



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS Y DE  
REVENTADO DE GRANOS DE MAÍZ PALOMERO TOLUQUEÑO**  
**(*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño) CULTIVADO EN**  
**SAN MARCOS TLAZALPAN, ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**  
**INGENIERA AGRÓNOMA INDUSTRIAL**

**PRESENTA:**

**DELIA GUADALUPE SÁNCHEZ GÓMORA**

(N° de Cuenta: 1110889; 43ava. Generación)

**MODALIDAD: TESIS INDIVIDUAL**

**ASESORES:**

**DR. NÉSTOR PONCE GARCÍA**

**DRA. ADRIANA VILLANUEVA CARVAJAL**



**CAMPUS UNIVERSITARIO "EL CERRILLO", EL CERRILLO,**  
**PIEDRAS BLANCAS, MUNICIPIO DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO**

**ABRIL DE 2022**

## RESUMEN

### **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS Y DE REVENTADO DE GRANOS DE MAÍZ PALOMERO TOLUQUEÑO (*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño) CULTIVADO EN SAN MARCOS TLAZALPAN, ESTADO DE MÉXICO**

Delia Guadalupe Sánchez Gómora<sup>1</sup>. Ingeniera Agrónoma Industrial  
Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas

Asesor Académico: Dr. Néstor Ponce García<sup>1</sup>

Asesor Adjunto: Dra. Adriana Villanueva Carvajal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Estado de México, México. 50200.

✉ [gomorad26@gmail.com](mailto:gomorad26@gmail.com); [nponceg@uaemex.mx](mailto:nponceg@uaemex.mx); [avillanuevac@uaemex.mx](mailto:avillanuevac@uaemex.mx)

---

El maíz palomero Toluqueño (*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño) (MPT) se reconoce como una raza de maíz del tipo reventador, cuyo centro de distribución se localiza principalmente en el Estado de México. Los granos se destinan básicamente para la producción de palomitas o rosetas de maíz, las cuales primordialmente se aprovechan en celebraciones y festividades religiosas. Entre otros, el rendimiento palomero y el índice de expansión del grano, constituyen referentes de calidad preponderantes de los maíces reventadores. Desafortunadamente, el MPT presenta considerables restricciones en ambos parámetros de calidad, situación que ha limitado seriamente su producción y explotación comercial, a diferencia de los maíces palomeros importados, los cuales, por el contrario, ofrecen atributos de calidad aceptables. Esto ha propiciado que actualmente prevalezca una escasa producción de MPT, al grado de que esta raza se considere en peligro de extinción. Derivado de lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en evaluar parámetros biofísicos y de reventado de granos de MPT cultivados en tres Barrios de la localidad de San Marcos Tlazalpan, Estado de México. La investigación constó de dos etapas principales; en la primera, se desgranaron mazorcas de MPT y se seleccionaron los granos de acuerdo con su disposición en la mazorca: punta, parte media y base, para posteriormente evaluar y contrastar parámetros biofísicos (fisuras en pericarpio, tamaño, peso, densidad, porosidad, esfericidad y dureza) de acuerdo con la ubicación en la mazorca y Barrio de origen. Adicionalmente se realizó el mismo comparativo, pero entre granos a granel de MPT y granos de un maíz palomero comercial (testigo). La segunda etapa del estudio consistió en evaluar y contrastar el rendimiento palomero e índice de expansión de los granos de MPT de acuerdo con su disposición en la mazorca y Barrio de origen, y adicionalmente se efectuó un comparativo entre granos de MPT a granel, respecto a granos de maíz palomero comercial. El reventado de los granos se realizó mediante dos métodos: reventado en olla y reventado en horno de microondas. Por último, se realizó un análisis de perfil de textura de las palomitas obtenidas de cada una de las muestras objeto de estudio. De acuerdo con los

resultados, se establecieron diferencias estadísticas significativas ( $P<0.05$ ) entre diversos parámetros biofísicos, a partir de la ubicación de los granos en la mazorca, destacando que aquellos seleccionados de la punta resultaron tener menor peso individual y de mil granos (0.17g y 171g) que los de la parte media (0.21g y 197g) y la base (0.25g y 225g). Por otro lado, se determinó que los granos de maíz palomero comercial mostraron mayor esfericidad (68 vs 56%), menor densidad real (11.8 vs 12.5 g/mL) y menor porosidad (24 vs 34%) que los granos a granel de MPT ( $P<0.05$ ). Se concluyó que la presencia de fisuras en el pericarpio de los granos fue mínima (12 granos con fisura de 220 observados), lo que permitió comprobar que el bajo rendimiento de reventado del MPT, no está asociado a este tipo de daño en el grano. Al respecto, los granos seleccionados de la punta de la mazorca fueron los que mostraron mejor rendimiento de reventado (14%) en comparación con los de la parte media y base; los granos de MPT a granel mostraron 18.5% y los granos comerciales 68%, utilizando horno de microondas. En general, los granos de MPT provenientes del Barrio 2 presentaron un mejor rendimiento de reventado y de expansión de palomitas. En relación con el método de reventado, el realizado mediante horno de microondas resultó más eficiente para los granos de MPT, tanto en el rendimiento como en el volumen de expansión de las palomitas. Sin embargo, debido al bajo rendimiento de reventado y volumen de expansión de los granos de MPT, fue necesario realizar el análisis de perfil de textura de las palomitas individualmente. Al respecto y luego de analizar y evaluar específicamente los resultados de este parámetro, se optó por desestimar los resultados obtenidos, considerando que no era posible estandarizar el método de evaluación propuesto, como consecuencia de que no se logró obtener una representatividad objetiva y confiable de las mediciones realizadas.

---

**Palabras clave:** Maíz palomero, palomitas, propiedades biofísicas, índice de reventado, volumen de expansión.

## ABSTRACT

### EVALUATION OF THE BIOPHYSICAL AND POPPING CHARACTERISTICS OF TOLUQUEÑO PALOMERO MAIZE (*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño) CULTIVATED IN SAN MARCOS TLAZALPAN, STATE OF MEXICO

Delia Guadalupe Sánchez Gómora<sup>1</sup>. Ingeniera Agrónoma Industrial  
Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas

Asesor Académico: Dr. Néstor Ponce García<sup>1</sup>

Asesor Adjunto: Dra. Adriana Villanueva Carvajal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus  
Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Estado de México, México. 50200.

✉ [Gomorad26@gmail.com](mailto:Gomorad26@gmail.com); [nponceg@uaemex.mx](mailto:nponceg@uaemex.mx); [avillanuevac@uaemex.mx](mailto:avillanuevac@uaemex.mx)

---

Toluqueño popcorn maize (*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño) (MPT) is a popping-type corn race located and distributed mainly in the State of Mexico. The grains produce popcorn, primarily consumed during celebrations and religious festivities. Therefore, the popcorn yield and the grain expansion index are essential quality parameters in the popping maizes. Unfortunately, MPT presents considerable restrictions in both quality parameters, a situation that has seriously limited its production and commercial exploitation, unlike imported popcorn, which, on the contrary, offers good quality attributes.

This situation has led to low MPT production to the extent that this variety could be considered in danger of extinction. Therefore, the objective of this study was to evaluate the biophysical and popping parameters of MPT grains grown in three paddocks located in San Marcos Tlazalpan, State of Mexico. The investigation consisted of two main stages. In the first step, MPT cobs were threshed, and the grains were selected according to their location on the cob: top, middle part, and base, to evaluate their biophysical parameters (pericarp cracking, size, weight, density, porosity, sphericity, and hardness) according to the location in the cob and paddock. In addition, the same comparison was made between bulk grains of MPT and grains of commercial popcorn (control). The second stage of the study evaluated the popcorn yield and expansion index of the MPT grains according to their cob disposition and paddock of origin. Additionally, a comparison was made between bulk MPT grains and commercial popcorn kernels. The popping evaluation was assessed by popping in a pot and using a microwave oven. Finally, the texture profile of the popcorn obtained from each of the samples was applied. Results showed significant statistical differences ( $P < 0.05$ ) between various biophysical parameters based on the location of the grains on the cob, highlighting that those seeds from the tip presented lower individual and thousand-grain weight (0.17g and 171g) than those in the middle part (0.21g and 197g) and the base (0.25g and 225g). On the other hand, commercial popcorn grains showed greater sphericity (68 vs. 56%), lower real density (11.8 vs. 12.5 g/mL), and lower porosity (24 vs. 34%) than MPT bulk grains ( $P < 0.05$ ). We concluded that the presence of cracks in the grains

pericarp was minimal (12 grains with cracks out of 220 observed) and was not associated with the low popping yield of the MPT. The grains selected from the top of the cob showed the best popping performance (14%) compared to those from the middle and base. Evaluation of microwave oven to produce popcorn, the bulk MPT grains showed 18.5% and commercial grains 68%. The MPT grains from paddock two presented better popping and popcorn expansion performance. About the popping method, the one carried out using a microwave oven was more efficient for the MPT grains, both in the yield and volume of the popcorn expansion. However, due to the MPT kernel's low popping performance and expansion volume, it was necessary to perform the texture profile analysis on the individual popcorn. In this regard, and after explicitly analyzing and evaluating the results of this parameter, we decided to reject the results obtained, considering that it was not possible to standardize the proposed evaluation method to obtain reliable representativeness measurements.

---

**Keywords:** Palomero maize, popcorn, biophysical properties, popping index, expansion volume

## ÍNDICE GENERAL

Dedicatorias .....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen .....	iii
Abstract .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE CUADROS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
I.INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos particulares .....	3
III. HIPÓTESIS .....	4
IV. JUSTIFICACIÓN.....	5
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
5.1. Maíz palomero (MP) .....	6
5.1.1. Composición química del grano .....	7
5.1.2. Parámetros de calidad del grano .....	7
5.1.3. Maíz palomero Toluqueño.....	9
5.1.3.1. Distribución geográfica .....	11
5.1.3.2. Características morfológicas.....	11
5.1.3.3. Composición química del grano.....	15
5.1.3.4. Principales usos.....	17
5.1.4. Propiedades biofísicas del grano .....	18
5.1.4.1. Presencia de fisuras en el pericarpio.....	19

5.1.4.2. Dimensiones axiales.....	19
5.1.4.3. Diámetros aritmético ( $D_a$ ) y geométrico ( $D_g$ ).....	20
5.1.4.4. Esfericidad ( $\phi$ ).....	21
5.1.4.5. Peso individual de grano ( $PIG$ ).....	21
5.1.4.6. Peso de 1,000 granos ( $PMG$ ).....	22
5.1.4.7. Densidad aparente ( $\rho_b$ ).....	23
5.1.4.8. Densidad real ( $\rho_t$ ).....	24
5.1.4.9. Porosidad ( $\mathcal{E}$ ).....	24
5.1.4.10. Dureza.....	25
5.1.5. Determinación del contenido de humedad.....	26
5.2. Reventado del grano.....	27
5.2.1. Palomitas de maíz.....	28
5.2.2. Métodos de reventado.....	30
5.2.2.2. Reventado por método de olla.....	31
5.2.2.3. Reventado por método de horno de microondas.....	32
5.3. Rendimiento de reventado y volumen de expansión.....	32
5.4. Análisis del Perfil de Textura (APT) de las palomitas.....	33
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
6.3. Ubicación del sitio experimental.....	36
6.1. Material biológico.....	36
6.2. Preparación de las muestras.....	37
6.4. Propiedades biofísicas del grano.....	38
6.4.1. Presencia de fisuras en el pericarpio.....	38
6.4.2. Dimensiones axiales.....	39
6.4.3. Diámetro aritmético ( $D_a$ ) y geométrico ( $D_g$ ).....	40

6.4.4. Esfericidad ( $\phi$ ) .....	40
6.4.5. Peso individual de grano ( <i>PIG</i> ).....	41
6.4.6. Peso de 1,000 granos ( <i>PMG</i> ).....	41
6.4.7. Densidad aparente ( $\rho_b$ ) .....	42
6.4.8. Densidad real ( $\rho_t$ ) .....	42
6.4.9. Porosidad ( $\mathcal{E}$ ) .....	44
6.4.10. Dureza.....	44
6.5. Determinación del contenido de humedad de los granos .....	45
6.6. Métodos de reventado .....	45
6.6.1. Consideraciones generales.....	45
6.6.2. Reventado en olla .....	46
6.6.3. Reventado en horno de microondas .....	47
6.7. Porcentaje de reventado y volumen de expansión .....	48
6.8. Análisis de Perfil de Textura (APT) de las palomitas .....	49
6.9. Diseño de experimentos y análisis estadístico .....	51
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	52
7.1 Características de las propiedades biofísicas del grano .....	52
7.1.1. Presencia de fisuras en el grano.....	52
7.1.3. Diámetro aritmético ( $D_a$ ), diámetro geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ )	55
7.1.4. Peso Individual de Grano ( <i>PIG</i> ), Peso de Mil Granos ( <i>PMG</i> ), Densidad Aparente ( $\rho_b$ ) y Densidad Real ( $\rho_t$ ).....	57
7.1.5. Porosidad ( $\mathcal{E}$ ), dureza y contenido de humedad .....	60
7.2. Rendimiento de reventado y volumen de expansión .....	63
7.3. Correlaciones de Pearson .....	68
7.4. Análisis del Perfil de Textura (APT) de las palomitas .....	70

7.5. Conclusiones .....	72
VII. REFERENCIAS CONSULTADAS.....	73

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Composición química proximal ( $\text{mg kg}^{-1}$ de peso seco de semilla) de diferentes cultivares granos de maíz palomero Toluqueño blanco y pigmentados. .....	16
<b>Cuadro 2.</b> Datos generales de los granos de maíz palomero objeto de estudio ..	36
<b>Cuadro 3.</b> Resultados de la evaluación para determinar presencia o ausencia de fisuras en el pericarpio de granos de maíz palomero Toluqueño y comercial Verde Valle .....	52
<b>Cuadro 4.</b> Valores medios de las dimensiones axiales (Largo, Ancho, Grosor) de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle.....	53
<b>Cuadro 5.</b> Valores medios de las dimensiones axiales (Largo, Ancho, Grosor) de granos de maíz palomero Toluqueño, de acuerdo con su ubicación en la mazorca .....	54
<b>Cuadro 6.</b> Valores medios del diámetro aritmético ( $D_a$ ), diámetro geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle.....	55
<b>Cuadro 7.</b> Valores medios de diámetro aritmético ( $D_a$ ), diámetro geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca.....	56
<b>Cuadro 8.</b> Valores medios de peso y densidad ( $PIG$ , $PMG$ , $\rho_b$ , $\rho_t$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle .....	58

<b>Cuadro 9.</b> Valores medios de peso y densidad ( $PIG$ , $PMG$ , $\rho_b$ , $\rho_t$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca .....	59
<b>Cuadro 10.</b> Valores medios de porosidad ( $\mathcal{E}$ ), Dureza y contenido de humedad de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle.....	60
<b>Cuadro 11.</b> Valores medios de porosidad ( $\mathcal{E}$ ), dureza y contenido de humedad de granos de maíz palomero Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca.....	62
<b>Cuadro 12.</b> Escala para determinar y evaluar el porcentaje de granos reventados y calidad de palomitas obtenidas a partir de granos de maíz palomero Toluqueño.	64
<b>Cuadro 13.</b> Comparación del rendimiento y volumen de expansión de palomitas obtenidas de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle	65
<b>Cuadro 14.</b> Rendimiento y volumen de expansión de palomitas obtenidas de maíz palomero Toluqueño por dos métodos y por ubicación del grano en la mazorca .	66
<b>Cuadro 15.</b> Correlaciones de Pearson entre características biofísicas del grano, rendimiento y expansión de las palomitas.....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución del cultivar palomero Toluqueño ( <i>Zea mays</i> L. cv. Palomero Toluqueño) en México.....	12
<b>Figura 2.</b> Mazorcas de maíz palomero Toluqueño .....	12
<b>Figura 3.</b> Forma de los granos de maíz palomero Toluqueño .....	13
<b>Figura 4.</b> Estructura del grano de maíz .....	14
<b>Figura 5.</b> Granos de maíz palomero Toluqueño enteros (corte transversal) .....	15
<b>Figura 6.</b> Dimensiones axiales de un grano de maíz.....	20
<b>Figura 7.</b> Principales formas de palomita de maíz. A). Hongo; B). Mariposa.....	30
<b>Figura 8.</b> Curva de perfil de textura generalizada.....	35
<b>Figura 9.</b> Recepción de maíz palomero Toluqueño .....	37
<b>Figura 10.</b> Medición y seccionado (punta, medio y base) de las mazorcas de maíz palomero Toluqueño. ....	37
<b>Figura 11.</b> Granos de maíz palomero Toluqueño separados e identificados.....	38
<b>Figura 12.</b> Dispositivo lumínico para determinar presencia o ausencia de fisuras en el pericarpio de granos de maíz palomero .....	39
<b>Figura 13.</b> Determinación de presencia de fisuras en pericarpio de granos de maíz palomero .....	39
<b>Figura 14.</b> Medición de las dimensiones axiales en grano de maíz palomero. A) Largo; B). Ancho; C). Grosor.....	39

<b>Figura 15.</b> Peso individual de grano de granos de maíz palomero.....	41
<b>Figura 16.</b> Determinación del peso de mil granos de granos de maíz palomero. A). Conteo de submuestras de cien granos; B). Pesaje de submuestras de cien granos .....	42
<b>Figura 17.</b> Determinación de densidad real ( $\rho_i$ ) de granos de maíz palomero .....	43
<b>Figura 18.</b> Análisis de dureza en granos de maíz palomero.....	44
<b>Figura 19.</b> Olla y parilla eléctrica. Método de reventado de grano de maíz palomero en olla.....	47
<b>Figura 20.</b> Recipiente vidrio borosilicato para elaboración de palomitas en horno de microondas.....	48
<b>Figura 21.</b> A). Determinación del volumen de granos de maíz. B). Determinación del volumen de expansión de palomitas .....	50
<b>Figura 22.</b> Análisis de perfil de textura de palomitas con Analizador de Textura Universal TA-XT2 .....	50

## I.INTRODUCCIÓN

El Código Internacional de Nomenclatura para Plantas Cultivadas (ICNCP, por sus siglas en inglés), cita que el término *cultivar* se refiere al conjunto de plantas cultivadas que se distinguen de las demás por algún carácter ya sea morfológico, fisiológico, citológico o químico y que transmiten dichos caracteres a su descendencia. El concepto *cultivar* y *variedad* son equivalentes si se refieren a una variedad cultivada (Brickeell *et al.*, 2009).

