



## MÉTODOS PARA MEDIR LA DUREZA DEL GRANO DE MAÍZ: REVIEW

## METHODS FOR THE MEASUREMENT OF MAIZE GRAIN HARDNESS: REVIEW

Arriaga-Pérez W<sup>1</sup>, Gaytán-Martínez M<sup>1,2</sup>\*, Reyes-Vega M.L.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ingeniería de Calidad y Productividad Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N Col. Las Campanas. Querétaro, México.

<sup>2</sup> Posgrado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Research and Graduate Studies in Food Science, School of Chemistry, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n Col. Cerro de las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Querétaro, Departamento de Investigación y Posgrado, Santiago de Querétaro, México.

\*Autor de correspondencia. Correo electrónico: [marcelagaytanm@yahoo.com.mx](mailto:marcelagaytanm@yahoo.com.mx)

### Resumen

La dureza es la principal característica física del grano de maíz, la cual determinará su uso debido a su alta influencia en la calidad del producto final. Se han desarrollado diferentes métodos con el objetivo de medir esta importante característica del grano. El objetivo del presente trabajo es clasificar, describir y comparar los métodos que se han utilizado para medir la dureza del grano. Se propone una clasificación de estos métodos, basada en su fundamento para determinar la dureza del grano. A la fecha no existe un método único, universalmente aceptado, para medir la dureza del grano de maíz. Actualmente algunos métodos, como “*Tangential Abrasion Dehulling Device*” y Stenvert, se usan con menor frecuencia, mientras que los métodos más utilizados son peso hectolítrico, índice de flotación, contenido de proteína e índice de tamaño de partícula, debido a la simplicidad y/o disponibilidad del equipo necesario para su análisis. Alternativamente, surgieron algunos métodos que se basan en el procesamiento de imágenes de granos de maíz para medir su dureza y los resultados demuestran que son adecuados para medir esta característica del grano.

Palabras clave: Dureza, maíz, métodos.

### Abstract

Hardness is the main physical characteristic of the maize. This characteristic is important because it will determine its use, because of its influence on the quality of the final product. Therefore, different methods have been developed in order to measure maize grain hardness. The objective of this work is to classify, describe and compare the methods that have been used to measure grain hardness. A classification of these methods is proposed, based on the principle that sustains them to determine the hardness of the grain. Currently there is no universally accepted single method for measuring the hardness of maize grain. Actually, some methods such as TADD and Stenvert, are used with a minor frequency, while the most commonly used methods are hectoliter weight, floating index, protein content and particle size index. This is because of their simplicity and /or the accessibility to the equipment necessary for the analysis. Alternatively, some methods based on image processing of maize grain emerged to measure hardness, which results show that they are adequate to measure this grain characteristic.

Key Words: Hardness, Maize, Hardness methods.

## Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal de mayor producción internacional, aproximadamente 1,134 millones de toneladas por año (Estadísticas FAO, 2017). Se utiliza principalmente como alimento de uso pecuario y como alimento para el ser humano (Aragón-Cuevas y col., 2012). Para determinar su potencial como materia prima y así facilitar su comercialización, se determinan diferentes características físicas (color, tamaño, dureza, presencia de material extraño) y químicas (contenido de aceite, proteína, almidón) (Aragón Cuevas y col., 2012; NMX-FF-034/2-SCFI, 2003). La dureza es la principal característica física del grano para determinar su uso, debido a su alta influencia en la calidad del producto final (Gaytán-Martínez y col., 2006; Williams y Kucheryavskiy, 2016:131).

La dureza del grano de maíz se define como la resistencia del grano a la deformación cuando éste se somete a una acción mecánica o al quebrado durante la cosecha y pos-cosecha, y dependerá de factores como lo son la genética de la planta de maíz, condiciones de cultivo y su manejo post-cosecha (Aragón Cuevas y col., 2012; Fox y Manley, 2009:5647).

La dureza del grano de maíz está dada por el arreglo microestructural y la matriz proteica de los gránulos de almidón y el grosor del pericarpio (capa que rodea al grano), de los cuales el que contribuye principalmente a la dureza del grano es el arreglo microestruc-

tural del gránulo de almidón (Gaytán-Martínez y col., 2006; Narváez-González y col., 2006). El almidón se encuentra en el endospermo: la parte estructural mayoritaria en el grano de maíz (82% aproximadamente) (Aragón Cuevas y col., 2012). El grano de maíz está constituido por dos tipos de endospermo, el endospermo vítreo o duro (EV) y el endospermo harinoso (EH) o suave y la relación en que se encuentren presentes estos tipos de endospermo contribuye principalmente a la dureza del grano (ISO5527, 2015; Williams y col., 2009).

En el presente trabajo de investigación se aborda los diferentes métodos reportados para determinar dureza. El objetivo del presente trabajo es describir los métodos físicos, químicos y de procesamiento de imágenes que se han reportado para medir la dureza del grano de maíz.

## 2. Métodos de determinación de la dureza del grano de maíz

Los métodos para la determinar la dureza del grano de maíz se pueden clasificar en físicos, químicos y de procesamiento de imágenes. Los métodos físicos involucran la medición de una característica física del grano que se relaciona con su dureza, mientras que los químicos, relacionan la dureza con las características químicas del grano. Por otra parte, los métodos de imágenes son aquellos que capturan imágenes de las partes estructurales del grano para explicar su dureza (Figura 1).

