratamiento con sancochado y como "más que regular" con el crudo. En la intensidad de color hubo diferencia significativa, donde el tratamiento crudo fue evaluado como "levemente oscuro" y el sancochado como "normal, moderado". El parámetro de salado también presentó diferencia significativa, sin embargo ambos tratamientos fueron evaluados con la misma intensidad que corresponde a "normal, moderado". El resto del análisis sensorial no presentó diferencia significativa, es así como la crocancia fue calificada como "algo dura", la textura como "más que regular" y el sabor de los productos fue evaluado como "normal, moderado", esto fue para ambos tratamientos. En el caso de aceptabilidad, a pesar de no presentar diferencia significativa, los tratamientos fueron evaluados como "me gusta algo" para sancochado y como "me gusta medianamente" para crudo (Hurtado, 2001).



Figura 9. Línea de flujo para la elaboración de frijoles verdes fritos (moon dal) (Holikar y col., 2005)

Otro proceso similar a la elaboración de maíz frito es el proceso descrito por Holikar y col. (2005), describiendo el proceso de elaboración de un aperitivo tradicional de la India llamado moon dal o dals (frijoles verdes fritos). Los frijoles verdes deshidratados (20 g) se lavaron y se sumergieron en 100 ml de agua potable con propósitos de hidratarlos durante períodos de tiempo que va de 0 a 180 min a temperatura ambiente (aproximadamente 30 °C). El agua en remojo a continuación, se drenó. Los dals se hidrataron la superficie se secó durante 5 min, posteriormente se frieron a 170 ± 5 °C durante 2 min en aceite de cacahuete. Los dals fritos se vertieron sobre papel absorbente. En la Figura 9 se muestra el proceso de producción para la elaboración de moon dal.

1.3.5 Textura de botanas fritas a base de cereales

La textura es la manera en la cual varios constituyentes y elementos estructurales de un alimento están arreglados y combinados en micro estructuras y macro estructuras cuyas manifestaciones externas se presentan en términos de flujo y deformación (De Man y col., 1975). Las propiedades texturales son factores clave en la aceptabilidad de los alimentos. La textura en los alimentos se percibe a través de la combinación de sensaciones visuales, táctiles, kinestésicas y auditivas.

Los alimentos sólidos abarcan una gran variedad de productos, tales como cereales para el desayuno, pan tostado, papas fritas, verduras y frutas, como apio, zanahorias y manzanas frescas. Los productos como nuggets de pollo, productos fritos, baguettes consisten en una parte interior sólida suave y una corteza quebradiza con un bajo contenido de agua. Estas costras tienen una estructura similar a los alimentos sólidos secos, bajo contenido de agua y propiedades mecánicas similares. Sin embargo, sus propiedades mecánicas se verán afectadas en cierto grado por la capa suave por debajo de las costras duras (Van, 2004). La textura crujiente característica de las botanas fritas es uno de los indicadores más importantes de calidad del producto acabado, aparte de color, olor y sabor. Las botanas a base de cereales y granos enteros fritos, en términos de textura se describen a menudo por la dureza y carácter crujiente. Este carácter crujiente es una característica sensorial

importante en la que los consumidores basan su aprecio (Salvador y col., 2009). Los alimentos sólidos crujientes tienden a romperse con una pequeña deformación en varios pedazos, tanto la corteza como el interior son duros y frágiles, y emiten sonido durante la mordida o masticación, así como durante las pruebas mecánicas para evaluación de su textura (Casas, 2012b). Los atributos texturales importantes para alimentos sólidos duros incluyen dureza/firmeza, fragilidad, carácter crujiente y la formación de astillas (Van, 2004).

1.3.5.1 Estructura de los productos crujientes húmedos y secos

La frescura sensorial y/o determinación carácter crujiente de manera instrumental pueden diferir entre los alimentos crujientes húmedos y secos. La diferencia entre los alimentos secos y húmedos se puede explicar por el hecho de que la mayoría de los alimentos húmedos se componen de células vivas y existe en ellas la presión ejercida por los fluidos en su interior (turgencia) (Figura 10, apartado A). Esto genera un sonido cada vez que se rompe una célula turgente. Paredes celulares fuertes pueden soportar más presión y al masticar o morder liberan dicha presión, produciendo un fuerte ruido; alimentos con paredes celulares suaves exhiben sonidos pequeños o nada perceptibles que se acompañan durante la mordida o masticación (Chauvin y col., 2008).

El mecanismo de producción de sonido en alimentos secos es diferente. En los alimentos secos, las células se llenan de aire y las paredes celulares son frágiles (Figura 10, apartado B). Los sonidos se producen a partir de la aplicación de una fuerza la cual ocasiona la ruptura colectiva de las células individuales al morder o masticar. Cuando se rompe la pared celular, sus restos y cualquier fragmento encajan de nuevo a la forma original, generando un sonido. La fuerza del sonido producido en los alimentos secos está influenciada por la velocidad, donde la pared celular rota vibra. La disminución de la rigidez de la pared celular es resultado de un aumento en el contenido de humedad, acompañada por una disminución en la producción de sonido (Chauvin y col., 2008).

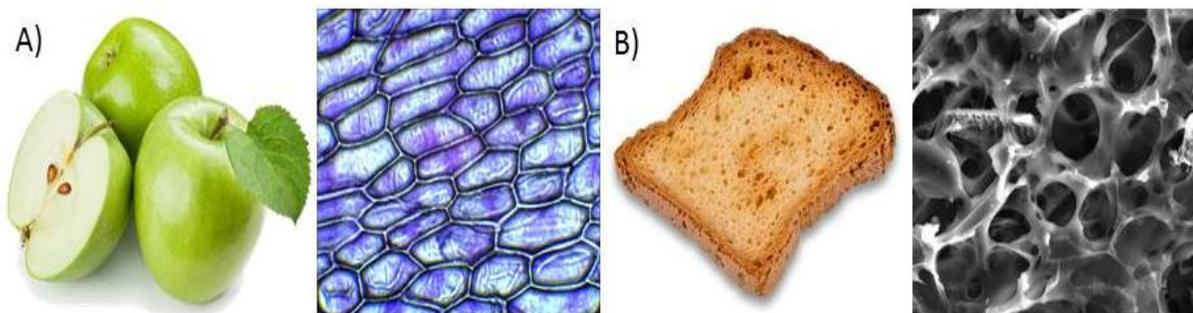


Figura 10. Estructura de alimentos crujientes; A) Húmedo, B) Secos.

1.3.5.2 Métodos de evaluación de características crujientes (*crispy, crunchy, crackly*)

La textura de productos crujientes se ha estudiado por varios investigadores, recurriendo a evaluaciones sensoriales, mecánicas, auditivas y combinaciones de éstas.

- **Sensoriales.** Las propiedades “crispy”, “crunchy” y “crackly” son los principales atributos de textura que afectan la aceptabilidad de los alimentos con respecto a la sensación auditiva. Los términos “crispness”, “crunchiness” y “crackliness” son comúnmente usados en estudios sensoriales, sin embargo entre los expertos hay poco acuerdo respecto a sus definiciones y técnicas de evaluación, al menos en el español no hay una traducción que las diferencie (Chauvin y col., 2008; Duizer y col., 2001).

La evaluación sensorial de crispness, crunchiness y crackliness es muy compleja. El análisis descriptivo de los panelistas para la evaluación de crispness, crunchiness y crackliness se centra en parámetros tales como la estructura del alimento intacto, los sonidos emitidos a la ruptura, la fuerza necesaria para triturar el alimento, el colapso del alimento en la fractura, la aparición de piezas y la percepción de la siguiente fractura. Sin embargo, existen pocos acuerdos sobre definiciones y técnicas de manipulación por vía oral durante la masticación en la determinación de las características crispness, crunchiness y crackliness. Muchos factores pueden ser responsables de la gran variación de sonidos en estos productos: el tamaño,

la forma y orientación del alimento en la boca; la cantidad de superficie de contacto entre los dientes y el alimento; el grado en que se abre la boca; variaciones dentro del alimento; el ritmo y la fuerza de la mordida; o la forma en que el alimento se rompe. Chauvin y col. (2008), formaron un grupo de panelistas sensoriales entrenados, los cuales tuvieron varias sesiones para compartir información bibliográfica acerca de las diferencias entre dichos atributos, así como para entrenar y estandarizar el método de evaluación. Por medio de los resultados, los panelistas fueron capaces de definir las diferencias auditivas entre ellos, y también entre los alimentos secos y húmedos. El cuadro 5 resume las características de diferentes autores que definían crispness, crunchiness y crackliness; unificando éstas en tres conceptos de los atributos texturales, describiendo el tipo de sonido emitido por el alimento, así como la estandarización de las técnicas para su evaluación sensorial, sin embargo, aún no hay un total acuerdo entre los investigadores que permita diferenciar claramente las características.

Cuadro 5. Definición y técnicas para la evaluación sensorial de crispness, crunchiness y crackliness (Chauvin y col., 2008).

Atributo textural	Definición	Técnica de evaluación
Crispness	Suceso sonoro percibido como fuerte, limpio, rápido, con sonido agudo. Evaluado con los incisivos y los labios abiertos.	Colocar el alimento entre los dientes incisivos, morder el producto y evaluar la intensidad del sonido después de la primera mordida, usando la misma fuerza posible para todos los productos de la escala.
Crunchiness	Múltiples sonidos graves percibidos como una serie de pequeños eventos. Evaluada con los molares y los labios cerrados.	Se colocan los productos entre los molares; se muerde usando cerca como sea posible la misma fuerza para todos los productos en la escala. Se mastica el producto dos o tres veces y se escucha la intensidad del sonido producido.
Crackliness	Suceso sonoro repentino con tono bajo, quebrándose el producto cuando los molares aplican presión. Evaluado con los molares y los labios cerrados.	Colocar el producto entre las muelas y morder una vez sin triturar el producto. Hasta sentir quebrado el producto.

- **Mecánicas.** Existe un consenso general de que tanto "crispy", "crunchy" y "crackly" son sensaciones relacionadas con las propiedades de fractura de los alimentos. En general las personas sienten que los cambios en el tiempo son importantes para diferenciar estos parámetros. Aún no está claro si esto tiene que ser durante la sucesiva masticación, o si el primer mordisco es suficiente para definir la sensación. Las curvas fuerza-deformación de productos crujientes muestran picos irregulares, posiblemente representando los diferentes eventos antes de llegar a la fractura (Luyten, 2004). Los instrumentos desarrollados para la textura de materiales, proporcionan parámetros texturales de deformación y fractura. Estos parámetros no pueden dar la medida exacta de qué tipo de producto es ("crispy", "crunchy" o "crackly"), pero se pueden utilizar como herramienta junto con los datos sensoriales, teniendo en cuenta la percepción en el paladar, proporcionando información de la base molecular de los alimentos.

Las mediciones mecánicas de comportamiento de textura son numerosas, pero, independientemente del tipo de dispositivo o del método utilizado, se basan en registrar la fuerza cuando se aplica una deformación al alimento, o viceversa, sugiriendo una velocidad de carga constante. Las pruebas más utilizadas se pueden clasificar en tres grupos: flexión, cizalla y compresión. Esta última es comúnmente la más empleada debido a su similitud con el proceso de masticación (Roudaut, 2002).

1.3.5.3 Fractura

Una característica común de los productos crujientes que ayuda a definir su textura es la fractura. La fractura es la separación de un material en dos o más piezas como resultado de la aplicación de una fuerza estática. La fracturabilidad es la fuerza con la cual una muestra se desmorona, agrieta o despedaza. Los alimentos que sufren fractura son los productos que poseen un alto grado de dureza y un bajo grado de cohesividad. El entendimiento de esta propiedad en los alimentos permite manipular su estructura para producir una textura deseada (Casas, 2012b).

En la Figura 11 se pueden observar dos tipos de fractura, en el apartado a) se muestra la fractura frágil o espontánea, que se caracteriza por la poca o nula deformación plástica antes de la fractura y baja absorción de energía para la fractura (nueces, pasta seca, cereales fritos, caramelos duros); en el apartado b) se muestra la fractura dúctil, caracterizada por una deformación plástica de gran importancia (deformación no recuperable) con alta absorción de energía antes de la fractura (carne, papa tipo francesa, pasta fresca, geles). También en el apartado a) se observan los parámetros de textura para este tipo de prueba donde el carácter crujiente puede definirse por la pendiente inicial de la gráfica, la dureza se representa como la fuerza máxima, la distancia de fractura (fragilidad) como la distancia donde se da la fuerza máxima y el trabajo de fractura como el área bajo la curva, desde el inicio de la curva hasta la fuerza máxima, (The Texture Report,1998).

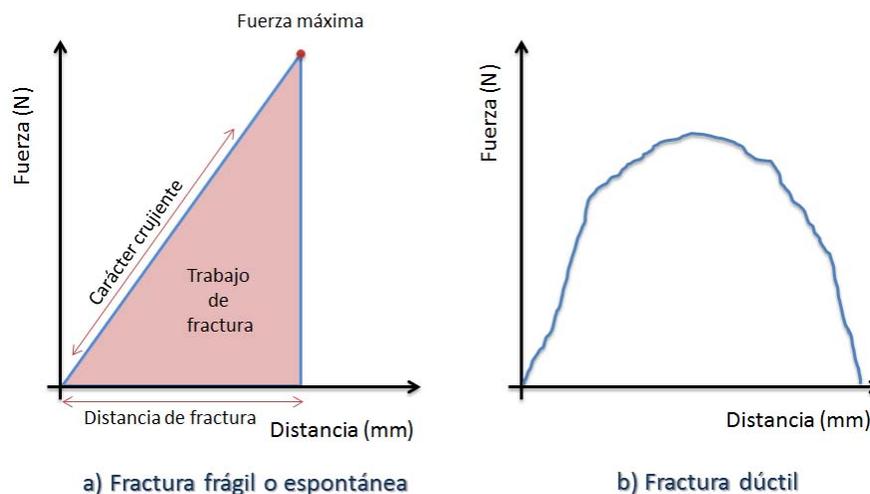


Figura 11. Curvas de fractura. a) Fractura frágil o espontánea; b) Fractura dúctil (Casas, 2012).

Las características de fractura de un material pueden ser evaluadas por medio de pruebas de tensión, compresión, punción, doblado, empleando dispositivos de acuerdo a la forma y tamaño del material (Casas, 2012). La metodología que siguió Véles (2004) para determinar la textura de una botana de maíz nixtamalizada fue usar un cilindro con 0.203 cm de diámetro y las condiciones utilizadas fueron una

velocidad de 10 mm/s, distancia de 10 mm, midiendo la dureza y el trabajo de fractura.

1.3.5.4 Fragilidad y carácter crujiente en pruebas de compresión

La definición académica de la fragilidad y el carácter no son muy claros. La regla general en lo que respecta a la fragilidad es que si el alimento se rompe relativamente en menor grado de deformación es frágil. La preocupación de los fabricantes de alimentos frágiles es el embalaje y el envío. Sin embargo el carácter crujiente es un parámetro de textura de alta importancia para las botanas, productos horneados y otros alimentos como las papas fritas. La regla general para definir el carácter crujiente es la resistencia inicial de los productos crujientes a la penetración o compresión por parte del dispositivo. Normalmente estos parámetros pueden ser cuantificados por la medición de la distancia a la que el producto se rompe (fragilidad) y la pendiente inicial de la gráfica (crujiente). Sin embargo, las conductas de los productos no son tan simples (The Texture Report, 1998). Los siguientes gráficos indican diferencias en los comportamientos de productos alimenticios en relación con la fragilidad y el carácter crujiente.

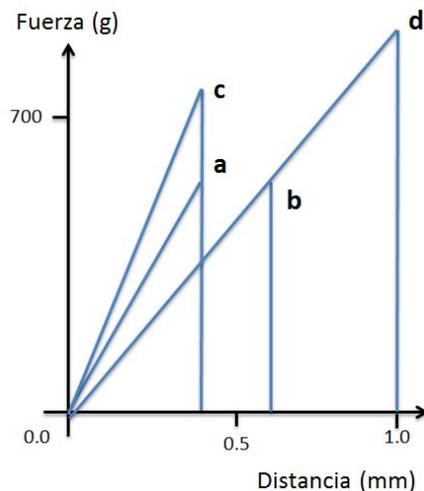


Figura 12. Fragilidad y carácter crujiente en pruebas de compresión con fractura espontánea (The Texture Report, 1998).

- En la Figura 12 se representan diferentes casos en relación con la fragilidad y el carácter crujiente. Todos los productos de esta Figura presentan fractura frágil, sin embargo los gráficos **a** y **b** son relativamente fáciles ya que estos se rompen alrededor de 500 g, aunque lo hacen a muy diferentes distancias; el gráfico **a** es más frágil que **b**, sin embargo su carácter crujiente sigue la misma tendencia que la distancia de fractura, puesto que la pendiente para el gráfico **a** es mayor que para el gráfico **b**. Los gráficos **a** y **c** también son sencillos ya que éstos se rompen a una distancia similar; el gráfico **c** es más crujiente que **a**; la gráfica **a** se rompe con una fuerza menor de **c**, de modo que el gráfico **a** probablemente sería juzgado por los panelistas sensoriales como el más frágil y la gráfica **c** sería el menos quebradizo. Los gráficos **b** y **d** muestran cómo la fragilidad y el carácter crujiente son más difíciles de determinar; el producto del gráfico **b** es el más frágil ya que se rompe con menor deformación, mientras que el gráfico **d** resiste la deformación mucho más antes de romperse y sería la menos frágil; si se mide el carácter crujiente, por medio de la pendiente inicial hasta la ruptura, entonces todos los productos son idénticos en cuanto a ese parámetro; en la práctica un panel sensorial probablemente diría que **d** sería más crujiente que los otros, ya que, las pendientes son iguales pero en dureza son diferentes (The Texture Report, 1998).

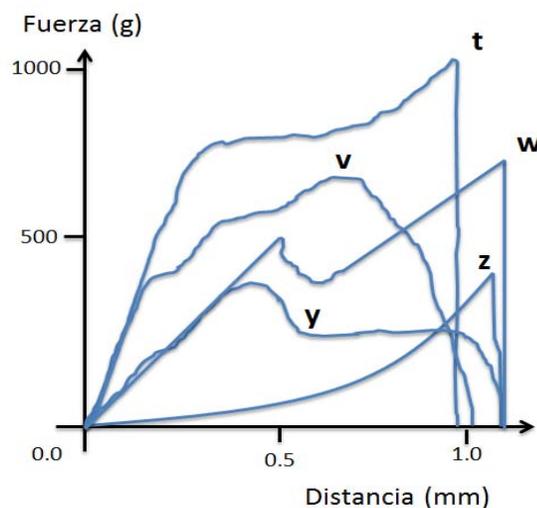


Figura 13. Fragilidad y carácter crujiente en pruebas de compresión con fractura dúctil (The Texture Report, 1998).

- En la Figura 13 se muestran gráficos más irregulares acerca de la fragilidad y el carácter crujiente. El gráfico **w** se fracturó parcialmente, sin embargo fue lo suficientemente cohesivo para no romperse completamente, finalmente estalló a una fuerza cercana a 700 g. Las gráficas **t** y **v** (y en menor medida **y**) son firmes, pero la redondez de sus curvas sugiere que son más flexibles que quebradizos y tal vez más firmes que frágiles; por ejemplo un caramelo suave podría exhibir una firme línea curva como la gráfica **v**; en la gráfica **t** existe una alta resistencia inicial que es seguida por una curva relativamente plana lo que sugiere que podría ser un producto como papas a la francesa que relativamente ofrece estructura resistente debido a su cáscara crujiente o su geometría; una vez que el producto es comprimido su carácter crujiente desaparece y es flexible y finalmente se rompe; un panel sensorial bien instruido podría determinar que en la gráfica **t** la resistencia inicial lo hace el segundo más crujiente, pero el mismo panel podría entender que la eventual flexibilidad del producto resta valor a su alto carácter crujiente (The Texture Report, 1998).

1.3.5.5 Pruebas Auditivas

Para la realización de pruebas auditivas se utiliza la emisión de sonido que es grabado al morder con los incisivos y/o durante una prueba mecánica usando un sensor acústico. Previo a la mordida, la boca de la persona de prueba está abierta. La distancia entre la boca y el micrófono se fija a una distancia de 10 cm. La persona de prueba es libre de elegir su propio morder tamaño y la frecuencia (Luyten y Vliet, 2006).

Hechas la prueba, se hace el análisis del espectro de frecuencias del sonido producido al comprimir el alimento. Generalmente se utilizan en tales estudios los parámetros de nivel de sonido o el volumen, la energía del sonido, o el número de los picos. Encontrando que el tono del sonido es más alto para los productos “crispy” con frecuencias que van de 5 a 12.8 kHz, que para los alimentos más “crackly” y “crunchy” van de 1.25 a 2 kHz (Leyten y col., 2004).

II. Metodología

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de las condiciones de proceso del grano (tiempo y temperatura de remojo, tiempo y temperatura de freído) y la congelación previa al freído, sobre las características físicas y texturales finales de una botana de grano entero de maíz azul.

2.1.2 Actividades preliminares

- Separar por tamaño y forma los granos del lote inicial de maíz azul y seleccionar con base al tamaño para tener un lote más homogéneo.
- Medir las características físicas del lote de maíz azul (humedad, densidad, peso hectolítrico, peso de 100 granos, color, dureza).
- Establecer las condiciones de prueba para la evaluación de textura de la botana frita con una botana comercial de maíz amarillo.

2.1.3 Objetivo particular 1

Evaluar la capacidad de hidratación del grano de maíz azul con respecto al tiempo a diferentes temperaturas (30, 45, 60, 70, 80°C) durante 10 horas mediante gráficos de cinética de absorción estableciendo tiempos y temperaturas de remojo para el estadístico Taguchi, con base en las cinéticas y las características del grano frito, a 170 °C por 5 y 7 minutos.

2.1.4 Objetivo particular 2

Analizar la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en las propiedades físicas (humedad, densidad, color, % de absorción de aceite, retención de condimento) y texturales (dureza, distancia de fractura, carácter crujiente, trabajo de fractura) por medio de un diseño estadístico Taguchi.

2.1.5 Objetivo particular 3

Evaluar la influencia de la congelación previa al freído en una corrida seleccionada del estadístico Taguchi, al compararla en las propiedades físicas (humedad, densidad, color, % de absorción de aceite, retención de condimento) y texturales (dureza, distancia de fractura, carácter crujiente, trabajo de fractura) con la corrida original.

2.2 Materiales

Para la elaboración de botanas fritas de maíz azul se utilizaron las siguientes materias primas:

- Granos enteros de maíz azul, obtenidos en el mercado de Cuautitlan, Estado de México; el maíz es originario de Chalco, se compró un lote de 3.5 kg.
- Hidróxido de sodio (NaOH), marca Fermont, 97.8% de pureza.
- Agua purificada, marca E-pura, compañía Pepsico.
- Aceite vegetal de canola, marca Capullo.
- Mezcla de condimentos tipo adobo, marca Piquín.

2.3 Métodos

2.3.1 Clasificación y selección con base en el tamaño del grano

Se caracterizó el maíz azul que se utilizó durante la experimentación. Se vaciaron los granos en la mesa de trabajo y se empezaron a clasificar respecto a su tamaño y granos agrietados/materia extraña. Se pesaron estos grupos en una balanza analítica y se sacó el porcentaje de muestra de cada clasificación respecto al total pesado. Considerando los resultados, se trabajó con el grano más homogéneo en tamaño. Se tomó 30 muestras del grano elegido para medir sus dimensiones con ayuda de un vernier.

2.3.2 Humedad del grano

El grano al inicio y posterior al freído se trituró con ayuda de un mortero para facilitar la eliminación de agua, se cuantificó la humedad por medio de una termobalanza de la marca OHAUS, modelo MB45, hecho en Suiza (Figura 14).