México es el país que cuenta con la mayor variedad genética de maíz, reconociéndose 59 variedades, de las cuales 7 son aptas para elaborar palomitas, destacando entre otras el cultivar “Palomero Toluqueño”, maíz producido principalmente en el Estado de México (Mier, 2020). Desafortunadamente, las poblaciones actuales de maíz palomero Toluqueño no representan las características típicas inicialmente descritas para esta variedad (CONABIO, 2020). De acuerdo con el ICNCP, el nombre correcto para denominar al maíz palomero Toluqueño es: *Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño. Sin embargo y para fines prácticos, en lo sucesivo en el presente documento lo nombraremos simplemente como “palomero Toluqueño”.

Bautista-Ramírez *et al.* (2018) afirman que el maíz palomero Toluqueño se encuentra en peligro de extinción y que esta amenaza continuará mientras no se encuentren estrategias que fomenten su conservación y aprovechamiento.

Estudios anteriores han demostrado que, gracias al conocimiento y evaluación de ciertas características o propiedades biofísicas del grano, tales como el tamaño, peso y dureza entre otras, es posible mejorar su aprovechamiento.

En este sentido, De la O-Olán *et al.* (2018) estandarizaron un método de reventado del maíz palomero, considerando el contenido de humedad del grano y el grado de expansión de la palomita.

De manera similar, Bautista-Ramírez *et al.* (2019) describieron algunas características físicas y químicas de diferentes accesiones del maíz palomero Toluqueño, las cuales contrastaron con variedades comerciales de mayor productividad, demostrando que variables físicas como el peso hectolítrico y la dureza del grano, presentan buena asociación con el volumen de expansión del grano.

Sin embargo, poco se ha reportado específicamente sobre las características y propiedades biofísicas de la variedad de maíz palomero Toluqueño, así como del potencial de correlación inversa que existe entre la presencia de fisuras en el pericarpio y el grado de reventado del grano.

Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en evaluar las principales características biofísicas de granos de maíz palomero Toluqueño, tales como el tamaño del grano (dimensiones axiales, según la ubicación del grano en la mazorca), diámetro aritmético y geométrico, esfericidad, densidad aparente, peso individual, peso de mil granos, dureza y presencia de fisuras en el pericarpio. A partir de los datos obtenidos fue posible generar información novedosa sobre las propiedades biofísicas de este cultivar, además de que se identificaron algunas correlaciones entre dichas propiedades y el grado de reventado del grano.

## II. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades biofísicas de granos de maíz palomero Toluqueño y su posible asociación con el grado de reventado para la producción de palomitas.

### 2.2. Objetivos particulares

- Caracterizar las propiedades biofísicas de granos de maíz palomero Toluqueño en función de su ubicación en la mazorca: punta, zona media y base.
- Determinar el grado de daño en el pericarpio (fisuras) de los granos y establecer su potencial efecto sobre el rendimiento de granos reventados (producción de palomitas).
- Determinar el rendimiento y volumen de reventado de los granos de maíz palomero Toluqueño aplicando los métodos de olla y microondas.
- Analizar el perfil de textura de las palomitas producidas, de acuerdo con la ubicación del grano en la mazorca y método de reventado.

### **III. HIPÓTESIS**

Las propiedades biofísicas de los granos de maíz palomero Toluqueño, así como el grado de daño (fisuras) presentes en el pericarpio, se asocian con el rendimiento de granos reventados para la producción de palomitas.

#### **IV. JUSTIFICACIÓN**

La conservación de algunos cultivares de maíz nativos de México, se ha visto amenazada por la importación y consumo de variedades mejoradas, lo que ha propiciado que los pequeños productores del país cada vez se interesen menos en producir ciertos tipos o variedades endémicas de maíz, hasta el punto de que actualmente algunos de estos cultivares se encuentren en potencial riesgo de extinción.

Las principales características de calidad consideradas en los maíces palomeros comerciales se relacionan con la forma de la palomita, el volumen de expansión y el porcentaje de granos sin reventar, cualidades asociadas con la humedad y dureza del grano, entre otras.

Al respecto, el maíz palomero Toluqueño es un cultivar que se ubica dentro de la lista de materiales genéticos en peligro de desaparecer, debido precisamente a su bajo rendimiento de reventado y bajo índice de expansión de la roseta, en comparación con otros maíces palomeros comerciales importados.

La caracterización y evaluación de las características biofísicas de los granos de maíz palomero Toluqueño, puede representar un primer acercamiento para establecer posibles correlaciones entre éstas y el limitado grado de reventado de los granos, lo que en consecuencia favorecería la identificación de los parámetros adecuados para el mejor aprovechamiento y conservación de este cultivar.

## V. REVISIÓN DE LITERATURA

### 5.1. Maíz palomero (MP)

El maíz puede ser clasificado en distintos tipos según el color del grano, la composición del endospermo, las condiciones ambientales de cultivo, el grado de madurez del grano y el uso o destino final, entre otros factores. El maíz palomero también conocido como maíz reventón, se destina para la elaboración de palomitas, en función de que sus granos poseen un alto contenido de endospermo vítreo y mínimo contenido de endospermo harinoso (situado en la parte basal del grano) (Paliwal, 2001).

En México, Wellhausen *et al.* (1951) clasificaron al maíz de acuerdo con su origen, características y distribución, en cuatro grupos principales, (estos autores se refieren al término “raza” para nombrar a los cultivares, por lo que, para esta cita en particular, se considerará de esa forma). Los cuatro grupos son: a) Indígenas antiguos, b) Exóticos pre-Colombinos, c) Mestizos prehistóricos y d) Modernas incipientes. En un grupo adicional se ha incluido a las razas no bien definidas. Particularmente, el grupo de razas indígenas antiguas incluye a aquéllas que se estima su origen fue en México, a partir del maíz primitivo tunicado. De estas, se conocen cuatro principales: Palomero Toluqueño, Arrocillo Amarillo, Chapalote y Nal-Tel, las cuales de acuerdo con la CONABIO (2021), pertenecen a los grupos cónico, Chapalote y tropicales precoces.

En la Mesa Central de México se emplea el nombre “maíz palomero” para los maíces reventadores que producen palomitas o rosetas cuando se exponen a elevadas temperaturas (Romero *et al.*, 2005).

### **5.1.1. Composición química del grano**

Los granos maduros de maíz palomero están compuestos por proteínas, lípidos, minerales y carbohidratos. Los porcentajes difieren de acuerdo con la genética de la planta y su entorno de crecimiento, pero en comparación con el maíz dentado normal, el maíz palomero tiende a un contenido similar de almidón (carbohidratos) y lípidos, pero mayor contenido de proteínas (Sweley *et al.*, 2013).

La composición proximal del grano de maíz palomero es: 11.0-13.2% proteína; 4.6-5.8% lípidos; 1.8- 2.6% fibra cruda; 1.4- 1.9% minerales y 76.5- 81.2% elementos libres de nitrógeno (Serna-Saldívar, 2010).

### **5.1.2. Parámetros de calidad del grano**

La calidad del grano de maíz puede verse afectada en campo (factores ambientales), así como durante las operaciones de cosecha y postcosecha (almacenamiento, transporte), ocasionando afecciones al material. Tal es el caso de la presencia de impurezas, que pueden provenir de la propia planta (rastrojo, ramas, hojas) o de agentes externos (otras plantas, arena, piedras), perjudicando el sabor, olor y color de los productos (Palacios-Rojas, 2018).

La norma NMX-FF-034/2-SCFI-2003 (Productos no industrializados - para uso humano – cereales – maíz amarillo para elaboración de almidones y derivados – especificaciones y métodos de prueba), determina ciertos parámetros de calidad que deben cumplir los granos, algunos de estos son: libre de olores a humedad, rancidez, fermentación u otros olores extraños. Contenido de humedad máximo deseable de 15% para permitir un adecuado manejo, conservación y

almacenamiento del grano. No debe presentar parásitos, microorganismos o sustancias generadas por ellos. Se deben cuantificar los granos incompletos y cualquier cuerpo o material extraño distinto a la especie.

Las principales variables de calidad que se consideran en los maíces palomeros comerciales son la forma de la roseta o palomita, el volumen de expansión, el porcentaje de granos sin reventar y la dureza del grano, entre otros.

Cuando se calienta el grano, la humedad atrapada en la parte harinosa del endospermo se expande y revienta, creando las palomitas de maíz, por lo que la calidad del maíz se correlaciona con la intensidad de la expansión (Brites *et al.*, 2007).

De acuerdo con De la O-Olán *et al.* (2018), tanto el contenido de humedad, como el tiempo y grado de reventado del grano, están asociados con la composición del pericarpio (contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina), el cual cumple con la función de limitar la salida de humedad del grano (como vapor de agua), logrando de esta forma que la presión de vapor se incremente, al grado que permite el reventado para la formación de la roseta o palomita.

La forma de los granos reventados, la cantidad de granos que se quedan sin reventar, la suavidad y el sabor, también son parámetros que representan calidad del maíz reventador (Villanueva, 2008).

Las accesiones de maíz palomero (MP) Toluqueño, deberían valorarse a través de sus atributos de calidad para elaborar palomitas en comparación con criterios de calidad de MP comerciales (Bautista-Ramírez *et al.*, 2019).

Para el maíz, se considera que características como la dureza del grano, la pérdida de peso y la capacidad de absorción de agua se relacionan con el uso alimenticio

al cual se destina. Resultan deseables valores altos de capacidad de absorción de agua para maíces destinados a la producción de tortillas y atole; mientras que, para elaboración de botanas son preferibles valores intermedios, mientras que, valores aún menores de capacidad de absorción de agua aplican para maíces empleados para producir palomitas y pinole (Figuroa *et al.*, 2013).

### **5.1.3. Maíz palomero Toluqueño**

El ICNCP asignó el término “*cultivar*” al conjunto de plantas que: a) ha sido seleccionado por un carácter en particular o combinación de caracteres; b) es distinto, uniforme y estable en estos caracteres y c) cuando se propaga en medios apropiados conservando tales caracteres.

Existen diferentes condiciones bajo las cuales ciertas plantas pueden pertenecer a un cultivar. Las plantas cultivadas reciben su nombre en tres niveles principales que son: género, especie y cultivar. El concepto cultivar es esencialmente diferente del concepto botánico variedad, que es una categoría de nivel inferior a la especie, sin embargo, el término cultivar y variedad son equivalentes tratándose de una variedad cultivada (Brickeell *et al.*, 2009).

El nombre completo de un cultivar se compone del nombre botánico o común de la especie y el nombre del cultivar (epíteto del cultivar), en este caso, colocando la abreviatura cv., entre ellos. De esa manera el nombre del cultivar en estudio es: *Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño.

La Cuenca Alta del río Lerma se considera su lugar de origen, derivado de la mayor presencia y antigüedad de esta (Romero *et al.*, 2005), a pesar de que se reportan

hallazgos en más lugares de la Mesa Central (Michoacán, Puebla) con altitudes elevadas que van desde los 2,000 hasta los 2,800 msnm (CONABIO, 2020).

Debido a que se encuentra en gran medida en el Valle de Toluca, se le dio el nombre de palomero Toluqueño (Wellhausen *et al.*, 1951).

De este cultivar, se tienen resguardadas 45 accesiones en los diferentes bancos de germoplasma de México, sin embargo, aún no se han caracterizado considerando su capacidad (volumen) de expansión (Bautista-Ramírez *et al.*, 2019).

Es probable que se hayan desarrollado subvariedades del palomero Toluqueño debido al aislamiento geográfico y al ambiente en algunas regiones elevadas de la Mesa Central, Sierra Madre Occidental y Oriental; éstas podrían ser: palomero de Chihuahua, palomero de Jalisco y palomero Poblano (Romero *et al.*, 2005).

De acuerdo con estudios realizados por Aguirre *et al.* (2018), el cultivar palomero Toluqueño, tiene baja representatividad de accesiones resguardadas en las colecciones nacionales debido a factores como su baja frecuencia de reconocimiento como grupo taxonómico diferente, su adaptación a condiciones agroecológicas, así como por estar asociado a un uso particular que se perdió o disminuyó con la migración, o bien, por presión de nuevas tendencias en el mercado, cambio de sistemas de cultivo, costumbres culinarias, ambientales y uso de la tierra y/ o por la obtención de pocas colectas.

El MP Toluqueño posee un carácter reventador y su capacidad de expansión es menor con respecto a materiales comerciales. Esta diferencia se atribuye a cambios tanto en variables físicas como químicas del grano (Bautista-Ramírez *et al.*, 2019).

### **5.1.3.1. Distribución geográfica**

En la Figura 1 se muestra la distribución geográfica del MP Toluqueño, en México, según datos recabados por CONABIO (2015). Como puede apreciarse, este cultivar se encuentra distribuido principalmente en los estados de México y Tlaxcala, además de la Ciudad de México.

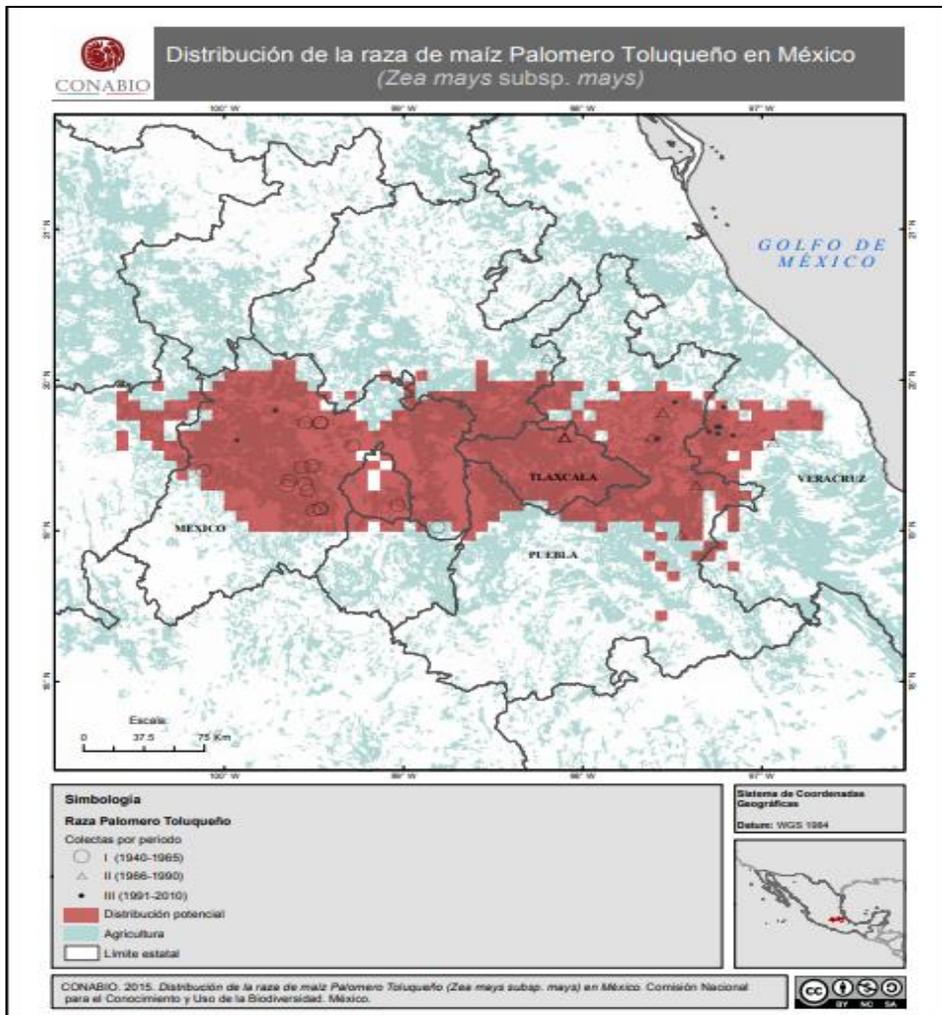
### **5.1.3.2. Características morfológicas**

Wellhausen *et al.* (1951) describen la morfología del maíz palomero Toluqueño de la siguiente manera:

Plantas: Longitud corta, de aproximadamente 1.70 m de altura, con pocas hojas angostas, caídas y cortas. El tallo presenta pocos nudos, además de poco desarrollo radicular y sus espigas son cortas con pocas ramificaciones.

Mazorcas: Cónicas con adelgazamiento agudo y uniforme de la base al ápice, de longitud corta. Cuentan con alrededor de veinte hileras de granos con forma oblonga (Figura 2).

Granos: Se caracterizan por poseer endospermo predominantemente vítreo, el cual ocupa la mayor parte del grano (razón por la cual los granos son duros), aunque también contienen una pequeña cantidad de almidón harinoso o suave en la parte basal del mismo. Los granos son pequeños, con pericarpio grueso y varían en su forma de redondos a oblongos (Figura 3).



