



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y
VISCOELÁSTICAS DE GRANOS DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.),
CENTENO (*Secale cereale* L.) Y TRITICALE (X *Triticosecale* Wittmack)”**

TESIS

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

PRESENTA:

ROXANA VILCHIS VELÁZQUEZ

(N° DE CUENTA:0945060, 40ava. Generación)

MODALIDAD: TESIS INDIVIDUAL

ASESOR:

DR. NÉSTOR PONCE GARCÍA



**CAMPUS UNIVERSITARIO “EL CERRILLO”, EL CERRILLO
PIEDRAS BLANCAS, MUNICIPIO DE TOLUCA, MEX.**

NOVIEMBRE DE 2019

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
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. Generalidades sobre los granos cereales.....	6
5.1.1. Importancia.....	6
5.1.2. Morfología y estructura del grano maduro.....	7
5.1.2.1. Grano de trigo.....	12

5.1.2.2. Grano de centeno.....	13
5.1.2.3. Grano de triticale.....	14
5.2. Relación: Trigo-centeno-triticale.....	15
5.3. Composición química del grano.....	17
5.4. Propiedades físicas de los granos cereales.....	19
5.4.1. Principales formas del grano.....	20
5.4.2. Color.....	21
5.4.3. Apariencia.....	21
5.4.3.1. Dimensiones axiales.....	22
5.4.3.2. Relación ancho-largo (R_{AL}).....	23
5.4.4. Propiedades geométricas.....	23
5.4.4.1. Diámetro geométrico (D_g) y diámetro aritmético (D_a).....	24
5.4.4.2. Superficie de área (S).....	24
5.4.4.3. Esfericidad (ϕ).....	25
5.4.5. Propiedades de peso, volumen y densidad.....	26
5.4.5.1. Peso individual del grano (PIG).....	26
5.4.5.2. Peso de 1,000 granos (PMG).....	26

5.4.5.3. Volumen elipsoidal (V_e).....	27
5.4.5.4. Densidad aparente (ρ_b).....	28
5.4.5.5. Densidad real (ρ_r).....	28
5.4.5.6. Porosidad en volumen (\mathcal{E}_v).....	29
5.4.6. Propiedades mecánicas.....	30
5.4.6.1. Fuerza máxima (F_{max}).....	30
5.4.6.2. Dureza (D).....	30
5.5. Reología y viscoelasticidad.....	33
5.5.1. Generalidades.....	33
5.5.2. Conceptos reológicos fundamentales.....	34
5.5.3 Compresión uniaxial.....	36
5.5.4. Propiedades reológicas y viscoelásticas en granos cereales.....	38
5.5.4.1. Módulo elástico o módulo de Young (E).....	43
5.5.4.2. Trabajo total (W_t), trabajo elástico (W_e) y trabajo plástico (W_p).....	44
5.5.4.3. Grado de elasticidad (GE)	45
5.5.4.4. Resilencia (Res).....	46
5.5.5. Influencia del contenido de humedad del grano sobre sus propiedades físicas y viscoelásticas	47

VI. MATERIALES Y MÉTODOS	49
6.1. Consideraciones generales.....	49
6.2. Ubicación del sitio experimental.....	50
6.3. Material biológico.....	50
6.4. Determinación del contenido de humedad y acondicionamiento de los granos.....	50
6.5. Caracterización de las propiedades físicas.....	51
6.5.1. Apariencia.....	51
6.5.1.1. Dimensiones axiales.....	51
6.5.1.2. Relación ancho-largo (R_{AL}).....	52
6.5.2. Propiedades geométricas.....	52
6.5.2.1. Diámetro geométrico (D_g) y diámetro aritmético (D_a).....	52
6.5.2.2. Superficie de área de grano (S).....	53
6.5.2.3. Esfericidad (ϕ).	53
6.5.3. Propiedades de peso, volumen y densidad	53
6.5.3.1. Peso individual de grano (PIG).....	53
6.5.3.2. Peso de mil granos (PMG).....	53
6.5.3.3. Volumen elipsoidal (V_e).....	53

6.5.3.4. Densidad aparente en volumen (ρ_b)	54
6.5.3.5. Densidad real (ρ_t)	54
6.5.3.6. Porosidad en volumen (ϵ_v)	54
6.5.4. Propiedades mecánicas	55
6.5.4.1. Fuerza máxima (F_{max}) a 5% de deformación	55
6.5.4.2. Dureza (D)	55
6.6. Caracterización de las propiedades viscoelásticas	56
6.6.1. Módulo de elasticidad o módulo de Young (E)	56
6.6.2. Trabajo total (W_t), elástico (W_e) y plástico (W_p)	57
6.6.3. Grado de elasticidad (GE)	58
6.6.4. Resiliencia (Res)	58
6.7. Diseño y análisis estadístico	58
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
7.1. Caracterización de las propiedades físicas de los granos	59
7.1.1. Características de apariencia	59
7.1.2. Propiedades geométricas	63
7.1.3. Propiedades de peso, volumen y densidad	67

7.1.4. Propiedades mecánicas.....	72
7.2. Caracterización de las propiedades viscoelásticas de los granos.....	74
7.3. Correlaciones simples.....	82
VIII. CONCLUSIONES.....	85
IX. REFERENCIAS CONSULTADAS.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
CUADRO 1. Comparativo de las propiedades funcionales del centeno y triticale, respecto al trigo.....	16
CUADRO 2. Composición química proximal de granos de trigo, centeno y triticale.....	17
CUADRO 3. Valores medios de las propiedades físicas de apariencia (L , A , G y R_{AL}) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.....	61
CUADRO 4. Valores medios de las propiedades geométricas (D_g , D_a , S y ϕ) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.....	65
CUADRO 5. Valores medios de las propiedades físicas de peso (PIG y PMG), volumen (V_e) y densidad (ρ_b , ρ_t y \mathcal{E}_v) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.....	68
CUADRO 6. Valores medios de las propiedades mecánicas (F_{max} y D) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad	73
CUADRO 7. Valores medios de las propiedades viscoelásticas (W_t , W_e , W_p , GE y Res) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.....	76
CUADRO 8. Correlaciones simples de Pearson entre las propiedades físicas y viscoelásticas de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad.....	82

CUADRO 9. Correlaciones simples de Pearson entre las distintas categorías físicas de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad.....84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Disposición de glumas y sus componentes en grano de trigo.....	8
FIGURA 2. Estructura subcelular general de un grano cereal seccionado.....	9
FIGURA 3. Estructura anatómica de un grano de trigo seccionado.....	13
FIGURA 4. Partes anatómicas de un grano de centeno. Secciones longitudinal (a) y transversal (b)	14
FIGURA 5. Partes anatómicas de un grano de centeno. Sección transversal.....	15
FIGURA 6. Representación estructural de la distribución de los principales componentes químicos en un grano cereal (avena).....	18
FIGURA 7. Principales formas de los granos cereales.....	20
FIGURA 8. Dimensiones axiales en grano. (a) Longitud y grosor. (b) Ancho.....	22
FIGURA 9. Representación esquemática de la compresión uniaxial sobre un grano cereal.....	37
FIGURA 10. Modelos mecánicos viscoelásticos.....	40
FIGURA 11. Representación esquemática de un ciclo de compresión (respuesta viscoelástica) durante un ciclo de carga y descarga.....	45
FIGURA 12. Curva fuerza-tiempo obtenida del Analizador de Textura Universal TA-XT2 en la que se identifican las áreas consideradas para el cálculo de la Resiliencia.....	47