La humedad es tomada como la pérdida de peso al secado, el cual emplea una balanza de torsión sensible para pesar la muestra y una lámpara infrarroja para secar (NMX-F-428-1982, 1982). Funciona sobre el principio termogravimétrico: El analizador de humedad mide el peso inicial de la muestra, posteriormente la muestra se calienta rápidamente por medio de una unidad halógena desecadora y la humedad se evapora. Durante la operación se mide continuamente el peso de la muestra presentado finalmente como % de contenido de humedad final, % sólidos, peso (OHAUS, 2001).



Figura 14. Termobalanza, marca OHAUS, modelo MB45 para la determinación de humedad.

Se le determinó humedad, con ayuda de la termobalanza, con un peso de muestra de 2.5 g, con un programa de desecación rápida, una temperatura de desecación 105°C y un criterio de terminación A60.

El criterio de terminación A60, reconoce el final del proceso. Si la pérdida de humedad es menor a 1 mg en 60 s la desecación se detiene y el equipo presenta un resultado final (OHAUS, 2001).

2.3.3 Determinación de color

Se determinaron los parámetros de color L, a, b del grano de maíz azul de la materia prima al inicio y al final de la elaboración de botana para observar la degradación de color durante el proceso de fritura. Se usó un colorímetro de marca Minolta modelo CR300, (Figura 15).

Una lámpara de pulsos de xenón en una cámara de mezclado proporciona iluminación en la superficie de la muestra. Seis fotoceldas de silicón altamente sensibles, para igualar la respuesta del observador estándar CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), son usadas para el sistema de retroalimentación de doble haz para medir tanto la luz incidente como la reflejada, reportando parámetros de los diferentes espacios de color (Casas, 2012a).



Figura 15. Colorímetro Minolta CR300 para la determinación de parámetros L, a, b.

Un espacio de color es una fórmula matemática abstracta que describe cómo se representan los colores. Para ello, se basa en tuplas numéricas, es decir, objetos matemáticos que tienen estructura y son capaces de ser descompuestos, este espacio compuesto normalmente por tres o cuatro valores o componentes de color. Para mejorar la representación del color, la CIE desarrolló en 1976 un espacio de color L, a, b, (Figura 16). Es el modelo de color más completo. Se usa habitualmente para describir todos los colores que puede ver el ojo humano. Las diferencias de color que se perciben como iguales en este espacio de color tridimensional, tienen distancias iguales entre ellas (LACIE, 2012).

Podemos identificar cada color de forma precisa mediante sus valores “a” y “b” y su brillo (“L”). Los tres parámetros del modelo representan la luminosidad (L) la cual tiene un intervalo de valores de cero a cien, donde el primer valor representa el negro y el mayor el blanco; el parámetro “a” es un eje donde se encuentran en sus extremos el color rojo con valores positivos y el verde con valores negativos; el parámetro “b” de igual forma es otro eje que tiene en sus extremos el color amarillo con valores positivos y el azul con valores (LACIE, 2012).

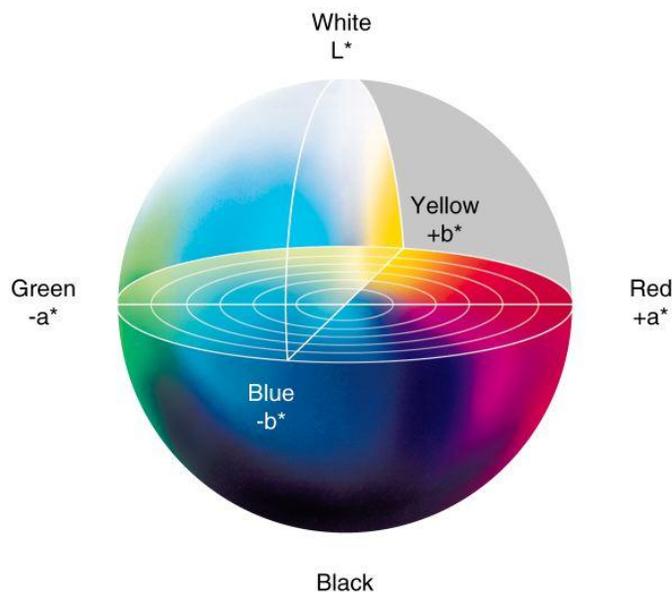


Figura 16. Espacio de color para ubicar los parámetros L, a, b.

Delta E es la diferencia de color y representa la distancia entre dos colores en el espacio L,a,b; la evaluación de diferencias de color puede considerarse uno de los campos clásicos de la colorimetría sobre el que se han producido importantes avances en la última década. En numerosas aplicaciones actuales de la colorimetría (reproducción de color, restauración de bienes culturales, medición de color de alimentos, etc.) se recurre a la evaluación de diferencias de color. Éste es el resultado de una operación matemática más o menos compleja que partiendo de los valores triestímulo de cada uno de los parámetros de color L, a, b; nos da un número

positivo que representa el grado de diferencia entre el color modelo o la referencia y el color que se quiere igualar o comparar (López y Caivano, 2004)

La medición de color en los maíces pigmentados se ve afectada por la forma en la cual se presentan los granos al colorímetro para tomar la lectura. En maíces de grano azul/morado, Salinas y col. (2013), observaron que los datos obtenidos (L, a, b) no guardaron relación con el color que se apreciaba visualmente, lo que se atribuyó a que los granos no tienen una coloración uniforme en la superficie. Por ello, en este tipo de maíces la lectura de color debe tomarse en la mazorca. Si no se cuenta con mazorcas, es necesario montar el grano sobre una superficie de plastilina gris para simular la forma en que se encuentra en la mazorca. En este trabajo la medición de color se hizo sobre la superficie de una muestra de 30 g de grano montada en plastilina gris, que de acuerdo con resultados no publicados del Laboratorio de Maíz del INIFAP, es lo recomendado (Salinas y col., 2013).

2.3.4 Densidad

- **Densidad real:** Se determinó la densidad real de los granos de maíz a partir de dos probetas graduadas de 100 ml y etanol al 70%. Para esta prueba se usaron granos enteros, se determinó el peso de una probeta de 100 ml y posteriormente se llenó de granos de maíz hasta la marca de 100 ml, se agitó la probeta suavemente para acomodarlos y añadir más granos si es necesario, se pesó de nuevo la probeta y se restó el peso de la probeta vacía para obtener el peso de los granos enteros, de igual manera se midieron 100 ml de etanol al 70% en la segunda probeta, se vertió lentamente el etanol en la probeta que contiene los granos enteros, hasta la marca de 100 ml (esto debe cubrir todos los granos), se agitó la probeta suavemente para eliminar las burbujas de aire atrapadas y se volvió a llenar a la marca de 100 ml, se midió el volumen del etanol de la segunda probeta (Figura 17), este es el volumen real del maíz; se dividió el peso obtenido del maíz entre el volumen

real, determinando así la densidad real de los granos enteros de maíz (TSFA, s.f.).

- **Densidad aparente:** Se determinó la densidad aparente de los granos de maíz a partir de una probeta graduada de 100 ml. Se pesó una probeta de 100 ml en una balanza analítica, se llenó la probeta con granos de maíz azul sin ningún tratamiento o freídos hasta un volumen definido, por diferencia de pesos se saca el peso de los maíces que ocupa el volumen establecido, de las unidades actuales (g/ml) se convirtieron a kg/m^3 .



Figura 17. Determinación de densidad de maíz azul.

- **Peso hectolítrico:** Se determinó el peso hectolítrico de los granos de maíz a partir de una probeta graduada de 100 ml. Se pone una probeta de 100 ml en una balanza analítica, se llena la probeta hasta un volumen establecido con granos de maíz azul sin ningún tratamiento o ya freídos, por diferencia de pesos se saca el peso real de los maíces, las unidades actuales (g/ml) se convierten a unidades de kg/hL.

2.3.5 Peso de cien granos

El peso de cien granos (PCG) es un indicador del tamaño del grano, este valor está relacionado con los rendimientos en la producción en las industrias de transformación. Se contabilizan 100 granos de maíz al azar y se pesan, este valor está expresado en gramos (Othón, 2001).

2.3.6 Textura

Para las pruebas de dureza del grano de maíz azul y para la prueba de fractura por compresión del maíz después del remojo y la botana se usó una máquina universal de deformación marca Stable Microsystem, modelo TA-XT2 (Figura 18).



Figura 18. Máquina universal de deformación Stable Microsystem TAxT2.

Las máquinas universales de deformación son instrumentos computarizados que pueden medir y/o controlar fuerza (f), distancia (d) y tiempo (t), operan bajo compresión o tensión. La deformación o aplicación de fuerza se puede efectuar a

velocidades controladas. Arrojando como resultado curvas F-t, F-d, d-t, de las cuales se pueden extraer varios parámetros texturales (Casas, 2012b).

Se realizaron pruebas de punción a 15 granos fritos de cada corrida experimental para determinar dureza y características de fractura, se usó un cilindro de acero inoxidable de 3 mm de diámetro, con una velocidad de 2 mm/s y una distancia de penetración de 1.5 mm, de la curva fuerza-distancia (Figura 19), se calculó la fuerza de fractura representada como la fuerza máxima, distancia de fractura, el carácter crujiente como la pendiente inicial y el trabajo de fractura como el área bajo la curva desde el inicio de ésta hasta la fuerza máxima (Casas, 2012b).

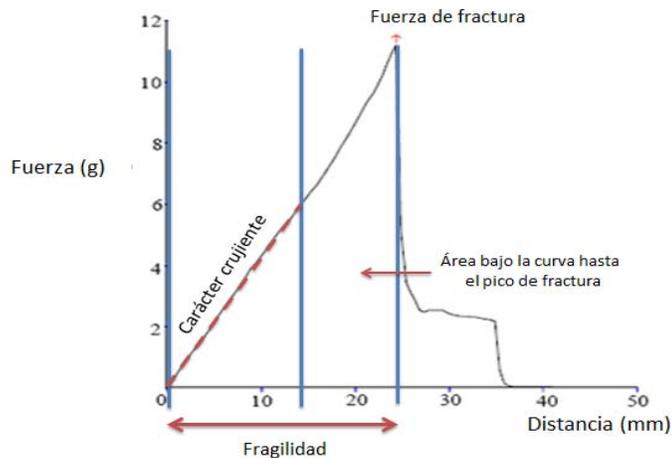


Figura 19. Gráfico fuerza-distancia para determinar parámetros texturales en maíz crudo y botana frita de maíz azul.

A los granos de maíz después del remojo también se les hizo pruebas de punción a 15 granos de cada temperatura de remojo (60, 70, 80 °C), a cada tiempo utilizado (5, 10, 15 h). Para dicha prueba se usó un cilindro de acero inoxidable de 3 mm de diámetro, con una velocidad de 2 mm/s y una distancia de penetración de 3 mm. De la curva fuerza-distancia (Figura 20), se calculó la resistencia a la penetración representada como la pendiente inicial, fuerza de cedencia como la fuerza donde cambia de dirección de la pendiente, distancia de cedencia como la distancia donde cambia de dirección de la pendiente, fuerza de ruptura como la fuerza máxima,

distancia de ruptura como la distancia de la fuerza máxima y trabajo de penetración como el área bajo la curva desde el inicio de ésta hasta la fuerza máxima.

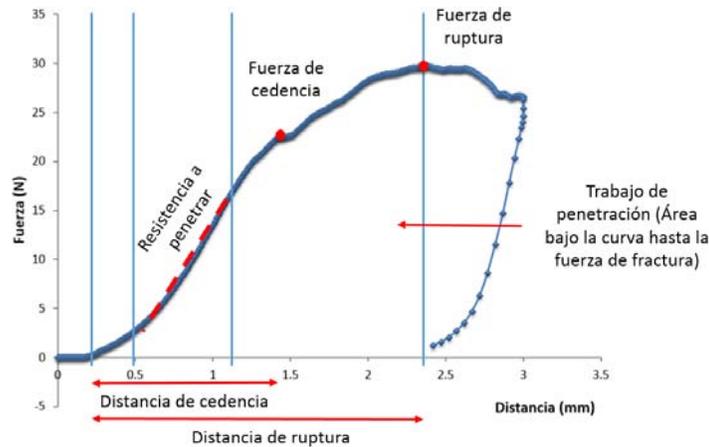


Figura 20. Gráfico fuerza-distancia para determinar parámetros texturales en maíces después del remojo.

2.3.7 Cinéticas de absorción de agua

Con la finalidad de seleccionar tres temperaturas para el diseño Taguchi y conocer las cinéticas de absorción de agua, se hicieron cinco pruebas de rehidratación del grano de maíz azul a temperaturas de 30, 45, 60, 70 y 80°C. Se pesaron los recipientes que contenían las muestras de maíz de forma individual con una balanza analítica, posteriormente se le agregaron 25 g de maíz a cada recipiente, se sumaron los pesos recipiente-maíz, éstos se sometieron a un primer remojo en un baño María marca Brookfield, modelo Ex-200, con una solución de hidróxido de sodio a concentración de 0.5% y una relación solución:maíz de 5:1 p/p a una temperatura de 60 °C por 7 minutos, después se enjuagó el maíz hasta la eliminación de la reacción alcalina, se remojó por segunda vez en agua purificada cumpliendo con una relación 5:1p/p, durante 10 horas; en cada hora el recipiente se sacó del baño María, se escurrió el maíz por 5 minutos y se pesó para calcular la cantidad de agua absorbida por el grano, destacando que el agua escurrida se regresó al baño María para no modificar la relación agua-maíz. Finalmente con los resultados obtenidos y a través de balances de materia se determinó el porcentaje de absorción de agua.

El balance de materia se considera como una contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen, se acumulan o se agotan, en el curso de un intervalo de tiempo de operación dado; es una expresión de la ley de la conservación de la masa, teniendo en cuenta aquellos términos (Ragatz, 2006). En la Figura 21 se muestra el balance de materia para determinar la cantidad de agua absorbida al igual que el porcentaje que representa en el maíz frito final durante el remojo.

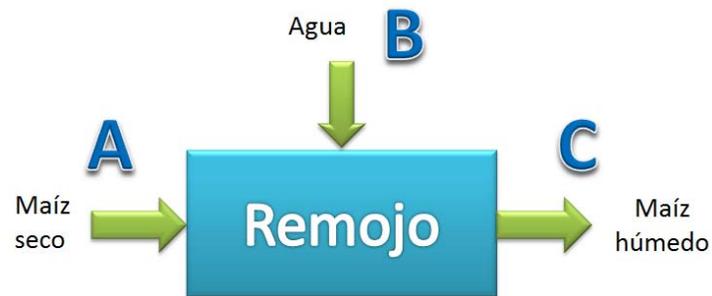


Figura 21. Balance de materia para determinar el porcentaje de agua absorbida por el grano durante el remojo.

Partiendo de la humedad inicial del maíz y el agua absorbida durante cada hora se pudo hacer una relación de kg de agua sobre kg de sólidos secos a lo largo del tiempo de remojo, construyendo una curva la cual describe el proceso de absorción de agua del maíz a cada temperatura.

2.3.7.1 Ajuste al modelo de la potencia

Teniendo la tendencia de la curva de cinética de absorción de agua se prosiguió a ajustarlo al modelo de la potencia (Ecuación 1), el cual nos permita predecir la humedad que contenga el maíz azul a cualquier tiempo. Éste modelo será interpretado como la relación kg agua sobre kg sólidos secos es igual a una constante que significa la capacidad de absorción de agua en 1 hora (kp), multiplicado por el tiempo en horas (t) y elevado a un exponente que significa la dependencia de la absorción de agua con el tiempo (n).

$$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg SS}} = kp t^n \quad (1)$$

2.3.7.2 Ajuste al modelo de Peleg

Otra forma de estudiar las cinéticas de absorción de agua, es la utilización de varios modelos, entre ellos, el modelo empírico de Peleg, el modelo probabilístico de Weibull y el modelo difusional que utiliza la segunda ley de Fick que muestran la transferencia de materia (agua) ocurrida en el proceso de rehidratación (Vázquez y col., 2007).

Dentro de las más utilizadas está el modelo empírico de Peleg, ecuación que ha demostrado que simula correctamente el proceso, además de describir ciertos mecanismos y variables existentes durante el mismo. En la mayoría de los estudios realizados sobre la hidratación de los alimentos, el modelo de Peleg es uno de los más usados por presentar parámetros de importancia para la optimización de los procesos (Vázquez y col., 2007), éste modelo se muestra a continuación:

$$X = X_o \pm \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (2)$$

Donde X es el contenido de humedad en un determinado tiempo (kg agua/kg sólidos secos), X_o es el contenido de humedad inicial (kg agua/kg sólidos secos), t es el tiempo (h), K_1 es la constante de velocidad de Peleg (h kg ss/kg H₂O), y K_2 es la constante de capacidad de Peleg (kg ss/ kg H₂O). En la ecuación dos, “±” llega a ser “+” si el proceso es absorción o adsorción, y “-” si el proceso es secado o desorción (Valencia y Torres, 2011).

Las curvas de absorción se modelaron a partir de la ecuación de Peleg con una configuración lineal, considerando el cociente a el tiempo sobre la diferencia de humedades como “y”, la constante k_2 como la pendiente “m”, el tiempo t como “x” y

la constante k_1 como la ordenada al origen “b”, esta configuración se muestra en la ecuación siguiente:

$$\frac{t}{x-x_0} = k_2 t + k_1 \quad (3)$$

Los valores que representan los términos “x” y “y” se fueron modificando respecto a los intervalos de tiempo que se tomaron durante el remojo. Teniendo todos los valores de “x” y “y” a los diferentes tiempos tomados, se graficó y se hizo una regresión lineal para determinar las constantes k_1 y k_2 . La constante k_1 resulta inversamente proporcional a la velocidad inicial de hidratación y la constante k_2 resulta inversamente relacionada a la humedad de equilibrio o humedad de saturación (Pantuso y col., 2007). Este método se aplicó a las diferentes temperaturas de remojo utilizadas.

2.3.8 Elaboración de la botana de maíz azul

Los granos de maíz azul se sometieron a un primer remojo en un baño María marca Brookfield, modelo Ex-200, con una solución de hidróxido de sodio a concentración de 0.5% con una relación solución:maíz, 5:1 p/p a una temperatura de 60°C por 7 minutos, después se enjuagó el maíz hasta la eliminación de la reacción alcalina, se remojó por segunda vez en agua purificada con una relación agua:maíz, 5:1 p/p a una temperatura y tiempo establecido según el objetivo a realizar, se escurrió con ayuda de un colador durante 5 minutos para eliminar el exceso de agua en el grano, posteriormente se eliminó el pericarpio de forma manual. Se prosiguió a la fritura del maíz azul con una freidora marca TURMIX modelo FT-2, con aceite vegetal de canola con una relación aceite-maíz de 40:1 a una temperatura y tiempo establecido según la corrida a realizar del diseño estadístico Taguchi, se dejó escurrir el exceso de aceite, colocando los granos fritos sobre papel absorbente, posteriormente la botana se depositó en una bolsa hermética que contenía el condimento y se sometió a una agitación manual por 2 minutos, se extrajeron las botanas de la bolsa, se

vertieron en un colador para eliminar el condimento que no se adhirió a la fritura. Finalmente se vertieron en bolsas de plástico hermético etiquetadas. En la Figura 22 se muestra el proceso a seguir para la elaboración de la botana frita de maíz.



Figura 22. Diagrama de proceso de la elaboración de botana frita de maíz azul de grano entero.

2.3.8.1 Elaboración de la botana de maíz con congelación previa al freído

Se seleccionó una corrida del estadístico Taguchi con base al contenido de humedad teórica que debe de tener un grano de maíz frito (cercano a 1.3%) y en las propiedades de textura, procurando que no sea la botana muy dura, que sea frágil y crujiente, se seguirán las mismas condiciones, sin embargo, se le adicionó posterior al remojo una congelación rápida usando un túnel de congelación con aire marca Loheat Quality Heating Equipment, modelo LDH5/40-25, a -20°C durante 15 minutos.

2.3.9 Porcentaje de absorción de aceite

Para determinar el porcentaje de absorción de aceite, inicialmente se deben de tener los datos de la masa del maíz después del remojo, del freído y la fracción de humedad de éstas; con estos datos se hará un balance parcial en función del contenido de agua basándonos en la Figura 23, que refleja que durante el freído el agua que contiene el maíz se evapora y parte del aceite penetra el maíz.

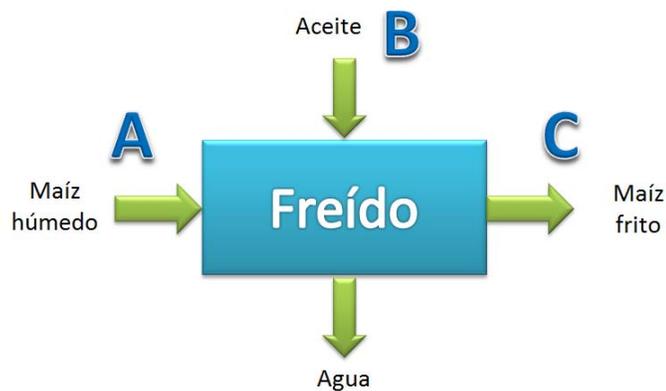


Figura 23. Balance de materia para determinar el porcentaje de absorción de aceite.

Inicialmente se hizo una corrección de la humedad del grano, debido a que en el proceso de pelado, se separa el pericarpio, lo que significa masa y de manera implícita sólidos secos y humedad. Se determinó la humedad del pericarpio en corridas aleatorias concluyendo que su estructura no absorbe agua, lo cual mantuvo

el porcentaje de humedad constante (X_p). Posteriormente se restó la masa del maíz pelado (A) a la masa del maíz sin pelar (A_o) para obtener el peso del pericarpio (P), mostrado en la ecuación cuatro.

$$P = A_o - A \quad (4)$$

Para obtener la fracción corregida de humedad del maíz sin pericarpio (X_a), se restó la masa de la humedad del pericarpio ($P X_p$), a la masa de la humedad del maíz sin pelar ($A_o X_{A_o}$) y se dividió sobre la masa total del maíz sin pericarpio (A), como se indica en la ecuación cinco.

$$X_a = \frac{(A_o X_{A_o}) - (P X_p)}{A} \quad (5)$$

En la ecuación seis se muestra el balance general, que describe el proceso de absorción de aceite en la operación de freído, de éste se partió para obtener la masa del agua evaporada, así como el aceite adquirido en la fritura.

$$A + B = C + D \quad (6)$$

El balance parcial en función del contenido de humedad se describe en la ecuación siete, donde se presenta la masa del maíz antes del freído y su fracción de agua ($A X_a$), la masa del maíz frito y su fracción de agua ($C X_c$), el aceite absorbido (B) no aparece en ella pues no contiene fracción de agua y en el caso del agua evaporada (D) su fracción es la unidad, ésta se despejó (ecuación 8) para obtener su valor.

$$A Xa - D = C Xc \quad (7)$$

$$D = A Xa - C Xc \quad (8)$$

Teniendo todos los valores de la ecuación doce, por medio de un balance general se pudo calcular la masa de aceite absorbido durante el freído (B), como se describe en la ecuación nueve.

$$B = C - A + D \quad (9)$$

Para concluir se determinó el porcentaje de absorción de aceite en el maíz, con ayuda de la masa total del maíz frito que representa el cien porciento, como se muestra en la ecuación diez.

$$\% \text{ Absorción de aceite} = \frac{(B*100)}{c} \quad (10)$$

2.3.10 Retención de condimento

Para calcular la retención de condimento en la botana de maíz, los granos fritos se pesaron con una balanza analítica y a continuación se depositaron en una bolsa hermética que contenía el condimento (25 g) y se sometieron a una agitación manual por 2 minutos, se extrajeron las botanas de la bolsa, se vertieron en un colador para eliminar el condimento que no se adhirió a la fritura, se volvieron a pesar y se sacó la diferencia de pesos para determinar el peso de condimento que retuvo la botana. Finalmente se relaciona por medio de un cociente el condimento adherido (A) y el peso total maíz frito-condimento (B) y se multiplica por cien para transformarlo en porcentaje, como se muestra en la ecuación once.

$$\% \text{ Retención de condimento} = \frac{A*100}{B} \quad (11)$$

2.4 Tabla de variables

En el Cuadro 6 se muestra las variables independientes que se modificaron para que nos arrojen un resultado en las variables de respuesta durante la experimentación así como las técnicas e instrumentos a utilizar.