**Figura 1.** Distribución del cultivar palomero Toluqueño (*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño) en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2015. Recuperada de: <http://www.biodiversidad.gob.mx:9999/media/1/usos/maices/grupos/>



**Figura 2.** Mazorcas de maíz palomero Toluqueño



**Figura 3.** Forma de los granos de maíz palomero Toluqueño

Los granos constan básicamente de tres partes anatómicas (Figura 4):

**Pericarpio:** Representa aproximadamente el 7% del peso del grano. Se caracteriza por su alto contenido de fibra, misma que se compone principalmente de celulosa y hemicelulosa (Benítez, 2006). A su vez, el pericarpio está conformado por tres capas delgadas:

*Epicarpio:* Capa externa que cubre al grano proporcionándole protección de insectos al grano y evitar su deshidratación.

*Mesocarpio:* Su función es brindar protección, están compuestos principalmente por fibra insoluble, proteínas y minerales.

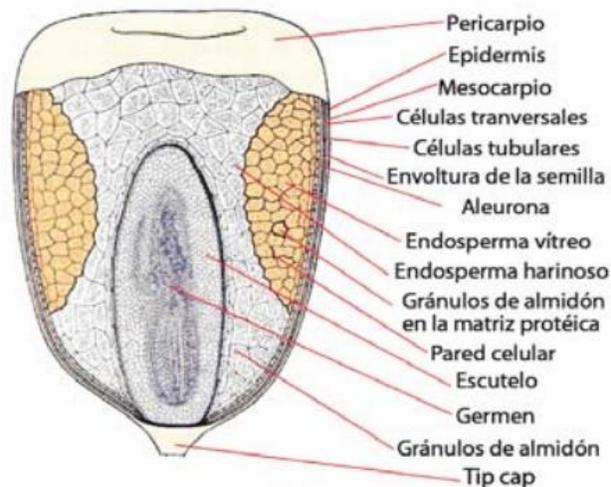
*Endocarpio:* Está formado por células tubulares (conducen agua y giberelinas durante la germinación) y células transversales (evitan la pérdida de agua durante la germinación) (Serna-Saldívar, 2010).

**Endospermo:** El endospermo es la reserva energética del grano (Villanueva, 2008) y ocupa hasta el 81% del peso del grano (Serna-Saldívar, 2010)

Está conformado por: a) *testa*, la cual protege al grano contra patógenos y es rica en vitamina B, minerales, ácido fítico, proteínas y compuestos fenólicos, b) *Capa de aleurona* la cual produce enzimas para la germinación, además de que contiene vitamina B, minerales, depósitos de grasa, ácido fítico, proteínas y compuestos fenólicos, c) *Endospermo harinoso*. Proporciona

energía y nutrientes necesarios para la germinación y desarrollo de las plántulas. Está compuesto por gránulos de almidón y proteínas (Serna-Saldívar, 2010).

**Germen:** Representa alrededor del 12% del peso del grano (Serna-Saldívar, 2010). Posee un elevado contenido de lípidos, proteínas, minerales, vitaminas y azúcares solubles (Benítez, 2006; Serna-Saldívar, 2010). Su consumo aporta gran cantidad de energía (Villanueva, 2008). Está formado por el escutelo, el cual aporta hormonas, enzimas, energía y nutrientes necesarios para la germinación y desarrollo de eje embrionario. Posterior a la germinación, el germen se desarrolla en la radícula y la plúmula originará la nueva planta.



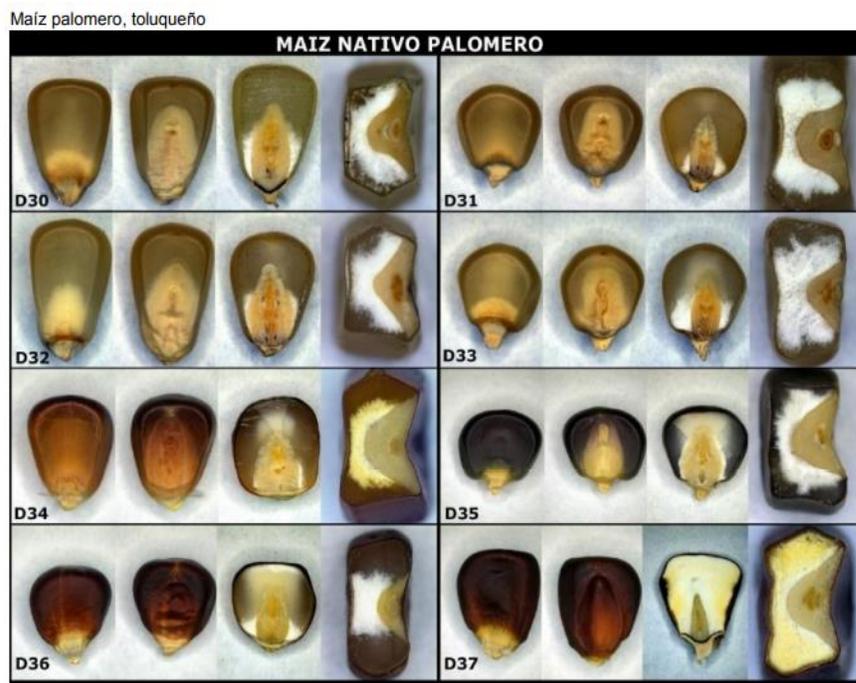
**Figura 4.** Estructura del grano de maíz (Brites *et al.*, 2007)

El tamaño y la forma de los granos de maíz dependen de su genética y su disposición en la mazorca. Por lo general, los granos extremos tienen forma redondeada, mientras que los restantes tienden a ser planos (Brites *et al.*, 2007).

### 5.1.3.3. Composición química del grano

La evaluación de las propiedades químicas del grano de maíz permite caracterizar las variedades que generan buen rendimiento y características agronómicas favorables (Salinas *et al.* 1992a).

Quero *et al.* (2018), evaluaron la composición química proximal de cuatro cultivares de MP Toluqueño blanco y cuatro pigmentados (Figura 5).



**Figura 5.** Granos de maíz palomero Toluqueño enteros (corte transversal) (Quero *et al.*, 2018).

En el Cuadro 1 se observa la composición química de granos de ocho diferentes cultivares de MP Toluqueño, de las cuales cuatro variedades son blancos y cuatro pigmentados.

**Cuadro 1.** Composición química proximal (mg kg<sup>-1</sup> de peso seco de semilla) de diferentes cultivares granos de maíz palomero Toluqueño blanco y pigmentados (Adaptado de Quero *et al.*, 2018).

ELEMENTO		Cultivares blancos				Cultivares pigmentados			
		D30	D31	D32	D33	D34	D35	D36	D37
CARBONO	C	546,100.0	542,400.0	542,200.0	528,000.0	543,000.0	536,800.0	543,000.0	527,800.0
OXIGENO	O	435,800.0	443,500.0	438,000.0	459,400.0	439,600.0	446,700.0	439,600.0	459,700.0
POTASIO	K	11,966.5	7,295.8	11,125.1	7,599.3	9,945.2	9,674.3	6,970.2	10,757.5
FOSFORO	P	10,392.1	7,624.5	11,142.5	6,160.5	9,474.3	9,108.5	4,668.6	6,176.5
MAGNESIO	Mg	3,684.6	3,708.6	4,131.6	2,983.7	3,361.8	3,406.3	1,841.3	2,390.0
AZUFRE	S	2,271.6	2,563.3	2,508.4	1,981.1	2,791.5	2,409.0	1,442.5	2,142.5
COLORO	Cl	969.9	1,303.7	824.7	1,285.6	1,125.2	806.3	1,077.3	1,072.3
SILICIO	Si	679.8	531.8	629.8	414.3	838.6	722.7	557.1	502.6
ALUMINIO	Al	207.2	118.5	162.9	94.6	449.4	236.1	189.6	133.9
HIERRO	Fe	222.6	233.4	258.3	211.4	317.8	227.4	176.6	233.3
CALCIO	Ca	192.1	181.7	301.9	220.6	214.8	216.4	134.4	201.9
WOLFRAMIO	W	65.9							
RUBIDIO	Rb	16.7	30.2	16.7	26.6	13.8	24.5	20.5	25.8
ZINC	Zn	74.9	62.5	81.2	50.7	92.4	75.2	48.3	74.7
MANGANESO	Mn	32.3		38.7					
BROMO	Br				29.1				
COBRE	Cu		29.1	24.6				17.5	22.9
NIQUEL	Ni						17.7		

Se pueden apreciar las diferentes proporciones de compuestos como carbono, oxígeno, potasio, fósforo, entre otros, reportados en  $\text{mg kg}^{-1}$  y ordenados de mayor a menor, también que no todos los cultivares contienen los mismos compuestos ni las mismas proporciones de ellos.

#### **5.1.3.4. Principales usos**

La propiedad de reventar y producir palomitas caracterizó culturalmente a este tipo de maíz, ya que además de su consumo como alimento, juega un papel importante en el culto a diferentes deidades prehispánicas, gracias a lo cual su producción se ha conservado hasta la actualidad en algunas zonas del Estado de México. En el siglo XIX, existían molinos dedicados a la producción de aceite a base de maíz, principalmente del tipo palomero Toluqueño. El aceite obtenido se destinaba como materia prima para la producción de jabón (Romero *et al.*, 2005). Sin embargo, la forma preferida de consumo del MP Toluqueño por los Matlazincas era como palomitas, a las cuales llamaban “*momochtli*” (De la O-Olán *et al.*, 2015).

Actualmente, en la localidad de San Marcos Tlaxalpan y Laguna seca ubicadas en San Bartolo Morelos, Estado de México, se continúa con la producción de este cultivar, cuyo principal uso es para la elaboración de tortillas, sin embargo, se suele mezclar con otros tipos de maíz como el cacahuacintle, para mejorar la textura y calidad de las tortillas, además de que también se usa para la alimentación animal (De la O-Olán *et al.*, 2015). En este sentido, Romero *et al.* (2005) mencionan que es posible elaborar tortillas a partir de MP Toluqueño, aunque preparadas de esta manera, no presentarán una textura suave.

Los productores de MP Toluqueño del Estado de México, consideran que sus maíces criollos son de baja productividad (Gómez *et al.*, 2014), debido a la baja rentabilidad de los maíces nativos, las condiciones agroecológicas y climáticas, la baja productividad del cultivo, la falta de conocimiento sobre la importancia de su conservación y diversificación, los cambios culturales y el uso limitado de algunos cultivares (Aguirre *et al.*, 2018).

#### **5.1.4. Propiedades biofísicas del grano**

Las características físicas del grano como su peso, forma, tamaño, densidad, porosidad y peso hectolítrico, entre otras, son parámetros importantes para considerar en un análisis de calidad (Ospina, 2001). El uso de métodos de análisis rápidos es esencial para estimar un nivel aceptable de calidad del grano de acuerdo con el manejo postcosecha, el almacenamiento y procesamiento de alimentos (Ponce-García *et al.*, 2017). La caracterización de la calidad de los granos es fundamental y crítica en el mercado y movimiento de granos (López *et al.*, 2005).

Los principales parámetros de calidad utilizados para seleccionar granos están relacionados con sus propiedades físicas, porque afectan la composición química, funcionalidad y uso final óptimo (Serna-Saldívar, 2010). En este sentido, Mauricio *et al.* (2004) afirman que las propiedades físicas (tamaño, gravedad específica, dureza) y químicas del grano son importantes a considerar para su uso alimentario; respecto al color del grano, se atribuye como preferencia del consumidor, ya que no se considera una propiedad importante para su uso.

#### **5.1.4.1. Presencia de fisuras en el pericarpio**

Las principales funciones del pericarpio son proteger al grano contra agentes externos (insectos, microorganismos), evitar la pérdida de humedad, además de conducir y distribuir agua y nutrientes durante la germinación (Serna-Saldívar, 2010), por lo que es indispensable la presencia del pericarpio sano.

Hoseney *et al.* (1983) demostraron que la integridad del pericarpio es fundamental, debido a que influye directamente en el proceso de reventado, actuando como contenedor de presión, por lo que a medida que se encuentra dañado disminuye el volumen de expansión de la palomita, debido a la ventilación de la presión de vapor afectando así el estallido normal del grano. De igual forma, estos autores precisan que existe una distinción entre el estallido y la expansión de un grano calentado, porque tan pronto se rompe el pericarpio existe una disminución del volumen de expansión, sin embargo, hay estallido, por lo que concluyen que son eventos diferentes.

Por su parte, Mohamed *et al.* (1993) mencionan que el grosor del pericarpio tiene mayor influencia en la capacidad de expansión de los maíces palomeros. En este sentido, Richardson (1959) (citado por Hoseney *et al.*, 1983) afirma que la ubicación del grano en la mazorca determina el grosor del pericarpio, pues tiende a ser más delgado en los granos de la punta de la mazorca y más grueso en los granos ubicados en la base.

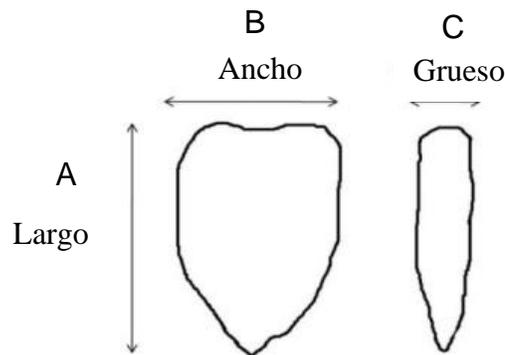
#### **5.1.4.2. Dimensiones axiales**

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 de

trituration durante la molienda, así como para calcular el área de superficie y el volumen de granos durante procesos como el secado, aireación, calentamiento y enfriamiento (Al-Mahasneh y Rababah, 2007).

En los granos cereales, es muy común la determinación de las tres principales dimensiones: largo ( $L$ ), ancho ( $A$ ) y grosor ( $G$ ) (Figura 6), las cuales típicamente se miden usando un micrómetro, expresando el resultado 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 de punto a punto más ancha en paralelo a la cara del grano y el grosor ( $G$ ) corresponde a la distancia medida entre las dos caras del grano (Karababa, 2005).



**Figura 6.** Dimensiones axiales de un grano de maíz.  
Adaptada de Sangamithra *et al.* (2016)

#### 5.1.4.3. Diámetro aritmético ( $D_a$ ) y geométrico ( $D_g$ )

Para cualquier partícula irregular existe una partícula esférica hipotética que tiene el mismo volumen, el diámetro de esta esfera hipotética es un diámetro equivalente para la partícula real, denominado diámetro de esfera equivalente en volumen o diámetro geométrico ( $D_g$ ). Por otro lado, el diámetro aritmético ( $D_a$ ) es el promedio

de las dimensiones lineales (longitudes) de los ejes principales (largo, ancho y grueso) de un grano (Figura y Teixeira, 2007).

#### **5.1.4.4. Esfericidad ( $\phi$ )**

Uno de los métodos para medir la forma de los productos agrícolas es mediante la comparación con formas geométricas regulares. Dentro de los más utilizados está la esfericidad, la cual relaciona el volumen y la proximidad a una esfera perfecta (Miranda-Avilés *et al.*, 2014). De igual manera y de acuerdo con Sangamithra *et al.* (2016), la esfericidad puede definirse como la relación entre el área de superficie de la esfera que tiene el mismo volumen y área de superficie que el grano.

El tamaño de partícula de formas regulares se puede caracterizar mediante sus dimensiones lineales (longitudes) a lo largo de sus ejes principales, sin embargo, en el caso de una esfera se determina mediante su diámetro, volumen y área superficial en función de sus dimensiones lineales básicas. La esfericidad se cuantifica como una relación adimensional de cualquier diámetro equivalente especificado para la partícula (media aritmética o geométrica), dividido entre el diámetro mayor de la partícula (Figura y Texeira, 2007).

El valor de la esfericidad está representado en porcentaje, así mientras el valor se acerque a 100, la partícula es más esférica y viceversa.

#### **5.1.4.5. Peso individual de grano (PIG)**

En el maíz, el rendimiento de grano depende del número de granos por unidad de superficie y el peso individual de grano obtenidos en la cosecha (Borras *et al.*, 2003, citado por Corona-Mendoza *et al.*, 2012).

El desarrollo del grano se puede dividir en dos etapas: alargamiento y llenado. La primera es resultado de la división celular y el llenado ocurre cuando las reservas de almidón y proteína se depositan dentro del endospermo, algunos de estos carbohidratos se trasladan al grano en crecimiento y aunque las estimaciones son variadas, pueden proporcionar hasta un 15-20 % del peso seco final del grano (Bewley y Black, 1994). Durante el periodo efectivo de llenado de grano (segunda etapa), ocurre una tasa de acumulación de materia seca que continúa depositándose hasta que alcanza un punto máximo, a partir del cual el agua es desplazada por la materia seca que sigue acumulándose en el grano.

#### **5.1.4.6. Peso de 1,000 granos (*PMG*)**

La calidad de los granos se basa en la valoración de distintos atributos como la calidad genética, fisiológica, física y sanitaria, los cuales mejoran el establecimiento del cultivo (Kelly, 1988, citado por Pérez *et al.*, 2006). La calidad física involucra características como el contenido de humedad, el peso por volumen y la pureza.

La prueba de determinación de peso de mil granos (*PMG*) puede llevarse a cabo mediante repeticiones de cien granos, contadas mediante un contador de semillas o manualmente, reportando el respectivo peso en gramos (Moreno, 1984).

El *PMG* es un indicador del tamaño y la densidad del grano: un valor bajo corresponde a granos suaves, mientras que un mayor peso corresponde a granos duros y compactos (García y Vázquez, 2016).

El *PMG* determina la masa del grano y es un parámetro esencial para la selección de cultivares con mejor calidad física y fisiológica de la semilla (Ponce-García *et al.*,

2017); es un parámetro que se utiliza en el manejo y procesamiento de granos (Sangamithra *et al.*, 2016).

#### **5.1.4.7. Densidad aparente ( $\rho_b$ )**

Es el espacio que ocupa cierto material por unidad de volumen y se expresa en unidades de masa por unidad de volumen, es decir, corresponde a la masa de un grupo de partículas individuales dividida por el espacio ocupado por estas (Wilhelm *et al.*, 2004).