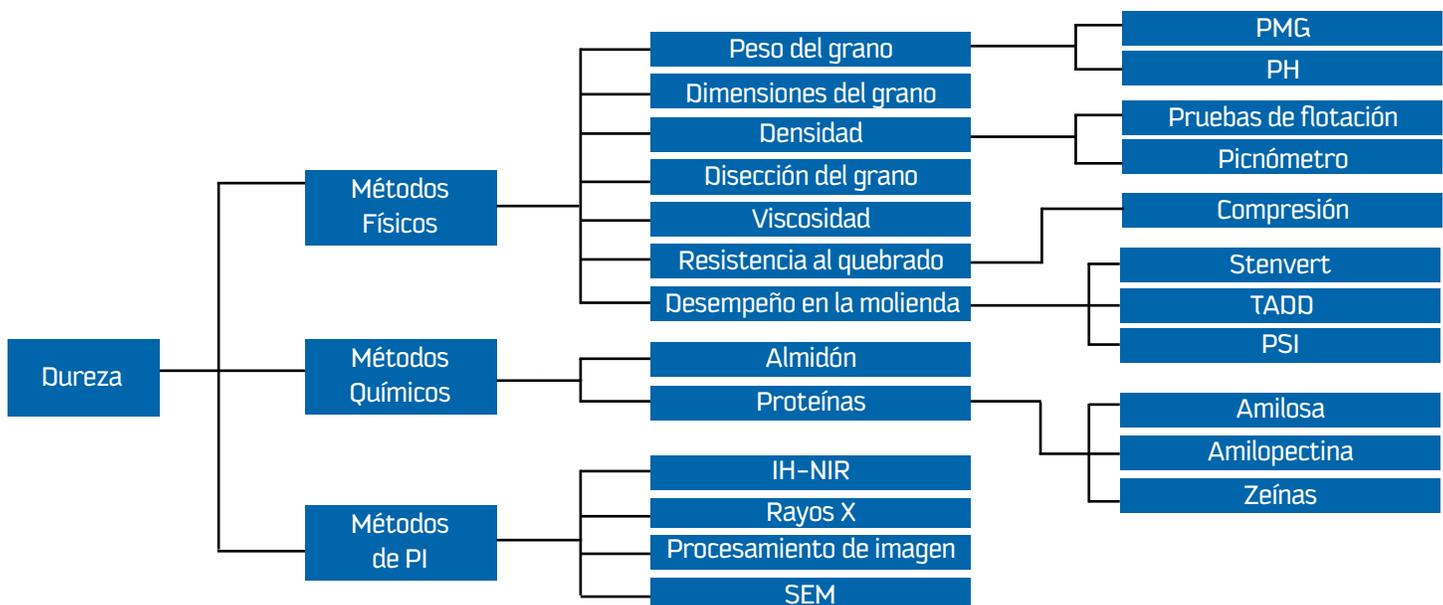


Figura 1. Clasificación de métodos para determinación de dureza de maíz

PI: procesamiento de imágenes; PH: peso hectolítrico; PMG: peso de mil granos; TADD: Tangential Abrasion Dehulling Device; PSI: índice de tamaño de partícula; SEM: microscopía electrónica de barrido; IH-NIR: imagen hiperespectral de infrarrojo cercano.

### 2.1 Métodos físicos

Algunas de las características físicas del grano que se relacionan con su dureza son: tamaño, peso, densidad, viscosidad, proporción de sus partes

estructurales, así como su resistencia al quebrado y su desempeño en la molienda. Los métodos que miden estas características son los que se señalan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Métodos físicos de determinación de dureza de maíz (Elaboración propia)

Característica del grano	Método/ D* o ND**	Parámetros obtenidos	Referencias
<b>Tamaño</b>	Dimensiones del grano (ND)	Ancho, largo y grueso, volumen y esfericidad	[Blandino y col., 2010, 2013]
<b>Peso</b>	Peso hectolítrico (ND)	Peso hectolítrico	[Blandino y col., 2010; Guelpa y col., 2015; Lee y col., 2006; Lee y col., 2005; Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010]
	Peso de mil granos (ND)	Peso de mil granos	[Aragón Cuevas y col., 2012; Blandino y col., 2010; Guelpa y col., 2015; Guelpa y col., 2016; Sánchez y col., 2004]
<b>Densidad</b>	Pruebas de flotación (D)	% granos flotantes	[Aragón-Cuevas y col., 2012; Carrillo y col., 2010; Gaytán-Martínez y col., 2006; Narváez-González y col., 2006; Santiago-Ramos y col., 2017]
	Picnómetro (D)	Densidad	[Almeida-Dominguez y col., 1997; Siska y Hurburgh, 1992]
<b>Partes estructurales</b>	Disección del grano (D)	%pericarpio, %pedicelio, %germen, % endospermo harinoso y vítreo	[Aragón Cuevas y col., 2012; Gaytán-Martínez y col., 2006; Santiago-Ramos y col., 2017]
<b>Viscosidad</b>	RVA (D)	Viscograma (viscosidad vs tiempo)	[Almeida-Dominguez y col., 1997; Guelpa y col., 2015]
<b>Resistencia al quebrado</b>	Prueba de punción (D)	Fuerza de rompimiento	[Aragón Cuevas y col., 2012; Blandino y col., 2010; Gaytán-Martínez y col., 2006; Narváez-González y col., 2006; Santiago-Ramos y col., 2017]
<b>Desempeño de molienda</b>	TADD (D)	Cantidad de material removido del grano	[Fox y Manley, 2009; Lee y col., 2006; Lee y col., 2005]
	Stenvert (D)	Tiempo de molienda	[Blandino y col., 2010, 2013; Fox y Manley, 2009]
	PSI (D)	Relación molienda gruesa: molienda fina	[Blandino y col., 2010, 2013; Fox y Manley, 2009; Guelpa y col., 2015]

### 2.1.1 Peso del grano

Los dos métodos que miden el peso del grano para relacionarlo indirectamente con su dureza son el peso hectolítrico y el peso de mil granos. Aunque la prueba de peso de mil granos (PMG) es considerada una de las primeras realizadas para obtener una estimación de la dureza del grano, no tiene la capacidad de proveer información efectiva y concluyente por sí sola, generalmente se utiliza este método junto con otros análisis al grano (Blandino y col., 2010).