Cuadro 6. Identificación de variables conforme a los objetivos.

V. Independiente	Niveles variación	V. Dependiente	V. Respuesta
Objetivo Particular 1 Temperatura de remojo (°C)	30, 45, 60, 70, 80	Aumento de peso al remojo, en función del tiempo Ajuste a los modelos potencia y Peleg	Parámetros de cinéticas de absorción de los modelos Potencial y Peleg
Objetivo Particular 2 Remojo <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo (h) • Temperatura (°C) Freído <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo (min) • Temperatura (°C) 	Diseño Taguchi L18 (2 ¹ 3 ³) 5, 10, 15 60, 70, 80 4, 5, 6 170, 180	Pérdida de peso al secado Luz reflejada Masa Volumen Grafico fuerza-distancia Peso contenido de humedad antes y después	% Humedad L, a, b Densidad aparente Dureza Distancia de fractura Carácter Crujiente Trabajo de fractura % Absorción de aceite
Objetivo Particular 3 Elección condiciones del estadístico Taguchi O.P.2 y comparar el efecto de congelación previa al freído	Sin congelación, con congelación	Aumento de peso por retención de condimento	% Retención de condimento

2.5 Diseño experimental

Un experimento se define como el cambio intencional en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades. Los factores de entrada son variables cuantitativas, los diferentes estados que pueden tener se llaman niveles (Fernández y Hoyos, 2011).

El sistema de ingeniería de calidad del Dr. Genichi Taguchi, es uno de los más grandes logros en ingeniería del siglo XX. Un diseño de Taguchi, o arreglo ortogonal, es un método para diseñar experimentos que usualmente requieren sólo una fracción de las combinaciones factoriales completas. Un arreglo ortogonal significa que el diseño está balanceado, de manera que los niveles de factores se ponderan equitativamente. Por ello, cada factor puede ser evaluado de manera independiente de todos los demás factores, de manera que el efecto de un factor no ejerce influencia en la estimación de otro factor. El método del Dr. Taguchi para el diseño de experimentos utiliza técnicas que implican bajos costos y que son aplicables a los problemas y requerimientos de la industria moderna. El propósito que se tiene en el diseño del producto es encontrar aquella combinación de factores que proporcione el desempeño más estable y confiable al precio de manufactura más bajo. Para Taguchi, es posible incorporar la calidad en los productos desde su diseño, no en la fábrica. Según esta perspectiva, es necesario diseñar productos robustos que toleren variaciones en el proceso de producción. Un producto es robusto cuando se comporta bien aún en condiciones no controlables conocidas como “ruido” (Rodríguez, 2007).

En el diseño de parámetro robusto, primero se eligen los factores de control y sus niveles, y un arreglo ortogonal apropiado para estos factores de control. Los factores de control constituyen el arreglo interno. Al mismo tiempo, se puede determinar un arreglo de factores de ruido. Los factores de ruido constituyen el arreglo externo (Rodríguez, 2007).

El análisis del arreglo ortogonal de Taguchi es usado para producir los mejores parámetros para el diseño óptimo del proceso, con el mínimo número de experimentos (pruebas). Los resultados obtenidos para los arreglos ortogonales son analizados con los siguientes objetivos (Dolores, 2005):

A) Estimar la contribución de los factores individuales que influyen en la calidad en la etapa del diseño del producto.

B) Obtener la mejor condición para un proceso o un producto, de manera que las características de una buena calidad puedan ser sostenidas.

Taguchi presenta tres etapas en el diseño de un producto o de un proceso:

1. Diseño del sistema,
2. Diseño de los parámetros y
3. Diseño de las tolerancias.

En el diseño del sistema se determina la configuración básica de los componentes. En el diseño de los parámetros, se determinan los niveles o valores de los factores controlables (parámetros de diseño), para minimizar el efecto de los factores incontrolables en las características del producto terminado. Finalmente, el diseño de las tolerancias apunta a reducir la varianza en las características del producto terminado cuando la reducción lograda en el diseño de los parámetros no es suficiente. El diseño experimental debería aplicarse fundamentalmente al diseño de los parámetros y al diseño de las tolerancias (Dolores, 2005).

Para el estudio de los factores que afectan a un producto o proceso, Taguchi se basa en un conjunto pequeño de matrices del diseño; utiliza los valores 1 y 2 para denotar los niveles bajo y alto, puesto que considera la posibilidad de más de dos niveles en cada factor. Este diseño reduce el número de filas de la matriz mediante identificación de factores principales y de factores de interacción, esto permite una mayor viabilidad del estudio de tratamientos (Dolores, 2005).

Para los diseños Taguchi se utiliza una nomenclatura especial: La letra L se utiliza para indicar que se trata de un diseño ortogonal. Se acompaña de un subíndice que indica el número de corridas; entre paréntesis se anotan los niveles que tomará cada factor y éste se eleva a un número que corresponde a los factores a estudiar (Rodríguez, 2007). Por ejemplo:

- $L_4(2)^3$ es un diseño de 3 factores con dos niveles cada uno que se realiza con cuatro corridas.
- $L_9(3)^4$ es un diseño de 4 factores con tres niveles cada uno que se realiza con 9 corridas experimentales.
- $L_{18}(2^1 * 3^3)$ es un diseño de un factor con dos niveles, tres factores con tres niveles y con 18 corridas.

Taguchi proporciona un conjunto pequeño de diseños que permiten abordar un número relativamente alto de experimentos en ingeniería. Los diseños con dos niveles por cada factor son L_4 , L_8 , L_{12} , L_{16} , L_{32} y L_{64} ; y los diseños con 3 niveles incluyen L_9 , L_{18} , L_{27} y L_{64} . Se pueden inclusive utilizar diseños mixtos, en los que los factores pueden tener diferentes niveles, por ejemplo $L_{18}(2^1 * 3^7)$, que se refiere a un experimento con 18 corridas en el cual se tiene un factor con dos niveles y 7 factores con 3 niveles (Dolores, 2005).

Los diseños Taguchi permiten investigar interacciones entre factores. Existe una interacción cuando el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentre otro factor. Para facilitar la asignación de los factores y las interacciones a un diseño ortogonal se recurre a las gráficas lineales en las que los factores se representan con puntos y las líneas que unen los puntos entre dos factores representan las interacciones. Los números representan las columnas del arreglo ortogonal, incluyendo las interacciones aun cuando estas no se corren experimentalmente. Si una interacción se considera irrelevante se puede asignar un factor al segmento de la línea correspondiente (Rodríguez, 2007). La Figura 24 muestra un ejemplo de una gráfica lineal de tres factores (1, 2, 4) con interacción entre 1 y 2 (segmento 3).

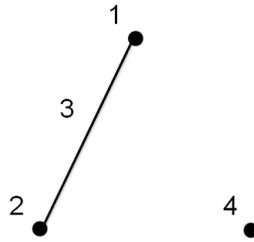


Figura 24. Gráfico lineal para un diseño de tres factores con una sola interacción.

Para el objetivo 2 de este trabajo, se definió un diseño experimental Taguchi L_{18} de niveles mixtos ($2^1 \cdot 3^3$). Los factores de estudio fueron: temperatura de freído con dos niveles (2^1); temperatura y tiempo de remojo y tiempo de freído con tres niveles (3^3) (Cuadro 7). Esta matriz cuenta con un diseño especial, presentando una columna con dos niveles y tres columnas a tres niveles, recomendable, cuando se quieren investigar efectos principales puros, por lo que no se consideraron interacciones (Dolores, 2005). La gráfica lineal para este diseño se muestra en la Figura 25.

Cuadro 7. Ejemplo de un arreglo ortogonal del diseño estadístico Taguchi de niveles mixtos L_{18} ($2^1 \cdot 3^3$).

Corrida	Factores			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	2	1	3
4	1	2	2	2
5	1	3	2	1
6	1	3	2	3
7	2	1	2	1
8	2	1	2	3
9	2	2	1	1
10	2	2	1	2
11	2	3	1	3
12	2	3	2	2
13	3	1	1	3
14	3	1	2	2
15	3	2	2	1
16	3	2	2	3
17	3	3	1	1
18	3	3	1	2

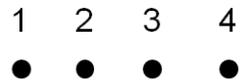


Figura 25. Gráfico lineal para el diseño de cuatro factores sin interacciones.

Debido a que en este proyecto se controlarán y variarán las señales de tiempo y temperatura de remojo y de freído se podrá identificar cuáles de ellas tiene un impacto en las propiedades físicas y texturales del producto final sin ser necesario el interactuar con otros factores. Por esta razón el estadístico Taguchi es el que se ajusta a las necesidades de esta investigación.

III. Resultados

3.1 Actividades preliminares

3.1.1 Selección del grano de maíz azul

El lote de maíz era relativamente heterogéneo, se clasificó con la finalidad de trabajar con un lote más uniforme, esto se realizó de manera manual-visual (Figura 26), en cuatro categorías y se cuantificó el porcentaje de cada una en cuanto al tamaño, presentando granos mayores a 22 mm, de 20 a 22 mm, de 16 a 19 mm y menores a 16 mm, éstos son presentados en el Cuadro 8.



Figura 26. Diferencias de tamaño en el lote de maíz utilizado. Menores a 16 mm (1); De 16 a 19 mm (2); De 20 a 22 mm (3); Mayores a 22 mm (4).

Cuadro 8. Clasificación del maíz respecto a su tamaño y forma.

	Peso (g)	%
De 16 a 19 mm	2124.0	61.0
De 20 a 22 mm	563.0	16.2
Menor a 16 mm	290.5	8.3
Mayor a 22 mm	286.5	8.2
Rotos/dañados	217.8	6.3
TOTAL	3481.8	100

Al trabajar con un lote con menor variación de tamaño se disminuye la diferencia en los resultados de cada corrida, ya que un maíz puede afectar al contar con mayor o menor volumen/peso, como es el caso de la hidratación o en la textura. Por ello se eligió trabajar con el maíz de 16 a 19 y de 20 a 22 mm (Figura 27), ya que juntos

representan el 77% del total, de los cuales se les midieron las dimensiones a 30 granos aleatoriamente de cada uno y se calculó el promedio y el coeficiente de variación en porcentaje. Los resultados se muestran en el Cuadro 9, donde en los dos casos el grosor es el que tiene mayor variación.



Figura 27. Maíces de tamaño promedio (a) y alargados (b).

Cuadro 9. Dimensiones de los granos de maíz empleados en el desarrollo experimental.

		Promedio	CV (%)
De 16 a 19 (mm)	Largo	18.1	9
	Ancho	8.9	7
	Grosor	4.9	14
De 20 a 22 (mm)	Largo	20.4	7
	Ancho	8.4	10
	Grosor	4.4	12

3.1.2 Caracterización del grano del maíz azul

Estas dos clasificaciones se mezclaron, se les determinó la densidad real, peso hectolítrico y peso de cien granos (PCG), con cinco repeticiones de cada prueba para determinar el coeficiente de variación. El Cuadro 10 muestra los resultados de las propiedades físicas, los datos son confiables pues los coeficientes de variación están por debajo del 4%. Con base en los resultados y lo reportado por Salinas y col. (2010) (Cuadro 4, página 19) se puede decir que es un grano muy suave debido a la

estructura harinosa que tienen, reflejada en el valor bajo del peso hectolítrico, caracterizados por absorber gran cantidad de agua durante el cocimiento y reposo.

Cuadro 10. Densidad real, peso hectolítrico, peso de cien granos y humedad del maíz azul empleado en la experimentación.

	Densidad real (kg/m ³)	Peso hectolítrico (kg/hL)	Peso de cien granos (g)	Humedad (%)	Dureza (N)
Promedio	1074.1	58.5	44.5	13.72	187.7
CV (%)	2	3	2	4	37

Respecto a su humedad se determinó a cuatro muestras, donde se obtuvo que el grano está en 13.7%, con un coeficiente de variación del 4%, es un valor aceptable (en el límite) que permite el manejo, conservación y almacenamiento del maíz, pues según la NMX-FF-034 (2002) el límite máximo es del 14 %.

En cuanto a la dureza del maíz azul hecha con el texturometro se observó que es de 187.7 N, un valor alto según lo reportado por Veles (2004) que reporta una dureza de 89.3 N, sin embargo este valor está hecho con una aguja, lo cual facilita la penetración del dispositivo en el maíz dando un valor más bajo, el maíz azul del estado de México se considera harinoso y de menor dureza que los que se utilizan para botanas infladas y más suaves que los maíces para elaborar tortillas en forma comercial.

El color del grano en el espacio de color L, a, b, tiene una luminosidad (L) de 20.8, donde el intervalo de cero a cien, representa negro a blanco respectivamente, lo cual nos indica que está en la escala de grises-negro, el parámetro “a” que es la posición entre el color verde (-) y rojo (+) es de -0.5 y por último el parámetro “b” que es la posición entre el color azul (-) y amarillo (+) es de -0.2, lo cual nos indica que tienen coloraciones verdes y azules muy débiles lo que hace que se perciban visualmente casi negros. En el programa Adobe Photoshop se ingresaron valores L, a, b, para generar el color medido el cual se muestra en la Figura 28 apartado a), se observa la

posición del color elegido y la barra vertical a un lado define el grado de intensidad de L, posteriormente en b) es el color de los parámetros reales 20.8, -0.5, -0.2 (L,a,b) y finalmente en c) es la apariencia real de los granos de maíz azul, montados en plastilina gris.

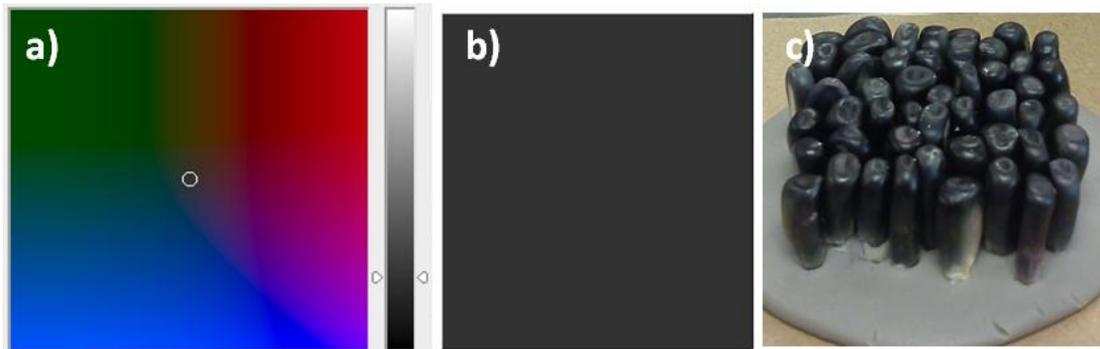


Figura 28. Color del lote de maíz azul utilizado. a) Ubicación de los parámetros L, a, b, en el espacio de color con Adobe Photoshop. b) Color generado en Adobe Photoshop c) Apariencia de los granos.

3.1.3 Establecimiento de condiciones para pruebas de textura en los granos fritos

Se hicieron pruebas de textura en maíz frito de dos marcas comerciales para poder determinar las condiciones con el cual se iban a ejecutar las pruebas, se eligió un cilindro de acero inoxidable de 3 mm de diámetro, una velocidad de prueba de 2 mm/s, una velocidad posprueba de 10 mm/s, una distancia de penetración de 1.5 mm.

Junto con la determinación de las condiciones de prueba se evaluó la textura con quince repeticiones de cada una de las dos marcas comerciales de botana frita de grano entero de maíz amarillo marcas Nutrisa (Nutri) y Queson-Chimón (QyCh); los resultados se muestran en el Cuadro 11 y gráficamente en la Figura 29. En las muestras nombradas como QyCh la dureza y carácter crujiente son mayores y por lo tanto tienen menor distancia de fractura y se necesita menor trabajo para fracturar la botana; en el caso de las muestras nombradas Nutri son ligeramente menos duras y menos frágiles pues su distancia de fractura es mayor, esto hace que el carácter crujiente se vea afectado y disminuya de la misma forma, pero al prolongarse la distancia de fractura aumenta el área del gráfico lo cual se ve reflejado en el aumento

en el trabajo de fractura. En los dos tipos de muestras los parámetros texturales obtuvieron un coeficiente de variación alto debido a la heterogeneidad natural del producto; el sonido que fue emitido durante su fractura fue limpio, fuerte y agudo, definiéndolos como “crispness” y se observó que al romperse las botanas se dividían en 2 a 3 partes.

Cuadro 11. Parámetros de textura de dos marcas comerciales de maíz frito.

	Dureza (N)	CV (%)	Distancia de fractura (mm)	CV (%)	Carácter crujiente (N/s)	CV (%)	Trabajo de fractura (N.s)	CV (%)
QyCh	45.7	30	0.41	27	249.6	19	4.6	48
Nutri	34.5	29	0.71	28	159.5	31	4.8	43

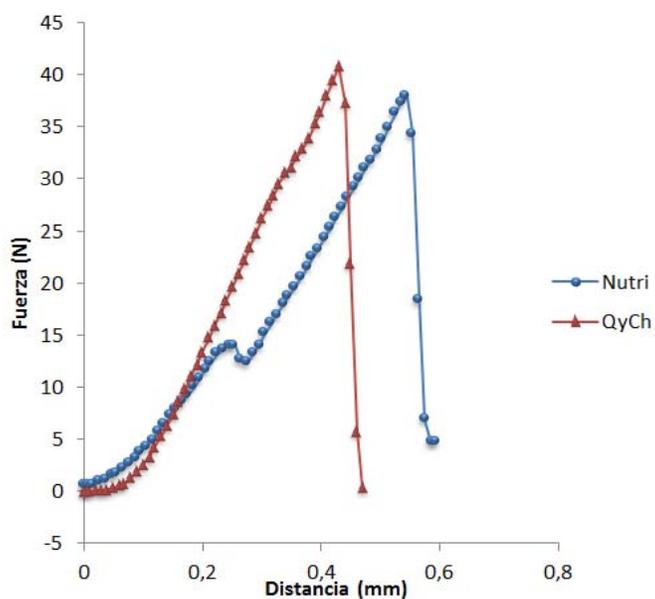


Figura 29. Gráfico representativo de la textura de las dos marcas comerciales de maíz amarillo.

3.2 Objetivo particular 1 – Cinéticas de absorción de agua

3.2.1 Cinéticas de absorción

Se evaluó la capacidad de rehidratación del grano de maíz azul con respecto al tiempo a diferentes temperaturas (30, 45, 60, 70, 80°C). Inicialmente se observó a

partir del peso de agua adquirido por cada hora en el maíz en las diferentes temperaturas la velocidad de absorción de agua respecto al tiempo a través de la elaboración de una curva que lo refleja (Figura 30), para poder observar la variación de esta velocidad durante toda la operación de remojo. Se observa que a medida que aumenta la temperatura de remojo aumenta la velocidad de absorción de agua, durante la primera hora de remojo llega a la velocidad máxima de absorción de agua y a partir de ahí va disminuyendo gradualmente a lo largo de las nueve horas restantes.

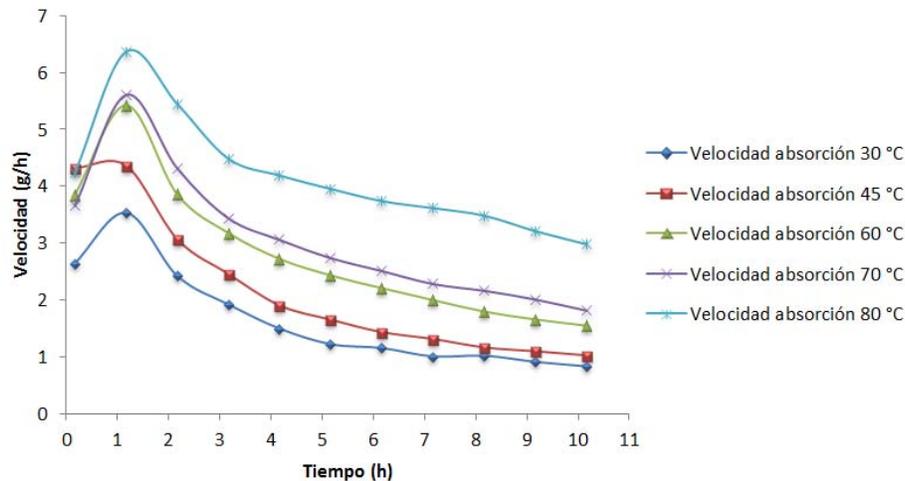


Figura 30. Gráfico de la velocidad de absorción de agua de maíz azul respecto al tiempo a diferentes temperaturas.

Posteriormente se elaboraron los gráficos de cinética de absorción (Figura 31), donde se puede observar que en los primeros 7 minutos, donde el maíz se encontró en la solución de hidróxido de sodio al 0.5% paso de tener una relación kg agua sobre kg de sólidos secos inicial de 0.15 al 0.18; debido a que una solución de hidróxido de sodio en concentración mayor o igual a 0.5% y menor al 2%, tiene una acción irritante que reacciona con tejidos vivos con los que entra en contacto y produce su rompimiento por efectos de hidrólisis, en la industria de alimentos tiene importancia en los procesos de pelado químico (MinAmbiente, 2003); por ello hace que ablande el pericarpio que rodea al maíz facilitando la absorción de agua;

posteriormente la diferencia de temperaturas hace que varíe la capacidad de captar agua en cada una de las temperaturas, concluyendo que a medida que aumenta la temperatura de remojo, el agua se absorbe más rápidamente y a las 10 horas se alcanza diferente cantidad de agua absorbida a cada temperatura, un ejemplo claro es el porcentaje de absorción a 30 °C donde se puede observar que los últimos tres puntos no hay un aumento significativo pues se mantuvo la relación de 0.54 lo cual la hace ver constante indicando que ha llegado a su capacidad máxima de absorción.

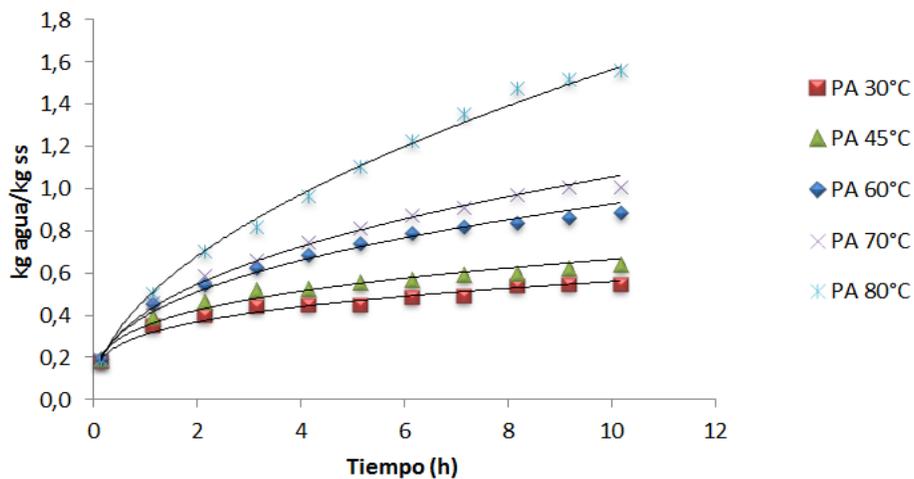


Figura 31. Gráfico de cinéticas de absorción de agua de maíz azul a diferentes temperaturas.

Las curvas de cinética de absorción de humedad se ajustaron al modelo de la potencia (Cuadro 12), a medida que se ajustaba una curva con una mayor temperatura el coeficiente de correlación (R^2) aumentaba, esto representa que el modelo de la potencia coincidía en mayor proporción a las curvas de absorción de humedad; interpretando el modelo como: el porcentaje de absorción de agua es igual a una constante (la capacidad de absorción de agua), multiplicado por el tiempo (en horas), elevado a un exponente (dependencia con el tiempo). Al aumentar la temperatura, se incrementa el valor de la constante de absorción de agua en una hora. El exponente menor de uno indica que la velocidad de absorción de agua disminuye con el tiempo y esta disminución es más notoria en bajas temperaturas.

