



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEXTURA DE PALOMITAS OBTENIDAS
DE MAÍCES PALOMEROS HÍBRIDOS**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO INDUSTRIAL

PRESENTA:

LUIS ALFONSO COYOLI LÓPEZ

(N° de cuenta:1413801, 45ava. Generación)

MODALIDAD:

TESIS INDIVIDUAL

ASESOR: DR. EN C. DE A. NESTOR PONCE GARCÍA

**CAMPUS UNIVERSITARIO “EL CERRILLO”,
EL CERRILLO PIEDRAS BLANCAS, TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO**

ENERO, 2025



RESUMEN

ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEXTURA DE PALOMITAS OBTENIDAS DE MAÍCES PALOMEROS HÍBRIDOS

Luis Alfonso Coyoli Lopez. Ingeniero Agrónomo Industrial.

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas.

Asesor Académico: Dr. Néstor Ponce García. Universidad Autónoma del Estado de México.
Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Estado de
México, México. 50200.

✉ acoyolil99@gmail.com; nponceg@uaemex.mx

Las principales características de calidad de los maíces palomeros comerciales están relacionadas con la forma de la palomita, el volumen de expansión y el porcentaje de granos sin reventar. Estas cualidades dependen, entre otros factores, de la genética del grano y de condiciones agronómicas, lo que se refleja en propiedades como el contenido de humedad, la forma y la dureza del grano. En general, el maíz palomero producido en México no cumple con los estándares exigidos para la producción de palomitas de alta calidad, lo que ha impulsado una búsqueda constante de alternativas que reduzcan la importación masiva de este tipo de maíz, optándose frecuentemente por variedades mejoradas.

Por ello, es esencial evaluar la calidad física de los granos de estas nuevas variedades para determinar, de manera objetiva, si cumplen con las expectativas necesarias para la elaboración de palomitas y su competitividad comercial. Sin embargo, la evaluación instrumental de alimentos como las palomitas presenta desafíos debido a la heterogeneidad de su forma, la fragilidad en su manejo y su alto grado de higroscopicidad, entre otros factores.

En este contexto, el propósito de la presente investigación fue estandarizar un método instrumental y objetivo para determinar y evaluar el perfil de textura de las

palomitas obtenidas de diferentes variedades híbridas de maíz palomero. Para ello, se utilizaron granos de cinco variedades híbridas y una variedad comercial (testigo). Se evaluaron diversas características físicas de los granos, tales como las dimensiones axiales (largo, ancho y grosor), el peso hectolitro (*phL*), el índice de reventado (*IRG*) y el volumen de expansión (*VEG*). Paralelamente, se estandarizó la técnica de reventado de los granos mediante aire caliente y se implementó un método para realizar el análisis de perfil de textura (*APT*) en volumen, utilizando un analizador de textura equipado con una celda de Kramer. Los atributos de textura evaluados fueron dureza, elasticidad, cohesividad y masticabilidad. Los resultados mostraron que las dimensiones axiales de los granos tendieron a correlacionarse con el *IRG* y el *VEG*, observándose que los granos más pequeños presentaban un mayor *VEG* en comparación con los más grandes. Entre las cinco variedades híbridas evaluadas, la variedad M6 destacó moderadamente por sus características físicas, con altos índices de reventado (95.3%) y un notable volumen de expansión (800 mL). Además, en el *APT*, la variedad M6 presentó parámetros comparables a los de la variedad comercial testigo, que mostró los mejores atributos físicos del grano y de textura de las palomitas.

Palabras clave: Grano de maíz, palomita de maíz, índice de reventado, volumen de expansión, análisis del perfil de textura.

ABSTRACT

TEXTURE PROFILE ANALYSIS OF POPCORN OBTAINED FROM HYBRID POPCORN MAIZE

Luis Alfonso Coyoli Lopez. Ingeniero Agrónomo Industrial.

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas.

Asesor Académico: Dr. Néstor Ponce García. Universidad Autónoma del Estado de México.

Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Estado de México, México. 50200.

✉ acoyolil99@gmail.com; nponceg@uaemex.mx

The key quality attributes of commercial popcorn maize are primarily associated with the shape of the popped kernel, expansion volume, and the percentage of unpopped kernels. These characteristics are influenced by factors such as the grain's genetics and agronomic conditions, which in turn affect properties like moisture content, grain shape, and hardness. Generally, popcorn maize produced in Mexico does not meet the stringent standards required for high-quality popcorn production, driving a continual search for alternatives to reduce the large-scale importation of this maize, often favoring improved varieties. As a result, it is crucial to assess the physical quality of grains from these new varieties to objectively determine whether they meet the necessary standards for popcorn production and are commercially viable. However, the instrumental evaluation of foods like popcorn presents several challenges due to issues such as shape variability, fragility during handling, and high hygroscopicity. In this context, this study aimed to standardize an objective, instrumental method for determining and evaluating the texture profile of popcorn produced from different hybrid maize varieties. Grains from five hybrid varieties and one commercial variety (used as a control) were analyzed. Various physical characteristics were measured, including axial dimensions (length, width, and

thickness), hectoliter weight (pHL), popping index (*PI*), and expansion volume (*EVG*). The hot-air popping technique was standardized, and a method was developed to conduct texture profile analysis (*TPA*) in volume using a texture analyzer equipped with a Kramer cell. The texture attributes assessed included hardness, elasticity, cohesiveness, and chewiness. The results indicated that grain axial dimensions tended to correlate with both *PI* and *EVG*, with smaller grains generally exhibiting higher *EVG* compared to larger grains. Of the five hybrid varieties tested, the M6 variety stood out moderately for its physical grain properties, achieving high popping indices (95.3%) and a notable expansion volume (800 mL). In addition, the *TPA* results showed that the M6 variety demonstrated texture parameters comparable to those of the commercial control, which had the best overall physical and texture characteristics of both the grain and the popped kernels.

Keywords: Maize grain, popcorn, popping index, expansion volume, texture profile analysis.

INDICE GENERAL

DEDICATORIAS	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE CUADROS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. JUSTIFICACIÓN.....	5
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
5.1. Palomitas de maíz.....	6
5.1.1. Requerimientos generales para la expansión del grano	7
5.1.2. Características físicas del grano	8
5.1.2.1. Dimensiones axiales	8
5.1.2.2. Peso Individual del grano (<i>PIG</i>)	9
5.1.2.3. Peso de mil granos (<i>PMG</i>).....	9
5.1.2.4. Peso hectolitro (<i>phL</i>).....	10
5.1.3. Reventado del grano (producción de palomitas)	11
5.1.3.1. Volumen de expansión	11
5.1.3.2. Índice de reventado	12
5.1.4. Evaluación de la calidad de las palomitas de maíz.....	13

5.2. Reología y textura	14
5.2.1. Pruebas objetivas instrumentales imitativas	14
5.2.2. Análisis del Perfil de Textura (APT)	15
5.2.2.1. Parámetros del APT de interés en palomitas de maíz	17
5.2.2.1.1. Dureza.....	17
5.2.2.1.2. Cohesividad	17
5.2.2.1.3. Elasticidad.....	18
5.2.2.1.4. Fracturabilidad	19
5.2.2.1.5. Masticabilidad	19
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
6.1. Ubicación del sitio experimental.....	20
6.2. Material biológico	20
6.3. Preparación de las muestras.....	20
6.4. Evaluación de las propiedades físicas del grano	20
6.4.1. Determinación del volumen, peso individual (<i>PIG</i>) y peso hectolitro (<i>phL</i>)	21
6.4.2. Determinación de las dimensiones axiales	23
6.4.3. Proceso de reventado de granos	23
6.4.4. índice de reventado de granos (<i>IRG</i>) y Volumen de expansión de grano (<i>VEG</i>).....	25
6.5. Análisis de perfil de textura (APT).....	25
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
7.1. Análisis de las propiedades físicas de las muestras	28
7.1.1. Dimensiones axiales (<i>L, A, G</i>).....	28
7.1.2. índice de reventado de grano (<i>IRG</i>) y Volumen de expansión de grano (<i>VEG</i>)	29
7.1.3. Peso individual del grano (<i>PIG</i>), volumen de grano (<i>VG</i>) y peso hectolitro (<i>phL</i>) del grano.....	31
7.2. Análisis del Perfil de Textura (APT) de las palomitas.....	32
7.2.1. Dureza	32

7.2.2. Elasticidad.....	34
7.2.3. Cohesividad	34
7.2.4. Masticabilidad	35
VIII. CONCLUSIONES	37
IX. SUGERENCIAS.....	38
X. REFERENCIAS CONSULTADAS.....	39

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores medios de las propiedades físicas de apariencia (<i>L</i> , <i>A</i> , <i>G</i>) de granos de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.....	28
Cuadro 2. Valores medios de volumen de expansión de grano (<i>VEG</i>) e índice de reventado (<i>IRG</i>) de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.	30
Cuadro 3. Valores medios de las propiedades físicas de peso y densidad (<i>PIG</i> , <i>VG</i> y <i>phL</i>) de granos de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.	32
Cuadro 4. Valores medios del análisis de perfil de textura de palomitas obtenidas a partir de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos (formas) de palomitas de maíz 1. Tipo hongo; 2. Tipo mariposa (Adaptada de Sweley et al., 2013).	6
Figura 2. Dimensiones axiales en un grano de maíz (Adaptada de Sangamithra et al., 2016).	8
Figura 3. Curva de perfil de textura generalizada (Sánchez, 2022, adaptada de Bourne, 2002).....	16
Figura 4. Obtención de cohesividad ($\text{Área 2}/\text{Área 1}$). (Torres-Salas et al., 2023). .	18
Figura 5. Peso de 25 g de muestra de maíz híbrido en balanza analítica.	21
Figura 6. Volumen de 25 g de muestra de maíz híbrido en probeta de 100 mL....	22
Figura 7. Peso Individual de un grano de maíz	22
Figura 8. Determinación del peso hectolitro en granos de maíz.....	23
Figura 9. Granos de maíz palomero (25 g) en el interior de la cámara de reventado de la palomera.....	24
Figura 10. Reventado de los granos de maíz y recepción de las palomitas.....	24
Figura 11. Volumen de expansión de muestra de 25 g de grano.	25
Figura 12. Granos no reventados.....	26
Figura 13. a. Analizador de Textura Universal (Mod. TA-XT2 Plus). b. Celda de Kramer con muestra de palomitas.....	26

I. INTRODUCCIÓN

La textura es una propiedad sensorial que puede ser percibida y descrita por los seres humanos. No obstante, es posible realizar pruebas instrumentales mediante dispositivos diseñados para medir la textura, los cuales detectan y cuantifican ciertos parámetros físicos que luego deben ser interpretados en términos de percepción sensorial. La textura debe entenderse como un atributo multiparamétrico, es decir, un conjunto de características derivadas de la estructura del alimento que son detectadas por diversos sentidos (Szczeniak, 2002).