FIGURA 13. Diagrama de flujo general del desarrollo de la investigación.....	49
FIGURA 14. (a). Analizador de textura Universal TA-XT2 con sonda SMSP/2. (b) Posición del grano sobre la plataforma para determinar dureza.....	55
FIGURA 15. (a) Grano con tinta sobre papel antes de la compresión. (b) Impresión (ampliada) sobre el papel, posterior a la compresión.....	57
FIGURA 16. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades de apariencia (L , A , G y R_{AL}).....	61
FIGURA 17. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades geométricas (D_g , D_a , S y ϕ).....	65
FIGURA 18. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades de peso (PIG y PMG), volumen (V_e) y densidad (ρ_b , ρ_t y \mathcal{E}_v).....	68
FIGURA 19. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades mecánicas (F_{max} y D).....	73
FIGURA 20. Curvas promedio del comportamiento viscoelástico (W_b , W_e , W_p) de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad.	79

FIGURA 21. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio del grado de elasticidad (*GE*) y resiliencia (*Res*).81

RESUMEN

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y VISCOELÁSTICAS DE GRANOS DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.), CENTENO (*Secale cereale* L.) Y TRITICALE (X *Triticosecale* Wittmack)

Roxana Vilchis Velázquez. Ingeniera Agrónoma Industrial
Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas

Asesor: Dr. Nestor Ponce García¹

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Estado de México, México. 50200. Tel. 2-96-55-29 y 2-96-55-31. Ext. 191. ✉ nponceg@uaemex.mx

La evaluación de la calidad de los granos cereales se relaciona inicialmente con sus características físicas y químicas, sin embargo, la determinación de sus propiedades viscoelásticas complementa y favorece un proceso de clasificación más selectivo y objetivo. El trigo (*Triticum aestivum* L.), centeno (*Secale cereale* L.) y triticale (X *Triticosecale* Wittmack) son tres cereales que tienen una amplia relación entre sí, debido a que el último es el resultado de la cruce de los dos primeros. En este contexto, los objetivos de este estudio fueron evaluar las propiedades físicas y viscoelásticas (determinadas por compresión uniaxial a baja deformación) de granos de trigo, centeno y triticale en función de su contenido de humedad (12% y 16%), así como identificar las posibles correlaciones existentes entre ambos tipos de propiedades. Los resultados indicaron que tanto el contenido de humedad como el tipo de grano tuvieron un efecto altamente significativo sobre la mayoría de las características evaluadas. De manera general, el incremento del contenido de humedad de los granos originó que los valores medios de algunas propiedades físicas (apariencia y geométricas) aumentaran. Por el contrario, los valores medios de las propiedades viscoelásticas y otras físicas (mecánicas), disminuyeron significativamente. Se identificaron diversas correlaciones altamente significativas entre las propiedades físicas y viscoelásticas, destacando entre otras las inversamente proporcionales (negativas) que tuvo el módulo de elasticidad (propiedad viscoelástica) en relación con varias propiedades físicas, así como las registradas entre el diámetro aritmético y el volumen elipsoidal (propiedades físicas), respecto a diversas viscoelásticas.

Palabras clave: granos cereales, propiedades físicas, compresión uniaxial, viscoelasticidad

ABSTRACT

EVALUATION OF PHYSICAL AND VISCOELASTIC PROPERTIES OF WHEAT (*Triticum aestivum* L.), RYE (*Secale cereale* L.), AND TRITICALE (X *Triticosecale* Wittmack) GRAINS

Roxana Vilchis Velázquez. Ingeniera Agrónoma Industrial
Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas

Asesor: Dr. Nestor Ponce García¹

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Estado de México, México. 50200. Tel.2-96-55-29 y 2-96-55-31. Ext 191. ✉ nponceg@uaemex.mx

The physical and chemical properties of cereal grains are initially related to their quality evaluation; nevertheless, the determination of its viscoelastic properties complements and favors classification processes that are more selective and objective. Wheat (*Triticum aestivum* L.), rye (*Secale cereale* L.), and triticale (X *Triticosecale* Wittmack) are three kinds of cereal that are significantly related to them since the last one is the result of the cross of the first ones. The aims of this study were to evaluate the physical and viscoelastic properties (determined by uniaxial compression test under small strain) in wheat, rye, and triticale kernels as a function of the moisture content (12% and 16%), and to identify the possible correlations between physical and viscoelastic properties. Results indicated that the moisture content and the type of grain had a highly significant effect over several evaluated characteristics. As an overview, the increase of the moisture content in the grains caused a proportional increase in the mean values of some physical properties such as appearance and geometry. Physical and viscoelastic properties showed a significantly high correlation (negative), among which stand the elastic modulus (viscoelastic) with some physical properties, such as the arithmetic diameter and the ellipsoidal volume.

Keywords: cereal grains, physical properties, uniaxial compression, viscoelasticity

I. INTRODUCCIÓN

Los cereales son las plantas cultivadas más antiguas en la historia de la humanidad (Seibel *et al.*, 2012). El término ‘cereal’ deriva de la diosa Romana y Griega de la alimentación *Ceres*, aunque las palabras ‘semilla’, ‘grano’ y ‘carióside’ suelen utilizarse indistintamente para denominarlos. Los cereales son frutos de plantas pertenecientes a la familia Poaceae (Gramineae) (Wrigley, 2016), cuyo impacto e importancia radica en que su consumo cubre la mayor parte de los requerimientos energéticos (carbohidratos) y proteicos necesarios en la dieta humana. Adicionalmente, son alimento indispensable en la dieta animal y materia prima básica para elaborar diversos productos no alimenticios. Los tres cereales de mayor relevancia a nivel mundial son el trigo, maíz y arroz, los cuales conjuntamente representan alrededor del 90% de la producción. Otros cereales de significancia económica son el triticale, centeno, cebada, avena, sorgo y mijo (Wrigley, 2010a). Específicamente, el triticale fue el primer cereal producido y desarrollado de manera intencionada, como resultado de la cruce de una planta femenina de trigo con una masculina de centeno (McGoverin *et al.*, 2011).

Botánicamente, los granos de los cereales son monocotiledóneos y están conformados por el pericarpio (envoltura del fruto) y la semilla. A su vez, la semilla está constituida por el germen, el endospermo y la testa o envoltura de la semilla (Serna, 2013). Son materiales biológicos que en su estado natural poseen características y propiedades que dificultan considerablemente su estudio. Wilhelm *et al.* (2004) consideran que la diversidad e irregularidad de tamaños y formas, la composición (divergente inclusive entre variedades) y la marcada influencia del contenido de humedad sobre el comportamiento reológico, son algunos aspectos que deben considerarse durante la evaluación de los granos. La evaluación de la calidad de los granos inicia con la determinación de sus propiedades

físicas, parámetros que básicamente se utilizan para el diseño, construcción y selección de equipos utilizados en operaciones y tareas de poscosecha y almacenamiento (Ponce-García *et al.*, 2017a). Por otro lado, la evaluación viscoelástica de los granos permite reconocer y determinar su uso potencial o industrial, siendo esta una herramienta de clasificación más selectiva entre granos con características físicas similares o afines (Ponce-García *et al.*, 2016).