Cuadro 12. Ajuste de las cinéticas de absorción al modelo de la potencia a las diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Modelo Potencial			Modelo de Peleg				
	kp ((kg H2O/kg ss) ⁻ⁿ)	n	R2	k2 (kg ss/kg H2O)	k1 (h kg ss/kg H2O)	R2	1/k1 (kg H2O/kg ss)	1/k2 (kg H2O/kg ss h)
30	0.31	0.26	0.98	2.17	4.85	0.97	0.206	0.460
45	0.35	0.28	0.97	1.82	3.32	0.99	0.300	0.549
60	0.39	0.37	0.99	1.08	3.21	0.99	0.312	0.923
70	0.41	0.41	1.0	0.85	3.32	0.99	0.301	1.173
80	0.47	0.52	1.0	0.38	3.29	0.96	0.303	2.577

Las curvas de cinética de absorción de humedad también se ajustaron al modelo de Peleg con una configuración lineal $t/(X-X_0) = k_2t+k_1$ (Valencia y Torres, 2011) (Figura 32), con el fin de determinar las constantes de Peleg (k_1 y k_2), a partir de la ordenada al origen se podrá obtener el parámetro cinético k_1 y de la pendiente la constante k_2 el contenido de humedad en el equilibrio.

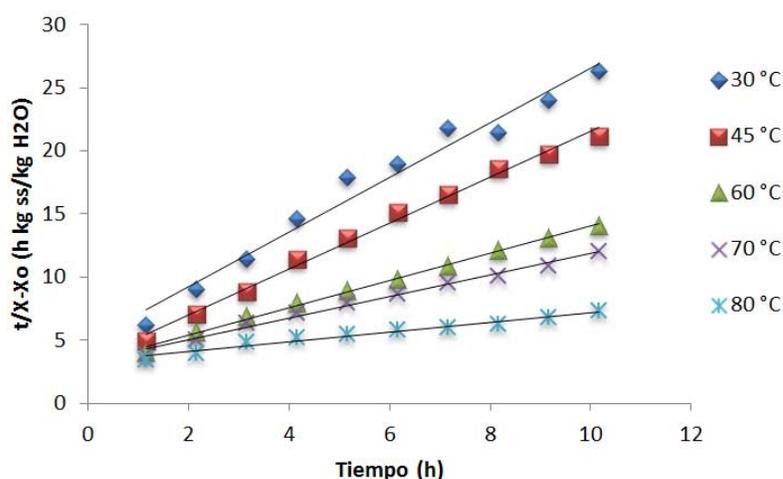


Figura 32. Aplicación del modelo de Peleg a las cinéticas de absorción a diferentes temperaturas.

En el Cuadro 12 se muestran los valores del modelo para cada temperatura de remojo donde el coeficiente de correlación (R^2) representa un buen ajuste al modelo ya que se encuentran en un intervalo de 0.96 a 0.99. Los valores de la constante k_2 disminuyen respecto al aumento de temperatura, un menor valor de dicha constante

representa mayor absorción de agua, el inverso de k_2 representa la humedad absorbida para llegar a la saturación observándose que a temperaturas de 30 y 45 °C el maíz absorbe cerca de la mitad de peso de sólidos en agua para llegar al equilibrio y a la temperatura de 80 °C necesita cerca de dos veces y medio el peso de sólidos para llegar al mismo estado. La constante k_1 , se relaciona inversamente con la velocidad de transferencia de masa, a medida que el valor de la constante es más pequeño la velocidad de transferencia es mayor, obteniendo que el incremento de la velocidad de absorción de agua va aumentando conforme aumenta la temperatura en que se desarrolla el remojo. Este mismo comportamiento se ve descrito por Sopade y col. (1991) en maíz amarillo, sin embargo los valores de saturación y de velocidad de transferencia de masa son mayores.

Se buscó la existencia de una relación entre el modelo de la potencia y el modelo de Peleg. Sólo se observó una relación lineal entre la constante K_2 del modelo de Peleg y las dos constantes del modelo de la potencia; la Figura 33 muestra la relación entre dichas constantes donde se puede observar una R^2 mayor a 0.87.

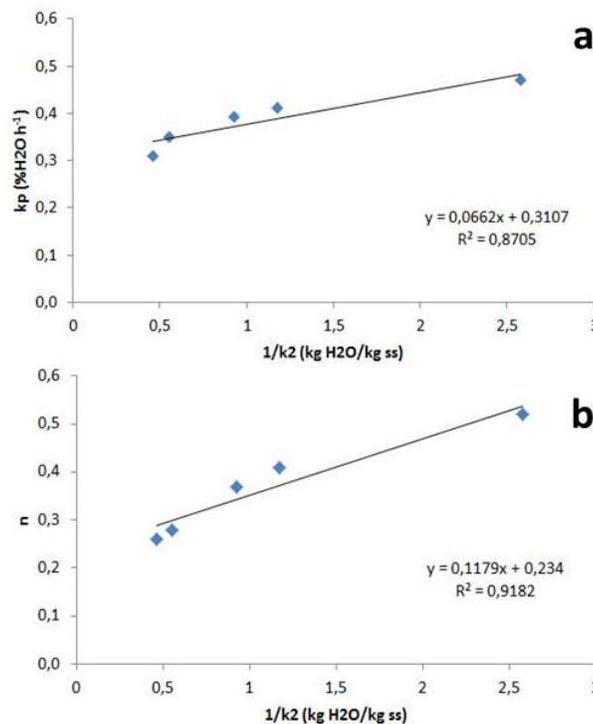


Figura 33. Relación entre el modelo de la potencia y de Peleg; a) relación k_p con k_2 ; b) relación n con k_2 .

3.2.2 Humedad después del remojo-freído y absorción de aceite después del freído

A las muestras para la elaboración de los gráficos de cinética de absorción se les determinó la humedad con la que finalizaron el remojo; cada una de las muestras se dividió en dos partes para someterlas a un freído a 170 °C por dos tiempos (5 y 7 minutos), se les determinó humedad y porcentaje de absorción de aceite a los granos fritos.

La Figura 34 muestra la relación entre la humedad final después del freído, absorción de aceite con la humedad después del remojo. En el apartado A) se muestran los resultados donde se observa que a medida que aumenta la temperatura de remojo, también aumenta la cantidad de agua dentro del grano y es más difícil la deshidratación por medio del freído; en la temperatura de 30 °C se puede apreciar que el freído de 5 minutos es suficiente para la deshidratación puesto que con 7 minutos sigue con la misma humedad. Sin embargo, al aumentar la temperatura de remojo por arriba de 30 °C, se incrementa la humedad final después del freído y la diferencia de humedad con 5 y 7 minutos de freído se vuelve más grande. En el apartado B) la absorción de aceite se incrementa al aumentar la temperatura de remojo y al aumentar el tiempo de freído, alcanzado hasta el 20% para el grano remojado a 80 °C y freído por 7 minutos.

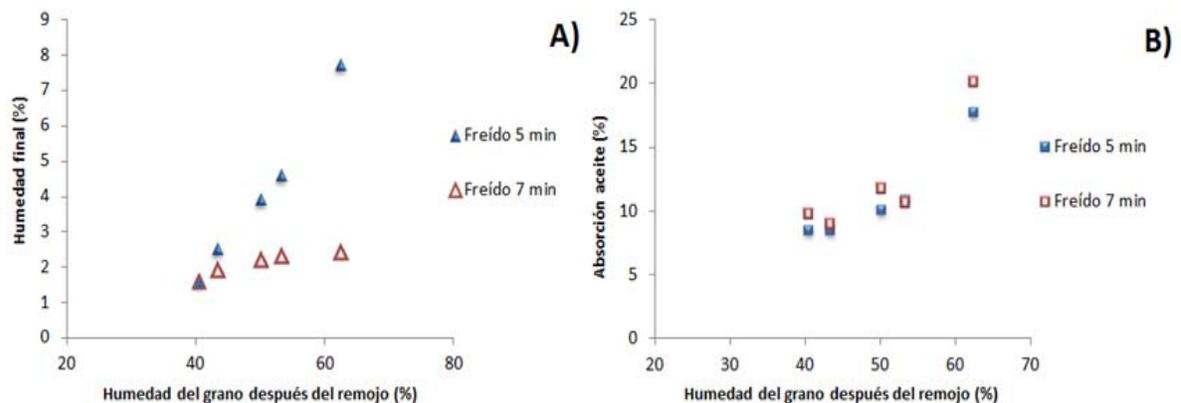


Figura 34. Comportamiento de la humedad final y absorción de aceite del maíz frito respecto a la humedad del grano después del remojo por 10 horas y diferentes tiempos de freído a 170 °C.

3.2.3 Densidad

La densidad (Cuadro 13), expresada en peso hectolítrico tiene el mismo comportamiento que la humedad final y la absorción de aceite en el maíz frito. Esto se debe a que el aumento progresivo de la cantidad de agua y de aceite en las temperaturas de remojo y tiempos de freído hacen que el valor de densidad aumente.

Cuadro 13. Peso hectolítrico de las muestras de maíz frito después del remojo por 10 horas a diferentes temperaturas y frito a 170 °C.

		30 °C	45 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Peso hectolítrico (kg/hL)	5 min	35.9	36.1	38.1	40.6	41.2
	7 min	34.5	36	36.6	37.9	37.9

3.2.4 Color y apariencia del grano

Los parámetros de color se muestran en el Cuadro 14. Después del freído, “L” disminuye ligeramente con relación al grano seco antes del proceso; “a” cambia de valores negativos muy bajos (-0.5) a valores positivos, dando tonalidades rojas y “b” cambia de valores negativos muy bajos (-0.2) a valores positivos, dando coloraciones amarillas, lo que en su conjunto los hace ver cafés rojizos debido a la degradación de las antocianinas por efecto del calor como se muestra en la Figura 35. Con 7 minutos de freído, los valores de “a” y “L” son los más bajos y los de “b” más altos con respecto a los de 5 minutos. En general los coeficientes de variación son altos debido a que el maíz crudo no tiene una coloración uniforme y después del proceso de freído se degrada en la misma proporción teniendo la misma variación de color. La diferencia de color (ΔE) con base al maíz crudo en el maíz freído por 5 minutos tuvo un aumento progresivo de 2,6 (maíz que fue remojado a 30 °C) hasta 5.3 (maíz que fue remojado a 60 °C) de ahí tuvo un descenso en este valor en las dos temperaturas de remojo siguientes; el maíz freído por 7 minutos tuvo una diferencia de color inicial de 4.8 (maíz que fue remojado a 30 °C) y tuvo un descenso a 4.2 con el mismo valor en el maíz remojado a 45 y 60 °C y de nuevo volvió a subir. De manera general el

maíz freído por 5 minutos tiene un intervalo de diferencia de color menor que los valores que tiene el maíz freído por 7 minutos. En la apariencia de las botanas fritas de maíz (Figura 35) también se observa que a medida que va aumentando la temperatura y el tiempo de remojo, al momento de freír el maíz provoca un aumento de la rugosidad visual y táctil de las botanas; las diferencias en la apariencia del maíz entre los tiempos de 5 y 7 minutos no son muy notorias, solo en el caso de las temperaturas de remojo de 70 y 80 °C donde la rugosidad es ligeramente más visible en el tiempo de freído de 7 minutos.

Cuadro 14. Parámetros L, a, b, del maíz frito sometido a remojo por 10 horas antes del freído.

Tiempo de freído (min)	Temperatura de remojo (°C)	L	CV (%)	a	CV (%)	b	CV (%)	ΔE_{-1976}	CV (%)
Maíz crudo		20.8	4	-0.5	69	-0.2	50	—	—
5	30	18.8	5	0.8	153	-0.2	5	2.6	38
	45	18.6	6	3.3	87	0.6	78	4.7	47
	60	20.0	9	4.7	10	1.9	46	5.3	12
	70	20.3	6	2.4	26	0.5	90	3.2	19
	80	19.6	7	2.6	30	1.0	39	3.7	15
7	30	16.9	18	0.7	111	0.3	105	4.8	34
	45	17.4	6	1.8	36	0.3	70	4.2	16
	60	19.0	5	3.0	19	0.9	22	4.2	5
	70	19.1	5	3.6	39	1.6	65	4.8	37
	80	18.9	2	2.3	21	1.6	19	3.9	10

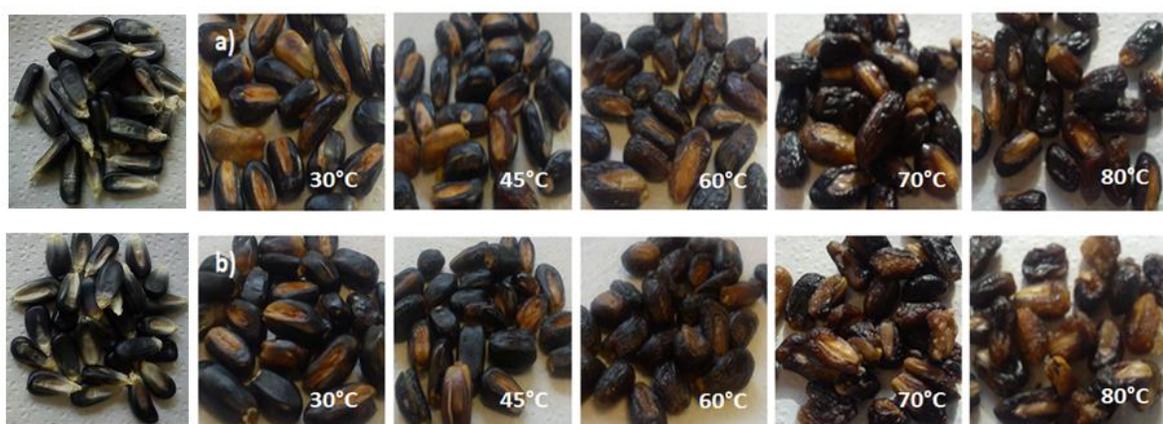


Figura 35. Degradación del color de los granos de maíz frito sometidos a remojo por 10 horas a diferentes temperaturas antes del freído a 170 °C. a) Freído por 5 minutos. b) Freído por 7 minutos.

3.2.5 Textura

A los maíces de cada temperatura de remojo y tiempo de freído de les realizó pruebas de textura con 15 repeticiones de cada condición. Las muestras remojadas a 30 y 45 °C, después del freído resultaron demasiado duras al degustarlas, debido a que el almidón no estaba lo suficientemente hidratado y cocido por lo que ya no se les realizó la prueba de textura. La Figura 36 muestra las curvas fuerza-distancia obtenidas en la prueba de textura realizada a los granos de las cinéticas de absorción después del freído a 170 °C y a los dos tiempos usados. En los granos freídos por 5 minutos (gráficos en rojo) se puede observar como disminuye el carácter crujiente (pendiente inicial) a medida que la temperatura de remojo va aumentando; la dureza, distancia y trabajo de fractura son muy similares en la temperatura de remojo de 60 y 70 °C, lo cual no pasa con el de 80 °C pues aumenta los valores de éstos atributos texturales. En los granos freídos por 7 minutos (gráficos en azul) se observa que los remojados a 70 °C tienen más dureza y carácter crujiente a comparación con los de 60 y 80 °C, sin embargo la distancia y trabajo de fractura en los tres casos tienen valores similares.

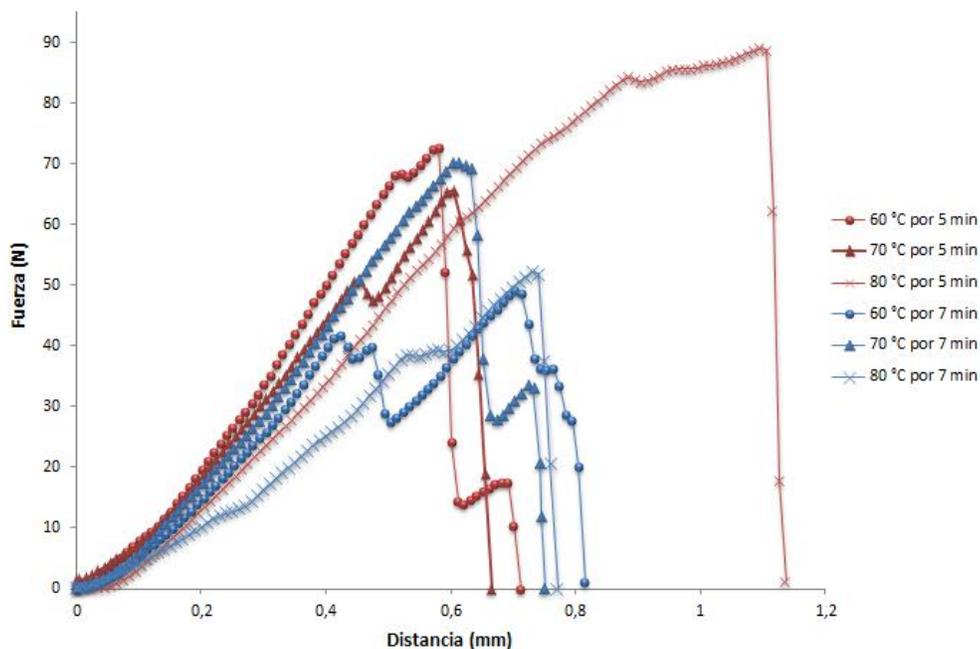


Figura 36. Gráfico de textura del maíz frito sometido a diferentes temperaturas de remojo y freído.

En el Cuadro 15, se observa que los granos remojados a 80 °C y freídos por 5 minutos, no tienen el suficiente tiempo de freído para evaporar el exceso de humedad dentro del frito, esto disparó los valores de los atributos texturales, volviendo la botana dura, y con estructura un tanto flexible, reflejado también en que tiene mayor distancia de fractura, y menor carácter crujiente y por lo tanto costará más trabajo la fractura. En general al someter el maíz a un mayor tiempo de freído disminuyen los valores de la dureza, distancia y trabajo de fractura y aumenta su carácter crujiente.

Cuadro 15. Parámetros de textura del maíz azul después del freído a 170 °C.

Tiempo de freído (min)	Temperatura de remojo (°C)	Dureza (N)	CV (%)	Distancia de fractura (mm)	CV (%)	Carácter crujiente (N/s)	CV (%)	Trabajo de fractura (N.s)	CV (%)
5	60	67.2	16	0.8	23	260.7	21	10.6	19
	70	61.4	24	0.73	32	235	17	10	42
	80	93.9	20	1.1	15	137.7	18	22.6	32
7	60	52.6	29	0.8	43	215.2	25	8.1	30
	70	58.9	29	0.66	23	252.1	28	7.8	33
	80	46.8	12	0.7	15	188.4	13	6.8	14

3.3 Objetivo particular 2 – Influencia de variables de proceso en botana

Con base en los resultados del objetivo 1 se concluyó que las temperaturas de 30 y 45 °C no son suficientes para gelatinizar el almidón, después del freído tienen una apariencia más agradable por ser lisas, sin embargo son demasiado duras. A temperaturas de 70 y 80 °C de remojo, la alta humedad del maíz remojado produjo botanas con humedad elevada al freír a 170 °C, por lo que se decidió considerar una temperatura de freído más alta, de 180 °C y tiempos menores a 7 minutos, para un menor deterioro del color. Por lo antes expuesto se decidió establecer las siguientes condiciones para las variables del diseño Taguchi L18 de niveles mixtos (2**1, 3**3).

- Temperatura de remojo: 60, 70, 80 °C
- Temperatura de freído: 170, 180 °C
- Tiempo de remojo: 5, 10, 15 h
- Tiempo de freído: 4, 5, 6 min

El Cuadro 16 muestra el número de corridas y condiciones del diseño estadístico de Taguchi.

Cuadro 16. Número de corridas y condiciones del estadístico Taguchi.

Corrida	Temperatura remojo (°C)	Tiempo remojo (h)	Temperatura freído (°C)	Tiempo freído (min)
1	60	5	170	4
2	60	5	170	5
3	60	10	170	6
4	60	10	180	5
5	60	15	180	4
6	60	15	180	6
7	70	5	180	4
8	70	5	180	6
9	70	10	170	4
10	70	10	170	5
11	70	15	170	6
12	70	15	180	5
13	80	5	170	6
14	80	5	180	5
15	80	10	180	4
16	80	10	180	6
17	80	15	170	4
18	80	15	170	5

3.3.1 Humedad después del remojo

La humedad después del remojo, está influenciada principalmente por la temperatura del agua pues ésta determina el límite máximo al que se puede hidratar el grano y a medida que va aumentando la temperatura, irá aumentando su capacidad de captación del agua, el tiempo de remojo no tiene una influencia tan marcada pues como se observó en el objetivo 1, la mayor hidratación del grano ocurre en la primera hora de remojo, lo cual se confirma con los cambios observados en las constantes k_2 del modelo de Peleg y k_p del modelo de la potencia, de modo que se puede concluir que el tiempo de remojo está en función de la temperatura. Las corridas 1, 2, 7, 8, 13 y 14, mostradas en el Cuadro 17, tienen el mismo tiempo de remojo (5 h), sin embargo lo que las diferencia es la temperatura, dando un aumento gradual en el contenido de humedad al incrementar la temperatura de remojo. Las corridas 3 y 4

que se remojaron por 10 horas a 60 °C aumentaron ligeramente con respecto a la 1 y 2 (5 h a 60 °C); sin embargo, las corridas 7 y 8 (5 h de remojo) ya habían alcanzado una humedad similar por la temperatura a la que se remojo (70 °C). De modo que si se le da un enfoque industrial a los resultados, conviene aumentar la temperatura para disminuir el tiempo de remojo y aumentar la capacidad de producción.

Cuadro 17. Humedad del grano después del remojo y del freído de las corridas del diseño Taguchi.

Corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Humedad despues del remojo (%)	46.1	45.5	49.3	49.8	48.8	49.7	51.2	48.7	53
Humedad despues del freído (%)	4.2	2.4	3.6	1.9	3.3	1.6	2.5	1.6	7
Corrida	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Humedad despues del remojo (%)	53.5	57.2	55.7	58.1	57.8	63.1	62.9	69.3	69.6
Humedad despues del freído (%)	4.5	4	2.8	2.3	3.1	6.9	1.8	16.4	8.3

3.3.2 Humedad después del freído

El tiempo y temperatura de freído tienen un impacto notable en los resultados de humedad después del freído, por ejemplo, en las corridas 1 y 2 (Cuadro 17), se tienen las mismas condiciones de tiempo y temperatura de remojo, la corrida 1 tiene una humedad final alta (4.2 %), la explicación a esto es porque tuvo un tiempo muy corto y temperatura muy baja de freído (170 °C por 4 min); al contrario de la corrida 2 que tuvo la misma temperatura de freído, sin embargo, el tiempo fue más prolongado (5 min), factor importante para una mayor deshidratación. En la corrida 9 se tuvo un tiempo y temperatura de remojo mayor que las corridas antes mencionadas (70 °C, 10 horas), por lo tanto tiene una cantidad mayor de humedad en su interior, si le adicionamos una baja temperatura y un corto tiempo de freído, la respuesta será un mayor porcentaje de humedad después del freído; lo mismo ocurrió con la corrida 17 que debido a sus condiciones de remojo (80 °C por 15 h) es la corrida que tiene mayor porcentaje de absorción de agua pero sus bajos valores de tiempo y temperatura de freído no son los favorables para su deshidratación, ya que presentó el contenido de humedad más alto después del freído (16.4%).