### 2.1.2 Densidad

La medición de la densidad del grano es una medida indirecta de su dureza (Pratt y col., 1991). Algunos métodos para medir la densidad el grano de maíz son las pruebas de flotación, y el picnómetro. La densidad se encuentra definida por la estructura de los dos tipos de endospermo y por consiguiente con la relación endospermo vítreo: endospermo harinoso, es decir su dureza. Así, entre mayor sea la densidad del grano, tendrá un mayor contenido de endospermo vítreo, es decir, será un grano más duro (Guelpa y col., 2016).

#### a) Picnómetro

La densidad medida con el picnómetro proporciona una medición precisa y no destructiva de la dureza del maíz. La densidad se obtiene midiendo el volumen del aire desplazado por un peso medido de maíz. Este método fue desarrollado por Thompson e Isaacs en 1967 (Pomeranz y col., 1984).

#### b) Pruebas de flotación

El índice de flotación es uno de los métodos que más usados para medir la dureza del maíz. Este método se basa en que los granos duros (gránulos de almidón compactados y con mayor relación endospermo vítreo/ endospermo harinoso) son de mayor densidad, por lo tanto, menor porcentaje de granos flotan en relación a los granos de menor densidad (NMX-FF-034/2-SCFI, 2003), por lo tanto la cantidad de granos flotantes es inversamente proporcional a la densidad del grano (Gaytán-Martínez y col., 2013).

Wichser en 1961 desarrolló el método de flotación con una solución de tetracloroetileno a una

densidad de 1.62 g/ml. Posteriormente otras soluciones con densidad conocida fueron utilizadas para determinar la dureza de los granos, entre las cuales se encuentran las de nitrato de sodio, sacarosa, tetracloruro de carbono-keroseno y etanol. La solución de nitrato de sodio a una concentración de 1.250 g/mL<sup>-1</sup> es la más comúnmente utilizada, esta prueba se conoce con el nombre de índice de flotación (IF) (Santiago-Ramos y col., 2017; Aragón Cuevas y col., 2012; Carrillo y col., 2010; Gaytán-Martínez y col., 2006; Narváez-González y col., 2006).

### 2.1.3 Disección del grano

El grano de maíz se divide en cuatro estructuras físicas fundamentales: pedicelio (1%), pericarpio (5%), germen (10%) y endospermo (82%). Para determinar los componentes del grano, por disección, se sumergen 5 gramos de maíz en agua (85°C) por 15 minutos para facilitar la disección, posteriormente el pedicelo, pericarpio, germen y endospermo (vítreo y harinoso) son separados manualmente utilizando un bisturí (Aragón-Cuevas y col., 2012). La dureza se determina con base en la relación de endospermo vítreo/endospermo harinoso presente en el grano. A mayor proporción de endospermo vítreo respecto al endospermo vítreo será indicativo de un grano con mayor dureza (Williams y Kucheryavskiy, 2016:131-137).

### 2.1.4 Viscosidad

El análisis del perfil de viscosidad se efectúa con un analizador de viscosidad (RVA por sus siglas *Rapid Visco Analyser*), es un método que se fundamenta en medir la viscosidad que se desarrolla con la hidratación y posterior gelatinización de los gránulos de almidón en una muestra (Cozzolino, 2016). RVA es sensible a las diferencias en la dureza del endospermo del grano de maíz con las ventajas del tamaño pequeño de la muestra y el corto tiempo de prueba (Almeida-Dominguez y col., 1997; Guelpa y col., 2015). Un resultado de alrededor de 700 unidades RVA indica que el grano es suave, mientras que aproximadamente 400 unidades RVA indican que el grano es duro (Fox y Manley, 2009:5652).

### 2.1.5 Resistencia al quebrado

La prueba de punción, perforación o compresión es una prueba mecánica que se relaciona positivamente con el porcentaje de endospermo vítreo que contenga el grano. El EV presenta gránulos de almidón altamente compactados y con mayor cantidad de entidades proteicas rodeando al gránulo de almidón, lo cual le confiere una mayor resistencia a la ruptura (Aragón-Cuevas y col., 2012; Gaytán-Martínez y col., 2006).

En este método se mide la fuerza aplicada al grano para lograr su ruptura, para lo cual se emplea un instrumento de medición llamado texturómetro, al cual se le adapta una sonda que será la que penetre el grano en el lado opuesto al germen, en la parte central del endospermo (Blandino y col., 2010; Gaytán-Martínez y col., 2006; Narváez-González y col., 2006; Sánchez y col., 2004)

### 2.1.6 Desempeño en la molienda

Los métodos que se basan en el desempeño de la molienda para determinar la dureza del grano de maíz son: el método TADD por sus siglas en inglés (Tangential Abrasion Dehulling Device), el método Stenvert y el índice de tamaño de partícula o PSI por sus siglas en inglés (*Particle Size Index*). En los dos primeros intervienen fundamentalmente dos factores, el tiempo de la molienda (TM) y la cantidad de material removido (MR), ya sea conservando fija la variable tiempo de molienda (método TADD) o conservando fija la variable material removido (método Stenvert).