Es un factor relacionado con la dureza, la susceptibilidad a la ruptura, el rendimiento de molienda, la velocidad de secado, las condiciones generales del grano y la resistencia al desarrollo de hongos (Palacios-Rojas, 2018).

Las unidades internacionales estándar (SI) para expresar la densidad son  $\text{kg m}^{-3}$ , aplica para sistemas sólidos, líquidos, gaseosos y dispersos como espumas, productos a granel, o polvos (Figura y Texeira, 2007). Para el caso de la evaluación de granos, este valor se expresa en kilogramos por hectolitro ( $\text{kg/hL}$ ) reconocido como peso hectolítrico (phL), el cual se define como el peso de una masa de granos que ocupa un volumen de 100 litros.

El phL es un valor directamente relacionado con la dureza del grano, debido a que los maíces suaves son menos densos como consecuencia de una mayor área porosa en su endospermo (Salinas *et al.*, 1992 b). Valores bajos de phL, se relacionan con granos de baja calidad, es decir, granos dañados, inmaduros, con poca humedad o con pérdida de materia seca.

La densidad aparente, la densidad real y la porosidad pueden ser útiles para dimensionar tolvas de granos e instalaciones de almacenamiento, ya que sus

respectivos valores influyen en la tasa de transferencia de calor y masa de humedad durante el proceso de aireación y secado (Al-Mahasneh y Rababah, 2007).

Haugh *et al.* (1976) mencionan que la determinación del peso hectolitrico y el contenido de humedad del grano son indispensables para establecer su nivel de calidad.

#### **5.1.4.8. Densidad real ( $\rho_t$ )**

Se define como la relación de la masa y el volumen real de los granos (Bhise *et al.*, 2014) y puede calcularse utilizando agua (Tabatabaeefar, 2003) para determinar el volumen de la muestra mediante desplazamiento. Este dato resulta útil en el diseño de equipos de separación y selección adecuados (Tabatabaeefar, 2003) para procesos postcosecha.

El método de desplazamiento de líquido implica la inmersión de una cantidad de grano o semilla completamente en el líquido (agua o tolueno) para registrar el volumen de líquido desplazado (Aviara *et al.*, 1999). El resultado se reporta en mL. Representa el peso por unidad de volumen de un grano, sin considerar el espacio que hay entre ellos, porque el cálculo se realiza para determinar la densidad del grano individual.

El índice de flotación está relacionado de manera inversa con la densidad, es decir, a mayor densidad menor índice de flotación (Salinas *et al.*, 1992-b).

#### **5.1.4.9. Porosidad ( $\mathcal{E}$ )**

Es la relación entre el volumen de espacio vacío (poros) y el volumen total de la masa (Figura y Texeira, 2007). Es el porcentaje de aire entre las partículas, en

comparación con una unidad de volumen de partículas. Permite que gases como el aire y los líquidos, fluyan en las operaciones de secado y destilación (Wilhelm *et al.*, 2004).

La porosidad de la masa de grano determina la resistencia al flujo de secado durante la aireación y el secado (Brooker *et al.*, 1992, citado por Sologubik *et al.*, 2013), ya que cuanto más bajo sea el valor de la porosidad, más bajo será el porcentaje de espacios de aire entre las partículas, es decir, son más resistentes al flujo de aire.

La porosidad y densidad son parámetros que afectan la dureza del grano, la susceptibilidad a ruptura, así como la resistencia a molienda y resistencia al desarrollo de hongos (Chang, 1988).

#### **5.1.4.10. Dureza**

Se define como la resistencia que posee el grano a la acción mecánica o al quebrado durante la cosecha y la postcosecha. Determina la calidad que posee el grano para su uso y conservación, además de relacionarse de forma directa con la textura del endospermo, que, a su vez, se debe a la relación de endospermo córneo y harinoso, y en menor medida, a la compactación de los componentes celulares, al grosor de la matriz proteica que rodea a los gránulos de almidón y al grosor del pericarpio. Por lo tanto, mientras mayor sea la proporción de endospermo córneo o vítreo, mayor será la dureza del grano (INTA, 2006).

Durante su manejo y procesamiento, los granos son susceptibles a compresión e impacto. Los granos que se ven afectados por daño mecánico reducen su calidad física, fisiológica y sanitaria (Mancera *et al.*, 2016).

En este sentido, la fracturabilidad está estrechamente relacionada con la dureza, ya 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.*, 1992a).

Entre las características que determinan la dureza de un grano se encuentran la densidad (gravedad específica), el contenido del germen, la proporción de endospermo y pericarpio, la relación de las características que incluyen a los compuestos químicos individuales y los arreglos moleculares dentro del gránulo de almidón (Figueroa *et al.*, 2013).

#### **5.1.5. Determinación del contenido de humedad**

El contenido de humedad del grano tiene una profunda influencia en las propiedades físicas, particularmente las relacionadas con el peso volumétrico del grano y la densidad, ya que modifica las propiedades superficiales de la cubierta de los granos (Ponce-García *et al.*, 2017).

La humedad es uno de los parámetros más comunes y críticos de la calidad del grano debido a que está inversamente relacionada con el contenido de materia seca y, por lo tanto, afecta los rendimientos de los productos procesados (Serna-Saldívar, 2010). También afecta el volumen de expansión de la palomita, ya que afecta la velocidad y extensión de la presión acumulada de los gránulos de almidón. El contenido de humedad para el reventado varía de acuerdo con el genotipo, pero generalmente el óptimo se encuentra entre 12-15% (Hoseney *et al.*, 1983).

El contenido de humedad en los alimentos normalmente se expresa en porcentaje, siendo la relación de la masa de agua contenida en el alimento sobre la masa total del alimento (Figura y Texeira, 2007).

Por otro lado, mientras mayor sea el contenido de humedad, mayor influencia en las dimensiones axiales del grano. Al-Mahasneh y Rababah (2007), observaron un aumento de las dimensiones axiales del grano de trigo verde cuando el contenido de humedad de éste era mayor, y en menor medida sobre la esfericidad del grano y el peso de mil granos.

## **5.2. Reventado del grano**

Villanueva (2008) determinó que la cinética de reacción del reventado de granos de maíz se caracteriza por un periodo de inducción, durante el cual los granos no revientan. Después comienza el periodo de explosión rápida, que luego se reduce mientras los granos remanentes revientan. El aumento de temperatura incrementa el ritmo de reventado y también disminuye el periodo de inducción.

Cuando los granos de maíz palomero se calientan hasta 66°C, el almidón absorbe humedad dentro del grano; al llegar a la temperatura de ebullición del agua, la presión interna aumenta. A temperatura de 175-180°C, la presión interna llega a ser nueve veces superior a la presión atmosférica, ocasionando que el almidón se expanda.

El reventado se produce aproximadamente a 177°C, lo que equivale a una presión de 135 psi (935 kPa) dentro del grano. Solo una pequeña parte del agua en el grano es vapor, ya que la mayor parte se sobrecalienta en el momento del reventado y

proporciona la fuerza impulsora para expandir el grano una vez que el pericarpio se fisura o rompe (Hoseney *et al.*, 1983). De manera similar, Byrd y Perona (2005) determinaron que la temperatura a la que se genera el reventado es de 180-190°C, a una velocidad de menos de 1/15 segundos. Un grano puede reventar cuando su presión de vapor interna (presión crítica) excede la suma de la presión de reventado del grano (presión necesaria para romper el pericarpio) y la presión atmosférica (Villanueva, 2008). Si los granos no tienen la suficiente humedad, no generarán la suficiente presión interna para romper el pericarpio (Quinn *et al.*, 2005)

Virot y Ponomarenko (2015) realizaron un estudio para determinar la cinética de la palomita en horno de microondas y determinaron que la temperatura a la cual reventaban la mayor cantidad de granos era a 180°C, observando además que, cuando la temperatura llegaba alrededor de 100°C, la humedad del grano alcanzaba un equilibrio termodinámico a la presión de vapor.

### **5.2.1. Palomitas de maíz**

Karababa (2005) refirió a las palomitas de maíz como una de las botanas más populares para los consumidores en gran parte del mundo y que los granos de maíz se clasifican por tamaño en pequeños, medianos y grandes. A este respecto, consideró que los compradores comerciales prefieren los granos grandes para elaborar palomitas, porque a partir de estos se producen palomitas más grandes y con mayor atractivo visual, además de ser más resistentes a la ruptura por manipulación.

El volumen de expansión de las palomitas es importante, pues se venden por volumen y no por peso (Hoseney *et al.*, 1983). Las palomitas tienen un valor

comercial más alto que el maíz común y son un alimento popular entre los consumidores (Freiere *et al.*, 2020). Estas botanas pueden prepararse en diferentes sabores, dependiendo si se adiciona al grano aceite, sal, caramelo, queso o algún otro ingrediente (saborizante) durante su preparación (Villanueva, 2008).

El volumen de expansión del grano depende entre otros aspectos de su contenido de humedad, el genotipo, el método de reventado, las prácticas de recolección y la manipulación (Gökmen, 2004). Se define como el volumen de palomitas por gramo de maíz, es el rasgo de calidad de mayor importancia para los programas de mejoramiento. El alto volumen de expansión se asocia con una mayor palatabilidad, porque los granos reventados con menor densidad suelen ser más blandos (Dofing *et al.*, 1990). El volumen de expansión, tamaño del copo (palomita), porcentaje de granos no reventados, contenido de proteínas y el peso de mil granos dependen del genotipo del maíz (Soylu y Tekkanat, 2006).

Sin embargo, a cierta temperatura no todos los granos de una muestra tendrán la misma posibilidad de reventar, debido a que no todos tendrán la misma presión acuosa interna (Villanueva, 2008).

Un grano de maíz reventado se denomina *palomita* o *copo*, clasificándose en dos tipos de acuerdo con su forma: hongo o mariposa (Figura 7). Las palomitas tipo mariposa se caracterizan por tener apéndices que se extienden en varias direcciones, mientras que las de tipo hongo se producen generalmente para mercados comerciales ya que los copos son menos susceptibles a romperse (Sweley *et al.*, 2013).



**Figura 7.** Principales formas de palomita de maíz. A). Hongo; B). Mariposa (Adaptada de Sweley *et al.*, 2013).

Actualmente se buscan cultivares con desempeño superior en las palomitas como la productividad y el volumen de expansión (Freiere *et al.*, 2020). En los programas de mejoramiento, es deseable predecir el volumen de expansión (Soylu y Tekkanat, 2006).

### 5.2.2. Métodos de reventado

Existen diferentes métodos para elaborar palomitas de maíz, otorgando cada uno características diferentes. Uno de los más tradicionales consiste en colocar los granos de maíz en arena que se encuentra a altas temperaturas.

Por otro lado, uno de los métodos más común y utilizado en los hogares, consiste en colocar los granos de maíz en una olla con aceite, el cual actúa como vehículo para distribuir uniformemente el calor en la superficie de los granos. De igual manera, el método de horno de microondas es uno de los más populares debido a

su practicidad y al alto índice de reventado que genera en los granos (Mohamed *et al.*, 1993; Karababa, 2005; Quinn *et al.*, 2005).

Otra forma de elaborar palomitas es mediante aire caliente, el cual requiere de mayor contenido de humedad en los granos para obtener un mayor volumen de expansión. De acuerdo con Metzger *et al.*, (1989) las palomitas obtenidas con este método producen mayor volumen de expansión que las palomitas elaboradas con aceite caliente sin importar el contenido de humedad.

#### **5.2.2.2. Reventado por método de olla**

La elaboración de palomitas de maíz en olla es uno de los métodos convencionales más populares, además de ser de fácil preparación, pues consiste en el calentamiento de los granos de maíz palomero con aceite vegetal en una olla común de uso doméstico. El proceso incluye el mezclado constante, con el fin de promover un calentamiento uniforme de los granos y el aceite, evitando que se quemen al sobrecalentamiento parcial de la superficie del grano.

Los aceites en la industria alimentaria se utilizan como vehículo de aromas, colores y otros aditivos alimentarios, conformando en muchos casos, parte del producto final (Zapata, 2004), además de actuar como transmisor de calor, al propiciar un calentamiento rápido y uniforme del alimento (Saguy y Dana, 2003).

Entre los aceites más importantes utilizados en la industria alimentaria están los aceites de palma, soya, canola, oliva, maíz y girasol (Suaterna, 2009).

El aceite de canola contiene 6% de ácidos grasos saturados, 61% de monoinsaturados y 29% de poliinsaturados, además de un alto contenido de ácidos grasos esenciales (Giacopini, 2012).

### **5.2.2.3. Reventado por método de horno de microondas**

El calentamiento dentro del horno de microondas se basa en la transmisión de calor hacia el alimento dentro del horno, para ello se utilizan las microondas, las cuales oscilan alrededor de 2.450 megaherzios y son absorbidas por las moléculas de agua del alimento (Benavente, 2014).

El horno de microondas es la manera más eficaz de calentar los granos uniformemente (Quinn *et al.*, 2005),

### **5.3. Rendimiento de reventado y volumen de expansión**

Entre los parámetros de calidad considerados para evaluar palomitas se encuentra el volumen de expansión, parámetro de calidad más importante y rasgo principal que distingue al maíz palomero de otros (Pajic, 2007).

Adicionalmente del número de granos sin reventar y la forma de la palomita son otros criterios importantes por considerar (Sweley *et al.*, 2013).

La unidad de medida estándar para la determinación del volumen de expansión es  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$  (Pajic, 2007). El volumen de expansión se define como el volumen que ocupan las palomitas producidas considerando como referente el volumen inicial que ocupaba el grano previo al reventado. El tamaño de las palomitas se reporta como el tamaño promedio a partir del volumen total.

Los granos sin reventar, así como aquellos que no forman palomitas completas se reportan en porcentaje, considerando el número de granos totales de la muestra.

Shimoni *et al.* (2002) sugirieron que el tamaño del grano limita el contenido de agua disponible para vaporizar en el momento de su calentamiento, así como el

suministro de presión para el óptimo reventado es ideal, esto se logra sobrecalentando el vapor ya producido en el grano mediante un aumento de temperatura, es decir, se requiere mayor temperatura cuando la humedad es baja para reventar el grano.

#### **5.4. Análisis del Perfil de Textura (APT) de las palomitas.**

La textura es uno de los atributos más ampliamente evaluados durante el manejo, procesamiento y consumo de alimentos frescos y procesados para determinar la calidad y aceptabilidad del producto. Esta propiedad se define como “*la manifestación sensorial y funcional de las propiedades estructurales, mecánicas y superficiales de los alimentos detectadas a través de los sentidos de la visión, oído, tacto y la cinética*” (Szczesniak, 2002).

Los perfiles de textura son curvas que monitorean y registran características espaciales o temporales de las muestras durante las mediciones de la textura del alimento (Chen y Opara, 2013).

El Análisis del Perfil de Textura (TPA, por sus siglas en inglés) es un procedimiento instrumental que se basa en la imitación del proceso de masticación con un ciclo de doble compresión (Chen y Opara, 2013) por medio de un equipo analizador de textura (González *et al.*, 2015) que contribuye a la medición y cuantificación de parámetros físico -mecánicos que se relacionan a su vez con variables como la tasa de deformación aplicada y la composición del producto. Considera la fuerza, distancia y el tiempo durante la prueba, lo que permite el cálculo de parámetros

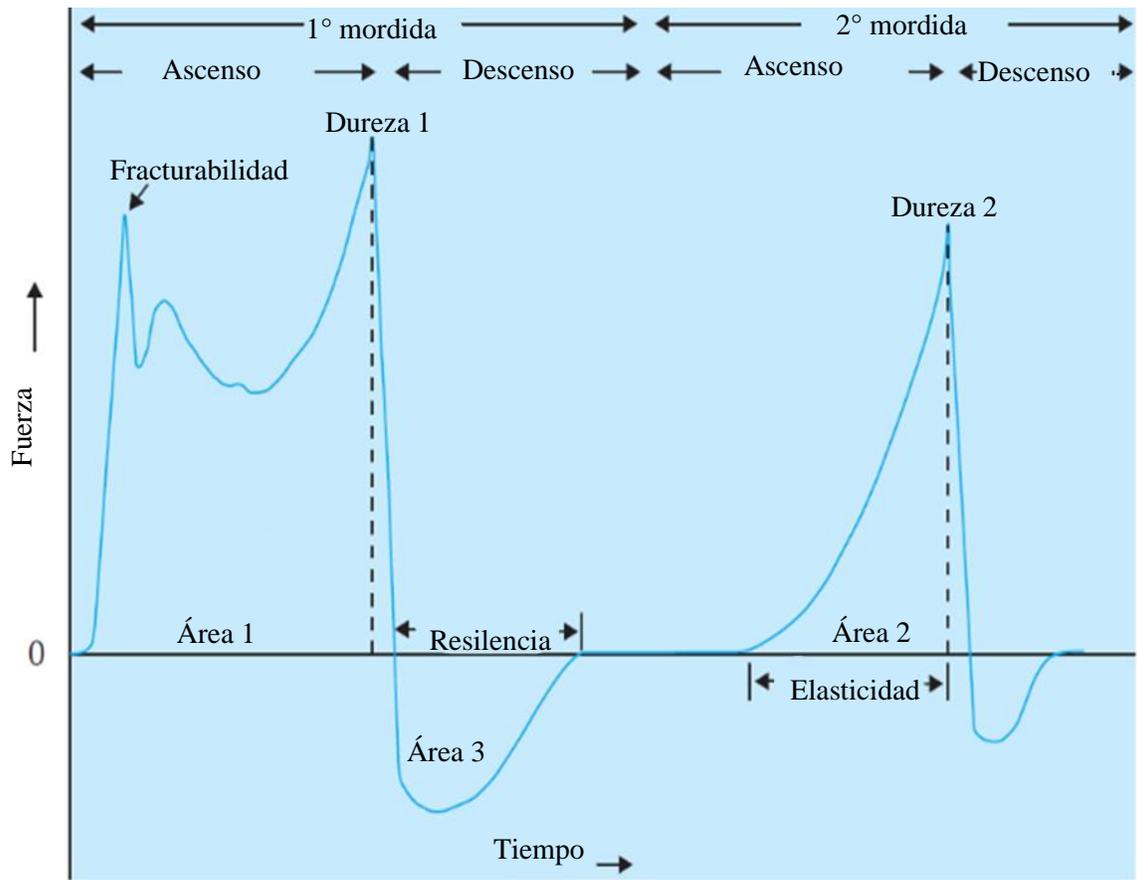
críticos (Figura 8). Szczesniak (2002) define los parámetros que conforman el análisis de perfil de textura de la siguiente manera:

a). Primarios

- Dureza: fuerza necesaria para deformar un producto. Se expresa en unidades de fuerza (Newton).
- Adhesividad: fuerza necesaria para superar las fuerzas de atracción entre la superficie del producto y la superficie del material. Se mide en unidades de trabajo (Joule).
- Cohesividad: grado en que la muestra se deforma antes de romperse cuando se aplica fuerza. Es adimensional y un valor igual a uno indica que la muestra se recupera completamente luego de la primera compresión.
- Elasticidad: se define como la propiedad de un material por la que recupera su forma y dimensiones originales total o parcialmente al terminar con la prueba de esfuerzo aplicado. Es adimensional.
- Viscosidad: tasa de flujo por unidad de flujo.

b). Secundarios

- Fracturabilidad: fuerza con la que se desmorona, agrieta o rompe la muestra. (Fragilidad). Se mide en Newtons.
- Masticabilidad: energía necesaria para masticar un alimento sólido a un estado listo para tragar. Unidad de medida: Newtons.
- Gomosidad: energía necesaria para desintegrar un alimento semisólido a un estado apto para la deglución. Se expresa en Newtons.