Sweley et al. (2013) resaltaron la estrecha relación entre las propiedades físicas y químicas del grano de maíz y la textura de las palomitas, centrándose en el endospermo del grano. La textura de la palomita está influenciada en gran medida por el tipo de almidón que contiene el grano. Aunque otras investigaciones no se enfocan específicamente en la caracterización del perfil de textura instrumental en palomitas, Bourne (2002) evaluó la textura de este producto en pruebas sensoriales.

El presente estudio evalúa un grupo de cinco híbridos experimentales y uno comercial. Aunque existe poca información sobre su potencial de rendimiento, Torres et al. (2011) señalan que, en las últimas tres décadas, se han realizado esfuerzos significativos para mejorar los rendimientos de híbridos palomeros. Estos híbridos se han desarrollado utilizando germoplasma élite de climas tropicales y subtropicales, tanto de origen mexicano como extranjero, con el objetivo de generar maíces palomeros de alto rendimiento.

Las diferencias en los métodos de preparación (olla, microondas, aire caliente), la heterogeneidad del producto final, la variedad y calidad del grano, así como las técnicas de evaluación, son factores que complican la determinación objetiva de la calidad de las palomitas. Sin embargo, a pesar de la escasa información al respecto, la estandarización de un método instrumental que permita identificar objetivamente el perfil de textura de las palomitas, independientemente de su método de preparación o la calidad del grano, sería una herramienta valiosa. Esto es

particularmente relevante dado que la textura final de las palomitas está fuertemente relacionada con las propiedades físicas y químicas del grano.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el perfil de textura de palomitas de maíz provenientes de distintas variedades híbridas de maíz palomero, mediante la estandarización de una metodología instrumental objetiva basada en la compresión uniaxial. Para ello, se utilizó un analizador de textura universal TA-XT2, equipado con una celda de Kramer.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el perfil de textura de palomitas de maíz elaboradas a partir de diferentes variedades de granos de maíces palomeros híbridos, mediante análisis instrumental objetivo imitativo, con el propósito de identificar diferencias texturales significativas entre las variedades evaluadas.

2.2. Objetivos específicos

- Estandarizar, mediante un enfoque de ensayo-error, un método instrumental imitativo que permita la evaluación objetiva del perfil de textura de las palomitas elaboradas a partir de las diferentes variedades de maíces palomeros híbridos, asegurando su reproducibilidad para su aplicación en análisis comparativos.
- Identificar, a través del método instrumental imitativo estandarizado, la variedad híbrida de maíz palomero que presente el mejor perfil de textura en sus palomitas, en comparación con una variedad comercial de maíz palomero de referencia, con el fin de determinar las características que contribuyen a una mejor calidad textural.
- Determinar el índice de reventado y el volumen de expansión de los granos de las cinco variedades híbridas de maíz palomero, utilizando metodologías de referencia reportadas, con el fin de establecer posibles correlaciones con el perfil de textura de las palomitas obtenidas e identificar la influencia de estas propiedades en la calidad final del producto.
- Evaluar las propiedades físicas de tamaño, peso, volumen y densidad de los granos de las variedades híbridas de maíz palomero objeto de estudio, mediante la aplicación de metodologías de referencia reportadas, con el propósito de establecer posibles correlaciones entre estas propiedades y el perfil de textura de las palomitas producidas.

III. HIPÓTESIS

Es posible caracterizar, diferenciar y analizar el perfil de textura de las palomitas obtenidas a partir de granos de diferentes variedades de maíz palomero híbrido, mediante la aplicación de un método instrumental objetivo imitativo estandarizado, que permita evaluar de manera precisa las propiedades texturales y establecer diferencias significativas entre las variedades, proporcionando una herramienta confiable para la evaluación de la calidad de las palomitas.

IV. JUSTIFICACIÓN

La textura es uno de los principales atributos de calidad considerados al seleccionar maíz palomero. En este aspecto, los maíces palomeros mexicanos suelen presentar deficiencias en comparación con las variedades importadas. Actualmente, alrededor del 99% del maíz palomero consumido en México es importado de Estados Unidos, lo que subraya la necesidad urgente de realizar estudios enfocados en mejorar la calidad de las variedades nacionales. Esta situación pone de manifiesto la importancia de profundizar en investigaciones que potencien la calidad de los materiales producidos en el país.

Las variedades híbridas utilizadas en este estudio carecen de información sobre su capacidad de expansión y las propiedades físicas del grano asociadas a esta característica. Por ello, es fundamental determinar la relación entre la capacidad de expansión del grano y sus variables físicas.

Actualmente, existe escasa información científica sobre la textura de las palomitas de maíz, especialmente en lo referente a variedades y cultivares mexicanos. Se requieren más estudios que caractericen tanto la calidad física del grano como el perfil de textura de las palomitas obtenidas. El objetivo de este proyecto es generar información innovadora que contribuya a la evaluación de parámetros clave para mejorar la calidad del maíz palomero producido en México. Los resultados obtenidos podrían tener un impacto significativo en áreas como el mejoramiento genético y el manejo de cultivos, proporcionando una base sólida para incrementar la competitividad de las variedades nacionales.

Además, este estudio pretende ofrecer herramientas objetivas para el análisis del perfil de textura de las palomitas de maíz, un atributo clave pero difícil de evaluar debido a la heterogeneidad del producto. El presente trabajo pretende contribuir en ese sentido, proporcionando un enfoque objetivo y útil tanto para el sector agroindustrial como para el ámbito de la investigación.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Palomitas de maíz

A los granos de maíz palomero reventados se les denomina palomitas, las cuales se clasifican en dos tipos según su forma: hongo o mariposa (Figura 1). Las palomitas tipo hongo se utilizan principalmente en mercados de productos pre-reventados, ya que son menos propensas a romperse. Por otro lado, las palomitas tipo mariposa se caracterizan por tener apéndices que se extienden en varias direcciones, lo que las hace más frágiles (Sweley *et al.*, 2013).

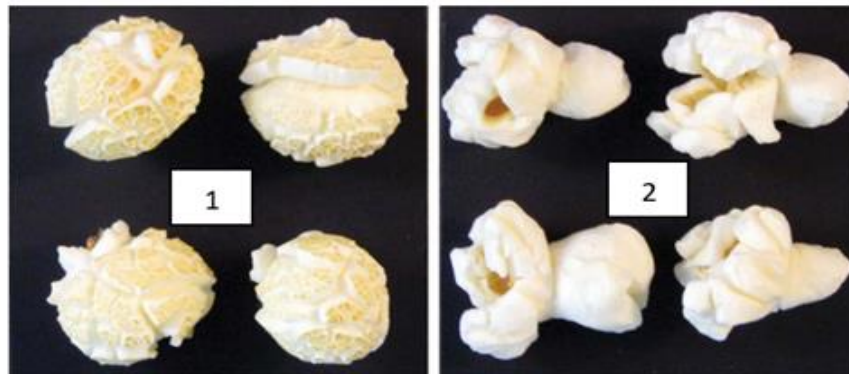


Figura 1. Tipos (formas) de palomitas de maíz 1. Tipo hongo; 2. Tipo mariposa (Adaptada de Sweley *et al.*, 2013).

Durante la formación de la palomita, el endospermo desempeña un papel fundamental, y la humedad del grano es crucial para el proceso de reventado. Cuando el pericarpio se rompe, el agua sobrecalentada se vaporiza y se dispersa rápidamente en los sitios de nucleación, generando la fuerza necesaria para expandir el almidón. Se cree que el hilio del almidón actúa como el principal sitio de nucleación y vaporización del agua sobrecalentada en los gránulos de almidón del endospermo translúcido.

Para que una palomita se forme, es necesario que el calor y la presión dentro del grano aumenten simultáneamente. El vapor sobrecalentado provoca la expansión del almidón y las proteínas, formando una “*espuma*”. A medida que el vapor se

disipa, la temperatura interna disminuye, y al llegar al punto más bajo, los polímeros de almidón y proteínas se convierten en una espuma vítrea, lo que otorga a las palomitas su característica crujiente (Lusas *et al.*, 2001).

La expansión del grano está controlada por la extensión multiaxial de burbujas individuales, impulsada por la presión del vapor, aunque se produce una ruptura localizada de las paredes celulares. Durante este proceso, la mayoría de los gránulos de almidón se gelatinizan, pero permanecen mayormente intactos. El resultado es una red de células expandidas que forma una estructura tridimensional, conocida como palomita de maíz (Sweley *et al.*, 2013).

5.1.1. Requerimientos generales para la expansión del grano

El porcentaje de humedad del grano es un factor muy importante que influye en la cantidad de granos que revientan y también en su volumen de expansión. Generalmente, el grano tiene un buen comportamiento cuando contiene entre 12% y 13% de humedad; a nivel comercial, se ha estimado que el contenido de humedad del maíz palomero oscila alrededor del 11.9% (Martines, 2006).

Según Serna (1999), para obtener la máxima expansión de una palomita de maíz, el contenido de humedad del grano debe mantenerse entre el 13% y el 14.5%, siendo el 13.5% el valor ideal. Si el contenido de humedad es menor, la expansión del grano se reduce significativamente. Una vez que el grano ha reventado, el producto final contiene menos del 3% de humedad, lo que hace que las palomitas sean altamente higroscópicas, es decir, absorben fácilmente la humedad del entorno, incluso en ambientes con solo un 20% de humedad relativa.

Por esta razón, es fundamental envasarlas pocos minutos después de su elaboración para minimizar, o incluso evitar, la pérdida de calidad, especialmente en lo que respecta a la pérdida de crujencia (textura) y volumen. Dado que el almacenamiento y manejo del grano pueden influir en su contenido de humedad, es recomendable guardar los paquetes abiertos de maíz en contenedores herméticos hasta su uso. Además, se debe evitar almacenarlos en el refrigerador, ya que el aire seco en su interior podría deshidratar el grano.

5.1.2. Características físicas del grano

El uso de métodos de análisis rápidos es esencial para estimar un nivel adecuado de calidad del grano, especialmente en lo que respecta al manejo postcosecha, almacenamiento y procesamiento de alimentos (Ponce-García *et al.*, 2017). Ospina (2001) destaca que las características físicas del grano, como el peso, tamaño, forma, peso hectolitro, porosidad y densidad, son parámetros clave a considerar en un análisis de calidad. Asimismo, Ponce-García *et al.* (2017) subrayan que los parámetros de calidad se dividen en dos categorías: las propiedades estables, como la dureza, tamaño, forma y color del grano, y las propiedades variables, que incluyen el contenido de humedad, contaminación, daño al grano y densidad aparente.