Con base en el Cuadro 17, se observa que cuando la humedad después del remojo se mantiene por debajo de 60% las condiciones de freído pueden garantizar una humedad final de baja a moderada (1.6- 7.0%), a medida que aumenta el porcentaje de humedad después del remojo por arriba de 60% va incrementando el porcentaje de humedad después del freído. Teniendo un comportamiento más notorio en los tres últimos puntos, observándose que en un intervalo de humedad después de remojo de 63 a 70%, se obtienen contenidos de humedad por arriba del 6%

3.3.3 Textura en maíces después del remojo

La Figura 37 muestra ejemplos de la textura de los maíces remojados, a diferentes tiempos y temperaturas. Se puede observar que durante los primeros segundos de la prueba, el dispositivo comprime el grano húmedo sin romperlo; la resistencia a esta compresión está representada por la pendiente antes del punto de cedencia, para dar lugar a la ruptura sin embargo solo dos condiciones (60 °C por 10 h y 70 °C por 5 h) llegaron a este punto, presentando una fractura dúctil estos dos casos. A medida que se incrementa el tiempo y la temperatura de remojo, la resistencia a la compresión, la fuerza de cedencia y de ruptura y trabajo de penetración disminuyen y se incrementa la distancia de cedencia y de fractura, lo que indica que el grano es más suave y flexible (más distancia de fractura) debido a la gran absorción de agua y gelatinización del almidón. Cuantitativamente se dan estos valores en el Cuadro 18.

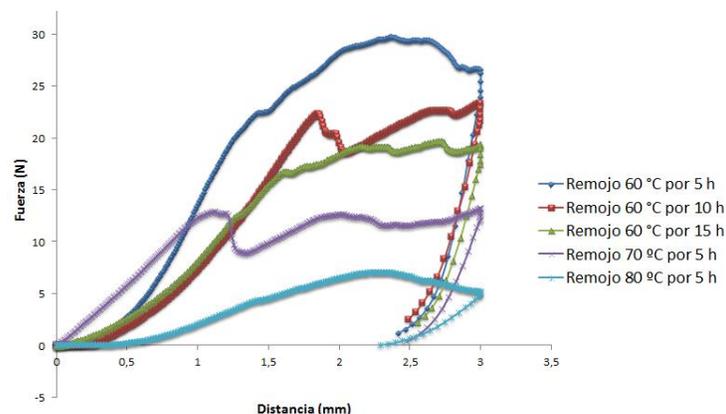


Figura 37. Curvas representativas de la textura de los maíces remojados a diferentes tiempos.

Cuadro 18. Parámetros de textura en los maíces después del remojo.

Corridas	Condiciones remojo (°C x h)	Resistencia a penetrar (N/s)	CV (%)	Fuerza de cedencia (N)	CV (%)	Distancia de cedencia (mm)	CV (%)	Fuerza de ruptura (N)	CV (%)	Distancia de ruptura (mm)	CV (%)	Trabajo de penetración (N.s)	CV (%)
1 y 2	60x5	41.6	28	21.7	26	1.44	9	28.2	22	—	—	25.7	26
3 y 4	60x10	33.9	28	19.4	34	1.58	10	21.5	23	1.8	15	20.0	24
5 y 6	60x15	30.2	12	17.3	24	1.59	17	22.9	25	—	—	17.9	23
7 y 8	70x5	23.5	34	12.9	23	1.38	25	17.0	27	1.2	23	15.6	29
9 y 10	70x10	21.1	24	12.6	21	1.44	14	15.1	24	—	—	13.8	18
11 y 12	70x15	21.7	17	12.9	20	1.46	18	13.3	20	—	—	12.8	19
13 y 14	80x5	11.1	25	6.4	25	1.50	20	7.0	22	—	—	6.4	25
15 y 16	80x10	9.8	22	5.9	23	1.67	20	6.7	22	—	—	5.7	24
17 y 18	80x15	9.5	25	7.5	20	1.81	15	7.3	19	—	—	6.5	15

3.3.4 Apariencia maíces remojados

En la Figura 38 se muestran cortes longitudinales de maíces después del remojo a las tres diferentes temperaturas manejadas (60, 70 y 80 °C) en combinación con diferentes tiempos de remojo. Apartado A) a 60 °C por 5 horas (tratamiento más leve), el endospermo se ve blanco y solamente en la orilla se observa un poco translucido, como resultado de la gelatinización; apartado B) cuando se incrementó el tiempo y temperatura de remojo (70 °C por 10 horas), el área del endospermo gelatinizado fue mayor, y finalmente apartado C) a las condiciones más drásticas de remojo (80 °C por 15 horas), prácticamente todo el endospermo gelatinizó a excepción de una pequeña parte en el centro del grano.

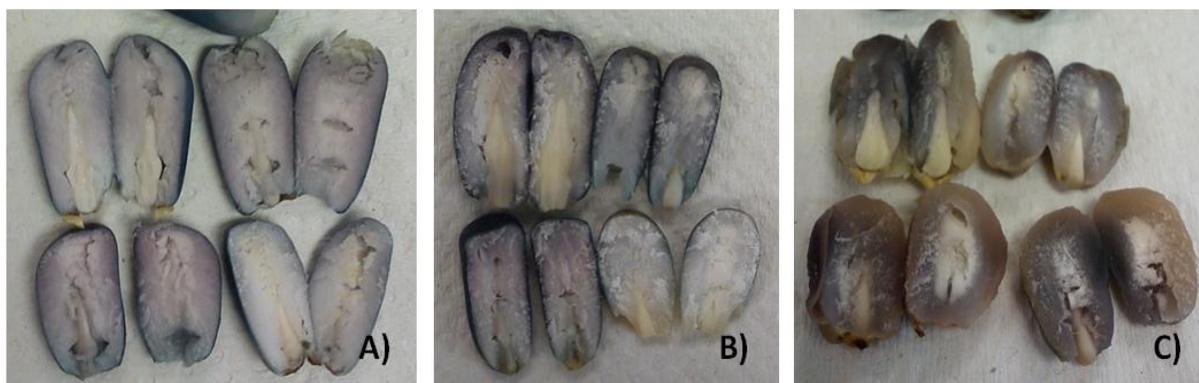


Figura 38. Apariencia del interior del maíz remojado a diferentes temperaturas y tiempos.

3.3.5 Absorción de aceite

La absorción de aceite de las diferentes corridas se muestra en el Cuadro 19; se observa una relación directa con a la humedad después del remojo de la botana de maíz azul; las corridas 1 y 2 tienen las mismas condiciones de temperatura y tiempo de remojo (60 °C por 5 h) y temperatura de freído (170 °C); difieren en el tiempo de freído (4 y 5 minutos respectivamente), la corrida con mayor tiempo de freído es la que tiene mayor porcentaje de absorción de aceite; lo mismo sucede con las corridas 5 y 6 (60 °C por 15 horas en el remojo, 180 °C en el freído), 15 y 16 (80 °C por 10 horas en el remojo, 180 °C en el freído), 17 y 18 (80 °C por 15 horas en el remojo, 170 °C en el freído).

Cuadro 19. Porcentaje de absorción de aceite de la botana de maíz frito.

Corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Absorción aceite (%)	9.1	9.9	8.7	12.6	9.8	10.6	9.6	8.9	13.3
Corrida	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Absorción aceite (%)	12.6	15.6	14.6	10.5	15.2	20.4	20.7	24.9	28.3

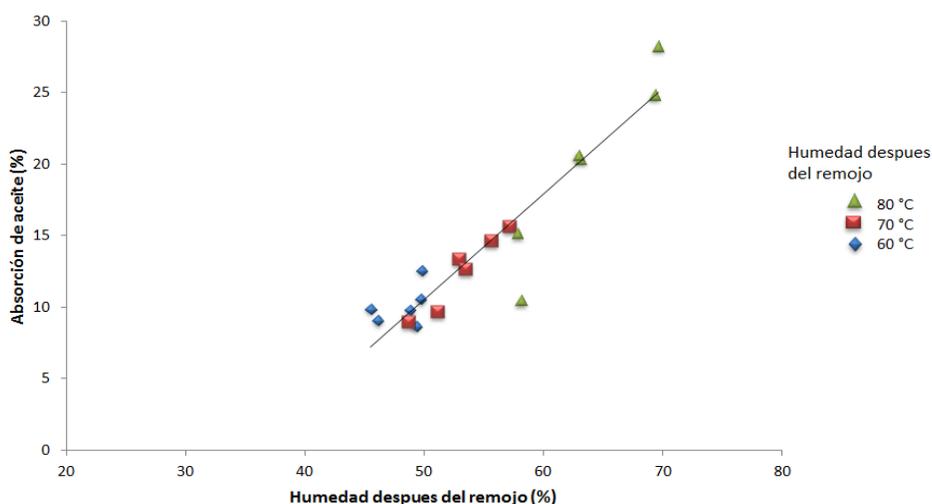


Figura 39. Efecto de la humedad después del remojo en la absorción de aceite.

En la Figura 39 se encuentra una gráfica, la cual representa el comportamiento de la absorción de aceite con relación a la humedad después del remojo a las diferentes

condiciones de remojo donde cada figura (rombo, cuadrado y triangulo) representa la temperatura a la que se llevó a cabo dicho proceso. Se aprecia que a medida que aumenta la temperatura de remojo, se absorbe mayor humedad, la capa aleurona que contiene el color se va agrietando y así facilita la absorción de aceite. A medida que se incrementa el porcentaje de humedad del grano después del remojo, aumenta el porcentaje de absorción de aceite. En este comportamiento los granos remojados a 60 y 70 °C se situaron en la parte inferior e intermedia de la relación y los granos remojados a 80 °C en la parte superior. Hurtado y col., (2001), elaboraron botanas de grano de maíz entero amarillo, donde se remojó a 70 °C por 16 horas y se frió a 190 °C por 5 min, obteniendo una botana con un contenido de aceite de 3%, siendo un valor más bajo que los obtenidos en la experimentación.

3.3.6 Densidad

La densidad, expresada en peso hectolítrico de las botanas de maíz frito, depende principalmente de la temperatura de remojo pues al incrementarse ésta, el grano de maíz se va hinchando hasta el punto de romper la capa aleurona, exponiendo así al almidón, al continuar con el freído es más fácil la absorción de aceite en la botana y esto está reflejado en los valores de peso hectolítrico aumentando proporcionalmente con los valores de aceite que retuvo el maíz, en la Figura 40 se muestra el comportamiento descrito.

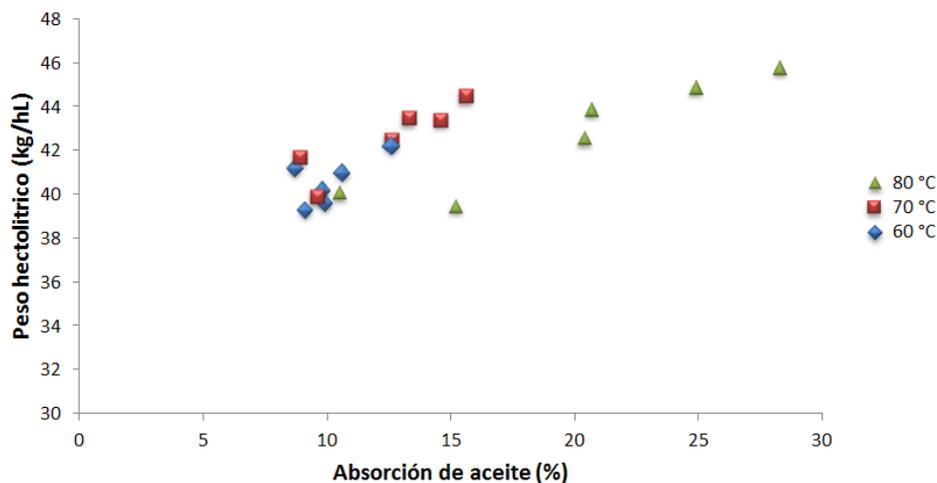


Figura 40. Aumento del peso hectolítrico respecto al % de absorción de aceite.

3.3.7 Color

El cambio en el color expresado en el Cuadro 20, se debe a la inestabilidad de las antocianinas debido al aumento de temperatura tanto en el remojo como en el freído, esto produce la degradación de dichos pigmentos. En la mayoría de los casos existe un desplazamiento de las tonalidades verde-azul (maíz azul sin ningún tratamiento), a azul (maíz remojado) y finalmente a las rojas-amarillas (maíz frito). El cociente entre los parámetros “b” y “a” (b/a) refleja el predominio del color de uno de los parámetros en la botana, en todas las corridas el parámetro “a” predominó y se mantuvo en valores de 1.9-5.0; el parámetro “b” cambió por efecto de la temperatura de remojo, en las primeras corridas tuvo valores tenues de azul y conforme aumentaba la temperatura de remojo los valores se fueron desplazando a tonalidades amarillas; esto se ve reflejado en la relación b/a debido a que cambian sus valores de negativos a positivos y a partir de ahí los valores están aumentando cerca a la unidad (corridas 17 y 18), lo que significa que el color amarillo tenía intensidad cercana al rojo. El mismo cuadro muestra la diferencia de color, de cada parámetro (ΔL , Δa , Δb) con relación al maíz antes del proceso y la diferencia global (ΔE); las diferencias de la luminosidad y el color amarillo (Δb) fueron menores, comparándolas con el color rojo (Δa). Contrario a lo esperado las mayores diferencias globales de color (ΔE) fueron obtenidas en el maíz remojado a 60 °C y conforme aumenta la temperatura de remojo la diferencia global de color disminuye.

En la Figura 41 se muestran los parámetros “a” y “b” de corridas representativas de maíces sometidos a las diferentes condiciones y sin ningún tratamiento. El punto marcado con un relleno azul fuerte representa el maíz azul sin ningún tratamiento, éste presenta tonos ligeros del parámetro “-a” (verdes) y “-b” (azules), La corrida que tiene las condiciones más leves de remojo y freído (corrida 1 y 2, puntos rojos), solamente se desplazó a las tonalidades rojas. Las corridas que tienen condiciones medias de remojo y freído (corrida 9 y 10, puntos azul claro), se desplazaron a las tonalidades rojas, sin embargo, también lo hicieron a las amarillas. Las condiciones más extremas de remojo y freído (corridas 17 y 18, puntos amarillos), a pesar que se desplazaron a tonalidades rojas, tuvieron mayor predominio del amarillo. De manera general las bajas temperaturas de remojo y freído se produce un incremento del rojo;

altas temperaturas causan incremento del color amarillo; esto se ve afectado en el producto final pues se desea una degradación menor del color, debido a que el color azul de la capa aleurona son ricos en proteínas, y las condiciones de proceso hacen que se desnaturalicen.

Cuadro 20. Parámetros de color L, a, b, de las corridas del estadístico Taguchi.

Temperatura de remojo (°C)	Corrida	L	CV (%)	a	CV (%)	b	CV (%)	b/a	ΔL	Δa	Δb	$\Delta E-1976$
60	1	19.2	7	3.2	15	-0.35	38	-0.1	-1.6	3.7	-0.2	4.0
	2	18.5	6	2.5	15	-0.14	168	-0.1	-2.3	3.0	0.1	3.8
	3	21.7	3	5.0	15	1.50	28	0.3	0.9	5.5	1.7	5.8
	4	22.5	5	3.1	7	0.41	23	0.1	1.7	3.6	0.6	4.0
	5	22.6	1	4.0	11	0.70	25	0.2	1.8	4.5	0.9	4.9
	6	20.3	2	3.0	48	0.70	8	0.2	-0.5	3.5	0.9	3.6
70	7	19.1	3	2.2	44	0.12	320	0.1	-1.7	2.7	0.3	3.2
	8	21.2	4	3.2	21	1.30	13	0.4	0.4	3.7	1.5	4.0
	9	21.6	2	2.3	30	0.43	94	0.2	0.8	2.8	0.6	3.0
	10	19.0	1	2.6	20	0.60	99	0.2	-1.8	3.1	0.8	3.7
	11	19.5	1	2.4	30	1.10	74	0.5	-1.3	2.9	1.3	3.4
	12	19.1	6	2.5	51	1.30	67	0.5	-1.7	3.0	1.5	3.8
80	13	20.0	2	2.2	9	-0.09	295	-0.04	-0.8	2.7	0.1	2.8
	14	20.8	2	2.8	26	0.52	47	0.2	0.0	3.3	0.7	3.4
	15	21.4	1	2.4	9	0.70	10	0.3	0.6	2.9	0.9	3.1
	16	22.4	2	2.6	28	0.60	69	0.2	1.6	3.1	0.8	3.6
	17	18.3	10	1.9	46	1.50	86	0.8	-2.5	2.4	1.7	3.9
	18	19.7	2	2.4	11	1.40	33	0.6	-1.1	2.9	1.6	3.5

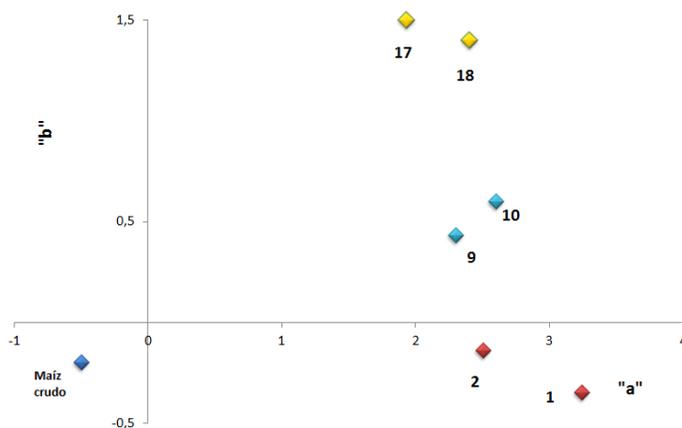


Figura 41. Desplazamiento de los parámetros “a” y “b” del maíz frito bajo diferentes condiciones de proceso, respecto al maíz crudo. Los números se refieren a las corridas.

3.3.8 Apariencia maíces fritos

A la apariencia de las botanas de maíz azul la afectan el tiempo y la temperatura de remojo y freído a que se someten. En la Figura 42 se muestran 3 corridas del

estadístico Taguchi (2, 10 y 18), a diferentes tiempos y temperaturas de remojo, en estos casos se frieron en las mismas condiciones (170 °C por 5 min), en la parte inferior derecha de cada imagen se pueden observar sus condiciones de remojo. A medida que va aumentando la temperatura y el tiempo del remojo la estructura se va haciendo más blanda y ésta va captando mayor cantidad de agua a tal grado que el grano se rompe y al momento de ser freído, la botana se va haciendo más rugosa.



Figura 42. Apariencia de la botana de maíz a diferentes tiempos y temperaturas de remojo. C2: condiciones leves (60 °C y 5 h de remojo); C10: condiciones intermedias (70 °C por 10 h); C18: condiciones extremas (80 °C por 15 h).

3.3.9 Retención de condimento

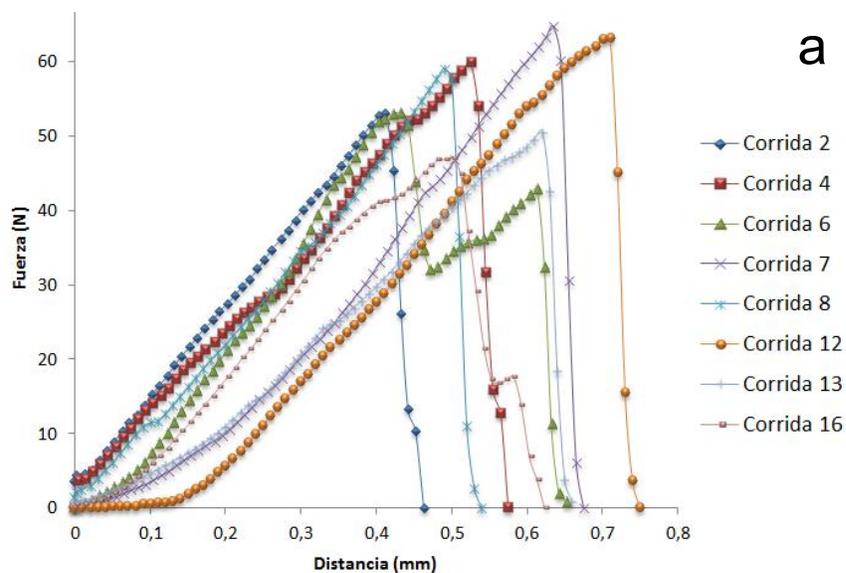
La retención del condimento, mostrada en el Cuadro 21, está relacionada con la temperatura de remojo, como se puede observar en la Figura 40 a medida que la temperatura y tiempo de remojo van aumentando, también lo hace la rugosidad visual y táctil que va obteniendo el maíz al freírlo, esta textura facilita la adhesión del condimento entre las hendiduras causadas por la rugosidad. Cuando las temperaturas de remojo son extremas (80 °C), el grano se hincha a tal grado que la capa de colorante se fractura y expone el tejido de reserva (almidón), al momento del freído el almidón se vuelve poroso y grasiento, esto le da más oportunidad al condimento de adherirse en el maíz, tal es el caso de las corridas 15, 16, 17 y 18.

Cuadro 21. Adhesión de condimento de los maíces fritos del estadístico Taguchi.

Adhesión de condimento (%)								
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
3.6	2.5	2.6	3.8	3	3.3	4.6	3	2.6
C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
3.9	5	3.4	5.6	5.4	7.2	8.2	6.1	8.2

3.3.10 Textura

Las gráficas de textura de las corridas del diseño Taguchi se ordenaron en la Figura 43 clasificándolas respecto a su humedad después del freído para así poder observar si sus atributos texturales dependen del contenido de humedad. En el apartado A, se muestran las corridas con un contenido de humedad final de 1.9 a 3%, se observa que todas las corridas tienen una fractura frágil, ésta se caracteriza por una ruptura y una caída de fuerza instantánea; al momento de la fractura se escuchó un sonido fuerte, limpio y rápido que son características que Chauvin y col., (2008) denominaron crispness; éste grupo de gráficas tiene valores bajos de trabajo y distancia de fractura, valores altos de carácter crujiente y valores intermedios de dureza. En el apartado B se muestran las corridas con un contenido de humedad de 3.1 a 7%, se observa que la mayoría de las corridas tienen una fractura frágil, sin embargo hay corridas donde se observa una fractura (pico) antes de la ruptura y corridas que tuvieron varias fracturas antes de la ruptura; en éste grupo también se escuchó el sonido crispness; éstas gráficas tienen valores intermedios de trabajo, distancia de fractura y carácter crujiente, y valores altos de dureza, En el apartado C se muestran las corridas con un contenido de humedad de 7.1 a 16%, se observa que las gráficas tienen una fractura dúctil puesto que tuvieron una mayor deformación antes de llegar a la fractura; éstas dos gráficas no emitieron sonido por su alto contenido de humedad; éstas gráficas tienen valores bajos de dureza y carácter crujiente y tienen valores altos en el trabajo y distancia de fractura.