**Figura 8.** Curva de perfil de textura generalizada. Adaptada de Bourne (2002)

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1. Ubicación del sitio experimental

El desarrollo del estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Textura de Alimentos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMéx.

### 6.2. Material biológico

El material biológico objeto de estudio, consistió en un lote de granos de maíz palomero Toluqueño (*Zea mays* L. cv. Palomero Toluqueño), cultivado en el ciclo agrícola primavera-verano 2019 en la comunidad de San Marcos Tlaxalpan, Municipio de Morelos, Estado de México, material que fue donado por la Fundación Tortilla de Maíz Mexicana.

Como muestra testigo se utilizó maíz palomero comercial (marca Verde Valle), el cual se mantuvo en las mismas condiciones de almacenamiento que los granos de maíz palomero Toluqueño.

Así, el lote total estuvo conformado por 5 muestras, tal como se describe en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Datos generales de los granos de maíz palomero objeto de estudio

Muestra	Cantidad	Origen (Barrio)	Altitud (msnm)
1	30 mazorcas	Laguna Seca	2,720
2	30 mazorcas	Barrio Segundo	2,730
3	30 mazorcas	La Beltrán	2,950
4	25 kg grano	Canta Rana	2,720
5	2 kg grano	Comercial (marca Verde Valle)	----

### 6.2.1. Preparación de las muestras

El material de cada Barrio se recibió en bolsas de tela (Figura 9), por lo que fue necesario mantenerlo almacenado en refrigeración, desde su recepción hasta su desgrane y posterior análisis, para evitar su deterioro.

Previo al desgrane de las mazorcas (Barrios 1, 2 y 3), se midió la longitud utilizando una regla de 30 cm. La longitud se dividía en tres partes proporcionales (cm), con el propósito de establecer 3 zonas delimitadas y proporcionales de ubicación de los granos: punta, media y base (Figura 10). Las mazorcas se desgranaron manualmente colocando los granos en bolsas plásticas con cierre hermético (ziploc), identificándolos de acuerdo con su respectivo Barrio de origen y zona de ubicación en la mazorca, es decir, cada Barrio incluyó 3 submuestras de grano.

Los granos seleccionados e identificados permanecieron en refrigeración en las bolsas plásticas herméticas (Figura 11) hasta la realización de las pruebas biofísicas y de reventado.



**Figura 9.** Recepción de maíz palomero Toluqueño



**Figura 10.** Medición y seccionado (punta, medio y base) de las mazorcas de maíz palomero Toluqueño.



**Figura 11.** Granos de maíz palomero Toluqueño separados e identificados

#### **6.4. Propiedades biofísicas del grano**

##### **6.4.1. Presencia de fisuras en el pericarpio**

Este parámetro se evaluó en las muestras 1, 2 y 3 (Cuadro 2), considerando los granos de maíz palomero Toluqueño separados por su ubicación en la mazorca (punta, medio y base). Para llevar a cabo esta determinación, se diseñó y construyó un dispositivo lumínico que consistió en un cajón de madera de 30 x 30 cm conformado por una pantalla de acrílico blanca de 3 mm de grosor iluminada con luz led blanca (Figura 12), sobre la cual se extendían los granos objeto de estudio, para así determinar visualmente la ausencia o presencia de fisuras en el pericarpio (Figura 13). Se tomaron al azar 20 granos de cada una de las muestras y se evaluaron acorde a una escala numérica de 0 a 3, donde 0=ausencia de fisuras; 1=daño mínimo por fisuras; 2=daño intermedio por fisuras y 3=daño severo por fisuras.



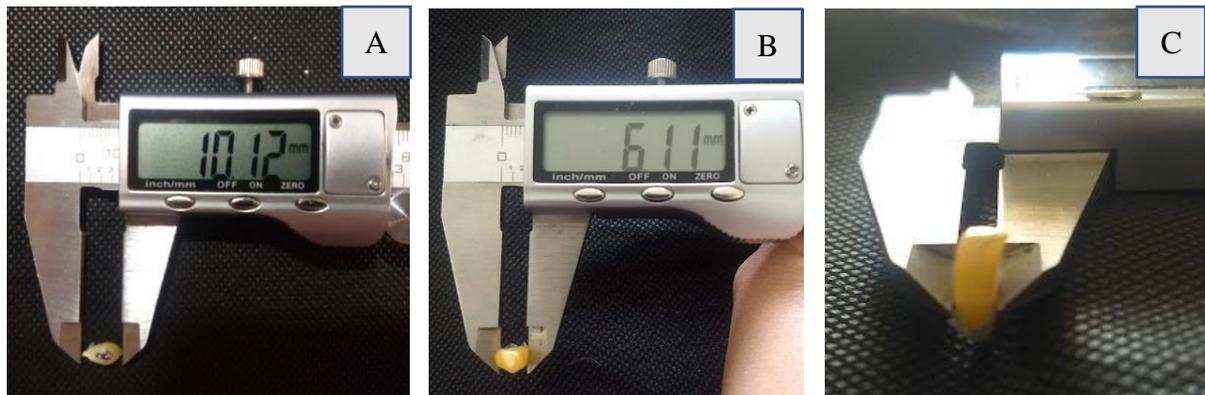
**Figura 12.** Dispositivo lumínico para determinar presencia o ausencia de fisuras en el pericarpio de granos de maíz palomero.



**Figura 13.** Determinación de presencia de fisuras en pericarpio de granos de maíz palomero.

#### 6.4.2. Dimensiones axiales

Para esta prueba se reportaron los valores medios de las dimensiones axiales largo ( $L$ ), ancho ( $A$ ) y grosor ( $G$ ) de 20 granos de cada muestra tomados aleatoriamente (Figura 14). Para las mediciones se utilizó un vernier digital (Surtek Stainless Hardened, Matrix 0-150 mm).



**Figura 14.** Medición de las dimensiones axiales en grano de maíz palomero. A) Largo; B). Ancho; C). Grosor

#### 6.4.3. Diámetro aritmético ( $D_a$ ) y geométrico ( $D_g$ )

La medición de los diámetros aritmético ( $D_a$ ) y geométrico ( $D_g$ ) permitió identificar la relación (proporción) entre las dimensiones axiales. Estos parámetros se calcularon atendiendo las ecuaciones (1) y (2), propuestas por Sangamithra *et al.* (2016).

$$D_a = \frac{L+W+T}{3} \quad (1)$$

$$D_g = (LWT)^{1/3} \quad (2)$$

Dónde:  $L$  es la longitud,  $W$  es el ancho y  $T$  corresponde al grosor, reportados en mm.

El cálculo de estas propiedades se realizó en los mismos 20 granos a los cuáles se les determinaron las dimensiones axiales.

#### 6.4.4. Esfericidad ( $\phi$ )

Este parámetro representa la proximidad de un grano a una forma esferoidal y se determinó de acuerdo con lo propuesto por Sologubik *et al.* (2013), mediante la siguiente relación:

$$\phi = \left[ \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde  $L$  es la longitud,  $W$  es el ancho y  $T$  representa el grosor, reportados en mm.

El cálculo de este parámetro se realizó sobre los mismos 20 granos a los que se les determinaron las dimensiones axiales y diámetros, reportando los valores medios correspondientes a cada muestra.

#### **6.4.5. Peso individual de grano (*PIG*)**

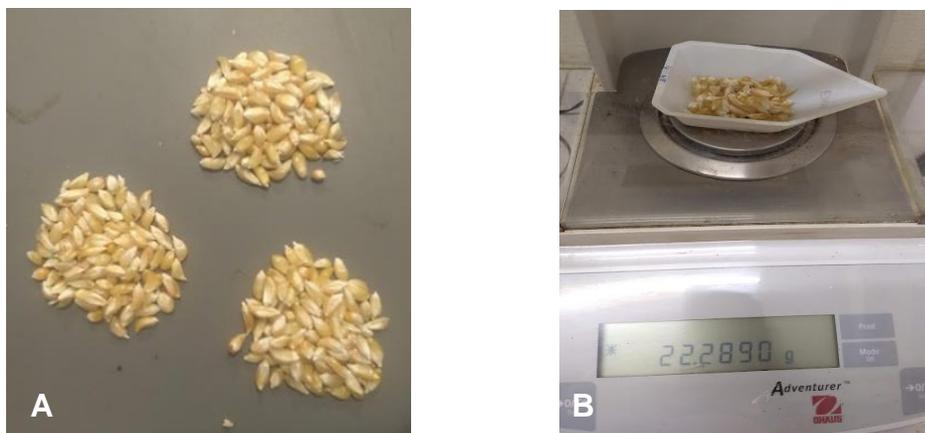
Para determinar el *PIG* se tomaron al azar 20 granos de cada muestra; cada grano analizado se pesó individualmente en una balanza analítica (Ohaus, Adventurer, USA) con precisión de 0.01 g, registrando su peso en gramos (g) (Figura 15). Se reportó el valor promedio de las 20 lecturas registradas de cada muestra.



**Figura 15.** Peso individual de grano de granos de maíz palomero

#### **6.4.6. Peso de 1,000 granos (*PMG*)**

De cada muestra de estudio se contaron manualmente 100 granos, se pesaron y el valor registrado se multiplicó por 10, extrapolando así este valor al equivalente al peso de 1,000 granos. Esta prueba se realizó por triplicado y se reportó el valor promedio de cada muestra (Figura 16).



**Figura 16.** Determinación del peso de mil granos de granos de maíz palomero. A). Conteo de submuestras de cien granos; B). Pesaje de submuestras de cien granos

#### 6.4.7. Densidad aparente ( $\rho_b$ )

Se determinó siguiendo la metodología de Bhise *et al.* (2014), aplicando la ecuación (4). La prueba se realizó por duplicado para cada muestra de grano.

$$\rho_b = \frac{W_s}{V_s} \quad (2)$$

Dónde:  $\rho_b$  es la densidad aparente en  $\text{kg/m}^{-3}$ ,  $W_s$  es el peso de la muestra en kg y  $V_s$  es el volumen ocupado por la muestra en  $\text{m}^3$ . El valor obtenido se transformó a unidades de peso hectolitrico ( $\text{kg/hL}^{-1}$ ).

#### 6.4.8. Densidad real ( $\rho_t$ )

Se determinó considerando la técnica descrita por Aviara *et al.* (1999), en la cual se utiliza agua como vehículo para medir el desplazamiento. Brevemente, en una probeta graduada de 10 mL se adicionaron 5 mL de agua (volumen inicial =  $V_1$ ), previamente se registró el peso de 10 granos tomados al azar, los cuales se

vaciaron en la probeta que contenía los 5 mL de agua considerando una altura de caída de 15 cm. Se registró el volumen final ( $V_2$ ) observado en la probeta luego de la adición de los granos, así, la diferencia entre el volumen final y el inicial ( $V_2 - V_1$ ) representaba el volumen ocupado por los 10 granos. El cociente del peso de los 10 granos entre su volumen de desplazamiento correspondía a la densidad real ( $\rho_t$ ). Para determinar este parámetro específicamente por grano, bastaba con dividir el cociente calculado entre 10. La prueba se realizó por duplicado para cada muestra de estudio, reportando el valor promedio en g/mL (Figura 17).



**Figura 17.** Determinación de densidad real ( $\rho_t$ ) de granos de maíz palomero

#### 6.4.9. Porosidad ( $\epsilon$ )

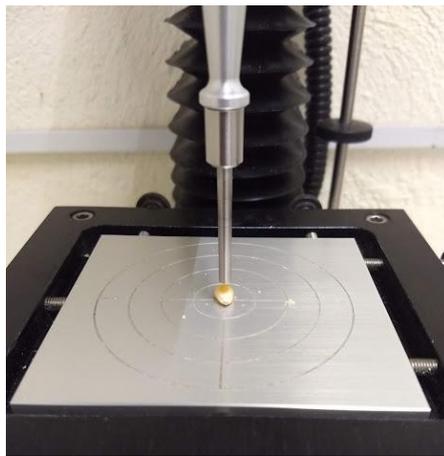
Se utilizó la siguiente fórmula propuesta por Tabatabaeefar (2003), utilizando los valores medios de densidad aparente y real:

$$\epsilon = 100 \left[ 1 - \left( \frac{\rho_b}{\rho_t} \right) \right] \quad (3)$$

Dónde:  $\epsilon$  representa la porosidad (%),  $\rho_b$  es la densidad aparente ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $\rho_t$  representa la densidad real ( $\text{kg/m}^3$ ).

#### 6.4.10. Dureza

Esta prueba se realizó a 20 granos tomados aleatoriamente de cada una de las muestras a evaluar, reportando el valor promedio en Newtons (N). Se utilizó un analizador de textura universal (TA-XT plus; Stable Micro Systems, Reino Unido) provisto con una sonda de 2 mm de diámetro. Se aplicó una sola compresión con un nivel de deformación de 35% y velocidad de prueba de 2 mm·s (Figura 18). Se reportó el valor medio de las 20 lecturas correspondientes a cada muestra.



**Figura 18.** Análisis de dureza en granos de maíz palomero con Analizador de Textura Universal TA-XT2

## **6.5. Determinación del contenido de humedad de los granos**

Para realizar este análisis se molieron por separado 10 g de grano de cada una de las muestras objeto de estudio, utilizando un molino eléctrico (Modelo 5XBG00G, ¼ HP, 115 V, 60 Hz, General Electric, México) y posteriormente se siguió el método 44-15.02 (AACCI, 1999). La determinación del contenido de humedad de los granos se realizó por triplicado para cada muestra, utilizando una estufa de convección (Jouan INC, Precision, USA).

## **6.6. Métodos de reventado**

### **6.6.1. Consideraciones generales**

Se utilizaron 25 g de grano y 5 mL de aceite de canola (marca Capullo) en cada muestra de estudio (tanda) y para cada uno de los métodos de reventado evaluados: olla y horno de microondas.

Por otro lado, considerando que los granos de las mazorcas de las muestras 1, 2 y 3 (Barrios) se desgranaron y seleccionaron por su ubicación en la mazorca (punta, media y base) y que las muestras 4 y 5 estaban a granel, en total se reventaron 11 muestras.

Sin embargo, debido a que el rendimiento de palomitas por tanda era demasiado bajo para evaluar su textura, fue necesario realizar dos tandas adicionales de reventado (tres en total) por cada muestra, con el fin de obtener la mayor cantidad de palomitas posible.

### **6.6.2. Reventado en olla**

Para la elaboración de palomitas mediante este método, primeramente, se precalentaba la olla de peltre durante un minuto en una parrilla eléctrica (Cimarec, Barnstead Thermolyne) a 295°C (Figura 19). Sin retirar la olla de la parrilla se adicionaban 5 mL de aceite vegetal, el cual permanecía en calentamiento durante 1.5 minutos; al término de este lapso se adicionaban los 25 g de grano de maíz palomero. A partir del momento de la incorporación de los granos, la olla se agitaba cada minuto para evitar sobrecalentamiento de los granos en un solo costado. El tiempo total de permanencia de los granos en la olla (tiempo de reventado) fue de 5 minutos.

Al término de cada tanda de reventado, las palomitas obtenidas se dejaron enfriar durante 10 minutos a temperatura ambiente y posteriormente se colocaron en bolsas herméticas (ziploc) para evitar que perdieran sus propiedades y absorbieran humedad del medio ambiente, debido a su alta capacidad higroscópica; transcurrido este tiempo, se procedió a realizar los respectivos análisis de porcentaje de reventado, volumen de expansión y perfil de textura. Esta evaluación se realizó por duplicado para cada una de las muestras.