5.1.2.1. Dimensiones axiales

En los granos de cereales, se miden tres dimensiones principales: largo (L), ancho (A) y grosor (G) (Figura 2). Estas dimensiones suelen determinarse utilizando un micrómetro o vernier, y se registran en milímetros (Ponce-García *et al.*, 2017). El largo (L) se define como la distancia desde la punta hasta la corona del grano; el ancho (A) es la medida en paralelo a la cara del grano, de un punto a otro; y el grosor (G) corresponde a la distancia entre las dos caras del grano (Pordesimo *et al.*, 1990, citado por Karababa, 2005).

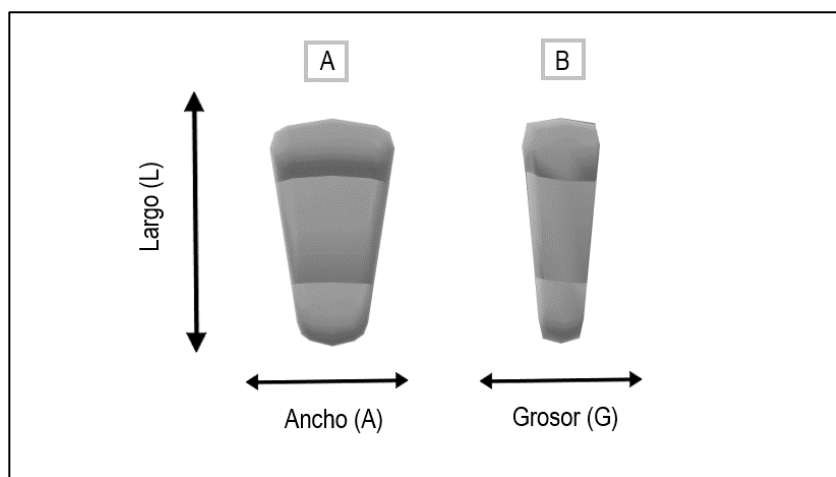


Figura 2. Dimensiones axiales en un grano de maíz (Adaptada de Sangamithra *et al.*, 2016).

Al-Mahasneh y Rababah (2007) reportan que la medición de las dimensiones axiales de las semillas y granos es muy común y útil para seleccionar separadores o tamices de grano, para calcular la energía requerida para llevar a cabo la molienda, así como para calcular el área de superficie y el volumen de granos durante procesos como el secado, aireación, calentamiento y enfriamiento.

5.1.2.2. Peso Individual del grano (*PIG*)

El rendimiento del maíz depende del número de granos por unidad de superficie y del peso individual de cada grano al momento de la cosecha. Este peso final suele diferir del que alcanza en la madurez fisiológica debido a factores agronómicos y ambientales, como la fecha de siembra, la densidad de población, la disponibilidad de nitrógeno, la temperatura y el estrés hídrico. Además, factores intrínsecos del genotipo, como la tolerancia al estrés biótico y abiótico, también pueden limitar la disponibilidad de asimilados durante la etapa de llenado del grano (Borras *et al.*, 2003 y 2009, citado por Corona-Mendoza *et al.*, 2012).

De acuerdo con Bewley y Black (1985), el crecimiento del grano se describe comúnmente en términos de acumulación de materia seca y contenido de agua, y su desarrollo se divide en dos etapas: alargamiento y llenado. El alargamiento es el resultado de la división celular, mientras que el llenado implica el depósito de almidón y proteínas en el endospermo. Durante este proceso, algunos carbohidratos se trasladan al grano en crecimiento, contribuyendo entre el 15% y el 20% del peso seco final del grano, aunque estas estimaciones pueden variar.

5.1.2.3. Peso de mil granos (*PMG*)

El peso de mil granos (*PMG*) es un indicador del tamaño y densidad del grano. Un valor bajo de *PMG* corresponde a granos suaves, mientras que un valor alto indica granos más duros y compactos (García y Vázquez, 2016). Este parámetro es crucial para determinar la masa del grano y seleccionar cultivares con mejor calidad física y fisiológica de la semilla (Ponce-García *et al.*, 2017). Moreno (1984) estableció que el análisis del *PMG* puede realizarse mediante repeticiones de cien granos,

contados manualmente o con un contador de semillas, registrando su peso en gramos.

Por su parte, Blandino et al. (2010) señalaron que parámetros como el peso hectolitro (*phL*) y el PMG además de medir el peso del grano, de forma indirecta, determinan la dureza. Sin embargo, aunque la prueba de *PMG* es una de las primeras herramientas utilizadas para estimar la dureza del grano, no proporciona información concluyente por sí sola. Por esta razón, suele emplearse junto con otros análisis complementarios del grano.

5.1.2.4. Peso hectolitro (*phL*)

El peso hectolitro (*phL*) se define como la masa de un material por unidad de volumen y se expresa en unidades de masa por volumen, comúnmente en kilogramos por hectolitro (kg/hL). En la evaluación de granos, este valor se refiere al peso de una cantidad de granos que ocupa un volumen de 100 litros (Wilhelm *et al.*, 2004).

El *phL* está influenciado por la estructura del endospermo, en particular por la proporción entre el endospermo vítreo y el harinoso, lo que determina la dureza del grano. Cuanto mayor sea la densidad del grano, mayor será su contenido de endospermo vítreo, lo que indica que el grano es más duro (Guelpa *et al.*, 2016).

De acuerdo con Ortiz-Torres et al. (2023) el peso hectolitro y el peso de mil semillas, pueden ser empleadas para predecir el comportamiento del volumen de expansión en genotipos de maíz, dado que a mayor peso de semilla y peso hectolitro hay un mejor volumen de reventado.

5.1.3. Reventado del grano (producción de palomitas)

Un grano puede reventar cuando la presión interna (presión de vapor de agua en el grano) excede la suma de la presión de explosión del pericarpio (P_p) y la presión atmosférica (P_a); entonces, la presión de explosión es la fuerza necesaria para romper el pericarpio. La presión interna mínima requerida para que el grano reviente se denomina presión crítica (P), que se define como la suma de la presión de explosión del pericarpio y la presión atmosférica ($P = P_p + P_a$). Para un grano con un valor específico de P_p , la explosión ocurrirá a la temperatura en la que la presión de vapor del agua sea igual a $P_p + P_a$.

Sin embargo, no todos los granos de una muestra presentan la misma probabilidad de reventar a la misma temperatura. Aunque los granos tengan la misma presión interna de vapor, poseen diferentes presiones críticas, lo que se convierte en un factor determinante para romper el pericarpio (Villanueva, 2008). Virot y Ponomarenko (2015) llevaron a cabo un estudio para determinar la cinética de reventado de las palomitas en un horno de microondas, hallando que la temperatura a la cual estallaba la mayor cantidad de granos era de 180°C. Además, observaron que cuando la temperatura alcanzaba alrededor de 100°C, la humedad del grano lograba un equilibrio termodinámico a la presión de vapor.

Por otro lado, el reventado de palomitas utilizando aire caliente requiere un mayor contenido de humedad en los granos para obtener un volumen de expansión superior. Según Metzger et al. (1989), las palomitas producidas con este método generan un mayor volumen de expansión en comparación con las elaboradas con aceite caliente, independientemente del contenido de humedad.

5.1.3.1. Volumen de expansión

El volumen de expansión, que se define como el volumen de maíz reventado por gramo de maíz sin reventar, es uno de los rasgos de calidad más importantes para la industria (Dofing *et al.*, 1990). Este volumen se determina comparando el espacio que ocupan las palomitas (V_2) con el volumen inicial del grano antes de reventar (V_1). Las principales variables que influyen en la calidad de expansión de los maíces

palomeros incluyen el volumen de producto obtenido por unidad de peso de grano, la forma de la palomita, la persistencia del pericarpio tras la expansión (Ziegler, 2001) y la proporción de granos sin reventar (Soylu y Tekkanat, 2007). Todas estas características están directamente relacionadas con propiedades físicas del grano, como el grosor y la dureza del pericarpio (Hoseney *et al.*, 1983). Asimismo, la composición química del grano es igualmente importante; entre los factores más relevantes se encuentran el contenido de humedad (Gökmen, 2004) y las proporciones de amilosa y amilopectina (Borras *et al.*, 2006). Pajic (2007) señala que, en la industria, la unidad de medida estándar para determinar el volumen de expansión es $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$.

Hoseney *et al.* (1983) citan que el volumen de reventado depende de diversos factores relacionados con el grano, tales como el contenido de humedad, el genotipo, las propiedades físicas del grano, la temperatura de reventado y el método utilizado. Sin embargo, entre todos estos factores, el contenido de humedad es el más crítico, ya que influye en la velocidad y el grado de acumulación de presión en los gránulos de almidón.

De acuerdo con Han *et al.* (2003), el volumen de expansión depende de qué porcentaje y la relación de amilosa y amilopectina se contenga en el grano. En el mismo sentido, Borras *et al.* (2006) reportaron que el contenido de amilosa de las muestras comerciales de palomitas de maíz oscila entre 30,5–38,0%, este porcentaje influye de manera directa en el volumen de expansión.

5.1.3.2. Índice de reventado

El número de granos sin reventar y la forma de las palomitas son criterios fundamentales para considerar, ya que tanto los granos no reventados como aquellos que no forman palomitas completas se contabilizan dentro del total de granos de la muestra (Sweley *et al.*, 2013). Estos granos se reportan en porcentaje en relación con el número total de granos de la muestra.

Shimoni et al. (2002) sugirieron que el tamaño del grano limita su capacidad de reventar de forma individual, dado que depende del contenido de agua disponible para vaporizarse durante el calentamiento, así como de la presión necesaria para lograr un óptimo reventado. Para esto, es necesario sobrecalentar el vapor ya generado en el grano mediante un aumento de temperatura, lo que implica que se requiere una temperatura mayor cuando la humedad es baja.

Lara et al. (2002) reportan que, durante el reventado del grano se debe tener el control del tiempo y la temperatura, de no ser así, ocurre mermas de materia prima y pérdidas en el índice de reventado; además, factores como la humedad ambiental, las condiciones de almacenamiento, el tamaño y forma de la semilla también pueden influir sobre el índice de reventado, por lo que son importantes de controlar para mantener la calidad y rendimiento.

5.1.4. Evaluación de la calidad de las palomitas de maíz

Dharmaraj et al. (2012) señalan que las propiedades de expansión están relacionadas con la aceptación del consumidor y sus atributos sensoriales. Por su parte, Pajic (2007) enfatiza que para definir los parámetros de calidad de una palomita de maíz es fundamental considerar la calidad de los granos, ya que esta determina en gran medida la calidad final de la palomita, incluyendo parámetros como textura, color y forma (Sweley *et al.*, 2013). Un mayor volumen del grano se traduce en una mejor textura de la palomita una vez reventada. El volumen de expansión es el parámetro de calidad más relevante para evaluar palomitas de maíz, además de ser un rasgo distintivo que separa al maíz palomero de otras especies (Pajic, 2007). Ranathunga et al. (2016) indican que un alto volumen de expansión se correlaciona con los atributos que los consumidores asocian a una mejor calidad, así como a una textura superior, mientras que los granos sin reventar representan una molestia para el consumidor.