#### a) Método TADD

En el método TADD, los granos de maíz son desgastados por un tiempo establecido y posteriormente se calcula la cantidad de material removido del grano. Alta cantidad de material removido (70%) representa que el grano es suave y baja (20%) que es duro. El resultado de esta prueba es para una muestra compuesta por varios granos, así que, no es capaz de diferenciar la dureza entre los granos individualmente (Fox y Manley, 2009:5652).

#### b) Método Stenvert

Este método fue desarrollado por Stenvert en 1974, durante las décadas de los 80s y 90s se reportan

artículos relevantes que midieron la dureza de granos de maíz utilizando el método Stenvert (Li y col., 1996; Mestres y col., 1995; Pomeranz y Czuchajowska, 1985:213-219; Pomeranz, y col., 1986). El fundamento del método Stenvert se basa en contabilizar el tiempo de molienda que se emplea para la obtención de 100 g de material molido. Tiempos de molienda de 10 segundos (o menos) son característicos de granos suaves, en tanto que, granos duros presentan tiempo de molienda de 20 segundos o más (Fox & Manley, 2009:5651).

#### c) Índice de tamaño de partícula

El índice de tamaño de partícula (PSI) es un método destructivo para medir indirectamente la dureza del grano de maíz. Su auge como método para la medición de la dureza del grano fue entre 1980 y 1990 (Abdelrahman y Hosene, 1984; Pomeranz y col., 1984; Wu, 1992) El PSI se determina moliendo 20 gramos de grano de maíz con un micro molino de martillos y se tamizan a través de mallas de diferente apertura, para relacionar el tamaño de partícula con la dureza del maíz, esto debido a la resistencia de los granos de maíz más duros a la molienda, por lo que se espera que las partículas molidas tengan un mayor tamaño, a diferencia de los granos suaves cuyo tamaño será menor pues presentan menor resistencia a la molienda. Las partículas >150  $\mu\text{m}$ , representaron al maíz duro, mientras que, las <150  $\mu\text{m}$  al maíz suave (Blandino y col., 2010; Fox y Manley, 2009:5651; Guelpa y col., 2015).

Mediante PSI se obtiene la relación molienda gruesa: molienda fina, donde un mayor valor se relaciona con granos duros. La molienda gruesa (C) son las partículas obtenidas de 700 a 2000  $\mu\text{m}$  y la molienda fina (F) son <500  $\mu\text{m}$  (Guelpa y col., 2015).

### 2.2 Métodos de procesamiento de imágenes

Los métodos de procesamiento de imágenes (PI) involucran la obtención de imágenes de granos de maíz para la determinación de su dureza. Entre los métodos de PI se encuentran: la tomografía micro computarizada de rayos X (CT), la imagen hiperespectral en infrarrojo cercano (IH-NIR) y visión de máquina (escáner).

La medición de la dureza del grano se basa en la identificación y medición de la región comprendida por el

endospermo vítreo y el endospermo harinoso (Blandino y col., 2010; Guelpa y col., 2016; McGoverin y Manley, 2012:530 ; Williams y col., 2009; Williams y Kucheryavskiy, 2016:131-137). Las diferencias entre ambos tipos de endospermos se deben principalmente al arreglo microestructural de los gránulos de almidón; para determinar las características microestructurales se ha utilizado microscopía electrónica de barrido (SEM) (Barrera y col., 2013; Narváez-González y col., 2007; Narváez-González y col., 2006).

#### a) Tomografía microcomputarizada de Rayos X

La tomografía microcomputarizada de rayos X es una técnica no destructiva con la cual se generan imágenes del grano en 3D, para obtener el volumen del total del grano, volumen del endospermo harinoso y vítreo, endospermo vítreo: endospermo harinoso para cada grano de maíz de forma individual (Guelpa y col., 2016).

La ventaja de tomografía microcomputarizada de rayos X para la medición de la densidad del grano, en comparación con otras técnicas como el índice de flotación o el peso hectolítrico, es que proporciona una medida real de la densidad ya que no considera espacios de aire dentro del grano, estos espacios se nombraron % huecos y % porosidad (Guelpa y col., 2015; Guelpa y col., 2016; Gustin y col., 2013).

Algunas desventajas de este método son el elevado tiempo para la adquisición de las imágenes, el costo de análisis, daño por radiación al grano y que se requiere un técnico experimentado para la reconstrucción del grano en 3D (Guelpa y col., 2015; Guelpa y col., 2016; Gustin y col., 2013). Para resolver el problema del tiempo del análisis, surgió la tomografía microcomputarizada de rayos X de alto rendimiento donde se pueden adquirir imágenes de 150 maíces simultáneamente, disminuyendo el tiempo en una relación de 3 minutos (alto rendimiento) vs 13 minutos por el método convencional (Guelpa y col., 2016).

#### b) Imagen hiperespectral infrarrojo cercano

La técnica espectroscópica llamada imagen hiperespectral infrarrojo cercano (IH-NIR) se refiere a la adquisición de imágenes en diferentes bandas en la región del espectro electromagnético infrarrojo cercano (900-1700 nm)(Williams y col., 2009), la información obtenida de la imagen está organizada en una matriz de dos ejes, coordenadas de los píxeles (x, y) que corresponden a la dimensión espacial y un tercer eje (z) representa la dimensión espectral (longitudes de onda), lo que genera una imagen en 3D denominada hipercubo (Manley, 2014:8203; Ravikanth y col., 2017). A cada píxel dentro de la imagen hiperespectral le corresponde un espectro en particular, que es diferente al espectro de los píxeles vecinos. Para el análisis de los datos se utilizan herramientas de análisis multivariado debido a la cantidad de información obtenida del hipercubo (Manley, 2014: 8203).