Los objetivos planteados en la presente investigación fueron: evaluar las propiedades viscoelásticas de granos individuales de trigo, centeno y triticale a diferente contenido de humedad, aplicando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación; determinar las propiedades físicas (apariencia, geométricas, peso-volumen-densidad, mecánicas) de los tres tipos de granos, e identificar las correlaciones existentes entre las propiedades determinadas.

II.OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades viscoelásticas de granos enteros de trigo, centeno y triticale utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación y establecer correlaciones con sus respectivas propiedades físicas.

2.1 Objetivos particulares

- Determinar y caracterizar las propiedades físicas de granos enteros de trigo, centeno y triticale.
- Aplicar experimentalmente la teoría de la elasticidad para evaluar las propiedades viscoelásticas de granos enteros de trigo, centeno y triticale con diferente contenido de humedad, utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación.
- Identificar y establecer correlaciones entre las propiedades físicas y viscoelásticas de los granos evaluados.

III. HIPÓTESIS

Es posible evaluar propiedades viscoelásticas de granos enteros de trigo, centeno y triticale aplicando experimentalmente la teoría de la elasticidad mediante el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, para establecer correlaciones con sus respectivas propiedades físicas.

IV. JUSTIFICACIÓN

El término “calidad” aplicado a los granos involucra diferentes atributos, dependiendo sustancialmente del uso o destino final que estos tendrán. Al ser diversas las etapas que sigue los granos desde su siembra hasta su procesamiento final, resulta importante definir los diferentes criterios de calidad que deben cumplir de acuerdo con la etapa de la cadena en la que se encuentren. En este sentido, la evaluación de las propiedades físicas de los granos permite reconocer su aspecto y estructura general, condiciones que a priori proporcionan información relevante para la toma de decisiones en procesos de clasificación, limpieza, o secado, por citar algunos. Por otro lado, evaluaciones más específicas como la composición química o el comportamiento reológico se asocian en mayor medida con la funcionalidad y uso final del grano. La determinación y correlación de diferentes tipos de atributos en un producto permite establecer con mayor objetividad su calidad general, siendo además factible realizar distinciones más específicas entre diferentes tipos de grano, e inclusive, entre variedades de un mismo tipo. Sin embargo, existe poca información disponible que asocie o establezca correlaciones entre diferentes tipos de atributos de calidad en granos. En este sentido, la presente investigación tiene entre otros propósitos realizar un primer acercamiento al estudio, evaluación y correlación entre propiedades físicas y viscoelásticas de granos de trigo, centeno y triticale, siendo adicionalmente interesante la aplicación del método de compresión uniaxial a baja deformación (método fundamental-objetivo) para evaluar propiedades viscoelásticas en granos individuales enteros.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Generalidades sobre los granos cereales

5.1.1. Importancia

Los granos cereales se definen como “fruto de las plantas de la familia de los pastos (Poaceae o Gramineae), cuyas semillas se utilizan como alimento” (Wrigley, 2016). Se cree que el hombre prehistórico seleccionó aquellos pastos que producían los granos de mayor tamaño. Así, como resultado de la producción de cereales, en un periodo de tiempo relativamente corto logró evolucionar y perfeccionar su experiencia como agricultor. Los cereales son cultivos que ofrecen una amplia gama de virtudes y ventajas, entre otras, que su conservación y almacenamiento puede prolongarse durante largos periodos de tiempo, facilitando que su disposición sea gradual de acuerdo con las necesidades del mercado (Serna-Saldivar, 2010). Su consumo es esencial para cubrir las necesidades nutrimentales en humanos y animales, al ser la principal fuente de carbohidratos (energía) y proteína. Riahi y Ramaswamy (2003) estimaron que los cereales proveen el 50% de la energía alimentaria y el 50% de la proteína que se consumen mundialmente. En cierta medida, los granos cereales son los responsables directos o indirectos de la mayoría de los alimentos que se consumen (Wrigley *et al.*, 2016). De igual forma, es posible elaborar alimentos a base de cereales con bajo aporte energético, además de que en general, los cereales no contienen factores antinutricionales, excepto por el ácido fítico (Serna-Saldivar, 2010). De acuerdo con los hábitos de consumo, costumbres y disponibilidad económica, en cada continente se cultiva al menos algún tipo de cereal, hecho que en buena medida es posible gracias a que poseen una elevada capacidad de adaptación a diversas condiciones agroecológicas, además de que son alimentos poco perecederos y relativamente fáciles de almacenar cuando su contenido de humedad es bajo (Seibel *et al.*, 2012). El trigo, maíz y

arroz son las tres especies más importantes, ya que en conjunto representan alrededor del 90% de la producción mundial de granos cereales. Otras especies de importancia económica son el triticale, centeno, cebada, avena, sorgo y mijo (Wrigley, 2010a).

La FAO estimó una producción mundial de 2,200 millones de toneladas de cereales en 2019, sin embargo, la producción alcanzará alrededor de 2,700 millones de toneladas, es decir, un incremento de 2% con relación a 2018. En buena medida, el incremento en la producción de estos cultivos deriva de que se han convertido en materia prima indispensable para la elaboración de una amplia gama de productos no alimentarios, siendo el trigo y el maíz los granos con mayor demanda en este sector. El pronóstico más reciente de la FAO relativo al comercio mundial de cereales en 2019/20 se mantiene en alrededor de 415 millones de toneladas y un 0,7 % (casi 3 millones de toneladas) por encima del nivel de 2018/19, con expectativas de un mayor comercio de trigo, arroz y cebada que compensará la disminución del comercio de maíz y sorgo. La producción de cereales en México se espera que supere los 34 millones de toneladas, en parte por la mejora en los rendimientos del maíz (FAO, 2019).

5.1.2. Morfología y estructura general del grano maduro

Los granos cereales son botánicamente el fruto de una semilla única llamada cariósipide, la cual se desarrolla dentro de las glumas (hojas modificadas que la protegen, Figura 1). El grano o cariósipide se subdividen en tres partes fundamentales: pericarpio, endospermo y germen. La proporción de cada una de estas varía dependiendo del tipo de cereal, pero en general constituyen de 7-10%, 82-85% y 3-10%, respectivamente (Serna-Saldívar, 2010).