5.2. Reología y textura

La reología es la rama de la física que estudia la deformación y el flujo de los materiales, abarcando las propiedades mecánicas de sólidos, semisólidos y líquidos (Prentice, 1992; Rao, 1999). Mouquet (1995) destaca que, a través de la evaluación reológica, es posible identificar relaciones entre la estructura y la composición química de los alimentos, así como determinar con mayor precisión los mecanismos fisicoquímicos que provocan modificaciones en sus propiedades reológicas, permitiendo la evaluación instrumental de su perfil de textura. Esto incluye la determinación de parámetros como dureza, fracturabilidad, cohesividad y masticabilidad del alimento. Así, un aspecto importante de la textura de los alimentos es su comportamiento reológico (Rodríguez *et al.*, 2005).

Por otro lado, la textura es un factor crucial de aceptabilidad sensorial que influye en la aprobación de las palomitas de maíz por parte del consumidor. Las propiedades texturales de las palomitas se caracterizan por un conjunto de características físicas que dependen de la estructura del material y se relacionan con la deformación, fracturabilidad, entre otras, mediante la aplicación de una fuerza. Szczesniak (2002) definió la textura como la manifestación funcional de las propiedades estructurales, mecánicas y superficiales de los alimentos, siendo un atributo evaluado durante su manejo, procesamiento y consumo. En consecuencia, gran parte de la calidad y aceptación de un alimento por parte de los consumidores depende de su textura.

5.2.1. Pruebas objetivas instrumentales imitativas

La caracterización de la textura de los alimentos comúnmente se divide en dos grupos principales, basados en métodos de análisis sensoriales e instrumentales. El análisis sensorial incluye el uso de los sentidos y, para evaluar la textura se utilizan los dedos, los labios, la lengua, el paladar y los dientes, sin embargo, la dificultad para obtener una evaluación textural objetiva mediante los sentidos llevó al desarrollo de métodos instrumentales de análisis que resultan objetivos y prácticos (Alfa Editores, 2019).

Bourne (2002) describe las pruebas objetivas instrumentales imitativas como pruebas diseñadas para replicar las condiciones a las que se somete un alimento durante la deglución. Estas pruebas se clasifican dentro de las categorías empíricas, ya que su finalidad no es ser fundamentales en sí mismas, sino imitar el manejo y tratamiento del alimento. Entre los equipos que aplican este principio se encuentran el farinógrafo y los consistómetros de Bostwick y Adams. El instrumento ideal para medir la textura debe combinar las mejores características de los métodos fundamentales, empíricos e imitativos, a la vez que elimina sus aspectos no deseados.

Las técnicas objetivas instrumentales se pueden clasificar en tres grupos según el tipo de información obtenida en la prueba, en este caso se utilizó la prueba de compresión, en donde la muestra se deforma y la extensión de la deformación y/o resistencia ofrecida por la muestra se registra y se usa como un índice de la textura del alimento; los tres grupos son los siguientes:

- Pruebas fundamentales: determinan una o más constantes físicas para describir exactamente las propiedades del alimento en términos de parámetros reológicos bien definidos.

- Pruebas empíricas: Las pruebas empíricas miden parámetros que están mal definidos en términos reológicos pero que, según la experiencia práctica, se relacionan estrechamente con la propiedad de interés,

- Pruebas imitativas: tienen como objetivo reproducir las operaciones mecánicas aplicadas en la evaluación humana y se ha demostrado que se correlacionan estrechamente con la evaluación sensorial (Alfa Editores, 2019).

5.2.2. Análisis del Perfil de Textura (APT)

El Análisis del Perfil de Textura (APT o TPA por sus siglas en inglés) es un método objetivo de evaluación instrumental, desarrollado por Szczesniak, quien introdujo varios parámetros de textura que fueron utilizados por primera vez en este enfoque analítico. Bourne (2002) adaptó el equipo Instron para realizar el APT. Este método

considera la textura como un atributo multifacético. La prueba consiste en comprimir una muestra de alimento dos veces, utilizando un movimiento alternativo que simula la acción de la mandíbula. A partir de esta compresión, se genera una curva de fuerza frente al tiempo (Figura 3), que el software del equipo utiliza para estimar y calcular una serie de atributos de textura, los cuales correlacionan con la evaluación sensorial de esos mismos parámetros (Stable micro Systems, 2023).

El APT genera una curva que monitorea y registra características espaciales o temporales de las muestras durante las mediciones de textura del alimento. Este procedimiento instrumental se basa en la simulación del proceso de masticación mediante un ciclo de doble compresión. A partir de estas curvas, es posible simular el esfuerzo de la mandíbula al morder, revelando el comportamiento del alimento frente a la fuerza aplicada (Chen y Opara, 2013).

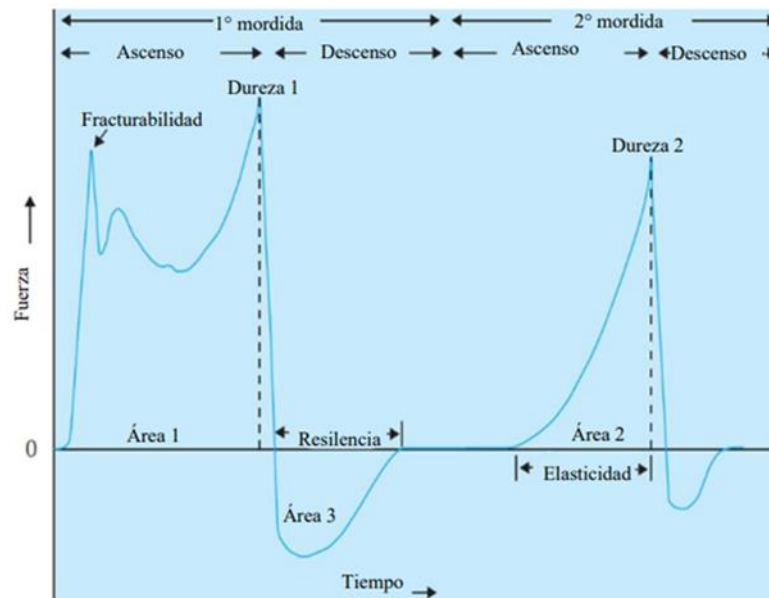


Figura 3. Curva de perfil de textura generalizada (Sánchez, 2022, adaptada de Bourne, 2002).

Torres et al. (2015) señalan que el APT se utiliza ampliamente tanto en la investigación como en la industria debido a su practicidad y amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, la textura es un atributo complejo, difícil de describir mediante una única propiedad física; es un factor crítico en la calidad y selección de alimentos. La manipulación y procesamiento de cereales, vegetales, frutas y otros

productos alimenticios conlleva desafíos específicos, ya que los consumidores desarrollan expectativas sobre la textura adecuada de estos productos. Para ofrecer productos aceptables, es fundamental controlar los cambios de textura, lo cual es más fácil de lograr cuando se comprenden los factores que influyen en esta característica.

5.2.2.1. Parámetros del APT de interés en palomitas de maíz

Szczesniak (2002) clasifica los parámetros del análisis del perfil de textura en primarios y secundarios, siendo estos últimos calculados de manera indirecta a través de la multiplicación de ciertos parámetros primarios; para ello, se simula y se mide la respuesta del alimento, siendo en este caso, las palomitas de maíz, cuando se le somete a una fuerza, como cortarlo, comprimirlo, masticarlo, cizallarlo o estirarlo

5.2.2.1.1. Dureza

La dureza se percibe como la fuerza máxima registrada durante la primera compresión, que simula el primer mordisco (ver Figura 3). Es también la fuerza necesaria para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar (González *et al.*, 2015). En granos como el maíz, la dureza se correlaciona directamente con el grado de adhesión entre los gránulos de almidón y la matriz proteica (zeína) del endospermo (Dombrink-Kurtzmann y Bietz, 1993; Eyhérbide *et al.*, 1996). En el contexto del APT, se considera “duro” a un producto que ofrece una resistencia sustancial a la deformación o ruptura; por lo tanto, la dureza es la fuerza necesaria para fragmentar la muestra en varias piezas (Bourne, 2002).

5.2.2.1.2. Cohesividad

Katz y Labuza (2001) determinaron que, en las palomitas de maíz, la cohesividad es un indicador de la resistencia a la deformación durante la compresión. Este parámetro se define como la relación entre el área de fuerza positiva en la segunda compresión y el área de la primera compresión (Figura 4). La cohesividad refleja la capacidad de las palomitas para resistir la ruptura bajo compresión, representando

la fuerza con la que las partículas de almidón permanecen unidas. Es un parámetro adimensional, donde un valor de uno indica que el material se recupera completamente tras la primera compresión, lo que implica una alta resistencia a la tracción y, por tanto, una manifestación de la cohesión (González *et al.*, 2015; Stable micro Systems, 2023).

Adicionalmente, se puede interpretar como el grado en que la muestra se deforma antes de romperse cuando se aplica fuerza (Szczesniak, 2002).

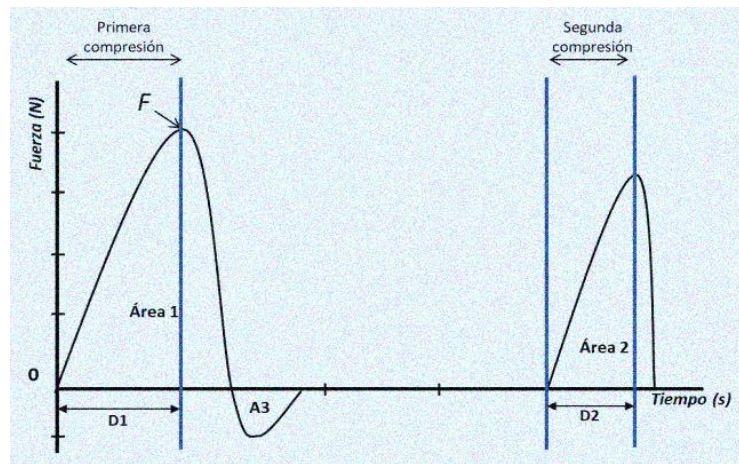


Figura 4. Obtención de cohesividad ($\text{Área 2}/\text{Área 1}$). (Torres-Salas *et al.*, 2023).

5.2.2.1.3. Elasticidad

Se define como la propiedad o capacidad de un material para recuperar su forma y dimensiones originales total o parcialmente al término de una prueba de compresión (Figura 3) (Stable micro Systems, 2023)

Bourne (2002) menciona que la elasticidad también se puede considerar como la relación entre la tensión y deformación a la cual se somete un material sólido cuando se comprime o extiende, así mismo es considerada como una medida de rigidez.