#### c) Escáner

El método consiste en lijar el grano de maíz para obtener una vista transversal del endospermo vítreo y harinoso, las imágenes se digitalizan utilizando un escáner y se transforman en imágenes en escala de grises, finalmente se mide, en la imagen, el área del endospermo vítreo, harinoso y relación endospermo vítreo/ endospermo harinoso (Blandino y col., 2010; Leyva Ovalle y col., 2002).

Una desventaja de este método es que no es práctico al analizar un número elevado de muestras por el tiempo que consume el lijado del grano, en contraparte presenta ventajas en el costo y disponibilidad del equipo (Blandino y col., 2010).

#### d) Microscopía electrónica de barrido

Utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) se obtienen algunos parámetros cualitativos, como el grado de compactación del gránulo de almidón (esférico, achatado, poligonal) y cuantitativos como el tamaño del gránulo de almidón (TGA). En el endo-

spermo vítreo los gránulos de almidón se caracterizan por su forma poligonal debido a que se encuentran altamente compactados, con una matriz proteica continua, mientras que, en el endospermo harinoso los gránulos de almidón se encuentran en forma esférica, menos compactados y la matriz proteica es muy delgada o ausente [ Roman y col., 2017; Guelpa y col., 2016; Guelpa y col., 2015; Narváez-González y col., 2006; Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010].

Narváez-González y col. (2006) concluyeron que el grado de compactación de los gránulos de almidón en los endospermos fue la principal característica asociada con características físicas del grano. Gránulos de almidón altamente compactados se relacionan con mayor contenido de proteína y de endospermo vítreo, además de presentar un bajo contenido de amilosa y de humedad [Gaytán-Martínez y col., 2006:137, Narváez-González y col., 2006]. Los granos duros presentaron una alta compactación del gránulo de almidón, forma poligonal y TGA <10 micrómetros, mientras que, los granos suaves presentaron menor grado de compactación del gránulo de almidón, forma esférica y TGA > 10 micrómetros [Narváez-González y col., 2006].

### 2.3 Métodos químicos

Químicamente el grano de maíz está constituido principalmente por carbohidratos (almidón, fibra), proteína y grasa. En mayor proporción se encuentran el almidón (72.4%) y las proteínas (9.6%)[Aragón Cuevas y col., 2012]. El almidón está compuesto por dos polímeros: amilosa y amilopectina, en proporción 25:75 aproximadamente. Sin embargo, existen variantes genéticamente modificadas, donde esta relación no se cumple [Fox y Manley, 2009:5649].

La influencia del contenido de amilosa y amilopectina en la dureza del grano de maíz ha sido obje-

to de diferentes estudios, coincidiendo en que granos de maíz duros presentan mayor contenido de amilosa respecto a granos suaves [Blandino y col., 2010; Santiago-Ramos y col., 2017]. Esto debido a que a mayor cantidad de amilosa indica una mayor compactación de los gránulos de almidón en el endospermo vítreo, en tanto que, cuando existe mayor cantidad de amilopectina, se observa un menor grado de compactación del gránulo de almidón lo que ocurre en el endospermo harinoso [Blandino y col., 2010; Dombink-Kurtzman y Knutson, 1997:776].

El contenido de proteína está relacionado con la dureza del grano de maíz [Fox y Manley, 2009:5648; Lee y col., 2006], diferentes investigaciones coinciden en que los granos con mayor dureza presentan mayor contenido de proteína en relación a los granos suaves, debido a que existe una mayor cantidad de cuerpos proteicos alrededor de los gránulos del endospermo vítreo que en los del endospermo suave [Blandino y col., 2010; Lee y col., 2006; Narváez-González y col., 2006; Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010:8].

Las proteínas presentes en el endospermo del maíz se denominan zeínas, y se encuentran principalmente en la superficie de los gránulos de almidón [Fox y Manley, 2009:5648 ; Gerde y col., 2016]. Por su masa molecular, las zeínas se dividen en  $\alpha$ (19-22 kDa),  $\beta$ (15kDa) y  $\gamma$ (16-27 kDa). El tipo de zeínas se ha correlacionado con la dureza del grano de maíz, con altos niveles de  $\alpha$ -zeína en el endospermo vítreo y bajos en el endospermo harinoso.

## 3. Principales métodos para la determinación de dureza

En la Tabla 2 se muestra un comparativo entre las principales características de los diferentes métodos descritos en la sección anterior.