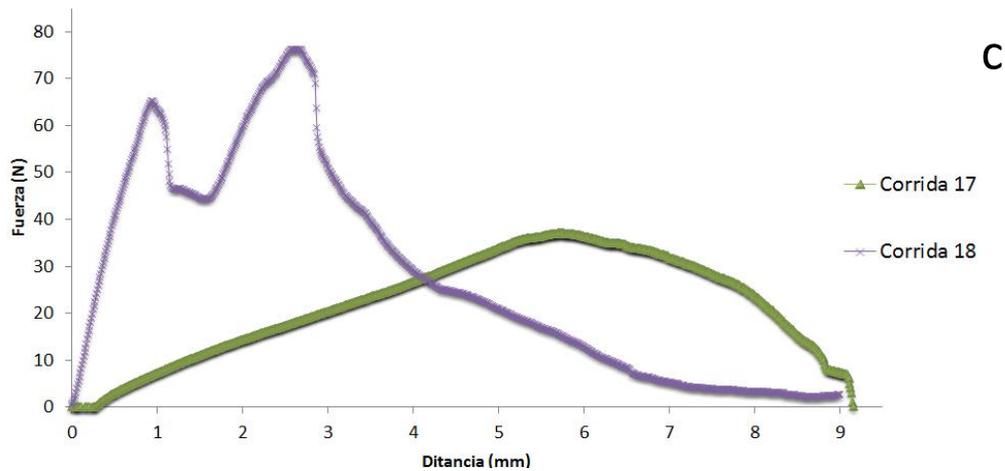
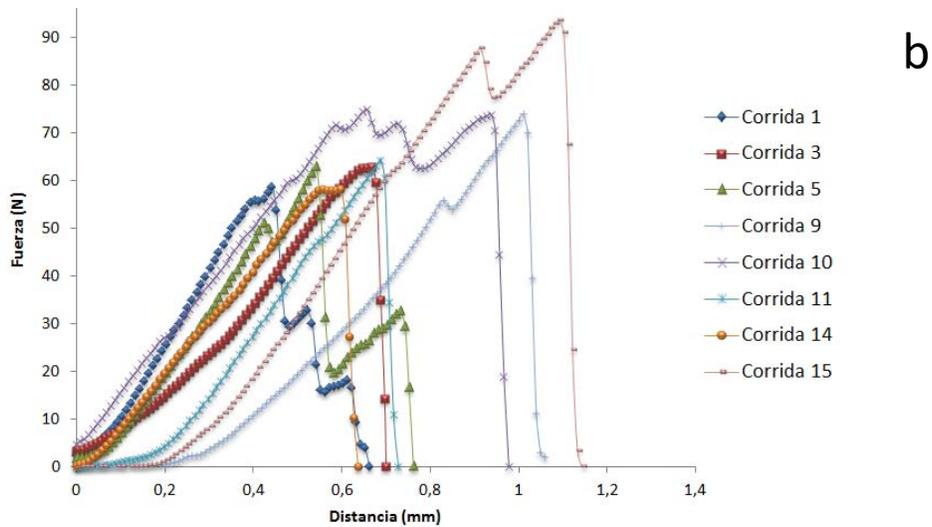


Figura 43. Gráficas de textura de las corridas del diseño Taguchi clasificadas respecto a su contenido de humedad. a) corridas con humedad de 1.9 a 3%; b) corridas con humedades de 3.1 a 7%; c) corridas con humedad de 7.1 a 16.5%.

En el Cuadro 22 se muestran los resultados de los parámetros de textura para las corridas del diseño Taguchi. Para la discusión se consideró este cuadro así como las gráficas que relacionan la dureza, trabajo de fractura, distancia de fractura y carácter crujiente con la humedad después del freído.

Cabe resaltar que los coeficientes de variación de los parámetros texturales fueron altos debido a la variabilidad natural en estructura y tamaño de los granos de maíz. Resultados similares de dispersión de parámetros texturales han sido reportados por Gowen y col. (2006). Por lo antes descrito, se aplicó el método de Grubbs para

detección de observaciones anómalos (Laso y Peris, 2001). Solamente se eliminó un dato anómalo en algunos parámetros de algunas corridas.

Cuadro 22. Parámetros de textura de las corridas del estadístico Taguchi.

Corrida	Dureza (N)	CV (%)	Distancia de fractura (mm)	CV (%)	Carácter crujiente (N/s)	CV (%)	Trabajo de fractura (N.s)	CV (%)
1	55.7	24	0.51	15	246.4	20	7.2	32
2	52.8	27	0.51	16	227.6	18	6.3	33
3	62	26	0.6	26	241.9	20	8.6	44
4	59.7	19	0.6	19	247.1	14	9	26
5	62.5	22	0.66	23	238.4	13	8.3	31
6	53.6	15	0.55	20	234.6	14	6.2	25
7	60.1	24	0.63	31	263.6	18	8	37
8	60.6	26	0.55	27	270.9	19	7.2	35
9	85.3	41	1.01	27	230.7	26	18.7	49
10	70.4	18	0.69	26	240.4	10	11.6	36
11	59.4	19	0.64	19	229.8	16	8.7	24
12	60.7	21	0.64	19	219.3	10	9.4	42
13	46.7	22	0.56	16	204.4	24	6	30
14	47.2	25	0.54	19	208.9	20	6	35
15	96.2	19	1.24	22	219.4	19	27	34
16	48.8	16	0.6	22	223.6	18	6.2	18
17	38.2	32	6.03	29	15.22	26	57.3	36
18	71.2	25	2.29	48	123.5	21	37.4	53

Los parámetros de textura se pueden predecir con base a la humedad después del freído que contengan los granos de maíz y los intervalos en las condiciones de proceso que se manejaron en este trabajo.

En la Figura 44 se muestran los parámetros de dureza de los granos fritos en función de la humedad después del freído, donde en la sección “A”, la dureza se mantiene entre 40 y 70 N cuando el contenido de humedad es menor al 5%, teniendo una botana seca. Las corridas con un incremento de humedad de 7 a 9 % (sección “B”) produce durezas de 100 a 70 N, presentan una fractura a mayor distancia debido al interior húmedo y “gomoso”, esto se puede explicar ya que el almidón ya hidratado pasa a un proceso de retrogradación, estos son los cambios que ocurren cuando las moléculas de almidón hidratado empiezan a reorganizarse pasando de una estructura amorfa a una estructura más cristalina, esto viene acompañado por un incremento gradual en la rigidez, influyendo en la textura de los productos. Este

fenómeno ocurre en geles de almidón o en productos horneados, fritos o extrudidos (Tester y Debon, 2000).

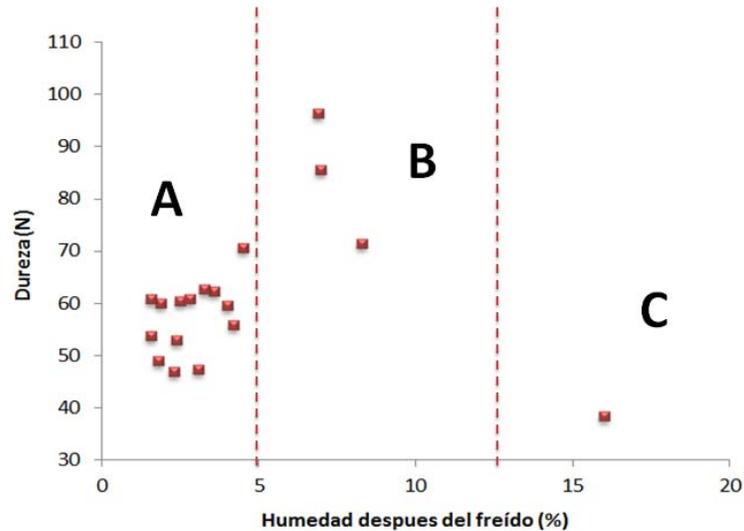


Figura 44. Relación del contenido de humedad de la botana frita con la dureza. A) con un contenido de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3 %; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.

En la sección “C”, el contenido de humedad es mayor al 13%, presentan el menor valor de dureza, pues el exceso de humedad hace que se hinche y rompa la estructura del granulo por las condiciones de tiempo y temperatura máximas de remojo, el proceso de hidratación excesiva se vuelve irreversible y esto hace que no suceda la retrogradación, sumándole que el tiempo y temperatura de freído no son las suficientes para deshidratar el grano de maíz, provocando un exterior seco y un interior húmedo y suave, de tal forma que la dureza en las humedades altas descienda de una manera drástica.

En el trabajo de fractura de las corridas del diseño Taguchi (Figura 45), se observa de manera general que a medida que el porcentaje de humedad después del freído dentro del grano aumenta el trabajo de fractura va aumentando progresivamente. En la sección “A”, se observa que en humedades menores a 5% el trabajo de fractura es de 6 a 12 Ns; en la sección “B”, aumentaba el trabajo a intervalos de 18 a 40 Ns,

pues la estructura se volvió flexible; en la sección “C”, el trabajo aumenta alrededor de 57 Ns. Debido al exceso de humedad, la botana era similar a una papa a la francesa por lo cual al quererlo fracturar, el pericarpio se hundía junto con el cilindro, aumentando el trabajo de fractura.

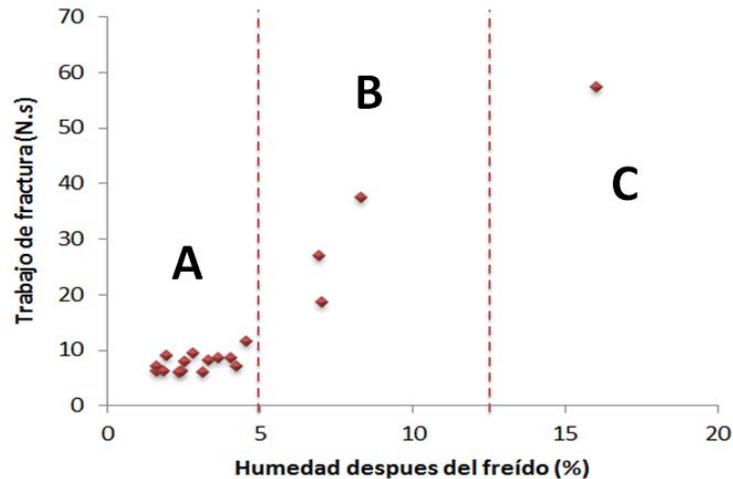


Figura 45. Relación del contenido de humedad de la botana frita con el trabajo de fractura. A) con un contenido de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3 %; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.

En la Figura 46 se presenta la relación de la distancia de fractura con humedad después del freído, en la sección “A”, se muestra un grupo de corridas que tienen una distancia de fractura baja (alrededor de los 0.5 mm), debido a su bajo contenido de humedad (1.6 a 4.5%) mostraron una fractura frágil espontánea; las corridas ubicadas en la sección “B”, con contenido de humedad en un intervalo de 6.9 a 8.3%, tienen distancias de fractura mayores (de 1.01 a 2.29 mm); en las corridas experimentales de la sección “C”, el tiempo de freído no fue suficiente para deshidratar el grano de maíz por lo que presentaron una humedad alta (alrededor de 16.4%) con una capa externa seca, y el interior cocinado y húmedo, similar a la textura de una papa a la francesa, por lo que su fractura fue dúctil, con una distancia de fractura mayor a 6 mm.

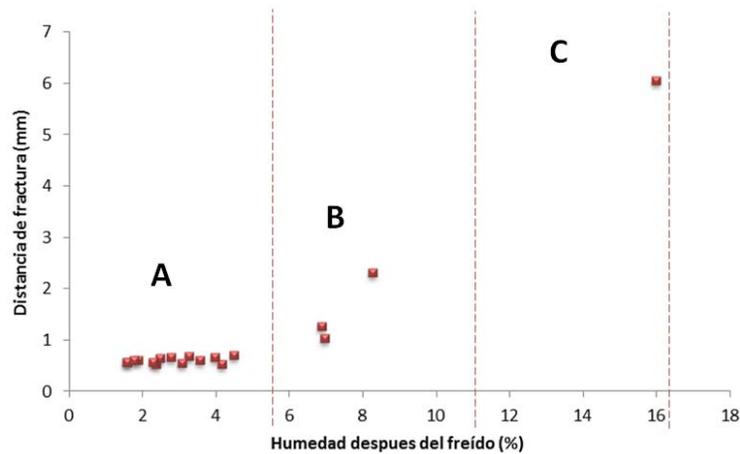


Figura 46. Relación del contenido de humedad de la botana frita con la distancia de fractura. A) con un contenido de humedad de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3%; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.

El carácter crujiente (Figura 47), está relacionado con la fragilidad de las botanas y su contenido de humedad debido a que si las muestras son más frágiles el carácter crujiente es mayor y el contenido de humedad es menor. Las corridas con una humedad menor del 5% tienen un carácter crujiente de 270 a 240 N/s, valores indicativos de un alimento muy crujiente. En la sección “B”, debido al contenido de humedad de 7 a 9%, los valores de 230 a 123 N/s no se puede considerar la pendiente como carácter crujiente, sino una resistencia a la cedencia pues son “gomosos” y no emiten ningún sonido característico. El exceso de humedad, sección “C”, en las botanas, solo cuenta con una capa externa seca, con el interior cocinado, disminuyendo su resistencia pues la consistencia de la botana es demasiado suave y flexible, teniendo valores alrededor de 15 N/s.

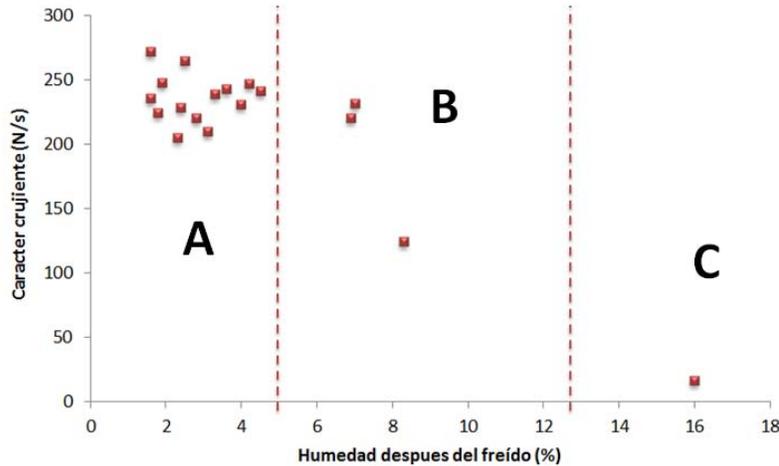


Figura 47. Relación del contenido de humedad de la botana frita con el carácter crujiente. A) con un contenido de humedad de 1.6 a 4.5%; B) con un contenido de humedad de 6.9 a 8.3%; C) con un contenido de humedad alrededor de 16.4%.

3.3.11 Análisis del diseño Taguchi para las propiedades físicas

A través de los gráficos de superficie respuesta que se elaboraron para el estadístico Taguchi, en el software Minitab Statistical, versión 16, Minitab Inc., se puede concluir que variable (tiempo y temperatura de remojo y freído) tiene mayor influencia en las características físicas y de textura, de la que se tratará a partir de la página 98. En el Cuadro 23 se muestran los resultados del análisis de varianza para el diseño Taguchi, mostrando las medias de las variables de respuesta para los diferentes niveles de las variables de proceso, así como su porcentaje de influencia en las propiedades físicas. Para la discusión se empleará este cuadro y las gráficas de superficie de respuesta para cada una de las variables de respuesta.

Cuadro 23. Resultados del análisis de varianza del estadístico Taguchi para la humedad después del remojo y las propiedades físicas de las botanas fritas de grano entero de maíz azul.

Variable	Nivel	Humedad después remojo (%)		Peso hectolitrico (kg/hL)		Humedad después freído (%)		Absorción de aceite (%)		Adhesion condimento (%)		Color b/a		Δb	
		Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia
Temperatura de remojo (°C)	60	48.2	78.6	41.0	16.8	2.8	19.7	10.1	56.0	3.1	55.9	0.07	29.1	0.41	36.7
	70	53.2		43.0		3.7		12.5		3.7		0.33		1.03	
	80	63.5		41.9		6.5		20.0		6.0		0.35		1.20	
Tiempo de remojo (h)	5	51.2	16.7	40.0	51.1	2.7	15.7	10.6	24.4	3.7	6.9	0.30	2.5	0.83	5.9
	10	55.3		42.4		4.3		14.7		4.7		0.21		0.74	
	15	58.4		43.6		6.0		17.3		4.5		0.25		1.07	
Temperatura de freído (°C)	170	————	————	42.6	9.9	5.8	18.5	14.8	1.1	4.2	0.3	0.14	22.0	0.72	8.7
	180	————	————	41.3		2.8		13.6		4.4		0.36		1.04	
Tiempo de freído (min)	4	————	————	41.6	2.7	6.7	25.7	14.5	5.0	4.5	5.6	0.21	16.7	0.87	8.6
	5	————	————	42.4		3.8		15.5		3.8		0.16		0.70	
	6	————	————	41.8		2.4		12.5		4.6		0.38		1.10	

Nota: En **negritas** se muestran los resultados para las variables que tuvieron un efecto significativo, con $\alpha=0.05$.

3.3.11.1 Humedad después del remojo

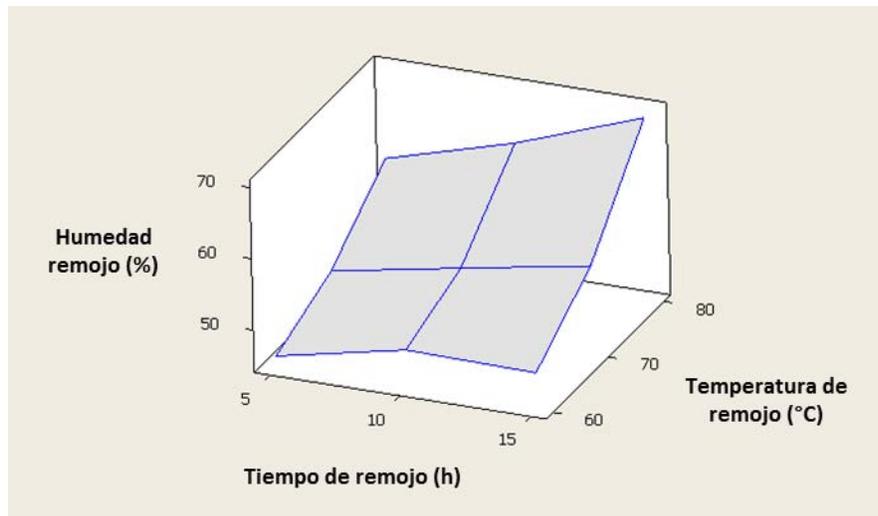


Figura 48. Influencia del tiempo y temperatura de remojo en la humedad después del remojo.

En la Figura 48 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo en la humedad después del remojo. Se observa que en humedad después del remojo se ve afectada por la temperatura de remojo pues a medida que esta aumenta, va teniendo una pendiente más pronunciada, en el tiempo de remojo aparenta la misma tendencia pero en menor proporción; el análisis de varianza (Cuadro 23), muestra que ambas variables tuvieron efecto significativo pero la temperatura de remojo tuvo el mayor porcentaje de influencia (78.6%) de esta propiedad.

3.3.11.2 Peso hectolítrico

En la Figura 49 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en el peso hectolítrico. En el apartado a) se observa que el peso hectolítrico tiene un valor alto en el tiempo de 10 horas en las temperatura de 70 °C y el cambio en el peso hectolítrico es muy pronunciado al aumentar el tiempo de remojo, mientras que el efecto de la temperatura fue muy

bajo. El estadístico (Cuadro 23) muestra que solamente el tiempo de remojo tuvo efecto significativo. En el apartado b) de la Figura 49 se observa que la temperatura de freído tiene influencia ligera en el peso hectolítrico pues a medida que la temperatura aumenta el peso hectolítrico disminuye, a pesar de esto el análisis de varianza muestra que esta variable ocupa el tercer lugar de influencia (9.9%), y respecto al tiempo de freído aparenta una tendencia constante debido al estrecho intervalo manejado para el diseño, mostrando un valor de 2.7% de influencia.

3.3.11.3 Humedad después del freído

En la Figura 50 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en la humedad después del freído. En el apartado a) se observa que la humedad después del freído no se ve afectada de manera importante por el tiempo de remojo, mientras que en la temperatura máxima de remojo (80 °C) la humedad aumenta drásticamente, considerando esta variable como la de mayor influencia; aunque el análisis de varianza (Cuadro 23), muestra que la temperatura de remojo no tiene el mayor porcentaje de influencia, sin embargo esta variable presenta un efecto significativo en la modificación de esta propiedad. En el apartado b) de la Figura 50 se observa que a medida que aumenta el tiempo de freído disminuye la humedad después del freído. La temperatura de freído tiene un menor efecto en la humedad; en el análisis de varianza el tiempo de freído representa el porcentaje mayor de influencia. Aun cuando éste no tuvo un efecto significativo en los resultados, respecto a la temperatura de freído representa el penúltimo porcentaje en la influencia de los resultados.

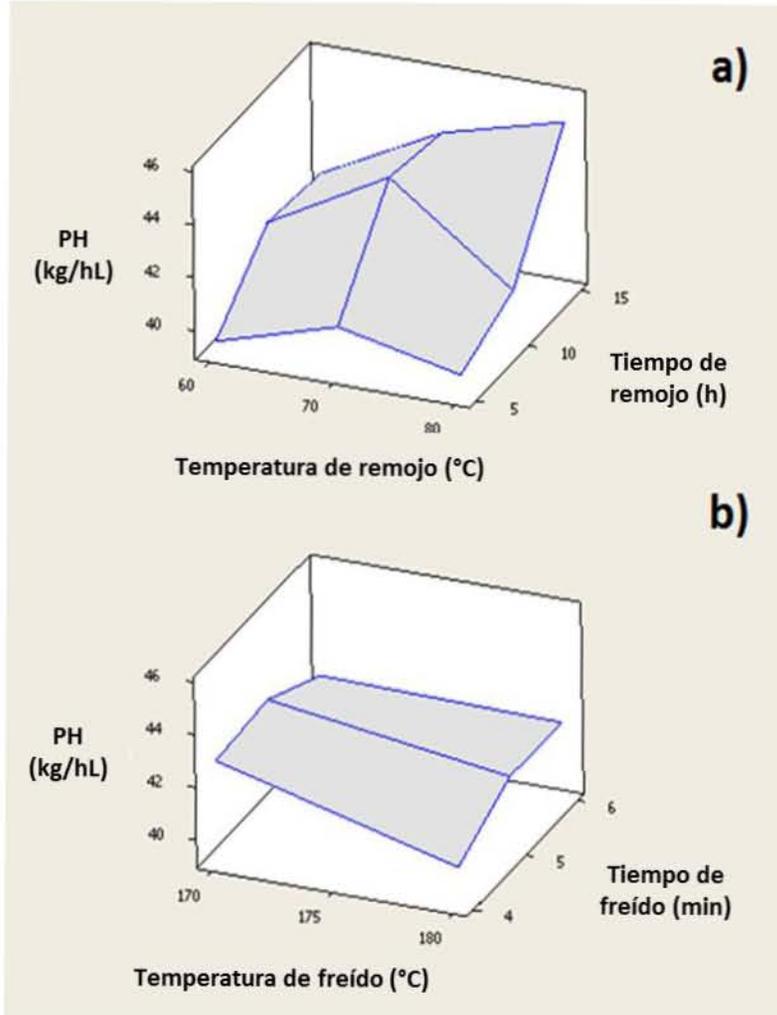


Figura 49. Influencia de las condiciones de proceso en el peso hectolítrico a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

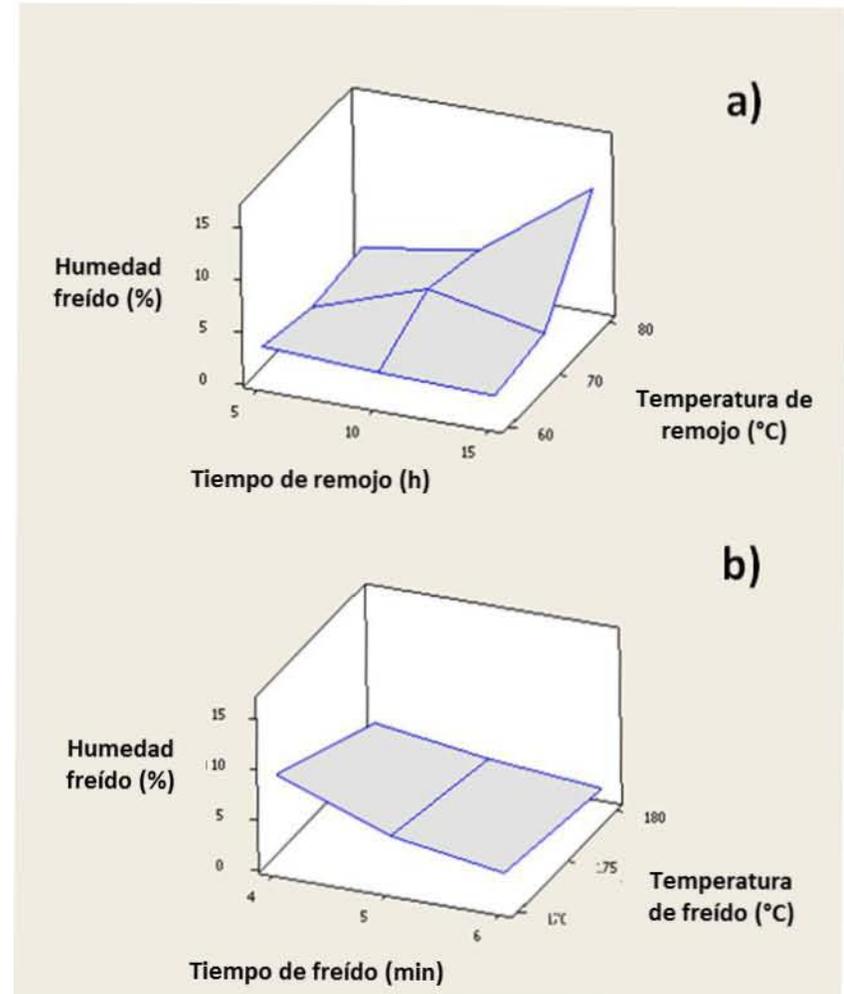


Figura 50. Influencia de las condiciones de proceso en la humedad después del freído a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

3.3.11.4 Absorción de aceite

El gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en la absorción de aceite, se muestra en la Figura 51. En el apartado a) se observa que la absorción de aceite no se ve afectada por el tiempo de remojo pues aparenta una tendencia constante, mientras que al aumentar la temperatura de remojo la absorción de aceite aumentó notablemente; el análisis de varianza (Cuadro 23), muestra que la temperatura de remojo tuvo el mayor porcentaje de influencia y representa un efecto significativo para la modificación de esta propiedad. En el apartado b) de la Figura 51 se observa una tendencia constante en casi toda el área del gráfico, excepto en donde se ve un ligero pico hacia abajo en las condiciones de 170 °C por 6 minutos, lo que indica que en esas condiciones disminuyó la absorción de aceite; en el análisis de varianza el tiempo y temperatura de freído representan los porcentajes menores de influencia y estos no tuvieron un efecto significativo en los resultados.