La elasticidad y el comportamiento de fractura del material repercuten en la forma y magnitud de la curva de compresión en un APT; así como el tamaño de muestra, tasa de deformación, temperatura de muestra, tipo de celda de prueba; muestra tamaño de la prueba y homogeneidad de la muestra.

5.2.2.1.4. Fracturabilidad

La fracturabilidad considera la fuerza correspondiente al primer pico que aparece en la curva de compresión, el cual representa el momento cuando el material se fractura o rompe (Figura 3). Los alimentos que presentan fracturabilidad son productos que poseen baja cohesividad y cierto grado de dureza (Vivas y Sangronis, 2021). (Stable micro Systems, 2023; Bourne, 2002).

La fracturabilidad está estrechamente relacionada con la dureza, debido a que la compactación y el espesor de los componentes celulares y el tamaño de célula y espesor entre las paredes celulares en el endospermo juegan un papel importante en diferencias de dureza del grano (Salinas *et al.*, 1992).

5.2.2.1.5. Masticabilidad

Representa la medida de la energía requerida para masticar un alimento y desintegrarlo, hasta que pueda deglutirse. Es un parámetro secundario, debido a que es el producto obtenido a partir de multiplicar el valor de gomosidad por la elasticidad y se expresa en Newtons (González *et al.*, 2015).

Bourne (2002) reporta que en la descripción clásica del APT, la masticabilidad se define como la energía necesaria para masticar cualquier producto alimenticio sólido o semisólido; además de considerarla como la energía necesaria para desintegrar un alimento hasta dejarlo listo para ser tragado.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación del sitio experimental

La investigación se realizó en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMex, específicamente en el laboratorio de textura de alimentos.

6.2. Material biológico

Se evaluaron cinco variedades híbridas de maíz palomero, utilizando 100 g de cada una. El material fue donado por una institución educativa privada. Además, se incluyó una variedad comercial (Verde Valle) como testigo. A cada muestra se le asignó una clave de identificación aleatoria (codificación). Los granos se almacenaron individualmente en bolsas Ziploc y se mantuvieron refrigerados hasta su uso.

6.3. Preparación de las muestras

Antes de la evaluación, las muestras se retiraron del refrigerador la noche anterior para que los granos alcanzaran y equilibraran la temperatura ambiente, esto para que los cambios de temperatura no fueran extremos y el reventado de los granos de maíz no presentaran complicaciones.

6.4. Evaluación de las propiedades físicas del grano

Una vez preparadas las muestras, se procedió a obtener las características físicas del grano, tales como su peso individual, dimensiones axiales, volumen y peso hectolitro. Todas estas características físicas fueron obtenidas con la ayuda de las herramientas pertinentes. Dichas mediciones se llevaron a cabo muestra por muestra, esto con el objetivo de no mezclar los datos y fuese más dinámico.

6.4.1. Determinación del volumen, peso individual (*PIG*) y peso hectolitro (*phL*)

Para determinar el volumen de grano se realizaron tres repeticiones de 25 g cada una, utilizando para ello una balanza analítica (Ohaus, Adventurer, EE.UU.) para que fuera precisa la medición del peso y no hubiese sesgo entre cada repetición (Figura 5). Las muestras de granos de maíz fueron pesadas repetición por repetición, se tomo el peso de cada una y se iban separando para continuar con los pasos siguientes y fuese más práctico.



Figura 5. Peso de 25 g de muestra de maíz híbrido en balanza analítica.

Cada muestra de 25 g se transfirió a una probeta de 100 mL y se registró el volumen (mL) ocupado por los granos (Figura 6), reportando el valor promedio obtenido de las tres repeticiones correspondientes a cada variedad. Asimismo, se contó manualmente el número de granos que conformaban la muestra de 25 g, información que posteriormente se utilizaría para estimar el porcentaje de granos no reventados.

Las tres repeticiones de 25 g de cada variedad se homogeneizaron y a partir de esa muestra compuesta se seleccionaron aleatoriamente 20 granos, a cada uno de los granos se les determinó su peso individual (*PIG*) (Figura 7). Estos 20 granos se reservaron para la posterior medición de sus dimensiones axiales.

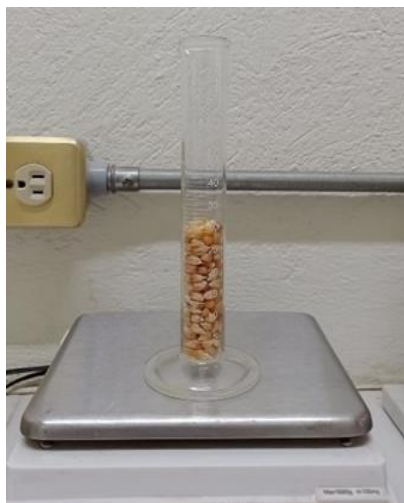


Figura 6. Volumen de 25 g de muestra de maíz híbrido en probeta de 100 mL.



Figura 7. Peso Individual de un grano de maíz

El peso hectolitro (*phL*) se determinó utilizando un cilindro metálico con un volumen de 8.65 cm³. El análisis consistió en llenar el cilindro con grano, dejando caer este desde una altura de 10 cm respecto al borde superior del cilindro hasta formar un “copete”; luego, con la ayuda de una regla se rasó el copete formado, para así pesar la masa de granos que ocupaban el volumen del cilindro (Figura 8). La determinación del *phL* se realizó por quintuplicado para cada variedad de grano,

reportando el valor promedio en kg/hL, luego de realizar los cálculos (transformación de unidades) correspondientes.



Figura 8. Determinación del peso hectolitro en granos de maíz.

6.4.2. Determinación de las dimensiones axiales

A los mismos 20 granos a los que se les determinó el peso individual, se les midieron también las dimensiones axiales: largo (L), ancho (A) y grosor (G). Estas mediciones se realizaron con un vernier (Matrix, 0-150 mm) reportando los valores promedio de cada dimensión en milímetros, las dimensiones obtenidas fueron registradas a mano para posteriormente ser pasadas en digital, lo cual permitiría analizarlas y poder sacar los promedios.

6.4.3. Proceso de reventado de granos

Por cada variedad a evaluar se colocaban 25 g de grano en la cámara de reventado de la máquina palomera (Mod. CPM-100W, Cuisinart) (Figura 9), situando una charola en la salida de la palomera para coleccionar las palomitas obtenidas. Dichas palomitas salían por la parte de enfrente de la palomera, en un principio salían una por una y cuando comenzaron a reventar uniformemente, salían en grupo y a gran velocidad.

La palomera funcionaba durante un máximo de 90 segundos, tiempo estimado para que la mayoría de los granos reventaran y también para que no se quemaran las palomitas, esto hubiese sido un impedimento para llevar a cabo el perfil de textura.



Figura 9. Granos de maíz palomero (25 g) en el interior de la cámara de reventado de la palomera.

Si todos los granos reventaban antes de completar los 90 segundos, el equipo se apagaba de manera anticipada (Figura 10). Tras el reventado, las palomitas se dejaban enfriar a temperatura ambiente en la charola durante 10 minutos, para posteriormente transferirlas cuidadosamente (evitando rupturas) a una bolsa Ziploc, que se sellaba herméticamente hasta realizar los análisis posteriores (volumen de expansión y textura).



Figura 10. Reventado de los granos de maíz y recepción de las palomitas.

6.4.4. Índice de reventado de granos (IRG) y Volumen de expansión de grano (VEG)

El volumen de expansión se determinó siguiendo la metodología propuesta por Sánchez (2022), la cual considera el volumen alcanzado por los granos reventados (palomitas), respecto al volumen de los granos antes del reventado. Como se puede observar en la Figura 11, al ser reventados los maíces palomeros híbridos, las palomitas son colocadas en una probeta para medir el volumen de expansión que obtuvo cada variedad.

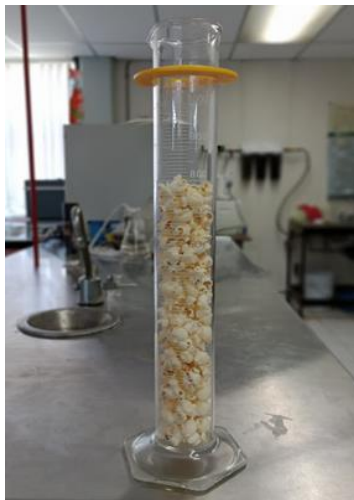


Figura 111. Volumen de expansión de muestra de 25 g de grano.

Los granos no reventados recuperados de la máquina palomera (Figura 12) se contaron para estimar su porcentaje respecto al conteo inicial de granos antes del reventado (ver 6.4.1.); como se observa en la figura 12, los granos que se muestran si llegaron a reventar, sin embargo, no son aptos para poder realizar la prueba objetiva instrumental imitativa; afortunadamente fueron muy pocos granos que no reventaban en su totalidad; esto se hizo con cada muestra analizada.

6.5. Análisis de perfil de textura (APT)

Esta evaluación se realizó utilizando un analizador de textura universal (Mod. TA-XT2 Plus; Stable Micro Systems, Reino Unido) provisto de una sonda de aluminio tipo Kramer de 5 cuchillas (Figura 13).



Figura 12. Granos no reventados.

La prueba consistió en colocar una capa de palomitas de aproximadamente 5 cm de grosor dentro de la celda, sobre la cual se sometió una doble compresión. Los parámetros aplicados durante el desarrollo del APT fueron: velocidad de pre-prueba y post-prueba de 1 mm/s y 5mm/s, respectivamente y deformación de 60%. Los parámetros considerados a partir del APT aplicado fueron: Dureza (Newtons); elasticidad (adimensional); cohesividad (adimensional) y masticabilidad (Newtons). Se realizaron tres repeticiones de APT por cada variedad de grano, reportando el valor promedio de cada parámetro.

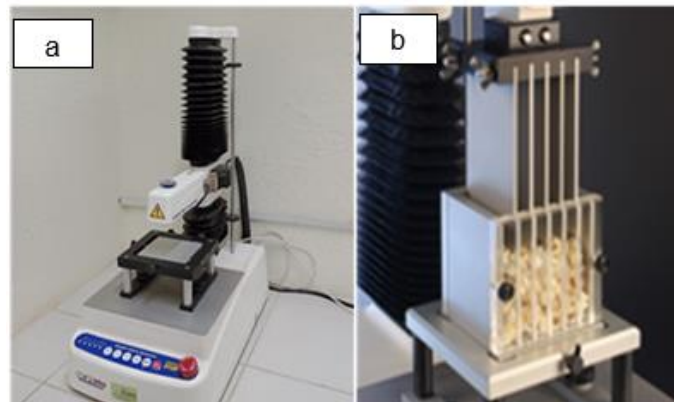


Figura 13. a. Analizador de Textura Universal (Mod. TA-XT2 Plus). b. Celda de Kramer con muestra de palomitas.