Tabla 2. Características de los métodos para la determinación de dureza [elaboración propia]

Método	Equipamiento necesario	Tiempo de análisis	Experiencia Analista	Tamaño de muestra	Referencias
<b>Pruebas flotación</b>	Balanza analítica	A	2	100 granos	NMX-FF-034/2-SCFI, 2003; Aragón Cuevas y col., 2012
<b>PH</b>	Balanza	A	1	1000 gramos	NMX-FF-034/2-SCFI, 2003
<b>CT</b>	Tomógrafo de rayos X	B	3	1 grano por análisis	Guelpa y col., 2016
<b>IH-NIR</b>	Cámara hiperespectral NIR	B	3	1 grano por análisis	Williams y col., 2009; Williams y Kucheryavskiy, 2016
<b>SEM</b>	Microscopio electrónico de barrido	A	2	1 grano por análisis	Narváez-González y col., 2007
<b>CGD</b>	Horno de secado	C	2	5 gramos	Aragón-Cuevas y col., 2012
<b>PMG</b>	Balanza semianalítica	A	1	100 granos	
<b>DG</b>	Vernier	A	1	1 grano por análisis	
<b>Proteína</b>	a) Con equipo Micro-Kjeldahl	a) C	2	a) 1-2 gramos	Lee y col., 2005; Narváez-González y col., 2006; Blandino y col., 2010
	b) Con espectrómetro NIR	b) A		b) 50 gramos	
<b>Amilosa</b>	Kit de ensayo amilosa/amilopectina Megazyme	C	2	1 gramo	Blandino y col., 2010
<b>AT</b>	Analizador de textura TA-TX2	A	2	1 grano por análisis	Aragón Cuevas y col., 2012
<b>TADD</b>	Dispositivo TADD	A	2	300 gramos	Lee y col., 2005
<b>Stenvert</b>	Molino de martillos a escala	A	2	20 gramos	Blandino y col., 2010
<b>RVA</b>	Analizador de viscosidad [RVA]	A-B	2	3 gramos	Guelpa y col., 2015
<b>PSI</b>	Molino, Rotab y balanza	A	2	20 gramos	Blandino y col., 2010
<b>Escáner</b>	Escáner	A	3	1 grano	

**Tiempo de análisis:** A: menos de 30 min, B: 30min-60min, C: más de 60 minutos; ND: no destructivo, D: destructivo; Niveles de experiencia 1: sin experiencia; 2: con experiencia previa, 3: Experto.

#### 4. Correlación entre los métodos para la determinación de dureza

En la Tabla 3 se observan los resultados de correlación entre las variables que describen la dureza del grano de maíz y los métodos empleados para la obtención de las mismas, [dichos resultados fueron obtenidos por diferentes autores, los cuales se referencian con los números dentro de los cuadros de la Tabla 3. Se observa que se correlacionan positivamente las variables peso

hectolítrico, fuerza de ruptura, contenido de proteína, endospermo vítreo, endospermo vítreo: endospermo harinoso, molienda gruesa: molienda fina, tiempo de molienda, TADD, grosor del grano, y a su vez, todas estas variables incrementan conforme aumenta la dureza del grano de maíz.

Por otro lado, las variables que se correlacionan negativamente con la dureza (y con las variables relacionadas con la dureza) fueron porcentaje de gra-

nos flotantes, contenido de almidón y germen. Algunas variables no mostraron ser concluyentes al ser comparadas con variables que se correlacionaron po-

sitivamente y negativamente con la dureza, entre estas se encontraron el ancho, peso de mil granos, pericarpio (%), largo del grano y el contenido de amilosa.

Tabla 3. Correlación entre métodos de determinación de dureza

	Metodo	Químicas		Procesamiento de imagenes				Físicas										
		Contenido de proteína	Contenido de almidón	Contenido de amilosa	Tamaño de gránulo de almidón	Grosor de pericarpio	Escáner (EV/EH)	IH-NIR (EV/EH)	Índice de flotación	Peso hectolítrico	Fuerza de ruptura	Germen (%)	Pericarpio (%)	Endospermo (%)	Peso de mil granos	Molienda gruesa: molienda fina	Tiempo de molienda	Ancho del grano
Químicas	Contenido de almidón	3																
	Contenido de amilosa	3	3															
Procesamiento de imagenes	Tamaño de gránulo de almidón	13																
	Grosor de pericarpio	12		12														
	Endospermo vítro (CT)	7					8											
Físicas	Índice de flotación	3 4 5 12	3	12 3														
	Peso hectolítrico	7 4 3 10	3	3			7	5 3 4 1										
	Fuerza de ruptura del grano	3 12	3	12	13			6 2 3	3									
	Germen (%)	5		12				2 5 6		6								
	Pericarpio (%)	12						6 2 5 12		2 6	4 12							
	Endospermo (%)			12		12	11	2 6		6	4 2 12	4 2 12						
	Peso de mil granos	12 7		12			7	12	3 7	2 12		12	12					
	Molienda gruesa/fina	3 4		3			3	7	3 4 4 3	7 9	3			7 3				
	Material removido (TADD)	9								9								
	Tiempo de molienda	3 10		3			3		3	3 9	3				3			
	Longitud del grano						3		3	3	3	2		2	2	3	3	
	Ancho del grano								2		2			2	3	3		
	Grosor del grano	3	3	3			3			3	3		2	2	2	3	3	2

Código de colores

Positivo

- 0,9 a 0,99: Muy alto
- 0,7 a 0,89: Alto
- 0,4 a 0,69: Moderada
- 0,2 a 0,39: Baja

Negativo

- 0,9 a -0,99: Muy alto
- 0,7 a -0,89: Alto
- 0,4 a -0,69: Moderada
- 0,2 a -0,39: Baja

Elaboración propia a partir de los resultados reportados por: 1: Abdala y col., 2017; 2: Aragón Cuevas y col., 2012; 3: Blandino y col., 2010; 4: Blandino y col., 2013; 5: Carrillo y col., 2010; 6: Gaytán-Martínez y col., 2006; 7: Guelpa y col., 2015; 8: Guelpa y col., 2016; 9: Lee y col., 2005; 10: Lee y col., 2006; 11: McGoverin y Manley, 2012; 12: Narváez-González y col., 2006; 13: Narváez-González y col., 2007.