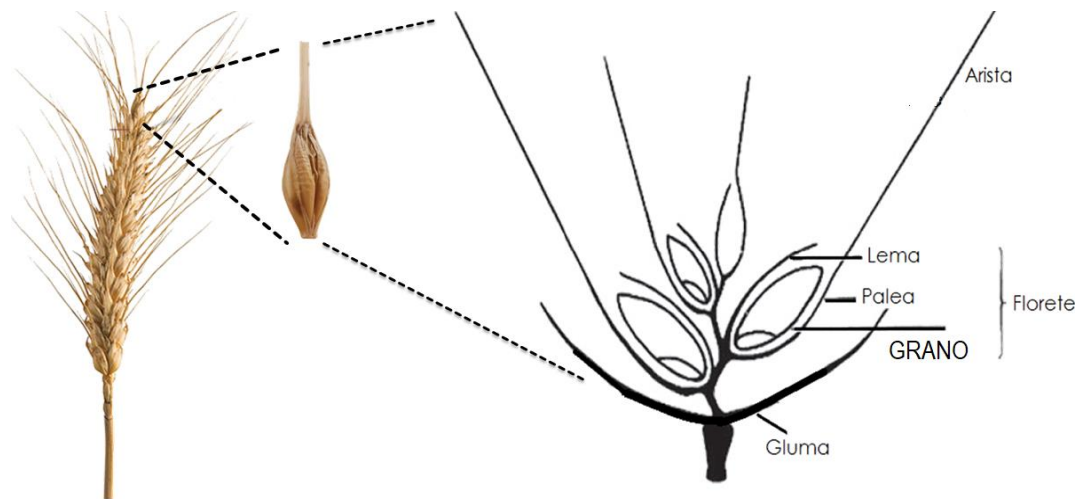


Figura 1. Disposición de glumas y sus componentes en grano de trigo (Adaptada de Corke, 2016).

Pericarpio. El pericarpio (que rodea toda la semilla), está compuesto por varias capas, incluida la epidermis externa (cutícula), hipodermis, células cruzadas, células tubulares, cubierta de semillas (testa) y el tejido nucelar. El pericarpio interno está constituido por células intermedias, células cruzadas y células tubulares. Las celdas cruzadas miden 100–150 μm de largo por 15–20 μm de ancho y 10–15 μm de espesor y tienen su eje largo perpendicular al eje largo del núcleo. El pericarpio comprende aproximadamente el 5% del grano y consiste en aproximadamente 6% de proteína, 2% de cenizas, 20% de celulosa y 0.5% de lípidos, el resto son polisacáridos sin almidón (Wrigley, 2010b). En la Figura 2 se representan las diversas partes estructurales y subcelulares generales de un grano cereal seccionado.

Testa o envoltura de la semilla. La testa está adherida en la parte ventral de las células tubulares que conforman el pericarpio. En buena medida, el color de algunos cereales depende de los pigmentos que se encuentran en esta capa (Serna, 2013).

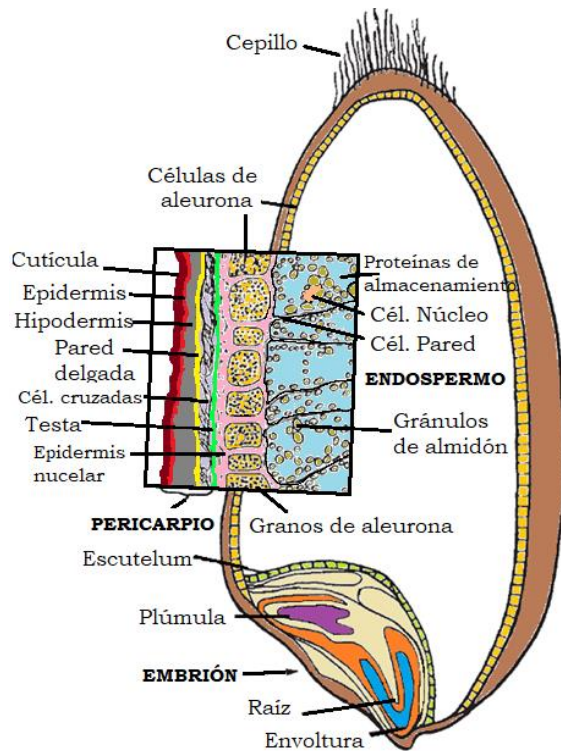


Figura 2. Estructura subcelular general de un grano cereal seccionado (Adaptado de Wrigley, 2016).

Proporciona una cobertura completa alrededor de la semilla que controla las relaciones de agua entre la semilla cerrada y sus alrededores en la etapa de madurez. La testa está compuesta por células de entre 100–190 μm de largo, 9–20 μm de ancho y 5–8 μm de grosor. Consta de tres capas: una cutícula gruesa exterior, una capa que contiene pigmentos y una cutícula delgada interna (Wrigley, 2010b).

Endospermo. Es el principal y más importante componente del grano, al representar entre 82-85% de su peso. Se caracteriza por su elevado contenido de almidón (el cual se deposita a manera de gránulos que conforman la mayor proporción de endospermo) y moderadamente alto de proteína (Atwell, 2001). Debajo de la testa o envoltura de la

semilla se encuentra el endospermo, el cual a su vez se subdivide en la aleurona y tres subtipos de endospermo: periférico, vítreo y harinoso.

En general, las células de endospermo están dispuestas como gránulos de almidón embebidos en una matriz proteica. Los gránulos de almidón se clasifican en dos grupos de tamaño: Tipo-A, que son gránulos grandes, lenticulares (en forma de lente) de hasta 40 mm y Tipo-B, esféricos, aplanados y pequeños, de hasta 10 mm de diámetro (Wrigley, 2010b; Corke, 2016).

Aleurona. Botánicamente la aleurona es la capa más externa del endospermo, pero debido a que comúnmente permanece adherida al pericarpio (capas externas del grano) y usualmente se remueve durante las operaciones de molienda, suele presentarse como la capa más interna del salvado (pericarpio) (Seibel *et al.*, 2012). En la mayoría de los cereales, la aleurona se compone por una sola capa de células y su estructura y composición es totalmente distinta al resto del endospermo. Las células que la conforman no contienen gránulos de almidón, pero poseen buen contenido de proteína, lípidos y minerales, además de concentraciones de tiamina y riboflavina, así como enzimas, las cuales juegan un papel vital en el proceso de germinación del embrión. Las células de aleurona también son comunes como reserva de almacenamiento de lípidos. Las paredes de sus células son gruesas y tienen la propiedad de fluorescer cuando se observan bajo la luz ultravioleta (Serna, 2013).

Endospermo periférico. Como su nombre lo indica, es el endospermo “más externo”, o en otro sentido, es la porción que limita con la aleurona. El endospermo periférico posee alto contenido de proteína, además de unidades de almidón pequeñas y compactas, siendo el tipo de endospermo que se encuentra en menor proporción (Serna-Saldivar, 2010).

Endospermo vítreo. El endospermo de un grano maduro está conformado por 4 estructuras principales: pared celular, gránulos de almidón, matriz y cuerpos proteicos. En el endospermo vítreo, los gránulos de almidón se encuentran rodeados de una matriz proteica, sin espacios de aire y poseen una forma angular (poligonal). El endospermo vítreo tiene una apariencia traslúcida, porque la luz no se difracta (Serna-Saldivar, 2010).