**Figura 19.** Olla y parilla eléctrica. Método de reventado de grano de maíz palomero en olla

### **6.6.3. Reventado en horno de microondas**

El desarrollo de este método consistió en adicionar 5 mL de aceite vegetal en un recipiente especial (Vidrio borosilicato, Ecolution EKPRES-4215, Epoca International Inc., Florida, EU) (Figura 20), para su precalentamiento en un horno de microondas (WM1811, 350W, 120v-60Hz, Whirlpool, China) durante un minuto a 750 W de potencia. Al término de precalentamiento del aceite se incorporaban 25g de maíz palomero, los cuales permanecían en el horno por espacio de 4.5 minutos (tiempo de reventado). Al concluir el reventado, el recipiente con las palomitas se retiraba del horno y se dejaban enfriar a temperatura ambiente durante 10 minutos para posteriormente colocarlas en bolsas herméticas (ziploc) hasta realizar los respectivos análisis de rendimiento, volumen de expansión y análisis de perfil de textura. El reventado por método de microondas se realizó por duplicado para cada una de las muestras evaluadas en este estudio.



**Figura 20.** Recipiente vidrio borosilicato para elaboración de palomitas en horno de microondas.

### **6.7. Porcentaje de reventado y volumen de expansión**

Previo a su reventado, los granos contenidos en los 25 g de muestra a reventar se contaban, a fin de considerar ese número de granos como referente para determinar el porcentaje de palomitas obtenidas (porcentaje de reventado) y volumen de expansión.

El porcentaje de reventado se determinó mediante una relación entre el número de palomitas obtenidas y la cantidad de granos iniciales de la muestra expresando el resultado en porcentaje; a mayor porcentaje, mayor rendimiento de reventado. Esta determinación se calculó a partir de la siguiente fórmula adaptada de Mohamed *et al.* (1993) para porcentaje de granos no reventados:

$$\% \text{ reventado} = \left( \frac{\text{Número de palomitas obtenidas}}{\text{Número de granos original}} \right) \times 100 \quad (4)$$

El volumen de expansión se determinó considerando el aumento de volumen alcanzado por los granos reventados (palomitas) respecto al volumen de granos sin

reventar. Para esta prueba se utilizó una probeta de 250 mL, en la cual se vaciaban 25 g de grano y se medía el volumen alcanzado por estos antes de someterlos a reventado (V1) (Figura 21A).

Posterior al proceso de reventado, las palomitas obtenidas se depositaban cuidadosamente en la probeta y se determinaba el volumen ocupado por estas (V2) (Figura 21B). A partir de los datos obtenidos, se calculaba el volumen de expansión, aplicando la ecuación propuesta por Mohamed *et al.* (1993), reportando los resultados en mL o cm<sup>3</sup>/g, de acuerdo con la ecuación (7).

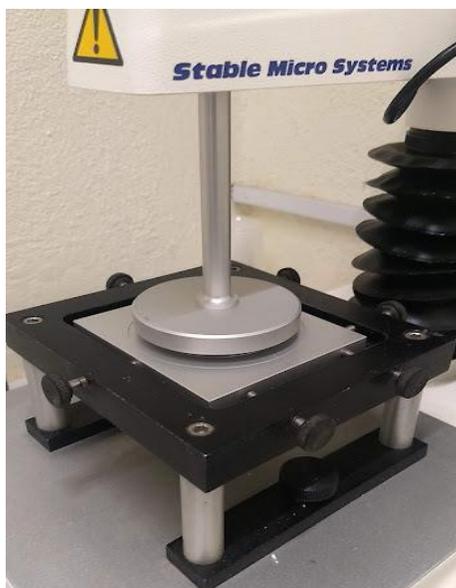
$$\text{Volumen de expansión} = \frac{\text{Volumen total de reventado (mL o cm}^3\text{)}}{\text{Peso de la muestra original (g)}} \quad (5)$$

### **6.8. Análisis de Perfil de Textura (APT) de las palomitas**

El Análisis de Perfil de Textura (APT) de las palomitas se realizó utilizando un Analizador de Textura Universal provisto con una sonda de aluminio de 75 mm (SMS P/75) (Figura 22). Los parámetros aplicados durante el desarrollo del APT fueron: 50% de deformación y velocidad de prueba=2 mm/s. Las propiedades de textura reportadas fueron: dureza, cohesividad y masticabilidad. El APT se aplicó a 10 palomitas de cada una de las muestras objeto de estudio, reportando el valor promedio de cada propiedad.



**Figura 21.** A). Determinación del volumen de granos de maíz. B). Determinación del volumen de expansión de palomitas



**Figura 22.** Análisis de perfil de textura de palomitas con Analizador de Textura Universal TA-XT2

## **6.9. Diseño de experimentos y análisis estadístico**

El arreglo experimental fue un diseño de bloques al azar con arreglo factorial, donde los bloques a considerar fueron los sitios de origen de los granos (Barrios y comercial) y los factores fueron las 3 ubicaciones del grano en la mazorca, además de los 2 métodos de reventado de grano. A partir de los resultados obtenidos, se aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia del 95%.

Para la comparación de maíz palomero Toluqueño vs el testigo comercial Verde Valle se realizó una prueba *t* de student para muestras independientes. Se aplicó una prueba Tukey para comparar medias entre tratamientos específicos. Se realizó un análisis de correlaciones simples de Pearson, considerándose significativas y altamente significativas, si  $P < 0.05$  y  $P < 0.01$ , respectivamente. El análisis estadístico se realizó con el software STATGRAPHICS Centurion versión XVI.I (StatPoint Technologies, Washington DC, 2007).

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Características de las propiedades biofísicas del grano

Los resultados de la evaluación de las propiedades biofísicas del grano se presentan a continuación.

#### 7.1.1. Presencia de fisuras en el grano

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la evaluación realizada para determinar la presencia o ausencia de fisuras en el pericarpio en 20 granos de cada muestra de los maíces palomeros Toluqueño y comercial Verde Valle.

**Cuadro 3.** Resultados de la evaluación para determinar presencia o ausencia de fisuras en el pericarpio de granos de maíz palomero Toluqueño y comercial Verde Valle

Muestra	Ubicación en la mazorca	# granos fisurados	Nivel de daño				Granos dañados (%)
			0	1	2	3	
1	punta	2	18	2	0	0	10
	medio	0	20	0	0	0	0
	base	1	19	1	0	0	5
2	punta	1	19	1	0	0	5
	medio	0	20	0	0	0	0
	base	0	20	0	0	0	0
3	punta	1	19	1	0	0	5
	medio	1	19	1	0	0	5
	base	3	17	2	1	0	15
4	NA	2	18	2	0	0	10
Comercial	NA	1	19	1	0	0	5

A partir de los resultados obtenidos para esta determinación fue posible comprobar que el porcentaje de granos de maíz palomero dañados en el pericarpio osciló entre 0 y 15%. En este sentido, en 3 de las 11 muestras analizadas no se observaron

fisuras en el pericarpio de los granos, mientras que sólo en una muestra (Barrio 3, granos de la base de la mazorca) se determinó un 15% de granos fisurados. Las 7 muestras restantes registraron entre 5 y 10% de granos fisurados. Cabe destacar, que de los 12 granos detectados con fisura (de un total de 220 observados), 11 fueron calificados con el nivel 1 de daño, es decir, “daño mínimo”. Bajo esta premisa, es posible afirmar que en las muestras de maíz palomero evaluadas en este estudio, el daño en el pericarpio del grano (presencia de fisuras), no influyó sobre el porcentaje de granos reventados (producción de palomitas).

### 7.1.2. Dimensiones axiales

En el Cuadro 4 se presentan los valores medios y desviaciones estándar correspondientes a las dimensiones axiales (largo ancho, grosor) determinadas en los granos de los maíces palomeros Toluqueño (Muestra 4, granel) y comercial Verde Valle (Muestra 5, granel).

**Cuadro 4.** Valores medios de las dimensiones axiales (Largo, Ancho, Grosor) de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle

Muestra	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>	<i>Grosor</i>
	(mm)		
Barrio 4	12.2 ±1.2a	6.0 ±0.5a	4.4 ±0.6a
Comercial	8.7 ±0.6b	5.5 ±0.5a	4.4 ±0.4a

±Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas

Se determinó que el largo (*L*) de los granos, presentó diferencias estadísticas significativas entre el MP Toluqueño y el MP comercial, siendo notablemente mayor la longitud de los primeros, respecto a los granos comerciales. En contraparte, para

las dimensiones ancho (*A*) y grosor (*G*), no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre ambas muestras.

Por otro lado, en el Cuadro 5 se presentan los valores medios de las dimensiones axiales *L*, *A* y *G* correspondientes a la evaluación de los granos de MP Toluqueño por Barrio (1, 2 y 3) de acuerdo con su ubicación en la mazorca (punta, media y base).

**Cuadro 5.** Valores medios de las dimensiones axiales (Largo, Ancho, Grosor) de granos de maíz palomero Toluqueño, de acuerdo con su ubicación en la mazorca.

Barrio	Ubicación en la mazorca	Largo	Ancho	Grosor
1	Punta	<b>11.6 ±1.0b</b>	5.4 ±0.6a	4.1 ±0.4ab
	Medio	12.5 ±0.8a	5.6 ±0.5a	3.8 ±0.4b
	Base	13.1 ±1.2a	5.7 ±0.5a	<b>4.3 ±0.5a</b>
2	Punta	<b>11.6 ±0.8b</b>	5.4 ±0.5a	4.3 ±0.4a
	Medio	12.8 ±1.0a	5.8 ±0.7a	4.1 ±0.5a
	Base	13.5 ±1.0a	5.9 ±0.5a	4.3 ±0.6a
3	Punta	<b>10.9 ±0.9b</b>	<b>5.3 ±0.5b</b>	4.1 ±0.6b
	Medio	12.9 ±0.8a	5.8 ±0.5ab	3.6 ±0.3b
	Base	12.5 ±1.0a	6.2 ±0.6a	<b>4.8 ±1.0a</b>

±Desviación estándar. En una misma columna y Barrio, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas.

De acuerdo con los resultados, se determinó que en general los granos ubicados en la punta de la mazorca fueron estadísticamente diferentes (menos largos) respecto a los granos de la parte media y la base. Sin embargo, el ancho de los granos no presentó diferencias estadísticas significativas, excepto en los granos del Barrio 3 obtenidos de la punta de la mazorca, los cuales registraron el valor más bajo (5.36 mm). Con relación al grosor, tanto los granos del Barrio 1 como los granos del Barrio 3 obtenidos de la base de la mazorca, mostraron los valores medios más

altos, siendo estadísticamente diferentes a sus contrapartes obtenidos de la punta y zona media de la mazorca. En particular, los granos del Barrio 2 no presentaron diferencias estadísticas significativas en el grosor, independientemente de su ubicación en la mazorca.

Quero *et al.* (2018) reportaron valores medios entre 9.0-9.9 mm (largo); 6.1-6.4 mm (ancho y 3.3-3.4 mm (grosor) en granos de MP Toluqueño, valores ligeramente por debajo de los reportados en este estudio. De manera similar y también en granos de MP Toluqueño, Figueroa *et al.* (2013) determinaron dimensiones de largo, ancho y grosor de 11.0 mm, 5.3 mm y 4.1 mm respectivamente, cifras semejantes a las determinadas en esta investigación.

### 7.1.3. Diámetro aritmético ( $D_a$ ), diámetro geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ )

En el Cuadro 6 se muestran los valores medios correspondientes a los diámetros aritmético ( $D_a$ ), geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ ) determinados en los granos de MP Toluqueño y MP comercial Verde Valle.

**Cuadro 6.** Valores medios del diámetro aritmético ( $D_a$ ), diámetro geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle

Muestra	$D_a$ (mm)	$D_g$ (mm)	$\Phi$ (%)
Barrio 4	7.5 ±0.4a	6.8 ±0.4a	56.2 ±5.7b
Comercial	6.2 ±0.2b	5.9 ±0.2b	68.8 ±5.3a

±Desviación estándar.  $D_a$ =diámetro aritmético;  $D_g$ =diámetro geométrico;  $\phi$ =esfericidad. En una misma columna y Barrio, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas.

Como se aprecia, se presentaron diferencias estadísticas significativas entre ambos maíces, tanto para el  $D_a$  como para el  $D_g$ , siendo los granos de MP Toluqueño los

que registraron los valores medios más altos en cada una de estas determinaciones. Por otro lado, respecto a la esfericidad, ésta mostró diferencias estadísticas significativas entre ambos maíces, resultando más esféricos los granos del MP comercial.

Al respecto y como resultado del análisis de varianza (Cuadro 7) aplicado para los Barrios (1, 2 y 3) y considerando la ubicación del grano en la mazorca, en los 3 Barrios se determinó que los  $D_a$  y  $D_g$  de los granos obtenidos de la base de la mazorca presentaron diferencias estadísticas significativas (valores más altos) respecto a los granos obtenidos de la zona media y punta de la mazorca, los cuales no presentaron diferencias estadísticas significativas. Ordóñez *et al.* (2012) reportaron valores de  $D_g$  en granos de maíz duro entre 7.8 y 8.2 mm, mientras que los valores del MP Toluqueño evaluados en este estudio oscilaron entre 6.8-7.9 mm, valores ligeramente inferiores.

**Cuadro 7.** Valores medios de diámetro aritmético ( $D_a$ ), diámetro geométrico ( $D_g$ ) y esfericidad ( $\Phi$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca.

Barrio	Ubicación en la mazorca	$D_a$	$D_g$	$\Phi$
		(mm)		(%)
1	Punta	6.3 ±0.3b	7.0 ±0.4b	54.8 ±3.9a
	Medio	6.4 ±0.3b	7.3 ±0.3b	51.7 ±3.7a
	Base	<b>6.8 ±0.3a</b>	<b>7.7 ±0.3a</b>	52.7 ±6.2a
2	Punta	6.4 ±0.3b	7.1 ±0.3b	55.5 ±3.7a
	Medio	6.7 ±0.4ab	7.6 ±0.4ab	52.7 ±4.4ab
	Base	<b>7.0 ±0.4a</b>	<b>7.9 ±0.4a</b>	51.6 ±3.8b
3	Punta	6.2 ±0.3b	6.8 ±0.3b	57.2 ±5.1a
	Medio	6.5 ±0.3b	7.4 ±0.4a	50.5 ±2.7b
	Base	<b>7.1 ±0.6a</b>	<b>7.8 ±0.4a</b>	56.6 ±7.4a

±Desviación estándar.  $D_a$ =diámetro aritmético;  $D_g$ =diámetro geométrico;  $\phi$ =esfericidad. En una misma columna y Barrio, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas.

En general, el % de esfericidad de los granos evaluados osciló entre 50.5% y 57.2% independientemente del Barrio y zona extracción de la mazorca, solo los granos de la base del Barrio 2 y de la zona media del Barrio 3 presentaron diferencias estadísticas significativas, siendo en general granos menos esféricos. Manayay (2015) reportó valores de esfericidad para maíz amarillo duro entre 52 y 70% con una media de 60%, valor ligeramente mayor a los reportados en este estudio. Por su parte, Ordóñez *et al.* (2012) reportaron esfericidad en grano de maíz duro entre 67 y 70%, valores superiores a los determinados en este estudio.

#### **7.1.4. Peso Individual de Grano (*PIG*), Peso de Mil Granos (*PMG*), Densidad Aparente ( $\rho_b$ ) y Densidad Real ( $\rho_t$ )**

En el Cuadro 8 se muestran los valores medios correspondientes a las propiedades de peso y densidad de granos de MP Toluqueño (Barrio 4) y MP comercial Verde Valle. Como se observa, el MP Toluqueño presentó mayor *PIG* en comparación con el MP comercial, lo que derivó en diferencias estadísticas significativas entre ambos. De acuerdo con lo anterior, es posible asumir que los granos de MP Toluqueño, poseen mayor tamaño y densidad que sus contrapartes. Considerando los resultados obtenidos para el *PIG*, era de esperarse que también se presentaran diferencias estadísticas significativas en el *PMG*, tal como ocurrió en este caso. Velázquez (2020) reportó valores de *PIG* en variedades de maíz palomero de 0.13 y 0.17 los cuales son semejantes a los *PIG* obtenidos en este estudio para el MP Toluqueño.

Por otro lado, García *et al.* (2016) reportaron valores de *PMG* para granos de maíz amarillo y blanco de 318 y 498 g respectivamente, Similarmente, Pérez *et al.* (2006) obtuvieron 304 y 348 g para maíces forrajeros, mientras que en nuestro se registraron valores considerablemente menores que oscilaron entre 160 – 231 g. En lo que respecta al comparativo de la densidad aparente ( $\rho_b$ ) entre granos de MP Toluqueño y MP comercial Verde Valle (Cuadro 8), se determinaron diferencias estadísticas significativas entre ambos, derivado de que los granos de MP comercial presentaron un valor medio más alto (89.3 kg/hL) respecto a los granos de MP Toluqueño (81.9 kg/hL). Al respecto, Bautista-Ramírez *et al.* (2019) reportaron un valor de 77.1 kg/hL en MP Toluqueño, dato ligeramente inferior al reportado en este estudio. Adicionalmente, estos autores sugirieron que el pH se relaciona de manera directamente proporcional con la dureza del grano, tal como se observó en los MP de este estudio, en los cuales se presentaron datos elevados de dureza, principalmente en el MP Toluqueño.

**Cuadro 8.** Valores medios de peso y densidad (*PIG*, *PMG*,  $\rho_b$ ,  $\rho_t$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle

<b>Muestra</b>	<b><i>PIG</i> (g)</b>	<b><i>PMG</i> (g)</b>	<b><math>\rho_b</math> (kg/hL)</b>	<b><math>\rho_t</math> (g/mL)</b>
Barrio 4	0.24 ±0.05a	231.3 ±6.5a	81.9 ±1.7b	12.5 ±0.07a
Comercial	0.16 ±0.02b	142.3 ±6.4b	89.3 ±1.0a	11.8 ±0.30b

±Desviación estándar. *PIG*=peso individual de grano; *PMG*=peso de mil granos;  $\rho_b$ =densidad aparente,  $\rho_t$ =densidad real. En una misma columna, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas.