3.3.11.5 Retención de condimento

La retención de condimento por efecto del tiempo y temperatura de remojo y freído se ve en la Figura 52, en el apartado a) se observa que la retención de condimento va aumentando conforme aumenta la temperatura de remojo, lo que no pasa con el tiempo de remojo, pues conforme pasa el tiempo la retención de condimento aparenta ser constante, a la temperatura manejada; en el análisis de varianza se indica que de estas variables la que tuvo más porcentaje de influencia fue la temperatura de remojo y este también es el que tiene efecto significativo. En el apartado b) la retención de condimento se ve constante en las temperaturas de freído y en los tiempos de freído varía ligeramente, sin embargo no sigue una tendencia; en el análisis de varianza (Cuadro 23) representan los porcentajes más bajos de influencia y no tienen efecto significativo en la retención de condimento.

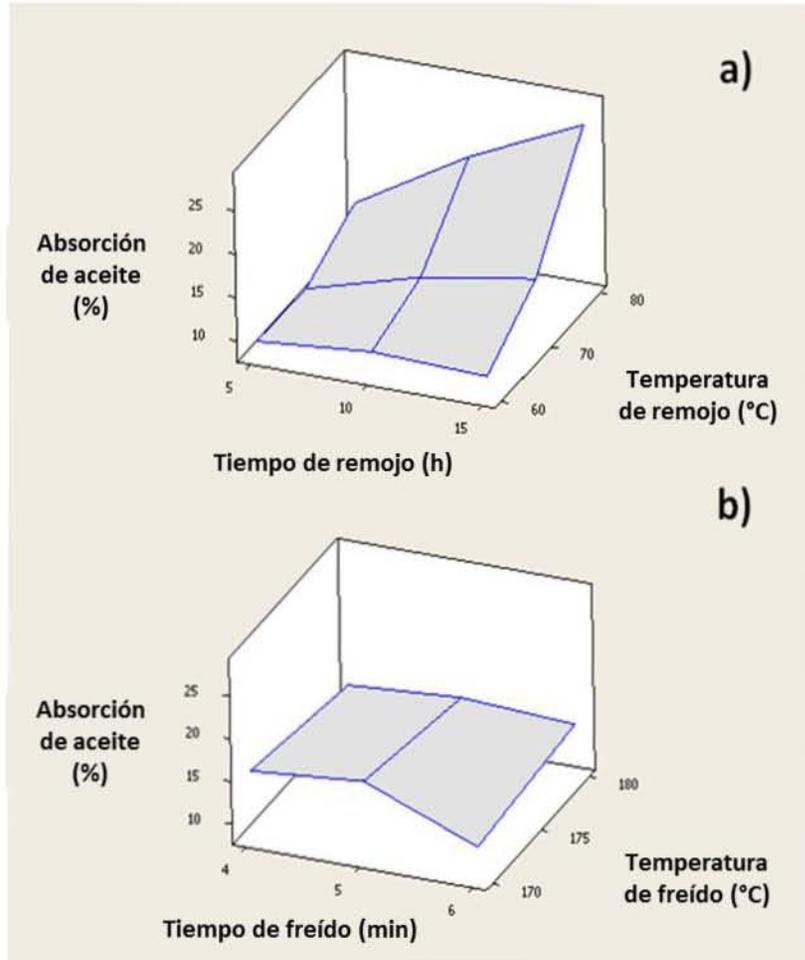


Figura 51. Influencia de las condiciones de proceso en la absorción de aceite a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

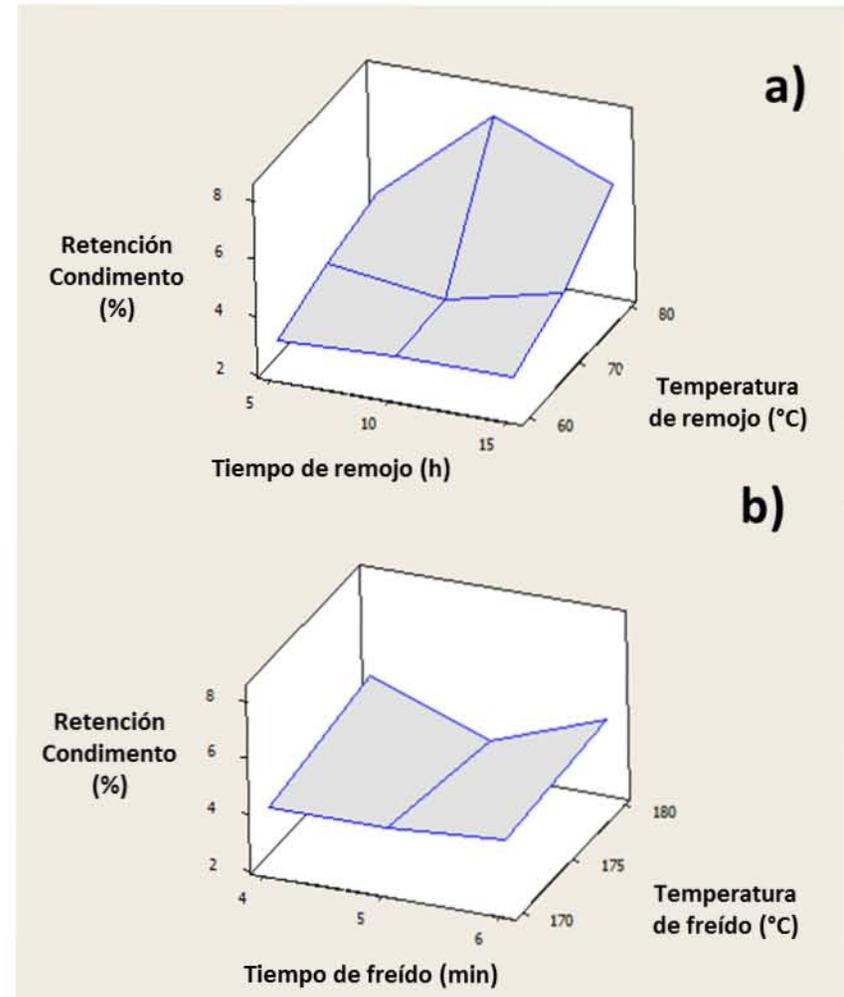


Figura 52. Influencia de las condiciones de proceso en la retención de condimento a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

3.3.11.6 Degradación de color

Se elaboraron análisis de varianza para la diferencia de color global, ΔL , Δa , Δb y b/a para ver la influencia de las variables en el color final de la botana, sin embargo solo las dos últimas propiedades indicaron un efecto significativo. El cociente b/a como resultado de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído se ve en la Figura 53. En el apartado a) se observa que la relación b/a va aumentando conforme aumenta la temperatura de remojo, lo que pasa en menor medida con el tiempo de remojo; en el análisis de varianza se indica que de estas variables la que tuvo más porcentaje de influencia fue la temperatura de remojo y éste también es el que tiene efecto significativo, este resultado fue semejante con Δb . En el apartado b) la relación b/a va aumentando en las temperaturas de freído y en los tiempos de freído pasa lo mismo pero no con el mismo impacto; en el análisis de varianza (Cuadro 23) representan porcentajes bajos de influencia y solo tiene efecto significativo la temperatura de freído en b/a .

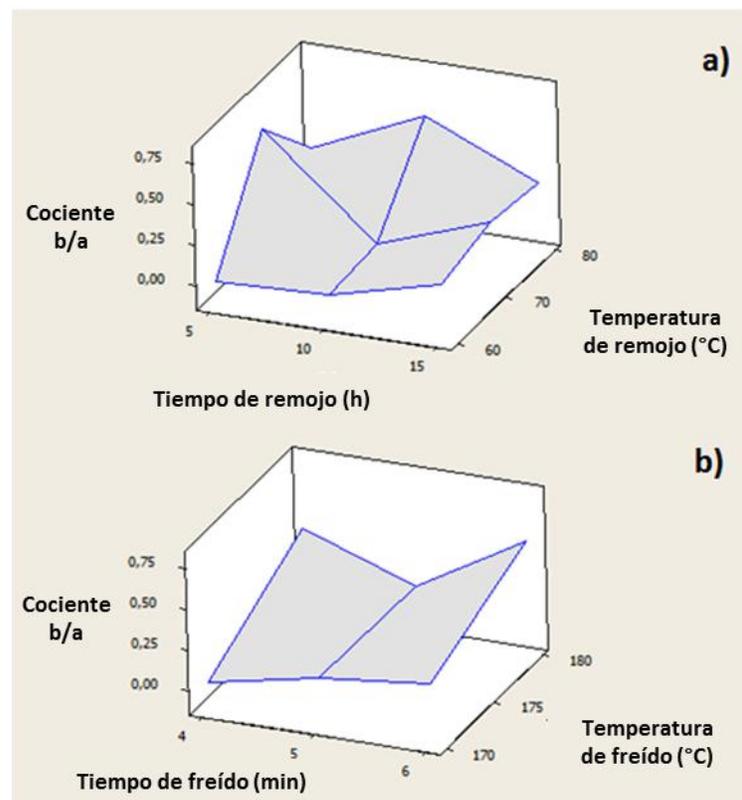


Figura 53. Influencia en el cociente b/a ; a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

3.3.12 Análisis del diseño Taguchi para las propiedades de textura

En el Cuadro 24 se muestran los resultados del análisis de varianza para el diseño Taguchi, indicando las medias de las variables de respuesta para los diferentes niveles de las variables de proceso, así como su porcentaje de influencia en las propiedades texturales. Para la discusión se emplearon este cuadro y en las gráficas de superficie de respuesta para cada una de las variables de respuesta.

Cuadro 24. Resultados del análisis de varianza del diseño Taguchi para las propiedades de textura en las botanas fritas de grano entero de maíz azul.

Variable	Nivel	Dureza (N)		Distancia de fractura (mm)		Carácter crujiente (N/s)		Trabajo fractura (N.s)	
		Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia	Media	% influencia
Temperatura de remojo (°C)	60	57.7	8.3	0.57	21.2	239.3	38.3	7.6	26.2
	70	66.1		0.69		242.4		10.6	
	80	58.0		1.88		165.8		23.3	
Tiempo de remojo (h)	5	53.8	27.9	0.55	18.0	237.0	23.3	6.8	19.6
	10	70.4		0.79		233.8		13.5	
	15	57.6		1.8		176.8		21.2	
Temperatura de freído (°C)	170	60.2	0.1	1.42	8.8	195.5	12.6	18.0	9.7
	180	61.0		0.67		236.2		9.7	
Tiempo de freído (min)	4	66.3	11.5	1.68	13.2	202.3	5.5	21.1	18.3
	5	60.3		0.88		211.1		13.3	
	6	55.2		0.58		234.2		7.1	

*Nota: En **negritas** se muestran los resultados para las variables que tuvieron un efecto significativo, con $\alpha=0.05$.*

3.3.12.1 Dureza

En la Figura 54 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en la dureza. En el apartado a) se observa que la dureza no se ve afectada por el tiempo y temperatura de remojo debido a que no sigue una tendencia definida, solo se observa que la mayor dureza fue alcanzada en la temperatura y tiempo medios (10 h por 70 °C), esto se aseguró por el análisis de varianza (Cuadro 24), que refleja que a pesar de que el tiempo de remojo es la variable que tiene más influencia, éste no tiene un efecto significativo en ésta propiedad. En el apartado b) de la Figura 54 se observa que la dureza no cambia con respecto al cambio de la mayoría de los niveles de las variables excepto en el

tiempo de 4 minutos por 180 °C de freído, donde se observa una mayor dureza, lo que indica que el tiempo y temperatura de freído tienen un porcentaje bajo de influencia en esta propiedad; esto se confirma con el análisis de varianza, donde el tiempo y temperatura de freído representan los porcentajes menores de influencia y éstos no tuvieron un efecto significativo en los resultados.

3.3.12.2 Distancia de fractura

En la Figura 55 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en la distancia de fractura. En el apartado a) se observa que la distancia de fractura no se ve afectada por el tiempo de remojo pues aparenta una tendencia constante, mientras que al aumentar la temperatura de remojo la distancia de fractura aumentó (menor fragilidad), alcanzando el valor más alto en condiciones extremas de temperatura y tiempo (15 h, 80 °C), pues la mayor absorción de la humedad en el remojo convierte a la botana en una estructura muy flexible que es difícil de romper a comparación con las demás condiciones. El análisis de varianza (Cuadro 24), muestra que la temperatura de remojo tuvo el mayor porcentaje de influencia, aun cuando estadísticamente ninguna variable tuvo un efecto significativo. En el apartado b) de la Figura 55 se observa que un mayor tiempo de freído disminuye la distancia de fractura (mayor fragilidad); por el contrario en la temperatura de freído se observa un comportamiento constante de la distancia de fractura, en el análisis de varianza el tiempo y temperatura de freído representan los porcentajes menores de influencia y estos no tuvieron un efecto significativo en los resultados.

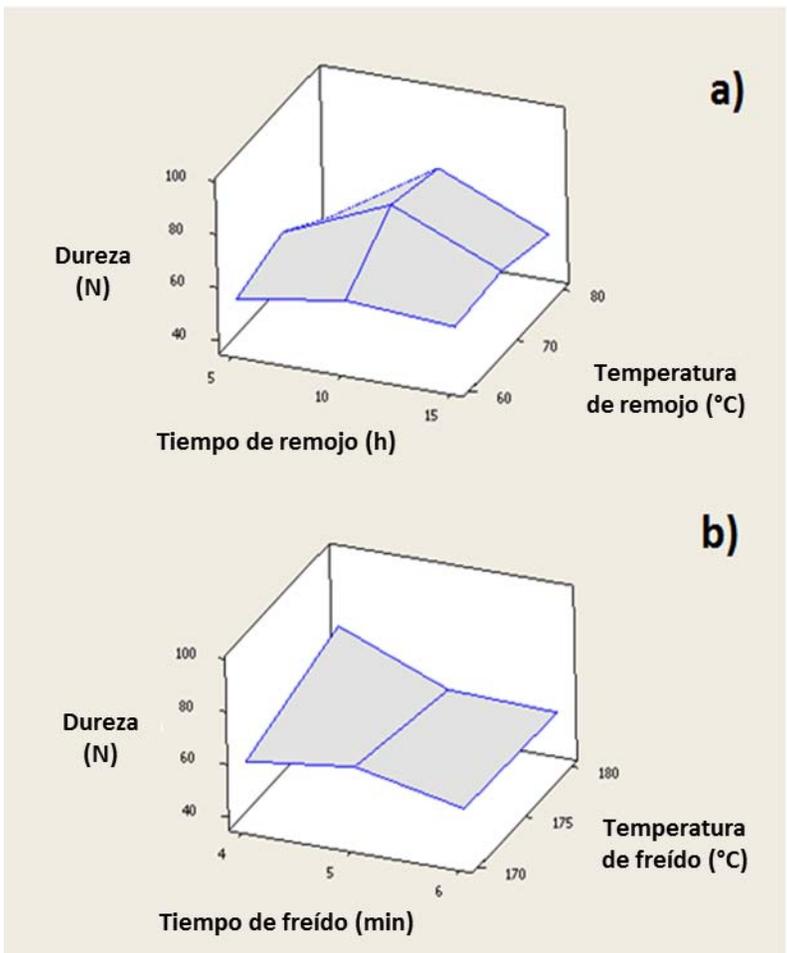


Figura 54. Influencia de las condiciones de proceso en la dureza a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

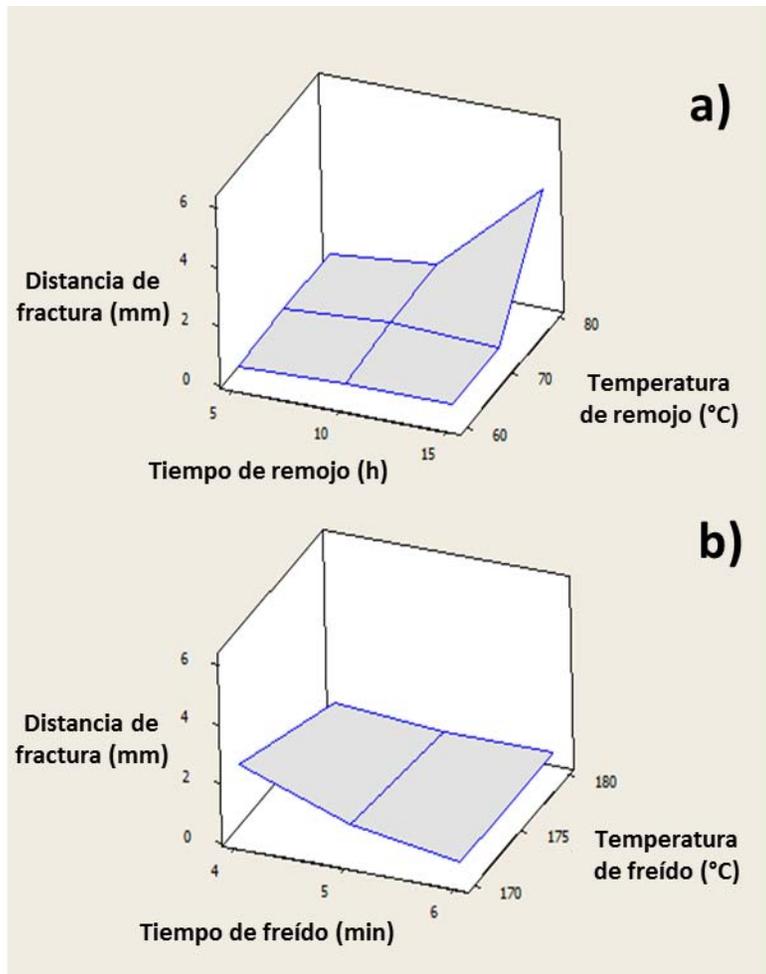


Figura 55. Influencia de las condiciones de proceso en la distancia de fractura a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

3.3.12.3 Carácter crujiente

En la Figura 56 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en el carácter crujiente. En el apartado a) se observa que la el carácter crujiente no se ve afectado por el tiempo pues aparenta una tendencia constante, solo en las condiciones máximas (15 h, 80 °C) el carácter crujiente descendió notablemente; el análisis de varianza (Cuadro 24), muestra que la temperatura de remojo tuvo el mayor porcentaje de influencia (38.3%) y estadísticamente tiene un efecto significativo junto con el tiempo de remojo. En el apartado b) de la Figura 56 se observa la misma tendencia constante, pero el punto donde el carácter crujiente desciende es en las condiciones mínimas de freído (4 min por 170 °C); en el análisis de varianza se observa que estas variables tienen los porcentajes menores de influencia y solo la temperatura de freído presentó efecto significativo.

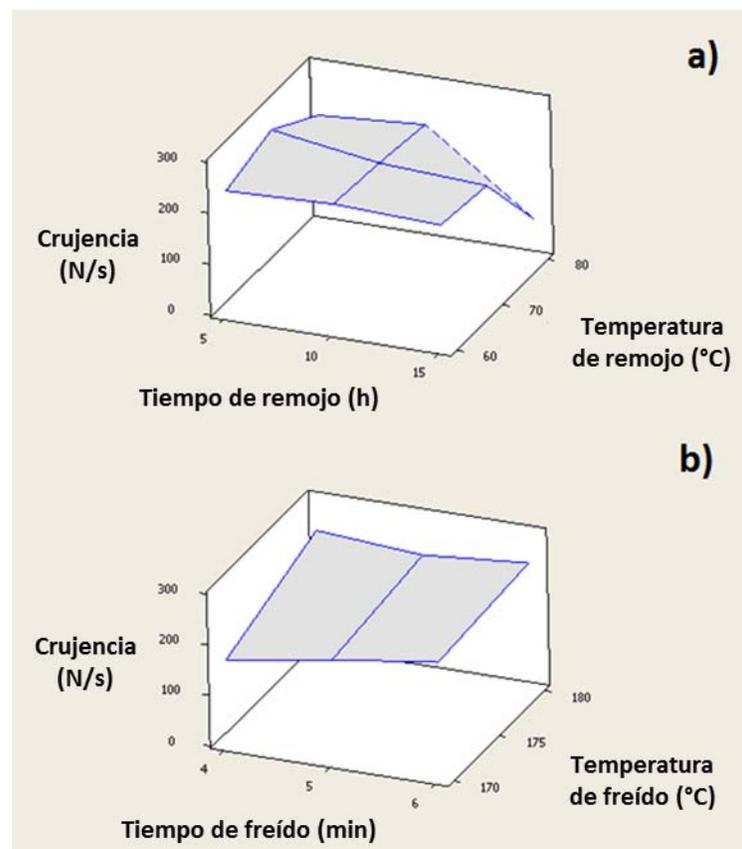


Figura 56. Influencia de las condiciones de proceso en el carácter crujiente a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

3.3.12.4 Trabajo de fractura

En la Figura 57 se muestra el gráfico de superficie respuesta de la influencia del tiempo y temperatura de remojo y freído en el trabajo de fractura. En el apartado a) se observa que el trabajo de fractura no se ve afectado por el tiempo y temperatura de remojo pues aparenta una tendencia constante, sin embargo a las condiciones extremas (15 h, 80 °C) el trabajo de fractura ascendió notablemente. El análisis de varianza (Cuadro 24), muestra que la temperatura de remojo tuvo el mayor porcentaje de influencia y estadísticamente tiene un efecto significativo. En el apartado b) de la Figura 57 se muestra que el trabajo de fractura va disminuyendo a medida que el tiempo de freído va aumentando, en la temperatura de freído no se ve cambio en el trabajo de fractura a medida que aumenta; estadísticamente estas variables tienen los porcentajes menores de influencia y no presentan efecto significativo.