Endospermo harinoso. Este tipo de endospermo se encuentra rodeado por el endospermo vítreo, por lo que constituye la parte más interna del grano. El endospermo harinoso se compone de los mismos elementos que el vítreo, pero a diferencia de este último, los gránulos de almidón son más grandes y menos angulares en su forma, la asociación entre los gránulos de almidón y la matriz proteica es más débil y el almidón está menos rodeado de cuerpos proteicos. Por lo tanto, comparado con el endospermo vítreo, el endospermo harinoso se conforma por paredes celulares más delgadas, existe menor cantidad de proteína y prevalecen minúsculos espacios de aire con apariencia opaca, lo que propicia que este tipo de endospermo tenga una estructura menos compacta (Serna-Saldivar, 2010).

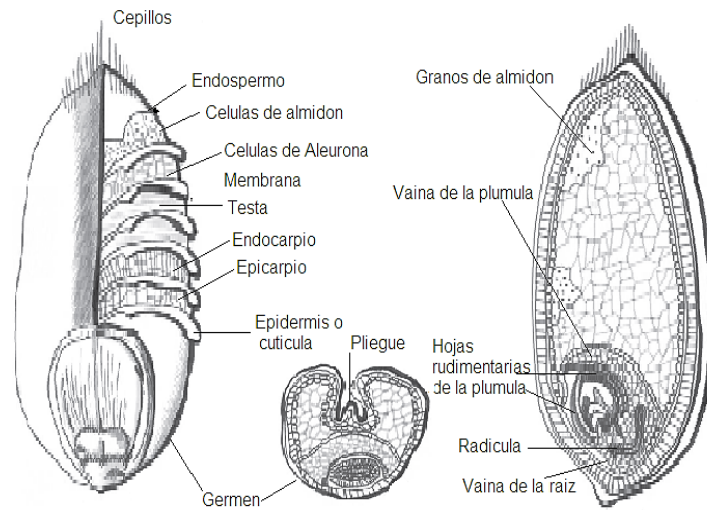
Germen. Constituye entre el 2.5–3.5% del peso del grano y se encuentra adherido o embebido parcialmente (en la base del grano) al endospermo a través del escutelum, el cual (junto con el epitelio) conforma el único cotiledón de las gramíneas. El germen no contiene almidón, pero en contraste es alto en lípidos (16%), proteínas (25%), minerales (5%) y azúcares solubles (18%). Posee buena proporción de vitaminas B y E, y genera la mayoría de las enzimas involucradas en el proceso de germinación (Serna-Saldivar, 2010; Posner y Hibbs, 2011). Posee la mayor concentración de lípidos y vitamina E de todos los componentes del grano, con niveles de hasta 500 ppm, además de que su contenido humedad es el mayor entre los componentes del grano maduro. Sin embargo, el uso del

germen de cereales sigue siendo un desafío por su escasa estabilidad y por la presencia de factores antinutricionales, tales como: (i) la rafi, que no es digerida por enzimas pancreáticas sino metabolizada por bacterias productoras de gas del intestino grueso, causando trastornos tales como flatulencia; (ii) el ácido fítico, que disminuye notablemente la biodisponibilidad mineral y (iii) la aglutinina de germen de trigo (WGA) que es responsable de los hiperplásicos e hipertróficos crecimiento del intestino delgado y el páncreas (MacRitchie, 2010)

5.1.2.1. Grano de trigo

El trigo es uno de los tres cereales más importantes del mundo en términos de producción y consumo. Es el más complejo de todos los cereales por la diversidad en su genética. Se reconocen unas 30 especies, algunas de ellas cultivables y otras silvestres, siendo las principales *aestivum* y *durum* (Serna, 2013). Las principales características morfológicas distintivas del grano de trigo son su forma ovalada, la presencia del embrión en un extremo y el mechón de cabello que constituye el cepillo. Tiene un pliegue longitudinal (una región entrante alargada paralela a su eje largo) en su lado ventral (opuesto al embrión) y está redondeado en el lado dorsal (el mismo lado que el embrión) (Gooding, 2010). En la Figura 3 se puede apreciar la morfología general de un grano de trigo seccionado.

Actualmente, los trigos más comerciales se dividen en trigos duros y suaves, de acuerdo con la dureza o textura del grano, así como por la época del año en que se cultivan: invierno o primavera (Gooding, 2010).



Secciones longitudinales y transversales del grano de trigo.

Figura 3. Estructura anatómica de un grano de trigo seccionado (Adaptada de Arendt y Zannini, 2013).

5.1.2.2. Grano de centeno

Es un cereal con mayor resistencia a climas fríos, a plagas, enfermedades y escasez de agua comparado con el trigo, además de que se cultiva en suelos menos fértiles (Serna-Saldivar, 2010), además de que puede crecer en áreas semiáridas. Rusia, Polonia y Alemania producen más del 70% de la producción mundial de centeno.

La anatomía de la cariósida del centeno es similar en apariencia a otros cereales comunes como el trigo y la cebada. La semilla consiste de un embrión unido a través del escutelum al endospermo harinoso y a los tejidos de aleurona. El endospermo y la aleurona están encerrados por los restos de la epidermis nuclear y la capa rodea todo el núcleo y se adhiere estrechamente a él. La cariósida se cubre con el cepillo, ubicado principalmente en el extremo distal del núcleo. El tejido del endospermo está rodeado por células de aleurona que forman una capa gruesa. Dentro de la aleurona se encuentra el endospermo harinoso que representa el orgánulo más predominante del grano de centeno maduro, como en todos

los granos de cereales, y puede explicar el 80% de su peso total (Arendt y Zannini, 2013).

El endospermo del grano de centeno es más suave que el del trigo duro (Wrigley, 2010b).

La Figura 4 representa la estructura anatómica de un grano de centeno.

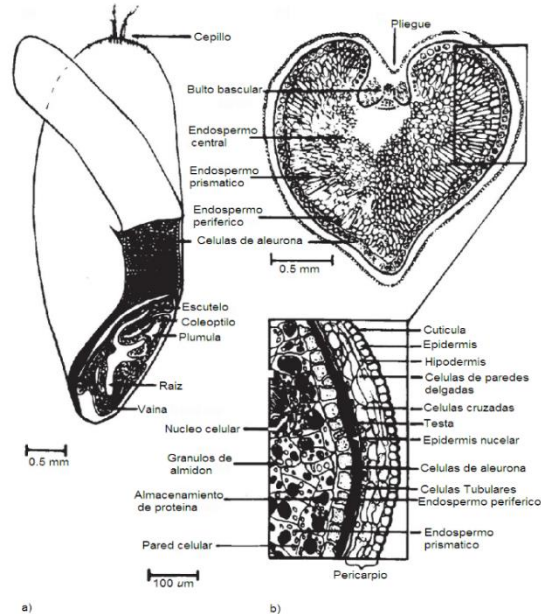


Figura 4. Partes anatómicas de un grano de centeno. Secciones longitudinal (a) y transversal (b) (Adaptada de Wrigley, 2016).