La densidad real ( $\rho_t$ ) presentó diferencias estadísticas significativas entre el MP Toluqueño y el MP comercial Verde Valle. Al respecto, el valor medio de  $\rho_t$  del MP Toluqueño resultó más alto (12.5 g/mL) que para los granos de MP comercial.

Por otro lado, y de acuerdo con los resultados obtenidos (Cuadro 9) del análisis de varianza aplicado en los granos de cada Barrio (1, 2 y 3) por ubicación en la mazorca, se determinaron diferencias estadísticas significativas en el *PIG* entre los granos obtenidos de la base de la mazorca y los obtenidos de la parte media y la punta, para cada uno de los 3 Barrios.

**Cuadro 9.** Valores medios de peso y densidad (*PIG*, *PMG*,  $\rho_b$ ,  $\rho_t$ ) de granos de maíz palomero Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca.

Barrio	Ubicación en la mazorca	<i>PIG</i> (g)	<i>PMG</i> (g)	$\rho_b$ (kg/hL)	$\rho_t$ (g/mL)
1	Punta	0.18 ±0.03b	160.0 ±4.3c	80.5 ±0.7b	12.9 ±1.1b
	Medio	0.20 ±0.03ab	185.6 ±1.5b	81.3 ±0.1a	15.2 ±0.3a
	Base	<b>0.24 ±0.04a</b>	<b>218.6 ±6.1a</b>	77.9 ±1.1b	14.1 ±0.3c
2	Punta	0.19 ±0.03b	177.6 ±2.5c	<b>81.3 ±0.3a</b>	<b>14.1 ±0.6a</b>
	Medio	0.23 ±0.04ab	197.3 ±3.7b	77.7 ±0.1c	12.8 ±0.5b
	Base	<b>0.26 ±0.04a</b>	<b>226.3 ±4.7a</b>	78.2 ±0.0b	12.5 ±1.3b
3	Punta	0.17 ±0.02b	175.3 ±4.1c	<b>82.2 ±0.7a</b>	<b>14.3 ±1.3a</b>
	Medio	0.20 ±0.03b	207.3 ±4.0b	81.5 ±0.2b	13.4 ±0.0b
	Base	<b>0.27 ±0.05a</b>	<b>230.6 ±2.8a</b>	80.9 ±0.4c	13.8 ±1.4b

±Desviación estándar. *PIG*=peso individual de grano; *PMG*=peso de mil granos;  $\rho_b$ =densidad aparente,  $\rho_t$ =densidad real. En una misma columna, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas.

Del mismo modo, fue posible corroborar que los valores de *PMG* fueron de menos a más, según se tratara de granos colectados de la punta, la parte media, o la base de la mazorca. En general, los valores medios de esta determinación presentaron variación considerable oscilando entre 160 g (Barrio 1, punta) y 230 g (Barrio 3, base).

En lo que respecta a la densidad aparente ( $\rho_b$ ), en el Barrio 1 los granos recolectados de la zona media fueron estadísticamente diferentes (mayor  $\rho_b$ )

respecto a los granos de la punta y la base. Sin embargo, en el caso de los Barrios 2 y 3, se presentaron diferencias estadísticas significativas en la  $\rho_b$  entre las tres zonas de colecta de la mazorca.

De manera similar, en lo referente a la densidad real ( $\rho_t$ ), en el Barrio 1 se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los granos de las 3 zonas de la mazorca, siendo los granos obtenidos de la parte media los que mostraron valores mayores (15.2 g/mL). Por otro lado, en los Barrios 2 y 3, estas diferencias se apreciaron sólo entre los granos colectados de la punta (mayor valor), respecto a los granos de las zonas media y base (Cuadro 9).

#### 7.1.5. Porosidad ( $\mathcal{E}$ ), dureza y contenido de humedad

En el Cuadro 10 se presentan los valores medios correspondientes a las propiedades de porosidad ( $\mathcal{E}$ ), dureza y contenido de humedad de granos de MP Toluqueño (Barrio 4) y MP comercial.

**Cuadro 10.** Valores medios de porosidad ( $\mathcal{E}$ ), Dureza y contenido de humedad de granos de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle

<b>Muestra</b>	<b><math>\mathcal{E}</math> (%)</b>	<b>Dureza (N)</b>	<b>Humedad (%)</b>
Barrio 4	34.7 $\pm$ 0.10a	293.5 $\pm$ 29.0a	7.2 $\pm$ 0.12a
Comercial	24.4 $\pm$ 0.10b	286.3 $\pm$ 45.5a	7.3 $\pm$ 0.08a

$\pm$ Desviación estándar.  $\mathcal{E}$ =porosidad. En una misma columna, valores medios con letras indican diferencias estadísticas

Se observó que los granos de MP Toluqueño presentaron 10% mayor porosidad (34.7%) respecto al MP comercial (24.4%), determinándose así diferencias estadísticas significativas entre ambos.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza, en el comparativo del parámetro de dureza no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre estos dos cultivares, lo que presumiblemente permitiría establecer que, en este estudio, esta propiedad del grano no fue un factor determinante en el procesamiento de los granos a palomitas.

En general, el MP Toluqueño objeto de esta investigación (Cuadro 10) presentó un valor medio de dureza elevado (293 N), en comparación con el reportado por Figueroa *et al.* (2013), quienes determinaron 134 N en los granos de su estudio.

En cuanto al contenido de humedad determinado en ambas muestras, en el Cuadro 10 se observa que este valor estadísticamente fue igual, ya que apenas prevaleció una variación de 0.1% entre las dos muestras, oscilando de 7.2 a 7.3%.

En el Cuadro 11 se observan los valores medios de porosidad ( $\mathcal{E}$ ), dureza y contenido de humedad determinados en los granos de MP Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca.

Con relación a la porosidad ( $\mathcal{E}$ ), se apreció que en los 3 Barrios se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los granos de las 3 zonas de la mazorca. Este parámetro no mostró una tendencia de comportamiento bien definida entre Barrios y ubicación del grano en la mazorca, ya que, de acuerdo con los resultados, el menor % de porosidad de los granos se manifestó indistintamente en las tres zonas de la mazorca dependiendo del Barrio del que se tratará: Barrio 1, punta (37.6%), Barrio 2, zona media (39.3%) y Barrio 3, base (37.5%).

**Cuadro 11.** Valores medios de porosidad ( $\mathcal{E}$ ), dureza y contenido de humedad de granos de maíz palomero Toluqueño por Barrio y ubicación en la mazorca.

<b>Barrio</b>	<b>Ubicación en la mazorca</b>	<b><math>\mathcal{E}</math>(%)</b>	<b>Dureza (N)</b>	<b>Humedad (%)</b>
1	Punta	<b>37.6 ±0.1c</b>	266.8 ±39.8b	<b>6.7 ±0.01a</b>
	Medio	46.5 ±0.1a	245.5 ±29.1b	6.6 ±0.04b
	Base	45.0 ±0.1b	<b>351.4 ±37.3a</b>	6.5 ±0.04b
2	Punta	42.3 ±0.1a	231.7 ±39.2b	<b>7.5 ±0.08a</b>
	Medio	39.6 ±0.1b	<b>337.5 ±20.0a</b>	7.3 ±0.04b
	Base	<b>37.5 ±0.1c</b>	289.4 ±32.3c	7.3 ±0.01b
3	Punta	42.7 ±0.1a	336.4 ±17.6a	7.2 ±0.07b
	Medio	<b>39.3 ±0.1c</b>	335.1 ±14.9a	7.8 ±0.21a
	Base	41.2 ±0.1b	340.0 ±18.8a	7.2 ±0.02b

±Desviación estándar.  $\mathcal{E}$ =porosidad. En una misma columna y Barrio, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas

Sin embargo, en lo que respecta al comparativo entre los valores medios de dureza, los resultados fueron contrastantes entre Barrios, ya que en el caso del Barrio 1 los granos de la base fueron estadísticamente diferentes (mayor dureza) a los granos de la punta y la zona media; en el Barrio 2 los granos de las 3 zonas presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí, registrándose el mayor valor de dureza en los granos ubicados en la zona media. Por último, los granos del Barrio 3 no presentaron diferencias estadísticas entre sí, independientemente de su ubicación en la mazorca.

En contraste, los valores medios del contenido de humedad de los granos de los 3 Barrios de acuerdo con su ubicación en la mazorca presentaron rangos más amplios de valores, de 6.5 % (Barrio 1, base de la mazorca) a 7.8 % (Barrio 3, zona media). En los 3 Barrios se presentaron diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la zona de obtención de los granos de la mazorca. En los Barrios 1 y 2, los granos de la punta presentaron el valor mayor de humedad, mientras que en el

Barrio 3, los granos de la zona media de la mazorca fueron los que registraron mayor humedad.

## **7.2. Rendimiento de reventado y volumen de expansión**

Propiedades físicas del grano de maíz como el tamaño, la forma y la densidad afectan el volumen de expansión, los granos pequeños generalmente producen un volumen de reventado mayor que los granos grandes (Pajic y Babic 1991, citado por Gokmen, 2004).

Dentro de los parámetros de calidad establecidos para maíces palomeros, se encuentra el porcentaje de granos reventados (palomitas). En el presente estudio se aplicó una escala subjetiva de categorías para determinar y evaluar el % de granos reventados, de acuerdo con la formación parcial o total de palomitas. Esta escala se define e ilustra en el Cuadro 12.

A partir de la selección y clasificación de los granos reventados considerando en Cuadro 12, se concluye que los granos reventados no correspondían a la diferencia entre palomitas obtenidas y el número de granos totales (previo al proceso de reventado), es decir, la mayoría de los granos literalmente “reventaban” durante el proceso, pero no producían una palomita completa.

Los valores medios del rendimiento de reventado y volumen de expansión de palomitas obtenidas a partir de MP Toluqueño (Barrio 4) y MP comercial Verde Valle se presentan en el Cuadro 13. Como puede observarse, se presentaron diferencias estadísticas significativas entre ambos maíces, tanto en el rendimiento palomero como en el volumen de expansión. Al respecto, el MP Toluqueño registró mejores

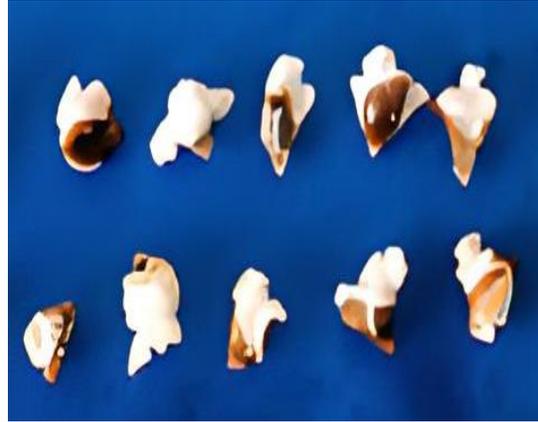
resultados cuando el reventado se realizó en horno de microondas (18.5%), a diferencia del MP comercial Verde Valle, que mostró mejor rendimiento cuando el reventado se realizó por el método de olla (93.2%).

**Cuadro 12.** Escala para determinar y evaluar el porcentaje de granos reventados y calidad de palomitas obtenidas a partir de granos de maíz palomero Toluqueño

Categoría	Descripción	Aspecto
1	<p><b>Granos sin reventar.</b> No presentan evidencia visual de expansión de endospermo posterior al proceso de calentamiento.</p>	
2	<p><b>Granos reventados mínimamente expandidos.</b> Exposición poco perceptible de endospermo expandido.</p>	

**Cuadro 12.** Continuación

3 **Granos reventados parcialmente expandidos.**  
Formación parcial de palomita.



4 **Grano reventado expandido.**  
Formación de palomita completa por expansión de endospermo.



**Cuadro 13.** Comparación del rendimiento y volumen de expansión de palomitas obtenidas de maíz palomero Toluqueño y maíz palomero comercial Verde Valle

Muestra	Rendimiento (%)		Volumen de expansión (mL g <sup>-1</sup> )	
	HM	Olla	HM	Olla
Barrio 4	18.5 ±9.1b	12.5 ±3.3b	2.8 ±0.17b	1.3 ±0.5b
Comercial	68.2 ±25.3a	93.2 ±1.4a	25.4 ±11.6a	31.2 ±2.2a

±Desviación estándar. HM=horno de microondas. En una misma columna valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas.

En el Cuadro 14 se muestran los valores medios del rendimiento y volumen de expansión de palomitas obtenidas a partir de los granos de MP Toluqueño de acuerdo con su ubicación en la mazorca.

En los Barrios 1, 2 y 3 el rendimiento de palomitas presentó diferencias altamente significativas, dependiendo la zona de extracción de los granos de la mazorca. Se observó que los granos obtenidos de la punta mostraban una tendencia de mayor rendimiento palomero respecto a los granos extraídos de las otras dos zonas de la mazorca, principalmente cuando el reventado se realizó en horno de microondas.

**Cuadro 14.** Rendimiento y volumen de expansión de palomitas obtenidas de maíz palomero Toluqueño por dos métodos y por ubicación del grano en la mazorca.

Barrio	Ubicación en la mazorca	Rendimiento (%)		Volumen de expansión (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	
		HM	Olla	HM	Olla
1	Punta	<b>17.8 ±6.2</b>	1.7 ±0.7	1.4 ±0.6	0.4 ±0.0
	Medio	3.4 ±1.1	--	--	--
	Base	5.0 ±0.1	1.5 ±0.8	0.4 ±0.0	0.4 ±0.0
2	Punta	<b>10.3 ±5.5</b>	<b>5.8 ±6.3</b>	<b>1.0 ±0.4</b>	0.3 ±0.2
	Medio	7.9 ±1.4	0.7 ±1.1	0.8 ±0.0	0.2 ±0.2
	Base	5.4 ±1.2	0.9 ±1.3	0.6 ±0.2	0.2 ±0.2
3	Punta	<b>14.7 ±0.2</b>	5.6 ±5.0	1.0 ±0.1	0.5 ±0.1
	Medio	8.0 ±3.4	--	--	--
	Base	7.4 ±0.9	--	--	--

±Desviación estándar. En una misma columna y barrio, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas. HM=horno de microondas. (--) = sin datos.

Shimoni *et al.* (2002) determinaron que la disminución del volumen de expansión de las palomitas además de verse afectada por el contenido de humedad del grano también puede deberse a la ruptura de pericarpio del grano cuando se encuentra a

una temperatura en la que la presión de vapor de agua interna del grano es demasiado baja, lo cual concuerda con el bajo rendimiento de palomitas en categoría 4 (Cuadro12) pero gran presencia de granos que presentan ruptura de pericarpio sin formar rosetas.

Entre los factores químicos del grano que influyen en su volumen de expansión, se encuentra el contenido de humedad (siendo alrededor de 14% el ideal) (Gokmen, 2004). De acuerdo con Allred-Coyle y Tomma (2000), si el grano contiene entre 11 y 15% de humedad, es posible obtener buenos resultados en cuanto a rendimiento palomero, sin embargo, en pruebas preliminares realizadas en este estudio en las que se acondicionó el contenido de humedad del grano a 14%, no se observaron diferencias respecto a los granos cuyo contenido de humedad promedio era alrededor de 7%, tanto en rendimiento como en el volumen de expansión de las palomitas.

Bautista-Ramírez *et al.* (2020) reportaron volúmenes de expansión entre 1.0 y 7.5  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$  en palomitas producidas a partir de granos de MP Toluqueño reventados en horno de microondas, mientras que los resultados registrados en este estudio oscilaron entre 0.20 y 2.8  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ . El marcado contraste entre ambos resultados puede deberse a las diferencias en el contenido de humedad (14 vs 7 %), y tamaño de granos, ya que en general los granos obtenidos de la punta de la mazorca (menor tamaño y mayor esfericidad) presentaron mejores rendimientos en contraste con los granos colectados de las zonas media y base de la mazorca.

### 7.3. Correlaciones de Pearson

En el Cuadro 15 se aprecian las correlaciones simples encontradas entre las propiedades biofísicas y el rendimiento palomero y volumen de expansión de granos de MP Toluqueño.

**Cuadro 15.** Correlaciones de Pearson entre características biofísicas del grano, rendimiento y expansión de las palomitas.

	<i>A</i>	<i>D<sub>a</sub></i>	<i>PIG</i>	<i>D<sub>g</sub></i>	<i>PMG</i>	Rendimiento		Vol. Expansión	
						HM	Olla	HM	Olla
<i>L</i>	0.7242*	0.7428*	0.779*	<b>0.9161**</b>	0.7949*	<b>-0.7895*</b>	<b>-0.7509*</b>	<b>-0.6987*</b>	
<i>A</i>		0.8746**	0.8743**	0.8819**	0.8749**		-0.7395*	-0.6725*	-0.776*
<i>D<sub>a</sub></i>				0.9475**	0.899**				
<i>D<sub>g</sub></i>					0.9204**	<b>-0.7331 *</b>	<b>-0.7032*</b>	<b>-0.6937*</b>	
<i>PMG</i>						-0.7178*		-0.7739*	

*L*= largo, *A*= ancho, *D<sub>a</sub>*= diámetro aritmético, *D<sub>g</sub>*= diámetro geométrico, *PIG* = peso individual de grano, *PMG*= peso de mil granos, HM= horno microondas. \*Significativo a 0.05 nivel de confianza, \*\* Significativo a 0.01 nivel de confianza.

Se encontraron correlaciones simples entre algunas propiedades biofísicas del grano y las características de rendimiento y volumen de expansión de las palomitas obtenidas a partir de granos de MP Toluqueño, concordando así con lo reportado por Allred-Coyle y Toma (2000), quienes determinaron que existe una correlación significativa entre el tamaño del grano y el volumen de expansión.