## 4. Conclusiones

A la fecha no existe un método único para la medición de la dureza del grano de maíz. La elección del método dependerá de los recursos disponibles como son: equipamiento, tiempo de análisis y la experiencia del analista. Sin embargo, de acuerdo a la literatura revisada se observa que los resultados obtenidos por IH-NIR, Escáner, TADD, PSI, tiempo de molienda, contenido de proteína, pruebas de flotación y peso hectolítrico presentan correlaciones de moderadas a altas entre sí, lo que indica su consistencia para la medición de la dureza en diferentes variedades de granos de maíz, por lo cual se recomienda la elección de estos métodos por sobre los otros.

De acuerdo a la literatura revisada los métodos que más se emplean son peso hectolitrico, índice de flotación, contenido de proteína e índice de tamaño de partícula, lo cual se debe principalmente a la simplicidad y/o disponibilidad del equipamiento necesario para su análisis. El procesamiento de imágenes se ha usado con el objetivo de disminuir costos, por la simplicidad del análisis y aumentar su exactitud. En contra parte, la tomografía micro computarizada de rayos X que emplea tecnología de reciente aplicación para el área del análisis del grano de maíz, por tal motivo, los pocos datos referidos en el presente trabajo de investigación, además de que la falta de investigación al respecto podría obedecer a que no se tiene disponibilidad del equipo o del analista experto, lo que hace que los investigadores prefieran otro método.

## Referencias bibliográficas

- Abdelrahman, A.A., Hosney, R. C. [1984]. Basis for hardness in sorghum and maize Chemical. *American Association of Cereal Chemist*.
- Almeida-Dominguez, HD., Suhendro, E. L., & Rooney, L. W. [1997]. Factors Affecting Rapid Visco Analyser Curves for the Determination of Maize Kernel Hardness, 25, 93-102.
- Aragón Cuevas, F., Dios, J. De, Cárdenas, F., Zarate, M. F., & Gaytán, M. [2012]. *Calidad Industrial de Maíces Nativos de la Sierra Sur de Oaxaca*. Oaxaca, México.
- Barrera, G. N., Calderón-Domínguez, G., Chanona-Pérez, J., Gutiérrez-López, G. F., León, A. E., & Ribotta, P. D. [2013]. Evaluation of the mechanical damage on wheat starch granules by SEM, ESEM, AFM and texture image analysis. *Carbohydrate Polymers*, 98(2), 1449-1457. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.056>
- Blandino, M., Mancini, M. C., Peila, A., Rolle, L., Vanara, F., & Reyneri, A. [2010]. Determination of maize kernel hardness: comparison of different laboratory tests to predict dry-milling performance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(March), 1870-1878. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4027>
- Blandino, M., Sacco, D., & Reyneri, A. [2013]. Prediction of the dry-milling performance of maize hybrids through hardness-associated properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(6), 1356-1364. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5897>
- Carrillo, M. G. V., Camarillo, J. P. P., Casillas, J. M. H., De La Luz Marrufo Diaz, M., & Ruiz, E. M. [2010]. Calidad de grano y de tortillas de maíces criollos del altiplano y valle del mezquital, México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 33(4), 49-56.
- Cozzolino, D. [2016]. The use of the rapid visco analyser (RVA) in breeding and selection of cereals. *Journal of Cereal Science*, 70, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.07.003>
- Dombrink-Kurtzman, M. A., & Knutson, C. A. [1997]. A Study of Maize Endosperm Hardness in Relation to Amylose Content and Susceptibility to Damage. *Cereal Chemistry Journal*, 74(6), 776-780. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.6.776>
- Estadísticas FAO. [2017]. FAOSTAT. Retrieved May 31, 2019, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fox, G., & Manley, M. [2009]. Hardness methods for testing maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(13), 5647-5657. <https://doi.org/10.1021/jf900623>
- Gaytán-Martínez, A. C., Figueroa-Cárdenas, M. ;, Reyes-Vega, J. D. ;, Rincón-Sánchez, M. L. ;, & Morales-Sánchez, F. ; [2006]. Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 29(2), 135-139. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61009823>
- Gaytán-Martínez, M., Figueroa-Cárdenas, J. D., Reyes-Vega, M. L., Morales-Sánchez, E., & Rincón-Sánchez, F. [2013]. Maize landraces selection for industrial end-use based on their added