6.6. Diseño de experimentos y análisis estadístico

Para la evaluación de las propiedades de reventado del grano y el APT de las palomitas, se consideró un diseño de experimentos completamente aleatorizado. Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia del 95% y una prueba de Tukey donde se observaron las diferencias entre las medias de los tratamientos ($P < 0.05$). Se llevaron a cabo correlaciones simples de Pearson, considerándose significativas y muy significativas si $P < 0.05$ y $P < 0.01$, respectivamente. El análisis estadístico se realizó con el software SAS, versión 9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC, USA 2002).

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Análisis de las propiedades físicas de las muestras

A continuación, se discuten los resultados obtenidos a partir del análisis de las propiedades físicas de apariencia, correspondientes a las muestras de los granos objeto de estudio.

7.1.1. Dimensiones axiales (*L*, *A*, *G*)

En el Cuadro 1 se muestran los valores medios y desviaciones estándar correspondientes a las propiedades físicas de apariencia (*L*, *A*, *G*) obtenidas de las muestras de variedades híbridas de granos (M6, M20, M24, M35, M38), así como a la muestra comercial (Verde Valle).

Cuadro 1. Valores medios de las propiedades físicas de apariencia (*L*, *A*, *G*) de granos de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.

VARIEDAD	<i>L</i> (mm)	<i>A</i> (mm)	<i>G</i> (mm)
M6	7.02 ±0.52d	5.61 ±0.58bc	4.70 ±0.60a
M20	7.78 ±0.96bc	6.10 ±0.68ab	4.50 ±0.87a
M24	7.80 ±0.75bc	5.52 ±0.42c	3.87 ±0.40b
M35	8.48 ±0.59a	6.23 ±0.58a	4.59 ±0.49a
M38	7.30 ±0.73cd	4.63 ±0.36d	4.18 ±0.44ab
Verde Valle	8.26 ±0.71ab	5.59 ±0.47c	4.61 ±0.51a
Promedio	7.77	5.61	4.41

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras son estadísticamente diferentes. *L*=Largo; *A*=Ancho; *G*=Grosor. n=20.

Con base en los valores medios obtenidos, se determinó que prevalecieron diferencias estadísticas significativas entre variedades respecto al parámetro largo (*L*) de los granos, siendo la variedad M35 la que presentó el mayor valor (8.48 mm) y, en contraste, la variedad M6 el menor (7.02 mm).

Figuroa et al. (2013) reportaron dimensiones medias de *A* y *G* en maíces palomeros similares a las del presente estudio (5.3 mm y 4.1 mm, respectivamente),

pero superiores para *L* (11.0 mm). De igual manera, Quero et al. (2018) reportaron valores medios de 9.0 mm (*L*); 6.1 mm (*A*) y 3.3 mm (*G*) en granos de maíz palomero Toluqueño, de los cuales, *L* y *A* fueron superiores, a diferencia de *G* que fue menor, respecto a los resultados presentes en este estudio.

En general, de acuerdo con los resultados obtenidos, se puede inferir que las dimensiones axiales de los granos tienden a correlacionarse con el índice de reventado de grano (*IRG*) y volumen de expansión de grano (*VEG*). Se observó que los granos más pequeños mostraron una tendencia a presentar un *VEG* mayor, en comparación con los granos de mayor tamaño (Pajic y Babic 1991, citado por Gökmen, 2004). Karababa (2005) determinó que un tamaño aproximado de 5 mm de *G* en maíces palomeros resultaba ser el más conveniente para obtener buenos rendimientos de granos reventados y volumen de expansión.

7.1.2. índice de reventado de grano (*IRG*) y Volumen de expansión de grano (*VEG*)

Diferentes estudios (Barrales y Torres, 1989; Ortiz *et al.*, 2018) señalan que variedades de maíces palomeros con un buen índice de reventado presentan volúmenes de expansión bajo, dicho comportamiento no se observó en las variedades de este estudio. Por el contrario, los *IRG* y *VEG* presentaron una relación directamente proporcional entre sí.

Asimismo, respecto al volumen de expansión de grano (Cuadro 2), la variedad M6 es la que destacó significativamente entre todas, alcanzando un *IRG* del 95.3 % y un *VEG* de 800 mL. Guy (2001) reportó que usualmente los granos reventados deben contener más de 60% de almidón para asegurar una expansión deseada de manera que cualquier daño estructural del endospermo afecta al proceso de expansión y esto puede producir dos efectos, ya sea el no reventado correcto del grano o una reducción del volumen final del producto expandido, en este caso, la palomita de maíz.

Cuadro 2. Valores medios de volumen de expansión de grano (*VEG*) e índice de reventado (*IRG*) de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.

VARIEDAD	IRG (%)	VEG (mL)
M6	95.3 ±0.20b	800 ±20a
M20	93.8 ±0.20cd	680 ±10b
M24	93.9 ±0.20cd	660 ±10b
M35	93.4 ±0.20d	680 ±10b
M38	94.3 ±0.20c	600 ±20c
Verde Valle	95.9 ±0.20a	790 ±10a
Promedio	94.4	701.6

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras son estadísticamente diferentes. *IRG*=Índice de reventado de grano; *VEG*=Volumen de expansión de grano. n=3.

A partir de los resultados presentados en el Cuadro 2, se determinó que la mayoría de los granos reventaban durante el proceso, alcanzando un *VEG* entre 680-800 mL (promedio de 701.6 mL), siendo las variedades M6 y testigo (Verde Valle) las que destacaron favorablemente entre las demás, tanto en este parámetro como en el *IRG*. Cabe destacar que algunos granos reventaban, pero no se obtenía una palomita de forma completa. Esto repercutió en el *VEG* significativamente.

Shimoni et al. (2002) estimaron que el rendimiento de las palomitas puede verse afectado por el contenido de humedad del grano, así como por la ruptura del pericarpio cuando la presión de vapor interna es insuficiente debido a una temperatura inadecuada.

Los valores obtenidos de *IRG* y *VEG* en las muestras evaluadas reflejan la diversidad genética entre las diferentes variedades, lo cual podría asociarse a la selección realizada por los productores, quienes buscan mazorcas con los atributos necesarios para producir maíces palomeros de calidad (Gámez et al., 2014).

Al contrastar los resultados del presente estudio con los reportados por O-Olán et al. (2018), se observan valores inferiores de *VEG*. En dicho estudio se evaluaron dos muestras de maíz, una comercial y otra híbrida, que presentaron rendimientos de *VEG* entre 8.81 mL y 28.42 mL. Además, O-Olán et al. (2018) reportaron altos porcentajes de granos no reventados, con valores entre 45.58% y 53.86%, lo que afectó directamente el *IRG* de las variedades evaluadas.

7.1.3. Peso individual del grano (*PIG*), volumen de grano (*VG*) y peso hectolitro (*phL*) del grano

Como se observa en el Cuadro 3, las variedades M35 y la comercial presentaron los valores más altos de peso individual (*PIG*) y volumen de grano (*VG*), respecto al resto de las muestras. En general, en este estudio se presentaron diferencias estadísticas significativas entre variedades respecto al *PIG*, registrándose un valor promedio de 0.141 g, siendo las variedades M38 (menor valor) y M35 (mayor valor) las que más contrastaron. Velázquez (2020) reportó valores de *PIG* en variedades de maíz palomero de 0.13 g y 0.17 g, valores semejantes al promedio obtenido en este estudio.

En lo que a *VG* y peso hectolitro (*phL*) respecta, las variedades no mostraron diferencias estadísticas significativas entre sí, tal como se aprecia en el Cuadro 3.

Gambín et al. (2006) reportaron que, en el peso individual del grano, existe una estrecha relación entre la dinámica de acumulación de materia seca y el contenido de agua en los granos, lo cual repercute de manera directa tanto en el llenado de la mazorca, como en el *PIG*.

Salinas et al. (2013) reportaron pesos hectolitros entre 74. Kg/hL y 76.5 Kg/hL mientras que los valores medios de *phL* obtenidos en el presente estudio resultaron ser mayores, sin embargo, entre las variedades evaluadas no se presentaron diferencias estadísticas significativas. Salinas et al. (1992) destacaron que el *phL* es un valor directamente relacionado con la dureza del grano, ya que los maíces suaves son menos densos como consecuencia de una mayor área porosa en su endospermo; valores bajos de *phL*, se relacionan con granos de baja calidad,

granos dañados, inmaduros, con poca humedad o con pérdida de materia seca son ejemplos.

Cuadro 3. Valores medios de las propiedades físicas de peso y densidad (*PIG*, *VG* y *phL*) de granos de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.

VARIEDAD	<i>PIG</i> (g)*	<i>VG</i> (mL)**	<i>phL</i> (kg/hL)***
M6	0.136 ±0.027bc	32.0 ±0.00a	78.1 ±1. 30a
M20	0.155 ±0.030ab	32.0 ±0.00a	78.5 ±3. 56a
M24	0.122 ±0.023c	31.3 ±0. 57a	79.9 ±1. 89a
M35	0.172 ±0.030a	32.0 ±0.00a	76.9 ±2. 65a
M38	0.097 ±0.015d	31.3 ±0. 57a	81.4 ±2. 85a
Verde Valle	0.161 ±0.028a	32.0 ±0.00a	80.4 ±2. 66a
Promedio	0.141	31.7	79.2

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras son estadísticamente diferentes. *PIG*=Peso individual de grano; *VG*=Volumen de grano; *phL*=Peso hectolitro. *n=20; **n=3; ***n=5.

7.2. Análisis del Perfil de Textura (APT) de las palomitas

A continuación, se discuten los resultados obtenidos a partir del análisis de las propiedades evaluadas en el perfil de textura (dureza, elasticidad, cohesividad y masticabilidad) correspondientes a las muestras de los granos objeto de estudio.

7.2.1. Dureza

La dureza es una característica importante en los alimentos, ya que es la primera impresión que tiene el consumidor al probar el producto (Hamouchene y Saliha, 2014). Durante el proceso de transformación de grano a palomita, resulta evidente la disminución de la dureza y diferencia de textura entre ambos materiales. Wong et al. (2023) refirieron que este proceso deriva de varios factores: la desnaturalización del almidón (se gelatiniza), la pérdida de humedad que contiene el grano y el rápido enfriamiento del almidón gelatinizado ocasionan una modificación en la textura, pasando a ser más suave e incrementando su volumen.