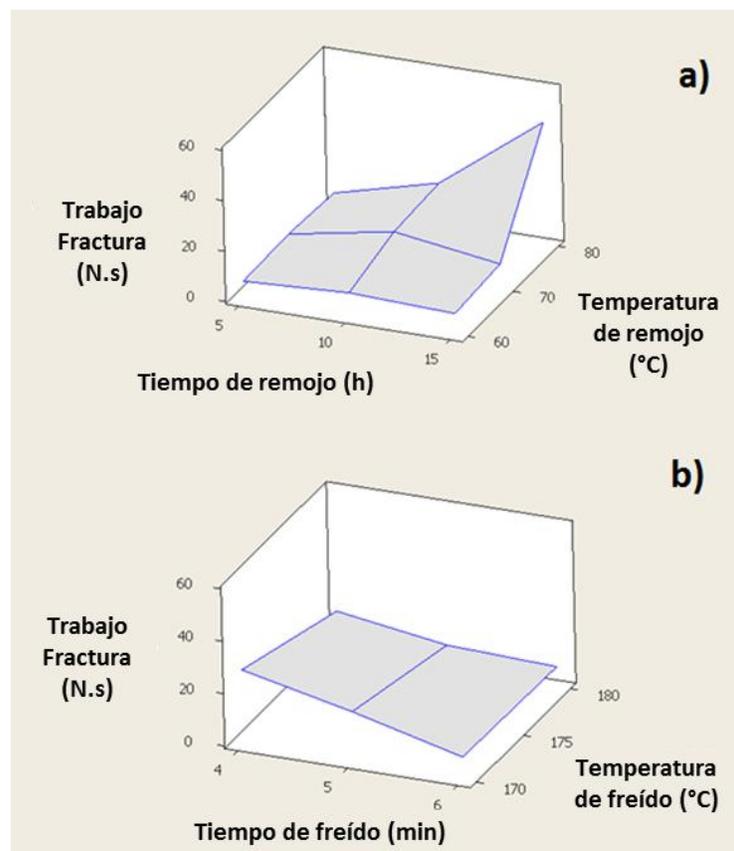


Figura 57. Influencia de las condiciones de proceso en el trabajo de fractura a) tiempo-temperatura de remojo. b) tiempo-temperatura de freído.

3.4 Objetivo particular 3 – Efecto de la congelación previa al freído

3.4.1 Propiedades físicas

Con base en el contenido de humedad teórica que debe de tener un grano de maíz frito (cercano a 1.3%) y en las propiedades de textura, procurando que la botana no sea muy dura, que sea frágil, muy crujiente y con una absorción de aceite baja, se seleccionó la corrida 8 del diseño estadístico Taguchi que tiene como condiciones de remojo 70 °C por 5 horas y freído a 180 °C por 6 minutos; a estas condiciones se le adicionó después del remojo una congelación rápida usando un túnel de congelación con aire marca Loheat Quality Heating Equipment, a -20°C, con dos ciclos de congelación para asegurar el congelamiento total de los granos de maíz. En el Cuadro 25 se muestran los valores comparativos de las propiedades físicas de la corrida 8 y la corrida 8 más congelación, donde el valor de humedad disminuye a la mitad debido a que la formación de cristales pequeños durante la congelación hizo que en el momento del freído hubiera un intervalo mayor de temperatura, lo cual causó que la humedad del maíz se evaporara en mayor cantidad e instantáneamente. Debido a que se tardó menor tiempo en deshidratar el maíz en el freído, el producto se sobre procesó y la absorción de aceite aumentó de un 8.9 a un 11.6%; los valores de humedad después del freído resultantes de la corrida 8 más congelación fueron menores a la original y el porcentaje de absorción de aceite mayor al original, hizo que se compensara el valor del peso hectolítrico final del maíz congelado, teniendo una diferencia mínima en este valor. El intervalo amplio de temperatura durante el freído, que tenía el maíz con congelación, provocó una textura visual y táctil más rugosa que la original que se refleja en el mayor porcentaje de retención de condimento.

Cuadro 25. Efecto de la congelación en las propiedades físicas del maíz azul.

Corrida	8	8 + congelación
Humedad inicial (%)	49.6	50.4
Humedad final (%)	1.6	0.8
Peso hectolitrico (kg/hL)	41.7	40.2
Absorción aceite (%)	8.9	11.6
Retención condimento (%)	2.5	3.6

La degradación del color en el proceso de freído se muestra en el Cuadro 26, donde la congelación ayuda que se mantenga el valor de luminosidad que tiene el maíz crudo, puesto que en la corrida 8 aumentó la luminosidad, en los parámetros de color "a" y "b", además de este cuadro, en la Figura 58, se observa que el primer parámetro (a) toma valores de positivos de 2.3, ligeramente menores a la corrida original, en el parámetro "b" se observa que se degrada en menor proporción (valores de 0.3) con respecto al original.

Cuadro 26. Efecto de la congelación en los parámetros de color L, a, b del maíz azul frito.

Corrida	L	CV (%)	a	CV (%)	b	CV (%)	ΔE	CV (%)
Maíz crudo	20.8	4	-0.5	69	-0.2	50	—	—
8	21.3	4	3.2	21	1.3	13	4.1	18
8 + C	20.5	1	2.3	21	0.3	38	2.8	16

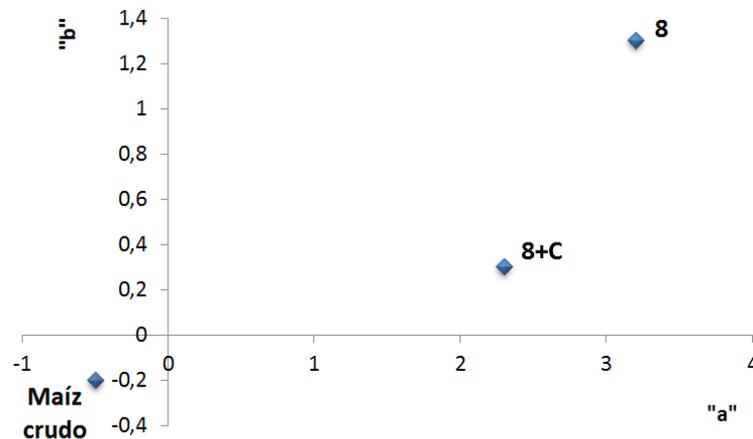


Figura 58. Efecto de la congelación en el maíz azul en los parámetros de color L, a, b.

En la Figura 59 se muestra la apariencia que tienen dichas corridas, donde se puede visualizar la degradación de color de la corrida original (C8) pues se ven más claros y los tonos rojos-amarillos con mayor intensidad que con la corrida que se le agrega la congelación puesto que se ven los maíces más oscuros, lo que se confirma con los valores anteriores donde el valor de luminosidad se mantiene y los parámetros de “a” y “b” se desplazan en menor proporción que en la original. Respecto a la apariencia de las dos corridas se observa que la corrida original tiene una superficie más lisa que la corrida con la congelación, ésto dado por el cambio tan brusco de temperatura, ocasionando el daño y rugosidad en la superficie de la botana.



Figura 59. Efecto que tuvo la congelación en la apariencia del maíz frito.

3.4.2 Propiedades de textura

En el Cuadro 27 se muestran los parámetros de textura, comparando la corrida original con la corrida con congelación previa al freído, donde se muestra que hay una disminución en la dureza, carácter crujiente y el trabajo de fractura y manteniendo el valor de la distancia de fractura; esta misma descripción se visualiza gráficamente en la Figura 60.

Cuadro 27. Efecto de la congelación en los parámetros de textura del maíz azul frito.

Corrida	Dureza (N)	CV (%)	Distancia de fractura (mm)	CV (%)	Carácter crujiente (N/s)	CV (%)	Trabajo de fractura (N.s)	CV (%)
8	60.6	26	0.55	27	270.9	19	7.2	35
8 + Congelación	50.6	20	0.56	33	240.9	17	5.9	36

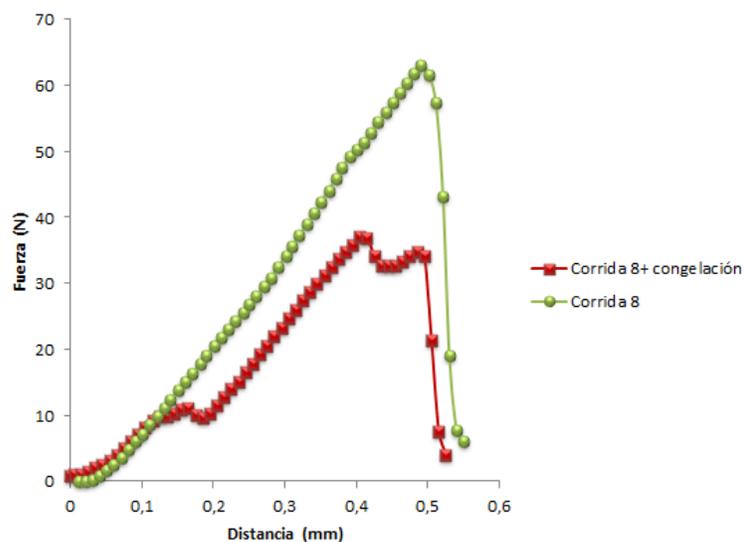


Figura 60. Efecto que tuvo la congelación en los parámetros de textura del maíz azul.

Por lo anterior, se puede decir que las propiedades físicas de la botana de grano de maíz azul con congelación previa al freído se mejoran en el descenso de la humedad y la baja degradación del color de las antocianinas, sin embargo también se busca que la botana cuente con bajo contenido de aceite y este aumenta en comparación con la corrida original; en las propiedades texturales a pesar que baja la dureza, también lo hace el carácter crujiente, principal atractivo de las botanas, concluyendo que la congelación no mejora de manera general las características de la botana.

IV. Conclusiones

El grano azul con el que se trabajó es un grano muy suave debido a la estructura harinosa y a que absorben gran cantidad de agua, lo cual favorece durante la operación de remojo pues el almidón alcanza a hidratarse muy bien.

Una mayor temperatura de remojo reduce tiempos de remojo y mejora tiempos en el proceso de producción de la botana de maíz y ahorro en costos además de asegurar el cocimiento y gelatinización del almidón.

En el ajuste al modelo de la potencia de las cinéticas de absorción de agua se observó el desarrollo de la velocidad de hidratación en las diferentes temperaturas utilizadas; se consiguió un valor aproximado del porcentaje de agua absorbida en un tiempo, entre cada intervalo de tiempo o un tiempo mayor al establecido.

En el modelo de Peleg el inverso de la constante k_2 indica la humedad de saturación a cada temperatura. Muestra que a temperaturas de 30 y 45 °C el maíz absorbe cerca de la mitad de peso de sólidos en agua para llegar al equilibrio y a la temperatura de 80 °C necesita cerca de dos veces y medio el peso de sólidos para llegar al mismo estado; el inverso de la constante k_1 , se relaciona con la velocidad de transferencia de masa. A medida que el valor de la constante es más pequeño la velocidad de transferencia es mayor, obteniéndose que el incremento de la velocidad de absorción de agua va aumentando conforme aumenta la temperatura en que se desarrolla el remojo.

Se encontró que existe una relación entre la humedad después del remojo y el peso hectolítrico con el % de absorción de aceite; entre más alta sea la cantidad de agua que capta el grano de maíz, más alto será el porcentaje de absorción de aceite durante el freído; por lo tanto será más alto el peso hectolítrico.

La humedad después del freído también tiene relación con los parámetros de textura. Si la cantidad de humedad es pequeña la fractura de la botana frita será frágil con una textura muy crujiente, una dureza intermedia y una distancia y trabajo de fractura

bajo. Si la cantidad de humedad es alta el carácter crujiente será bajo, con dureza, trabajo, distancia de fractura alto y fractura dúctil.

Las propiedades que la botana frita de maíz obtendrá al final de su proceso están influenciadas principalmente por la temperatura de remojo. Esta tiene influencia significativa en las siguientes propiedades físicas (humedad después del freído, % de absorción de aceite, retención de condimento) y de textura (carácter crujiente, trabajo de fractura). En segundo lugar está el tiempo de remojo que determina la densidad de la botana y por ultimo hay dos propiedades de textura (dureza y fragilidad) que a pesar de que el tiempo de remojo y la temperatura de remojo respectivamente tenían mayor porcentaje de influencia, estadísticamente no eran significativas.

Por lo anterior se puede decir que para tener baja absorción de aceite (menor al 10%), la humedad después del remojo no debe sobrepasar el 50%; para tener una fractura frágil, dureza moderada, carácter crujiente alto, distancia y trabajo de fractura bajo, característicos de un producto crujiente, la humedad después del freído debe ser menor a 4%. La corrida 8 cumple con estas características, por lo que las condiciones a las que esta corrida se sometió se consideran las más adecuadas.

La corrida 8 se empleó para el objetivo particular 3, donde la congelación fue una opción para mejorar las características físicas pues contribuye a tener una menor humedad, peso hectolitrico, y degradación de color; en las propiedades texturales disminuye la dureza, trabajo de fractura de la botana, conservando su fragilidad y sacrificando un poco su carácter crujiente; sin embargo la botana presento mayor % de absorción de aceite y la congelación daría un incremento en el precio del producto final. En comparación con las propiedades de textura comerciales fue similar a los valores de la marca denominada QyCh. Sin embargo se recomienda omitir la congelación y agregar en el remojo el EDTA para saber el efecto que tiene como secuestrante de calcio para aminorar la dureza y las otras propiedades de textura, con el fin de disminuir el precio del producto, comparado con el proceso de congelación.

V. Referencias

- Aguilera, M., Reza, M. d., Chew, R., y Meza, J. (2011). Propiedades funcionales de las antocianinas. *Revista Biotecnia*, (13) 16-22.
- Almeida, J. (2012). *Extracción y caracterización del colorante natural del maíz negro (Zea mays L.) y determinación de su actividad antioxidante*. México: Tesis de licenciatura en ingeniería agroindustrial. Universidad Politecnica Nacional.
- Brennan, J. (2008). *Manual del procesado de los alimentos*. España: 1° Ed. Editorial Acribia.
- Cagnasso, C., López, L., Rodríguez, V., y Valencia, M. (2007). Estimación de la ingesta potencial de ácido etilendiaminotetraacético en niños y adolescentes argentinos, influencia de la fortificación de cereales para desayuno con sal férrica de este ácido. *Revista Chilena de Nutrición*, (34) 143-149.
- Caivano, J., y López, M. (2004). *Color: ciencia, artes, proyecto y enseñanza*. Argentina: Grupo Argentino del Color.
- Casas, N. (2012a). *Guía rápida: Colorímetro Minolta CR-300*. México: LAPRyFAL, UNAM.
- Casas, N. (2012b). *Propiedades texturales en alimentos. Apuntes de Taller Multidisciplinario de Reología y Textura*. México: LAPRyFAL, UNAM.
- Chauvin, M., Younce, F., Ross, C., y Swanson, B. (2008). Standar scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: relationship with acoustical determination. *Food Science and Human Nutrition*, (39) 345-368.
- DeMan, J., Voisey, P., Rasper, V., Stanley, D. (1975). *Rheology and texture in food quality*. Conn: Avi publishing.
- Dolores, R. M. (30 de 01 de 2005). *Universidad de Granada*. Recuperado el 04 de 08 de 2015, de http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Tema_9.pdf

- Duizer, L. (2001). A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. *Trends in Food Science y Technology*, (12) 17-24.
- Escalante, A., Ramírez, B., Torres, P., Barrón, M., Figueroa, J., y López, J. (2013). La nixtamalización y su efecto en el contenido de antocianinas de maíces pigmentados, una revisión. *Revista Fitotecnica Mexicana*, (36) 429-437.
- FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana (Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 25)*. Italia.
- Fernández, J., y Hoyos, B. (2011). Optimización a partir del método estadístico de Taguchi con aplicación en procesos tecnológicos. *Revista Nacional de Investigación-Memorias*, (9) 62-81.
- Figueroa, J., Narváez, D., Mauricio, A., Taba, S., Gaytán, M., Véles, J., Rincón, F., y Aragón, F. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista Fitotecnica de México*, (36) 305-314.
- Gaytán, M., Martínez, F., y Morales, E. (2000). Aplicación de un proceso de cocimiento dieléctrico en la elaboración de harinas instantáneas de maíz amarillo para preparación de frituras de masa y tortillas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, (50).
- Gonzalez, R., Torres, R., De Greef, D., Bonaldo, A., Robutti, J., y Borrás, F. (2005). *Efecto de la dureza del endospermo del maíz sobre las propiedades de hidratación y cocción*. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, (55) 354-360.
- Gowen, A., Agu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. (2006). Modelling the water absorption process in chickpeas (*Ciner arietinum L.*)-The effect of blanching pre-treatment on water intake and texture kinetics. *Journal of Food Engineering*, (78) 810-819.

- Holikar, M., Annapure, U., Singhal, R., y Kulkarni, P. (2005). Pectin and calcium chloride treatment for low-fat fried green gram splits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, (85) 1677–1680.
- Hurtado, M. (2001). Mezclas legumbre/cereal por fritura profunda de maiz amarillo y de tres cultivares de frejol para consumo "snack". *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, (51) 3-26.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2010). *Maíz cadena de valor agregado*. Argentina: INTA.
- LACIE. (2012). *Libro blanco de la gestion de color 3, espacios de color y conversión de colores*. Francia.
- Laso, J., & Peris, A. (2001). *Tratamientos estadísticos en ensayos de aptitud: Aplicación de la mediana para detección de resultados anómalos*. España: Gabinete de Servicios para la Calidad.
- Lawson, H. (1999). *Aceites y grasas alimentarios, tecnología, utilización y nutrición*. España: Editorial Acribia.
- Luna, B., Hinojosa, A., Ayala, Ó., Castillo, F., y Mejía, A. (2012). *Perspectiva de desarrollo de la industria semillera de maíz en México*. *Revista Fitotecnica Mexicana*, (35) 1-7.
- Luyten, H., y Vliet, T. (2006). Acoustic emission, fracture behavior and morphology of dry crispy foods: a discussion article. *Journal of Texture Studies*, (37) 221-240.
- Luyten, H., Plijter, J., y Van Vliet, T. (2004). Crispy/crunchy crusts of cellular solid food: a literature review with discussion. *Journal of Texture Studies*, (35) 445-492.
- Kavanaugh, C. (2002). Los diseños de Taguchi contra los diseños clásicos de experimentos. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*.

- MAyR. (2006). *Ministerio de Agricultura y Riego, Peru*. Obtenido de <http://www.minag.gob.pe/portal/sector-agrario/agricola/cultivos-de-importancia-nacional/ma%C3%ADz?start=2>
- MinAmbiente. (30 de Mayo de 2003). *Ministerio de ambiente y desarrollo sustentable, Republica de Colombia*. Recuperado el 28 de Mayo de 2014, de <http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf>
- Morales, J., y Vélez, J. (2011). Estudio del efecto combinado del secado y freido en las propiedades de tortillas tostadas. *Información Tecnológica*, (22) 55-68.
- NMX-F-428-1982. (1982). *Alimentos. Determinación de humedad (método de termobalanza)*. México: Norma Mexicana.
- NMX-FF-034/1-SCFI. (2002). *Productos alimenticios no industrializados para consumo humano (Cereales) parte 1: Maíz blanco para proceso alcalino para tortilla de maíz y productos nixtamalizados, especificaciones y métodos de prueba*. México: Secretaria de Economía.
- NOM-247-SSA1-2008. (2008). *Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas*. México: Secretaria de Salud.
- OHAUS. (2001). *Manual de instrucciones. Analizador de humedad MB45*. Suiza.
- Ordóñez, M., Gely, M., y Pagano, A. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de los granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, (3) 153-171.
- Othón, S. (2001). *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales*. México: AGT editor.
- Pantuso, F., Tolaba, M., Aguerre, R., y Suarez, C. (2007). Deshidratación de maíz flint para semilla mediante sólidos adsorbentes. *XI Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1-11.

- Peréz, F., Caraballo, A., Santacruz, A., Hernandez, A., y Molina, J. (2007). Calidad fisiológica en semillas de maíz con diferencias estructurales. *Agricultura Técnica en México*, (33) 52-61.
- Quintero, A. (03 de Marzo de 2014). *Boletín de Ciencia, Educación y Sociedad*. Recuperado el 02 de Junio de 2015, de <https://boletinboces.wordpress.com/2014/03/04/obtiene-cinvestav-maiz-azul-que-ayuda-a-prevenir-enfermedades-cardiovasculares/>
- Ragatz, R. (2006). *Balances de materia y energía*. España: Editorial Reverte.
- Reyes, P. (1990). *El maíz y su cultivo*. México: 1° Ed. A.G.T. Editor.
- Rodríguez, J. (01 de 11 de 2007). *Instituto Tecnológico de Chihuahua*. Recuperado el 18 de 08 de 2015, de Arreglos Ortogonales: <http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/ingcalidad/unidad3.html>
- Romero, A., Falcón, M., Barrón, J., Silveira, M., y Alfaro, R. (2010). Evaluación del color del garbanzo (*Cicer arietinum* L.) por métodos instrumentales y sensoriales. *Revista Mexicana de Agronegocios*, (14) 323-335.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Vallès Pàmies, B., Colas, B., y Le Meste, M. (2002). Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science & Technology*, (13) 217–227.
- Sala, R., y Barroeta, A. (s.f.). *Manual de microscopía de piensos*. España: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Salinas, Y., y Aguilar, L. (2010). Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, (2) 5-11.
- Salinas, Y., Aragón, F., Ybarra, C., Aguilar, J., Altunar, B., y Sosa, E. (2013). Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista fitotecnica*, (36) 23-31.

- Salinas, Y., Cruz, F., Díaz, S., Castillo, y Fernando. (2012). Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Fitotecnia*, (35) 33-41.
- Salinas, Y., Soria, J., y Espinosa, E. (2010). *Aprovechamiento y distribución de maíz azul en el Estado de México*. México: SAGARPA.
- Salvador, A., Barela, P., Sanz, T., y Fiszman, S. (2009). Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture. *Food Science and Technology*, (42) 763-767.
- Seguí, J. (2010). *Biología y biotecnología de las plantas*. España: 1° Ed. Editorial Universitat Politècnica de Valencia.
- Singthong, J., y Thongkaew, C. (2009). Using hydrocolloids to decrease oil absorption in banana chips. *Food Science and Technology*, (42) 1199–1203.
- Sociedadycultura. (10 de enero de 2012). *Sociedadycultura, cultivos básicos*. Recuperado el 01 de junio de 2014, de <http://sociedadycultura.com/cultivos-basicos-2.html>
- Sopade, P., Ajisehiri, E., y Badau, M. (1991). The use the Peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. *Journal of Food Engineering*, (15) 269-283.
- Stanley, R., y Butler, W. (1963). Procesos vitales de la semilla viva. En *Semillas* (págs. 170-201). México: 1° Ed. Compañía editorial continental.
- Tester, R., y Debon, S. (2000). Annealing of starch, a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, (27) 1-12.
- The Tapas Lunch Company. (2011). *The Tapas Lunch Company* . Recuperado el 2014 de 09 de 17, de <http://www.thetapaslunchcompany.co.uk/spanish-food/spanish-bar-snacks/fried-corn-catering-tub>

- TheTextureReport. (1998). *Quantify Brittleness and Crispiness*. Stable Micro Systems.
- Toche, N. (02 de Septiembre de 2014). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Recuperado el 02 de Junio de 2015, de <http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/en/c/242440/>
- TSFA. (s.f.). Corn quality assurance manual. The snacks food association.
- Valencia, L., y Torres, J. (2011). *Caracterización del proceso de cocción de yuca a presión atmosférica con empaque y sin empaque al vacío*. Colombia: Tesis de licenciatura en ingeniería en alimentos. Universidad del Valle Santiago de Cali.
- Van, T. (2004). *Rheology and fracture mechanics of foods*. U.S.A.: CRC Press, Taylord and Francis group.
- Vázquez, M., Chenlo, F., Moreira, R., y Riva, P. (2007). Rehidratación de zanahorias previamente secadas con aire y deshidratadas osmóticamente. *XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 115-126.
- Véles, J. (2004). *Caracterización de tostadas elaboradas con maíces pigmentados y diferentes métodos de nixtamalización*. México: Tesis de maestría en tecnología avanzada. Instituto Politecnico Nacional.