5.1.2.3. Grano de triticale

Es un cultivo producto de una cruce entre los géneros *Triticum* (al cual pertenece el trigo) y *Secale* (al cual pertenece el centeno). Su nombre se formó con la mitad de cada uno de los géneros progenitores. Creado por fitogenetistas más que por el proceso natural de evolución, el triticale lleva la distinción de ser el primer cereal "hecho por el hombre". Sin embargo, la mayoría de las variedades que actualmente se cultivan no poseen la calidad y funcionalidad de gluten deseada, además de que solo conservan algunas características agronómicas deseables del centeno, tales como la tolerancia a la sequía y a suelos con fertilidad limitada y resistencia a algunas enfermedades típicas del centeno. En muchos

ambientes ecológicos poco favorecidos, el triticale ofrece una doble esperanza: rendimiento, calidad nutritiva y otros atributos del trigo (Serna-Saldivar, 2010).

En la Figura 5 se ilustra un grano de triticale seccionado transversalmente, en la cual se aprecian sus diferentes estructuras anatómicas. En este cereal, el embrión y el endospermo están encerrados por la cubierta de semillas y por un pericarpio que rodea el núcleo y se adhiere estrechamente a él. El pliegue, que se extiende a lo largo del grano en su superficie ventral, varía en profundidad según la variedad. El grano de triticale tiene, en general, una apariencia arrugada, cuyo nivel varía de leve a severo. Cuando las arrugas son severas, el grano tiene un pericarpio parecido al papel y arrugado, así como también depresiones en el endospermo. En general posee dos tipos de gránulos de almidón: lenticelares y esféricos (Arendt y Zannini, 2013)

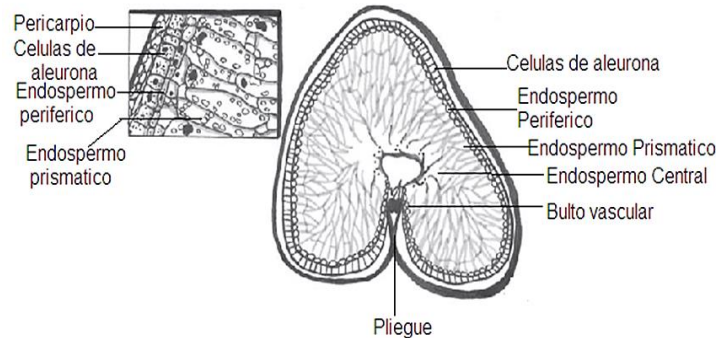


Figura 5. Partes anatómicas de un grano de centeno. Sección transversal (Adaptada de Arendt y Zannini, 2013).

5.2. Relación: Trigo-centeno-triticale

El objetivo original del desarrollo del triticale, fue conjuntar en un solo cultivo la resistencia a las enfermedades y la tolerancia ambiental (suelo, agua, estrés) que posee el centeno, aunadas al potencial de rendimiento y de panificación del trigo. En el Cuadro 1

se presentan un comparativo entre algunas cualidades funcionales del triticale y el centeno, respecto al trigo. Hasta ahora, este objetivo solo se ha cubierto parcialmente.

Cuadro 1. Comparativo de las propiedades funcionales del centeno y triticale, respecto al trigo (Adaptado de Arendt y Zannini, 2013).

Grano	Centeno	Triticale
Peso de 1000 granos	Similar	Superior
Dureza/Suavidad	Suave	Suave
Contenido de proteína	Similar	Similar
Daño por germinación (α -amilasa)	Más susceptible	Más susceptible
Harina		
Tamaño de granulo de almidón	Mayor	Ligeramente mayor
Daño del almidón durante la molienda	Menor	Ligeramente menor
Contenido de pentosanos	Superior	Superior
Capacidad de absorción de agua	Hasta 8x más sobre el límite	Muy efectivo
Proteína soluble en agua	Mayor	Mayor
Calidad del Gluten	Menor	Menor
Cantidad de Gluten	Menor	Menor
Masa		
Reología (viscoelasticidad/ elasticidad)	Más elástica	Moderadamente elástica
Pegajosidad de la masa	Mayor	Mayor
Retención de gases durante la cocción	Menor	Menor
Pan		
Grano/textura	Mayor (más gruesa)	Mayor (más gruesa)
Sabor	Más fuerte y característico	Ligeramente más fuerte
Vida de anaquel	Menor	Menor

El mejoramiento convencional ha permitido establecer al triticale como un cultivo comercial valioso, principalmente como pienso, particularmente donde las condiciones son menos favorables para el cultivo de trigo. Se han invertido menos esfuerzos en intentos de mejorar las propiedades de molienda y horneado, aunque en general no se han abordado de cerca diversos requisitos para considerarlo como fuente primaria de alimentación humana, lo que ha provocado cierta frustración entre algunos sectores

involucrados. El enfoque más directo para determinar las relaciones composición-funcionalidad es mediante la aplicación de la química del cereal. Esto implicaría evaluar con precisión la composición del grano y de su respectiva harina, para posteriormente realizar una comparación directa respecto al trigo (MacRitchie, 2010).

5.3. Composición química del grano

En el Cuadro 2 se presenta la composición química proximal de estos tres tipos de cereales. El contenido de nutrientes entre el trigo, centeno y triticale es semejante, pero varía de una especie a otra. Poseen una similitud en su composición, ya que como se ha comentado, el triticale es un híbrido derivado de la cruce entre el trigo y el centeno. En general, debido a su alto contenido de carbohidratos, los cereales son una fuente importante de energía, además de que aportan vitaminas, minerales, lípidos y fibra cruda. Particularmente el contenido y calidad de las proteínas de los cereales es de vital importancia desde el punto de vista nutricional y funcional.

Cuadro 2. Composición química proximal de granos de trigo, centeno y triticale^a (Serna, 2013).

Cereal	Proteína (%)	Extracto etéreo (%)	Fibra cruda (%)	Cenizas (%)	ELN^b (%)
Trigo					
Panadero	14.4	2.3	2.9	1.9	78.5
	11.5-17.0	1.8-2.8	2.8-3.0	1.8-2.0	75.2-82.1
Suave	9.9	2.8	2.7	1.7	82.9
	8.0-12.0	2.6-2.9	2.5-2.8	1.8-1.9	80.4-85.1
Centeno					
	13.4	1.8	2.1	2.0	80.7
	12.6-14.5	1.6-2.2	1.6-2.6	1.7-2.2	78.5-82.5
Triticale					
	15.2	1.9	2.2	1.9	78.6
	12.6-17.2	1.6-2.2	2.0-2.5	1.8-2.1	77.4-80.8

^a Todos los valores se expresan en base seca. El número superior indica el valor promedio y el inferior se refiere al intervalo dentro del cual se encuentran generalmente los valores. ^b Extracto libre de nitrógeno.

En la Figura 6 se presenta una esquematización de la distribución de los principales componentes químicos (nutrientes) en el grano.