De acuerdo con la metodología aplicada para el reventado de granos, se observó una relación directa de la dureza de las palomitas con factores como la temperatura y el tiempo de exposición en la palomera. Se observó que dicha relación, tiene lugar gracias a que, al ser sometido a una alta temperatura en tan poco tiempo, se logra cambiar la humedad del grano a la par de que cambia la estructura del almidón contenido en el grano, esto ocurre generalmente en el reventado de cereales o cuando se fríen (Rahman y Ahmed, 2012).

Cuadro 4. Valores medios del análisis de perfil de textura de palomitas obtenidas a partir de cinco variedades híbridas y una marca comercial (testigo) de maíces palomeros.

VARIEDAD	Dureza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad (N)
M6	302.8 ±56.6ab	0.882 ±0.055a	0.607 ±0.062a	164.8 ±47.6ab
M20	277.9 ±49.5ab	0.834 ±0.124a	0.729 ±0.103a	171.5 ±58.1ab
M24	281.3 ±61.5ab	0.863 ±0.046a	0.792 ±0.179a	185.7 ±15.5ab
M35	332.7 ±32.8a	0.930 ±0.058a	0.797 ±0.153a	246.4 ±53.3a
M38	218.6 ±31.8b	0.763 ±0.077a	0.738 ±0.052a	122.7 ±20.1b
Verde Valle	304.2 ±20.5ab	0.770 ±0.056a	0.696 ±0.193a	161.3 ±40.5ab
Promedio	286.3	0.840	0.726	175.4

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras son estadísticamente diferentes. n=4.

En cuanto a los valores medios de dureza de las palomitas obtenidos en este estudio, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las variedades, excepto entre M35 (332.7 N, mayor) y M38 (218.6 N, menor). Esto sugiere que, en general, la dureza de las palomitas no es un parámetro distintivo entre las variedades híbridas evaluadas. Sin embargo, dado el menor valor de dureza de la variedad M38, podría considerarse la mejor opción en términos de menor dureza.

La dureza de las palomitas se relaciona de forma directa con la composición del endospermo. Se explica mediante la relación que existe entre el endospermo vitreo y harinoso, ya que, mientras mayor sea la proporción de endospermo vítreo, mayor será la dureza de la palomita de maíz; así mismo, la compactación de los

componentes celulares juega un papel importante, el grosor de la matriz proteica que rodea a los gránulos de almidón y al grosor del pericarpio (E.E.A. INTA, 2006).

De igual manera, la dureza está estrechamente relacionada con la fracturabilidad, debido a que la compactación del endospermo aunado al espesor de los componentes celulares, el tamaño de célula y espesor entre las paredes celulares contenidas en el endospermo juegan un papel importante en la dureza de las palomitas de maíz obtenidas (Salinas *et al.*, 1992).

7.2.2. Elasticidad

De acuerdo con los valores medios de elasticidad presentados en el Cuadro 4, se observan coeficientes cercanos a 1. De acuerdo con De la Cruz-De la Cruz (2013), un coeficiente elevado (1) indica una mayor resistencia del alimento durante la masticación, lo que dificulta su deglución debido a su alta elasticidad.

Los resultados de este estudio indican que las palomitas de maíz presentan altos coeficientes de elasticidad. Esto significa que, tras la primera compresión, las palomitas recuperan en gran medida su tamaño o forma original antes de la segunda compresión. Estos valores pueden explicarse en función de lo reportado por Mao *et al.* (2002), quienes afirman que la elasticidad depende del contenido de almidón en el grano, ya que este componente contribuye a que las palomitas sean menos quebradizas durante las compresiones.

7.2.3. Cohesividad

Wong *et al.* (2023) indican que, cuando el valor de cohesividad de un alimento (en este caso, las palomitas de maíz) se aproxima a 1, el producto mantiene mejor su estructura tras la compresión, lo que indica una mayor cohesión. En cambio, si los valores de cohesividad tienden a 0, se produce un mayor colapso estructural después de las compresiones.

De acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 4, los valores medios de cohesividad entre variedades no mostraron diferencias estadísticas significativas, alcanzando un promedio de 0.726. Este valor puede interpretarse como

relativamente alto, lo que sugiere que las palomitas evaluadas no se desintegran fácilmente, es decir, no son tan frágiles. Además, los valores de dureza y elasticidad resultaron elevados, lo que concuerda con la alta cohesividad observada.

En este sentido, Hamouchene y Saliha (2014) exponen que valores más bajos de cohesividad se obtienen cuando las palomitas son más frágiles, ya que la mayor cantidad de paredes celulares colapsan durante la primera compresión.

A diferencia de los resultados obtenidos en este estudio, Vázquez (2022) reportó valores de cohesividad en palomitas que oscilaron entre 0.22 y 0.23, lo que indica una textura suave y frágil.

7.2.4. Masticabilidad

De acuerdo con los valores medios presentados en el Cuadro 4, se observaron diferencias estadísticas significativas entre variedades. En particular, la variedad M38 mostró el valor más bajo de masticabilidad (122.7 N), lo que indica que, en este parámetro específico, alcanzó la mejor calidad, ya que requiere un menor esfuerzo al masticar. En contraste, la variedad M35 presentó el valor más alto (246.4 N), lo que sugiere que estas palomitas necesitan un mayor esfuerzo para ser masticadas.

Wong et al. (2023) señalan que la dureza influye directamente en la masticabilidad de las palomitas, al afirmar que este parámetro cuantifica la fuerza necesaria para comprimir la roseta durante la masticación. Por lo tanto, los valores obtenidos en este estudio sugieren que las palomitas requieren una fuerza considerable para ser fragmentadas.

En un estudio similar, Sánchez (2022) elaboró palomitas de maíz de la variedad palomero Toluqueño utilizando métodos de reventado en olla y en horno de microondas. Evaluó el perfil de textura en palomitas individuales, en contraste con el enfoque empleado en este estudio, que se basó en el volumen. Como resultado, los hallazgos de Sánchez (2022) difieren de los obtenidos en el presente estudio, siendo incluso poco comparables.

Udachan y Sahoo (2017) reportaron que las proteínas de los cereales, junto con el almidón, desempeñan un papel clave en la masticabilidad de los alimentos derivados de ellos. Estas proteínas, al desnaturalizarse por exposición a altas temperaturas, provocan cambios en la estructura del alimento.

VIII. CONCLUSIONES

- Se estandarizó y replicó un método instrumental imitativo que permitió realizar una evaluación objetiva del perfil de textura de las palomitas de maíz obtenidas a partir de diferentes variedades híbridas de maíz palomero.
- El análisis instrumental aplicado permitió identificar diferencias significativas en los perfiles de textura de las palomitas elaboradas con las cinco variedades híbridas evaluadas.
- Entre las variedades híbridas analizadas, la variedad M6 presentó el perfil de textura más similar al de la variedad comercial utilizada como testigo, además de destacar por las características físicas del grano, su elevado índice de reventado y su notable volumen de expansión.
- La evaluación de las propiedades físicas de los granos permitió establecer una correlación positiva entre el grosor del grano y el índice de reventado, así como con el volumen de expansión. Sin embargo, no se encontraron correlaciones entre estas propiedades y el perfil de textura de las palomitas.

IX. SUGERENCIAS

- Se recomienda evaluar las variedades híbridas de maíz palomero utilizando otros métodos de reventado (olla, microondas, entre otros) complementados con un análisis de perfil de textura (APT) estandarizado, con el propósito de estimar con mayor precisión los índices de reventado y el volumen de expansión. Esto permitirá discriminar con mayor exactitud la calidad de los granos destinados a la elaboración de palomitas.

- El contenido de humedad en el grano de maíz es un factor determinante que influye directamente en el índice de reventado y en el volumen de expansión. Se sugiere realizar estudios previos bajo diferentes niveles de humedad para identificar las condiciones óptimas que maximizan el rendimiento en estos parámetros.

X. REFERENCIAS CONSULTADAS

1. Alfa Editores Tecnicos. (2019) Tecno Textura 2019: Ensayos instrumentales para la medición textural de alimentos. <https://www.alfa-editores.com.mx/tecnotextura-2019-ensayos-instrumentales-para-la-medicion-textural-de-alimentos/>
2. Al-Mahasneh, M. y Rababah, T. (2007). Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. *Journal of Food Engineering*. 79: 1467-1473.
3. Barrales, D.J.S. y Torres, H.L. (1998). Capacidad de reventado del grano de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) producido en dos ambientes de temporal. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 4(1):63-66.
4. Bewley, J.D. y Black, M. (1985). Seeds: physiology of development and germination. *Plenum Press*. New York. 445 p.
5. Blandino, M., Mancini, M.C., Peila, A., Rolle, L., Vanara, F. y Reyneri, A. (2010). Determination of maize kernel hardness: comparison of different laboratory tests to predict dry-milling performance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90:1870– 1878.
6. Borrás, F.; Seetharaman, K.; Yao, N.; Robutti, J.L.; Percibaldi, N.M. y Eyherabide, G.H. (2006). Relationship between popcorn composition and expansion volume and discrimination of corn types by using zein properties. *Cereal Chemistry*, 83(1):86-92.
7. Bourne, M. (2002). Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. 2nd edition. *Academic Press*. Cambridge, Massachusetts. 249 pp.
8. Chen, L. y Opara, U. (2013). Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – A review. *Journal of Food Engineering*, 497-507.
9. Corona-Mendoza, E., Martínez- Rueda, C. y Estrada, G. (2012). Determinantes del peso de grano en cultivares nativos e híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8): 1479-1494
10. De la Cruz-De la Cruz, V. (2013) Relación del crecimiento de *Bifidobacterium lactis* y *Lactobacillus acidophilus* con almidón de banano como fuente de

- carbono, XV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 641-647, Colima, México, 23-24 de Mayo 2013.
11. Dharmaraj, U., Ravi, R. y Malleshi, N. G. (2012). Physicochemical and textural characteristics of expanded finger millet. *International Journal of Food Properties*, 15 (2):336–349.
 12. Dofing, S. M., Thomas-Compton, M.A. y Buck, J.S. (1990). Genotype x popping method interaction for expansion volume in popcorn. *Crop Science*, 30:62–65.
 13. Dombink-Kurtzman, M.A. y Bietz, J.A. (1993). Zein composition in hard and soft endosperm of maize. *Cereal Chemistry*, 70:105-108.
 14. E.E.A. INTA Balcarce. (2006). Calidad del grano de maíz. Recuperado de https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/suplementacion/80-grano_maiz.pdf [18/09/24]
 15. Eyhérbide, G.H., Robutti, J.L. y Borrás, F.S. (1996). Effect of nearinfrared transmission-based selection on maize hardness and the composition of zeins. *Cereal Chemistry*, 73:775-778.
 16. Figueroa, J., Nárvaez, 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 Fitotecnia Mexicana*, 30:305-314
 17. Gambín, B.L., Borrás, L. y Otegui, M.E. (2007). Diferencias fuente-sumidero y peso del grano en híbridos templados de maíz. *Field Crops Res.* 95:316-326.
 18. Gámez, A., De la O-Olán, M., Santacruz, A., y López, H. (2014). Conservación in situ, manejo y aprovechamiento de maíz Palomero Toluqueño con productores custodios. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8):1519-1530.
 19. García, A. y Vázquez, L. (2016). Secado de maíz propiedades del grano. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(2): 73-77.
 20. Gökmen, S. (2004). Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering*, 65(3):357-362.