- value. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(SUPPL.3), 339-346.
- Gerde, J. A., Tamagno, S., Di Paola, J. C., & Borrás, L. (2016). Genotype and nitrogen effects over maize kernel hardness and endosperm zein profiles. *Crop Science*, 56(3), 1225-1233. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.08.0526>
- Guelpa, A., Bevilacqua, M., Marini, F., O'Kennedy, K., Geladi, P., & Manley, M. (2015). Application of Rapid Visco Analyser (RVA) viscograms and chemometrics for maize hardness characterisation. *Food Chemistry*, 173, 1220-1227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.149>
- Guelpa, A., du Plessis, A., Kidd, M., & Manley, M. (n.d.). Non-destructive Estimation of Maize (*Zea mays* L.) Kernel Hardness by Means of an X-ray Micro-computed Tomography ( $\mu$ CT) Density Calibration. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1419-1429. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1502-3>
- Guelpa, A., du Plessis, A., & Manley, M. (2016). A high-throughput X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT) approach for measuring single kernel maize (*Zea mays* L.) volumes and densities. *Journal of Cereal Science*, 69, 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.009>
- Gustin, J. L., Jackson, S., Williams, C., Patel, A., Armstrong, P., Peter, G. F., & Settles, A. M. (2013). Analysis of Maize (*Zea mays*) Kernel Density and Volume Using Microcomputed Tomography and Single-Kernel Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(46), 10872-10880. <https://doi.org/10.1021/jf403790v>
- ISO5527. (2015). ISO 5527:2015. Retrieved January 23, 2018, from <https://www.iso.org/standard/50933.html>
- Lee, K.-M., Herrman, T. J., Lingenfelter, J., & Jackson, D. S. (2005). Classification and prediction of maize hardness-associated properties using multivariate statistical analyses. *Journal of Cereal Science*, 41(1), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.09.006>
- Lee, K. M., Bean, S. R., Alavi, S., Timothy J. Herrman, A., & Waniska, R. D. (2006). Physical and Biochemical Properties of Maize Hardness and Extrudates of Selected Hybrids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (54), 4260-4269. <https://doi.org/10.1021/JF053101V>
- Lee, K. M., Herrman, T. J., Lingenfelter, J., & Jackson, D. S. (2005). Classification and prediction of maize hardness-associated properties using multivariate statistical analyses. *Journal of Cereal Science*, 41(1), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.09.006>
- Leyva Ovalle, A., Raúl, O., Carballo, C., Contreras, M., Apolinar, J., Carrillo, V., ... Gricelda Vázquez Carrillo, M. (2002). Procesamiento digital de imágenes para la estimación de textura de endospermo en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25(254), 355-365. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61025404>
- Li, P. X. P., Hardacre, A. K., Campanella, O. H., & Kirkpatrick, K. J. (1996). *Cereal chemistry*. Cereal Chemistry (USA). Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9700300>
- Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chem. Soc. Rev.*, 43(24), 8200-8214. <https://doi.org/10.1039/C4CS00062E>
- McGoverin, C., & Manley, M. (2012). Classification of maize kernel hardness using near infrared hyperspectral imaging. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(5), 529. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1018>
- Mestres, C., Matencio, F., & Louis Alexandre, A. (1995). Mechanical behavior of corn kernels: development of a laboratory friability test that can predict milling behavior. *Cereal Chemistry*, 72(6), 652-657. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search/display.do?f=1997/US/US97293.xm-;US9629681>
- Narváez-González, E. D., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., & Taba, S. (2007). Microestructural features and possible end uses of maize according to its geographic origin | Aspectos microestructurales y posibles usos del maíz de acuerdo con su origen geográfico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 321-325.
- Narváez-González, E. D., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., Taba, S., & Sánchez, F. R. (2006). Kernel microstructure of Latin American races of maize and their thermal and rheological properties. *Cereal Chemistry*, 83(6), 605-610. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0605>
- Narváez-González, E. D., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., Taba, S., Tostado, E. C., Peniche, R. Á. M., & Sánchez,

- F. R. (2006). Relationships between the microstructure, physical features, and chemical composition of different maize accessions from Latin America. *Cereal Chemistry*, 83(6), 595–604. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0595>
- NMX-FF-034/2-SCFI. NMX-FF-034/2-SCFI-2003 Norma Oficial Mexicana. Productos alimenticios no industrializados- Para uso humano- Cereales- Maíz amarillo para elaboración de almidones y derivados- Especificaciones y métodos de prueba (2003). Mexico: Secretaria de Economía.
- Pomeranz, Y., Martin, C.R., Traylor, D. D. (1984). Corn hardness determination. *American Association of Cereal Chemist*.
- Pomeranz, Y., & Czuchajowska, Z. (1985). Structure of Coarse and Fine Fractions of Corn Samples Ground on the Stenvert Hardness Tester, 4(2).
- Pratt, R. C., Paulis, J. W., Miller, K., Nelsen, T., & Bietz, J. A. (1991). Association of Zein Classes with Maize Kernel Hardness !
- Ravikanth, L., Jayas, D. S., White, N. D. G., Fields, P. G., & Sun, D.-W. (2017). Extraction of Spectral Information from Hyperspectral Data and Application of Hyperspectral Imaging for Food and Agricultural Products. *Food and Bioprocess Technology*, 10(1), 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1817-8>
- Salinas-Moreno, Y., & Aguilar-Modesto, L. (2010). Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2(1), 5–11. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2010.08.009>
- Sánchez, M., Araceli, R., Cárdenas, F., Dios, J. De, Vega, R., Luz, M. De, ... Mendoza, A. (2004). Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(3), 213–222.
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Véles-Medina, J. J., & Mariscal-Moreno, R. M. (2017). Changes in the thermal and structural properties of maize starch during nixtamalization and tortilla-making processes as affected by grain hardness. *Journal of Cereal Science*, 74, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.01.018>
- Siska, J.; Hurburgh, C. R. (1992). Corn density measurement by near-infrared transmittance, (Infratec 1225).
- Wang, L., Sun, D. W., Pu, H., & Zhu, Z. (2015). Application of Hyperspectral Imaging to Discriminate the Variety of Maize Seeds. *Food Analytical Methods*, 225–234. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0160-4>
- Williams, P., Geladi, P., Fox, G., & Manley, M. (2009). Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Analytica Chimica Acta*, 653(2), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.09.005>
- Williams, P. J., & Kucheryavskiy, S. (2016). Classification of maize kernels using NIR hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 209, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.044>
- Wu, Y. V. (1992). Corn Hardness as Related to Yield and Particle Size of Fractions from a Micro Hammer-Cutter Mill. *Cereal Chemistry*, 69(3), 343–347.