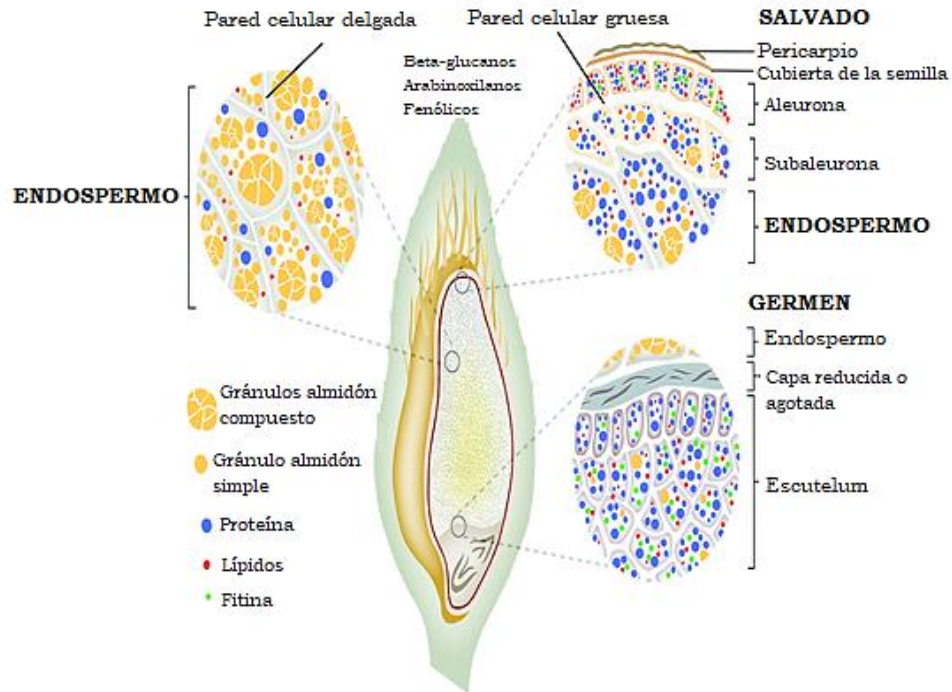


Figura 6. Representación estructural de la distribución de los principales componentes químicos en un grano cereal (avena) (Adaptada de Grundy *et al.*, 2018).

Por otro lado, debido a su bajo contenido de humedad, los granos cereales son productos que pueden conservarse fácilmente mientras se encuentran en condiciones secas y frías. Más allá del valor nutrimental de los granos, su contenido de humedad juega un rol muy importante y tiene una profunda influencia sobre sus propiedades físicas, geométricas y viscoelásticas, particularmente aquellas relacionadas con el peso y la densidad volumétrica del grano a granel, ya que modifica las propiedades de la superficie de la cubierta de la semilla, así como las propiedades del endospermo. Diversos estudios (Tabatabaeefar, 2003; Ponce-García *et al.*, 2008; Karimi *et al.* 2009; Bhise *et al.*, 2014)

han reportado el efecto del contenido de humedad en diferentes propiedades físicas del grano de trigo, concluyendo que el aumento del nivel de contenido de humedad incrementa el valor de algunas propiedades como las dimensiones axiales, la porosidad y la esfericidad, mientras que la densidad aparente tiende a disminuir.

Un mayor contenido de humedad del grano resulta en el aumento de la susceptibilidad de los granos a deformarse (incremento del trabajo plástico), por lo tanto, las propiedades físicas y viscoelásticas de los granos cereales varían en función de contenido de humedad (Molenda y Horabik, 2005; Gürzoy y Güzel, 2010).

5.4. Propiedades físicas de los granos cereales

La evaluación de las propiedades físicas de los granos como la forma, las dimensiones axiales (tamaño) y la esfericidad, permiten entre otras ventajas establecer ciertas condiciones y determinar la operatividad de algunos equipos utilizados durante las operaciones de selección y limpieza de los granos. De igual forma, determinar el peso de los granos facilita en cierta medida la selección del tipo de cultivadora que se empleará en campo, mientras que los valores de densidad aparente y el contenido de humedad del grano contribuyen a realizar una mejor selección del tipo y tamaño de tolva a emplear durante la siembra (Jayan y Kumar, 2004; Soyoye *et al.*, 2018).

Adicionalmente, otras características y propiedades físicas como el diámetro geométrico y aritmético permiten establecer una buena relación de la forma y tamaño del grano en relación con el diámetro de una esfera (Gorial y O'Callahan, 1990). Esta relación es útil al momento de ejecutar algunos cálculos durante diferentes operaciones de postcosecha (e.j. aireación, secado) ya que como los granos son materiales que comúnmente presentan formas irregulares y heterogéneas, es necesario considerar sus diámetros geométrico y

aritmético para realizar ajustes matemáticos y “estandarizar” su forma como esferas o elipses (Mohsenin, 1986; Gürzoy y Güzel, 2010). Las formas de los diversos granos y semillas son generalmente irregulares, por lo que se necesitaría un gran número de datos de medición para describirlos con precisión. Sin embargo, las mediciones prácticas muestran que las diversas formas generalmente se pueden caracterizar especificando ejes ortogonales seleccionados a propósito. Por ejemplo, los granos se caracterizan generalmente por su longitud, ancho y grosor (Sitkei, 1986).

5.4.1. Principales formas del grano

Desde el lado dorsal, los granos (inclusive del mismo tipo o distinta variedad) pueden ser ovalados, elípticos, alargados o truncados (Wrigley, 2010b) (Figura 7). Son redondeados en su lado dorsal con un pliegue longitudinal que se extiende a lo largo del lado ventral. La presencia del pliegue no es deseable porque, si es extrema, puede contribuir a una baja densidad aparente (peso de prueba). El embrión se encuentra en el lado dorsal al final del grano. En el extremo opuesto (extremo apical) hay un mechón de pelos, conocido como "cepillo".

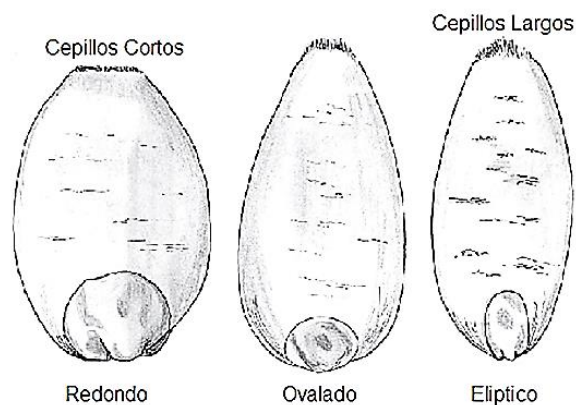


Figura 7. Principales formas de los granos cereales (Adaptada de Wrigley, 2010b).

5.4.2. Color

El color es una de las primeras y más relevantes características relacionadas con la calidad del grano. El color depende de la especie y otros factores y se determina principalmente a los componentes químicos presentes en la capa de la semilla madura (Ponce García *et al.*, 2017a). Bechtel *et al.*, 2009 determinaron que el color varía de beige claro o amarillo a rojo-marrón, según la ausencia o presencia de pigmentación en la testa.

En ocasiones, la percepción del color del grano se ve afectada por la textura del endospermo, ya que desde la parte blanda presenta interfaces de almidón de aire y proteína de aire que imparten la apariencia blanca u opaca sobre el grano. Otros factores que pueden afectar el color natural de los granos son la infestación con moho en el campo o durante el almacenamiento, los daños por calor o por heladas y otros daños causados por fitopatógenos (Arendt y Zannini, 2013).