En el presente estudio se determinó que el volumen de expansión correlacionó negativamente con parámetros biofísicos del grano como el *L*, *A*, *D<sub>g</sub>* y *PMG*. Respecto al rendimiento palomero, se encontraron correlaciones negativas con el *L*, *A* y *D<sub>g</sub>*.

Se determinaron correlaciones negativas entre el largo ( $L$ ) del grano respecto al rendimiento y volumen de expansión de las palomitas, lo cual como se discutió anteriormente (Cuadro 5), corrobora que los granos con menor valor de  $L$  (extraídos de la punta de la mazorca), presentaron mejores rendimientos (Cuadro 14) independientemente del método de reventado.

Adicionalmente se determinó una correlación negativa significativa entre el  $D_g$  con el rendimiento palomero y el volumen de expansión. Como se observó previamente en el Cuadro 7, los granos recolectados de la punta de la mazorca presentaron los menores valores de  $D_g$  y los mayores de esfericidad, además de su mayor rendimiento de reventado (Cuadro 14).

Lo anterior concuerda con lo reportado por Lyverly (1942) (citado por Haugh *et al.*, 1976) quienes argumentaron que el volumen de expansión de palomitas se correlacionaba con el tamaño y forma del grano; los granos más pequeños, cortos y redondeados tendían a expresar mayor volumen de expansión.

El  $PMG$  se correlacionó con propiedades biofísicas del grano tales como  $L$ ,  $A$ ,  $D_a$  y  $D_g$  de manera positiva, características dependientes del tamaño del grano. Finalmente, se presentó una correlación negativa entre el rendimiento palomero y el volumen de expansión de las palomitas.

De las correlaciones simples determinadas entre las características biofísicas del grano, destacan  $L$  el cual correlacionó de manera positiva con  $A$ ,  $D_a$ ,  $PIG$ ,  $D_g$  y  $PMG$ .

#### **7.4. Análisis del Perfil de Textura (APT) de las palomitas**

No fue posible realizar el APT de las palomitas de MP Toluqueño obtenidas de los Barrios 1, 2 y 3 de acuerdo con su ubicación en la mazorca (punta, medio y base), derivado del bajo rendimiento (baja producción de palomitas) para su evaluación, por lo tanto, no se obtuvieron datos completos, particularmente en las zonas media y base en el Barrio 1 y la zona de la base en el Barrio 3.

La variabilidad morfológica de las palomitas obtenidas (independientemente del método de reventado) se reflejó en los datos. En el caso de la dureza los valores oscilaron entre 45 y 70 N aplicando el método de reventado en horno de microondas, mientras que por el método de reventado en olla se observaron valores más altos (entre 68 y 111 N). En general las palomitas obtenidas por el método de reventado en olla presentaron mayor dureza que las palomitas del método de horno de microondas.

Los valores de cohesividad oscilaron entre 0.09 y 0.17 en el método de reventado en horno de microondas, mientras que en el método de reventado en olla los valores se encontraron entre 0.12 y 0.23.

Las palomitas obtenidas a partir del método de reventado en olla presentaron valores más altos de cohesividad, es decir, su recuperación después de la primera compresión es menor.

Por otro lado, la masticabilidad en el método de reventado en horno de microondas varió entre 1.28 y 2.95, mientras que en el método de reventado en olla los valores oscilaron entre 3.03 y 8.56. La masticabilidad en las palomitas obtenidas en el método de reventado en microondas mostró valores menores que las palomitas en

olla, lo que está relacionado con la dureza de la palomita, mientras mayor dureza, mayor será el valor de la masticabilidad.

Derivado del bajo rendimiento palomero, el Análisis de Perfil de Textura (APT) se realizó a las palomitas de manera individual y no en volumen (ideal para la evaluación de este tipo de alimento), lo que desafortunadamente implicó que los resultados no fueran satisfactorios. En conclusión, el método elegido (palomita individual) para la evaluación del APT, no permitió establecer un patrón y/o tendencia de resultados confiable que permitiera aplicar un análisis estadístico confiable, debido a la heterogeneidad individual de las palomitas.

## **7.5. Conclusiones**

Las características de los granos de MP Toluqueño en función de su ubicación en la mazorca (punta, zona media y base) difieren entre sí, siendo más pequeños los granos de la punta respecto a sus contrapartes.

Los granos de MP Toluqueño presentaron mayor longitud, diámetro aritmético y geométrico, pero menor esfericidad que los granos de MP comercial.

Fue posible identificar y corroborar que los granos de maíz palomero Toluqueño y comercial presentaron incidencia mínima de daño (fisuras) en el pericarpio, lo que permite concluir que en este estudio no existió correlación entre el daño del pericarpio y el índice de reventado.

En general, los granos de MP Toluqueño obtenidos de la punta de la mazorca presentaron mayor rendimiento de palomitas respecto a los granos de las zonas media y base.

Los granos de MP Toluqueño provenientes del Barrio 2 mostraron mejor rendimiento palomero y volumen de expansión

De acuerdo con los resultados, se determinó que el método de reventado utilizando horno de microondas fue más eficiente, respecto al rendimiento y volumen de expansión de las palomitas.

Derivado del bajo rendimiento y bajo volumen de expansión de las palomitas obtenidas a partir de los maíces palomeros Toluqueños, no fue posible llevar a cabo óptimamente el APT, por lo cual los resultados de este ensayo específico se desestimaron para su análisis estadístico.

## VII. REFERENCIAS CONSULTADAS

1. AACC International Method 44-15.02. Moisture-Air-Oven Methods. (1999)
2. Aguirre, J., Hernández, J., Sahagún, L., Ortega, R., Aragón, F., Dzib, L., De la O, M., García M., Gómez, N., Pérez, O. y Esparza, R. (2018). Conservación y manejo *in situ*. In: Ramírez-Galindo, J., y González-Santos. (Editores). Conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad de maíces nativos de México. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. México 6-15.
3. Allred-Coyle, A. y Toma, R. (2000). Effect of moisture content, hybrid variety, kernel size and microwave popcorn. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 51 (5): 389-394.
4. Aviara, N., Gwandzang, M., y Haque, M. (1999). Physical Properties of Guna Seeds. *J. Agric. Eng Res*, 73: 105-111.
5. Bautista-Ramírez, E., Cuevas-Sánchez, J., Santacruz-Varela, A., Hernández-Leal, E., Hernández-Galeano, C., Hernández-Bautista, A., y Gómez-Maldonado, R. (2018). Factores condicionantes en la distribución de maíz palomero toluqueño y alternativas para su conservación. *Revista BioCiencias*, 5(2):1-13.
6. Bautista-Ramírez, E., Salinas-Moreno, Y., Santacruz-Varela, A., Córdova-Téllez, L., y López-Sánchez, H. (2019). Características físicas y químicas de la raza de maíz Palomero Toluqueño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(2):441-446.
7. Bautista-Ramírez, E., Santacruz-Varela, A., Córdova-Téllez, L., Muñoz, O., López-Sánchez, H. y Esquivel-Esquivel, G. (2020). Rendimiento y capacidad de

- expansión del grano de maíz en la raza Palomero Toluqueño. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 11 (7): 1607-1618.
8. Benítez, C. (2006). El maíz: origen, composición química y morfológica. UNAM, 7: 15-20.
  9. Bewley, J. y Black, M. (1994). Seed Development and Maturation. In: SEEDS Physiology of Development and Germination. *Springer Science+Business Media*, LLC. (35-115 pp).
  10. Bhise, S., Kaur, A., y Manikantan, M. (2014). Moisture dependent physical properties of maize (PMH-1). *Acta Alimentaria*, 43(3):394-401.
  11. Bourne, M. (2002). Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. 2nd edition, Academic Press. 416 p
  12. Brickeell, C., Alexander, C., David., J., Hetterscheid, W., Leslie, A., Malecot., V. y Jin, X. (Eds) (2009). International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. *International Society for Horticultural Science*. 151:6-28.
  13. Brites, C., Haros, C., Trigo, M. y Pedroza, R. (2007). Maíz in De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica. *ISEKI-Food*: 73-121.
  14. Byrd, J. y Perona, M. (2005). Kinetics of popping of popcorn. *Cereal Chem.* 82 (1): 53-59.
  15. 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): 1479-1949.
  16. De la O-Olán, M., Sangerman, D., Gámez, A., Santacruz-Varela, A., López, H. y Hernández, J. (2015). Costumbres, usos y alternativas de uso de la raza criolla

- de maíz palomero toluqueño: caso Estado de México. Santiago, C., Ayala, A., y Almaguer, G. En: *Desarrollo y tecnología, aportaciones a los problemas de la sociedad*. 159-176.
17. De la O-Olán, M., Santacruz-Varela, A., Gámez-Vázquez, A., Arellano-Vázquez, J., Valadez-Bustos M., y Ávila, M. (2018). Estandarización del método de reventado para la evaluación experimental del maíz palomero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7):1471-1483.
18. Dofing, S., Thomas-Compton, M. & Buck, J. (1990). Genotype X Popping - method Interaction for Expansion Volume in Popcorn. *Crop Sci*, 30. 62-65.
19. 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: 05-314.
20. Figura, L.O. y Teixeira A.A. 2007. Food physics. Physical properties – Measurement and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 554 p
21. 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.
22. García, A. y Vázquez, L. (2016). Secado de maíz Propiedades del grano. Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Izatapalapa, 1 (2): 73-77.
23. 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.

24. Giacomini, M. (2012). El aceite de canola y sus efectos en la salud. *An Venez Nutr*, 25 (2): 94-99.
25. Gökmen, S. (2004). Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering*, 65: 357-362.
26. Hauhg, C., Lien, R., Hanes, R. y Ashman, R. (1976). Physical properties of popocorn. *Transactions of the ASAE*.
27. Hoseney, R., Zeleznak, K. and Abdelrahman, A. (1983). Mechanism of Popcorn Popping. *Journal of Cereal Science*, 1: 43-52.
28. Karababa, E. (2005). Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering*. 72: 2005.
29. López, P., Guzmán F., Santos E., Prieto F., Román A. (2005). Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*hordeum sativum jess*) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*, 32(3): 1-11.
30. Manayay, D. (2015). *Evaluación de la forma, redondez, esfericidad y ecuanticidad en granos comerciales de maíz amarillo duro (Zea mays L.) y arveja (Pisum sativum)*. Universidad Le Cordon Bleu.
31. Mauricio, R., Figueroa, J., Taba, S., Reyes, M., Rincón, F. y Mendoza, A. (2004). Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(3): 213-222.
32. Metzger, D., Hsu, K., Ziegler, K. and 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.

33. Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. y Li, Y. (2014). Discriminación de sedimentos contaminados con jales mineros por medio de la forma de granos de cuarzo. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 7 (1): 66-84.
34. Mohamed, A., Ashman, R. and Kirleis, A. (1993). Pericarp Thickness and Other Kernel Physical Characteristics Relate to Microwave Popping Quality of Popcorn. *Journal of Food Science* 58 (2): 342-346.
35. Ordóñez, M. Gely, M. y Pagano, M. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 3 (3): 153-172.
36. Pajic, Z. (2007). Reeding of maize types with specific traits at the Maize research institute, Zemun polje. *Genetika*, 39 (2): 169 - 180.
37. Palacios-Rojas, N. (2018). Calidad nutricional e industrial de Maíz: Laboratorio de Calidad Nutricional de Maíz “Evangelina Villegas”, *CIMMYT*: 29-53.
38. Pérez, C., Hernández, A., González, F., García, G., Carballo, A., Vásquez, T. y Tovar, M. (2006). Tamaño de semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. *Agricultura técnica en México*. 32 (2): 341-352.
39. Ponce-García, N., Escalante-Aburto, A., Torres-Chávez, P, & Serna-Saldívar, S. (2017). Grading Factors of Wheat Kernels Based on Their Physical Properties. *INTECH*: 275-291.
40. Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P., Figueroa-Cárdenas, J., Serna-Saldívar, S., and Cortez-Rocha, M. (2013). Effect of moisture content on the viscoelastic properties of individual wheat kernels evaluated by the uniaxial test under small strain. *Cereal Chemistry*, 90(6):558-563.

41. Quero, E., Lugo, M. y Sánchez, E. (2018). Caracterización elemental de semilla de maíz (*Zea mays Spp.*) nativo (mexicano). ←
42. Quinn, P., Hong, D. and Both, J. (2005). Increasing the size of a piece of popcorn. *Elsevier*. 637-648.
43. Romero, T., González, L., y Reyes, G. (2005). Geografía e historia cultural del maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays everta*). *Ciencia Ergo Sum*, 13(1):47-56.
44. Saguy, I. & Dana, D. (2013). Integrates approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, 56: 143-152.
45. Salinas, Y., Arellano, J. y Martínez, F. (1992 b). Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíces híbridos precoces para valles altos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 42 (2): 161-167.
46. Salinas, Y., Martínez, F. y Gomez, H. (1992 a). Comparación de métodos para medir la dureza del maíz (*Zea mays L.*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 42 (1): 59-63.
47. Sangamithra, A., Swamy Gabriela John, Sorna Prema, R., Nandini, K., Kanna K., Sasikala, S., and Suganya, P. (2016). Moisture dependent physical properties of maize kernels. *International Food Research Journal*, 23(1):109-115.
48. Serna-Saldivar, S.O. 2010. Cereal grains. Properties, processing, and nutritional attributes. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL. 747 p.
49. Shimoni, E., Dirks, E. y Labuza, T. (2002). The relation between final popped volume of popcorn and thermal-physical parameters. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol*, 35: 93-98.

50. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., and Gely, M. (2013). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43(1):762-767.
51. Soyly, S. and Tekkanat, A. (2006). Interactions amongst kernel properties and expansion volume in various popcorn genotypes. *Journal of Food Engineering*, 80; 336-341.
52. Suaterna, C. (2009). La fritura de los alimentos: el aceite de fritura. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 11 (1): 39-53.
53. Sweley, J., Rose, D. and 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.
54. Szczesniak, A. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13: 215-225.
55. Tabatabaeefar, A. (2003). Moisture-dependent physical properties of wheat. *International Agrophysics*, 17: 207-211.
56. 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.
57. Villanueva, R. (2008). El maíz reventador como alternativa industrial. *Ingeniería Industrial*, 26: 113-124.
58. Virost, E. & Ponomarenko, A. (2015) Popcorn: critical temperature, jump and sound. *J. R. Soc. Interface*, 12: 1-6.

59. Wellhausen, E.J., Roberts, L.M., y Hernandez, E. (1951). Razas de maíz en México, su origen, características y distribución. México: Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería, México. 256p.
60. Wilhelm, R., Dwayne, S. and Brusewitz, G. (2004). Physical Properties of Food Materials. Chapter 2. Food & Process Engineering Technology: 23-52.
61. Zapata, L. (2004). Utilización de aceite de palma y otros aceites vegetales en la industria de alimentos. *PALMAS*, 25 (2): 253-261.

### **Sitios web**

62. Aguirre, J., Hernández, J., Sahagún, L., Ortega, R., Aragón, F., Dzib, L., De la O-Olán, M., García, M., Gómez, N., Pérez, O., y Esparza, R. (2018). Conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad de maíces nativos de México. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. 10-15. Recuperado desde: [https://www.redinnovagro.in/pdfs/DIAG\\_MAIZ-DIGITAL.pdf](https://www.redinnovagro.in/pdfs/DIAG_MAIZ-DIGITAL.pdf) [15/02/21]
63. Benavente, R. (2014). Así es como funciona un microondas. Recuperado desde: [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-04-14/asi-es-como-funciona-un-microondas\\_114875/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-04-14/asi-es-como-funciona-un-microondas_114875/) [17/12/21]
64. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2020). Razas de maíz de México. Recuperado de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz> [03/08/21]
65. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2021). Distribución de la raza de maíz Palomero Toluqueño en México (*Zea*

- mays subsp. Mays*). Recuperado de:  
[raza\\_palomerotuloqueño\\_new\\_NF\\_2015.pdf \(biodiversidad.gob.mx\)](#)
66. 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](https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/suplementacion/80-grano_maiz.pdf) [15/09/21].
67. Mier, R. (2020). Para mexicanas: palomitas de maíz. Fundación Tortilla de Maíz Mexicana. Recuperado de <https://fundaciontortilla.org/?view=articulos&id=11> [25/01/21].
68. Moreno, E. (1984). Análisis físico y biológico de semillas agrícolas. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: [https://books.google.com.mx/books?id=FTpGWUloo4UC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=FTpGWUloo4UC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) [25/09/21].
69. NMX-FF-O34/2-SCFI-2003. PRODUCTOS NO INDUSTRIALIZADOS - PARA USO HUMANO – CEREALES – MAÍZ AMARILLO PARA ELABORACIÓN DE ALMIDONES Y DERIVADOS – ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA. Recuperado de <https://docplayer.es/12697675-Nmx-ff-034-2-scfi-2003.html> [15/02/21].
70. Ospina, J. (2001). Características físico-mecánicas y análisis de calidad de granos. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2DWmqb6xP3wC&oi=fnd&pg=PA5&dq=importancia+de+la+caracterizaci%C3%B3n+f%C3%ADsica+de+granos+de+cereales&ots=ICxqTjN7dy&sig=kjCYxLrPB9s7PyE1pqvIVu5rG-E#v=onepage&q=importancia%20de%20la%20caracterizaci%C3%B3n%20f%C3%ADsica%20de%20granos%20de%20cereales&f=false> [15/08/2021].

71. Paliwal, R., Granados, G., Renée, H., y D. Violic, A. (2001). El maíz en los trópicos Mejoramiento y producción: Tipos de maíz. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Recuperado de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=os79dx6BcmsC&oi=fnd&pg=PA123&dq=El+ma%C3%ADz+en+los+tr%C3%B3picos:+mejoramiento+y+producci%C3%B3n+&ots=O-PCQdKS3c&sig=-ekGWyK5iEeMRegAPloDnGgthl0#v=onepage&q&f=true> [25/01/21].