21. González, A.; Alvis, A. y Arrázola, G. (2015). Efecto del Recubrimiento Comestible en las Propiedades de Trozos de Batata (*Ipomoea Batatas Lam*) Fritos por Inmersión: Parte 1: *Textura. Información tecnológica*, 26(1):95-102.
22. Guelpa, A., du Plessis, A. y Manley, M. (2016). A high-through put X-ray micro-computed tomography (μ CT) approach for measuring single kernel maize (*Zea mays L.*) volumes and densities. *Journal of Cereal Science*, 69:321–328.
23. Guy, R. (2001). Extrusion cooking technologies and applications. Ed. Woodhead publishing limited and CRC Press LLC. London. 5-27 pp.
24. Hamouchene, I., y Saliha A. (2014). Overview of Texture Profile Analysis. *International Journal of Computer Vision and Image Processing*, 1–50. Recuperado de: <https://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis#tpameasurements>
25. Han, J. A., BeMiller, J. N., Hamaker, B., y Lim, S. T. (2003). Structural changes of debranched corn starch by aqueous heating and stirring. *Cereal Chem.* 80:323-328
26. Hoseney, R.C.; Zeleznak, K. y Abdelrahman, A. (1983). Mechanism of popcorn popping. *Journal of Cereal Science*, 1(1):43-52.
27. Karababa, E. (2005). Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering*, 72:100-107. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/223922586_Physical_properties_of_popcorn_kernels [04/05/2023].
28. Katz, E. y Labuza, T. (2006). Effect of Water Activity on the Sensory Crispness and Mechanical Deformation of Snack Food Products. *Journal of Food Science*, 46:403-409.
29. Lara, N., y Ruales, J. (2002) Popping of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*) and its effect on the functional, nutritional and sensory properties. *Science of Food and Agriculture* 82:797-805
30. Lusas, E.W., y Rooney, L.W. (2001). Snack Foods Processing. Popcorn Products. CRC PRESS. EU. 3-38 pp.
31. Mao, Y. Flores. R. A., y Loughin, T. M. (2002) Objective Texture Measurements of commercial wheat flour tortillas. *Cereal Chemistry*, 79 (5):648-653.

32. Martines, E. (2006). Evaluación de un medidor de contenido de humedad de granos basado en el principio de capacitancia eléctrica. Centro Nacional de Metrología, División de Termometría. Simposio de Metrología, 25 al 27 de Octubre. El Marqués, Querétaro, México. Pp. 1-6.
33. Metzger, D., Hsu, K., Ziegler, K. y Bern, C. (1989). Effect of Moisture Content on Popcorn Popping Volume for Oil and Hot-Air Popping. *American Association of Cereal Chemist, Inc.*, 66 (3):247-248.
34. Moreno, E. (1984). Análisis físico y bilógico de semillas agrícolas. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <https://books.google.com.mx/books?id=FTpGWUloo4UC&printsec=frontcover&> [27/05/2023].
35. Mouquet, C. (1995). Medidas Instrumentales de evaluación de la textura, Memorias de Seminario textura y reología de alimentos. Cali, Colombia, abril 18-21 de 1995.
36. O-Olán, M., Santacruz, A., Sangerman-Jarquín, D., Gámez-Vázquez, A., Arellano-Vázquez, J., Valadez, G. y Perches, M. (2018). Estandarización del método de reventado para la evaluación experimental del maíz palomero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9:1471-1471.
37. Ortiz, T.E.; Argumedo, M.A.; García, P.H.; Meza, V.R.; Bernal, M.R. y Taboada, G.O.R. (2018). Rendimiento y volumen de expansión de grano de variedades mejoradas de amaranto para valles altos de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(3):291-300.
38. Ortiz-Torres, E., Argumedo-Macías, A., Bernal-Muñoz, R., Cepeda-Cornejo, V. y Taboada-Gaytán, O.R. (2023). Peso hectolítrico Y Peso De Semilla Predicen El Volumen De Reventado En Amaranto. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 14 (6). México.
39. Ospina, J. (2001). Características físico-mecánicas y análisis de calidad de granos. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=2DWmqb6xP3wC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> [01/05/2023].

40. Pajic, Z. (2007). Breeding of maize types with specific traits at the Maize research institute, Zemun polje. *Genetika*, 39 (2):169 - 180.
41. Ponce-García, N., Escalante-Aburto, A., Torres-Chávez, P. y Serna-Saldívar, S. (2017). Grading Factors of Wheat Kernels Based on Their Physical Properties. INTECH: 275-291 Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/317101638_Grading_Factors_of_Wheat_Kernels_Based_on_Their_Physical_Properties [03/05/2023].
42. Pordesimo, L.O., Anantheswaran, R.C., Fleischmann, A.M., Lin, Y.E., y Hanna, M.A. (1990). Physical properties as indicators of popping characteristics of microwave popcorn. *Journal of Food Science*, 55:1352–1355.
43. Prentice, J.H. (1992). Dairy rheology: A concise guide. VCH Publishers, Inc., United States of America. 165 pp.
44. Quero, E., Lugo, M. y Sánchez, E. (2018). Caracterización elemental de semilla de maíz (*Zea mays* spp.) nativo (mexicano). Centro Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica del Estado de Hidalgo. 11 pp.
45. Rahman, S., y Ahmed J. (2012). Handbook of food process design. *John Wiley & Sons*. Hoboken, NJ. 18-23.
46. Ranathunga A.G., Gunasekara, G.T.N. y Wijewardana, D. (2016). Quality Performance, Proximate Composition and Sensory Evaluation of Developed Flavoured Instant Popcorn. *Procedia Food Science*, 143-146.
47. Rao, V.N.M. (1999). Rheology of fluid and semisolid Foods: Principles and Applications. *Aspen Publishers, Inc.*, Burlington, Massachusetts. 184 pp.
48. Rodríguez, E., Fernández, A., y Ayala, A. (2005). Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería. 72-78 pp.
49. 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 Fitotecnia Mexicana*, 36(1):23-31.

50. Salinas, Y., Arellano, J. y Martínez, F. (1992). Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíces híbridos precoces para valles altos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 42(2):161-167.
51. Sánchez, G.D.G. (2022). Evaluación de las características biofísicas y de reventado de granos de maíz palomero Toluqueño (*Zea mays* L. Cv. Toluqueño) cultivado en San Marcos Tlaxalpan, Estado de México. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Agrónomo Industrial. Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEMEX. 95 p. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/136982> [03/02/2023].
52. Sangamithra, A., Swamy Gabriela John, Sorna Prema, R., Nandini, K., Kanna K., Sasikala, S. y Suganya, P. (2016). Moisture dependent physical properties of maize kernels. *International Food Research Journal*, 23(1):109-115.
53. Serna, S.S.O. (1999). Utilización Industrial del Maíz en México. 2° Taller Nacional de Especialidades de Maíz. 9 y 10 de septiembre de 1999. Saltillo, Coahuila, México. 101-102 p.
54. Shimoni, E., Dirks, E. y Labuza, T. (2002). The relation between final popped volume of popcorn and thermal-physical parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 35:93-98.
55. Soyly, S. y Tekkanat, A. (2007). Interactions amongst kernel properties and expansion volume in various popcorn genotypes. *Journal of Food Engineering*, 80(1):336-341.
56. Stable Micro Systems. Texture analysis properties (2023). <https://www.stablemicrosystems.com/TextureAnalysisProperties.html>
57. Sweley, J., Rose, D. y Jackson, D. (2013). Quality Traits and Popping Performance Considerations for Popcorn (*Zea mays everta*). Department of Food Science and Technology, Agriculture Research Division, University of Nebraska–Lincoln. 157-177 pp.
58. Szczesniak, A. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13:215-225.
59. Torres, F. J. L.; Morales, R. E. J.; González, H. A.; Laguna, C. A. y Córdova, O. H. (2011). Respuesta de híbridos trilineales y probadores de maíz en Valles Altos del Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(6):829-844

60. Torres, J., González-Morelo, K. y Acevedo, D. (2015). Análisis del perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. *Revista ReCiTeIA*, 14:63-75.
61. Torres-Salas, V., Hernández-Montes, A. y Hernández B. (2023). Análisis sensorial, textural y actividad antioxidante de queso añejo de Zacazonapan durante la maduración: Análisis del queso añejo de Zapopan. *Biotechnia*, 25:204-213.
62. Udachan, I. y Sahoo, A. K (2017) Quality evaluation of gluten free protein rich broken rice pasta. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(3):1378–1385.
63. Vázquez, G.G. (2022). Optimización de los parámetros del proceso de explotado de sorgo mediante superficie de respuesta. Tesis de Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. 87 p. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/8431/1/RI007514.pdf> [19/09/2024].
64. Velázquez, D. (2020). Estudio de la asociación maíz palomero (*Zea mays everta*) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) como alternativa de producción en Toluca, México [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México.
65. Villanueva, R. (2008). El maíz reventador como alternativa industrial. *Ingeniería Industrial*, 26:113-124.
66. Virost E. y Ponomarenko A. (2015). Popcorn: critical temperature, jump and sound. *Journal of The Royal Society Interface*, 12.
67. Vivas, O. y Sangronis, E. (2021). Textura y análisis descriptivo cuantitativo de galletas elaboradas con harinas de granos fermentados de *Phaseolus vulgaris* o *Cajanus cajan*. *Revista de la Facultad de Farmacia*, 8-17.
68. Voisey, P.W., MacDonald D.C., Kloek M., y W. Foster. (1972). The Ottawa Texture Measuring System. An operational manual. Agric. Can., Eng. Spec. No. 7024.
69. Wilhelm, R., Dwayne, S. y Brusewitz, G. (2004). Physical Properties of Food Materials. Chapter 2. *Food & Process Engineering Technology*, 23-52.

70. Wong, M., Chan, K., Wong, T., Tang, H., Chung, H. y Kwan, H. (2023). Quantitative Textural and Rheological Data on Different Levels of Texture-Modified Food and Thickened Liquids Classified Using the International Dysphagia Diet Standardisation Initiative (IDDSI) Guideline. *Foods*, 12.3765.
71. Ziegler, K.E. (2001). Popcorn. En: Hallauer, A.R. (ed). *Specialty Corns*. CRC Press. Boca Raton, FL. 199-234 pp.