El trigo se clasifica comúnmente según el color como rojo o blanco (según la intensidad de la pigmentación roja en la cubierta de la semilla). Los granos de centeno varían en color de claro a oscuro, normalmente son de color amarillo grisáceo, pero esto puede variar dentro de una variedad individual e incluso dentro de la misma muestra. El color la variación depende de la región de cultivo y las condiciones de cosecha. El color del grano de triticale es ligeramente más oscuro que el trigo, resultado de su apariencia típicamente arrugada, particularmente en la parte ventral (Arendt y Zannini, 2013).

5.4.3. Apariencia

La apariencia física es de primordial importancia combinada con otros análisis. La inspección visual es el primer enfoque para determinar la calidad del grano, con especial atención a los signos de brotación, heladas o daños por calor y daños por hongos o

insectos. Estos procedimientos, son similares para los cereales en general, pero las especificaciones exactas para grados y clases particulares difieren de una especie de grano a otra y de una región a otra. El muestreo de grano es un aspecto crítico en esta etapa inicial del análisis de grano. No se puede suponer que un envío de grano sea homogéneo, por lo que, para obtener una muestra representativa, el submuestreo debe realizarse en varios puntos de la carga, y las submuestras combinadas deben mezclarse completamente antes del análisis (Wrigley, 2010b).

5.4.3.1. Dimensiones axiales

En un grano cereal, comúnmente se miden tres dimensiones principales: longitud (L), ancho (A) y grosor (G) (Figura 8) las cuales normalmente se determinan utilizando un micrómetro reportando el resultado en milímetros. Las dimensiones axiales son útiles en la selección de tamices, separadores y para el cálculo de la tasa de extracción durante la reducción de tamaño (Al-Mahasneh y Rababah, 2007).

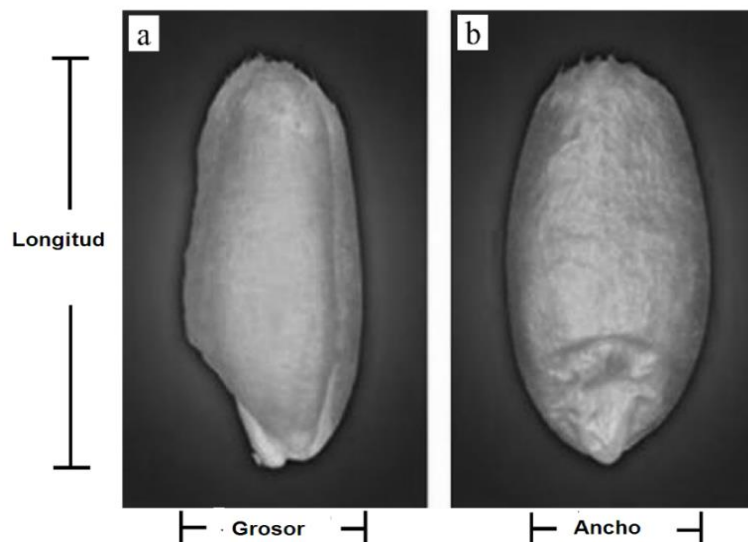


Figura 8. Dimensiones axiales en grano. (a) Longitud y grosor. (b) Ancho (Ponce-García *et al.*, 2017a).

Estas medidas también se utilizan para calcular el volumen del grano, determinación importante durante el modelado de secado de granos, aireación, calefacción y refrigeración. El tamaño y la forma son importantes en el diseño de máquinas de separación, cosecha y dimensionamiento (Gastón *et al.*, 2002).

En promedio, un grano de trigo mide de 2.5–3.0 mm de grosor, de 3.0–3.5 mm de ancho, 6.0–7.0 mm de longitud y pesa entre 30-40 mg. Por su parte, un grano de centeno es similar en tamaño al trigo. Es más delgado, puntiagudo y largo que el trigo y la cebada. El grano de triticale es más delgado y puntiagudo que el del trigo. Los granos suelen ser de 10–12 mm de longitud, algo más largo que el grano de trigo promedio y de 3 mm o menos de ancho (Wrigley, 2010b).

5.4.3.2. Relación ancho-largo (R_{AL})

Este parámetro se refiere al cociente obtenido de la relación ancho entre largo. Se expresa en porcentaje. Cuanto mayor es la R_{AL} , el material tiende a ser más esférico, es decir, la longitud del grano es menos aguda respecto a su ancho, así, cuanto más elevado sea el valor porcentual de la R_{AL} , significará que es más estrecha la proporción entre ambas dimensiones.

5.4.4. Propiedades geométricas

Las propiedades geométricas son aquellas que pueden derivarse de la geometría de un cuerpo sólido o partícula. Son muy importantes como un medio por el cual el tamaño y la forma de una partícula de forma irregular pueden cuantificarse fácilmente. Esto es cierto si la partícula se trata como un cuerpo sólido individual o como uno que es representativo de muchas partículas en un sistema disperso (Figura y Teixeira, 2007).

La determinación y evaluación de las propiedades geométricas de los granos, aporta información relevante para el diseño y construcción de maquinaria y equipo destinado a operaciones de cosecha, transporte, aireación, secado y almacenamiento, por citar algunas (Markowski *et al.*, 2010).

5.4.4.1. Diámetro geométrico (D_g) y diámetro aritmético (D_a)

Para cualquier partícula de forma 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 y se denomina diámetro de esfera equivalente en volumen o diámetro geométrico (D_g), siendo quizá este el tipo de diámetro equivalente más utilizado para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería (Figura y Teixeira, 2007). El D_g considera propiamente el volumen del grano, mientras el que el D_a se relaciona más bien con la proporción o relación en función de las dimensiones axiales del grano.

5.4.4.2. Superficie de área (S)

Otra característica importante es la superficie de grano o superficie de área (S), la cual está relacionada con el tamaño, pero también depende de la forma de la partícula. Es difícil de medir para objetos de forma irregular y, por lo tanto, a menudo se determina indirectamente o se calcula al asumir una forma específica. Se determina más fácilmente para elementos que se parecen mucho a formas geométricas comunes. Un método de uso frecuente es el método de proyección, que utiliza fotografías o imágenes proyectadas para obtener un esquema del objeto, una vez que se obtiene el contorno del objeto, los segmentos se pueden definir dibujando líneas paralelas y calculando el área encerrada en cada segmento. En materiales granulares como los granos, la porosidad está estrechamente

relacionada con la S . La superficie de área de las partículas es importante en las operaciones de calefacción y refrigeración, ya que la transferencia de calor es proporcional a la S (Wilhelm, 2004).

La S específica de diversos granos se puede determinar recubriéndolos con una sola capa de polvo metálico y midiendo el cambio de peso. Un grupo de control, que consiste en una forma geométrica del área de superficie conocida y una densidad cercana al grano que se está probando, se ejecuta a través del proceso de recubrimiento con el grano. Un factor que representa el peso del recubrimiento por unidad de superficie para el grupo de control se utiliza para calcular el área de superficie del grano. El volumen total de la muestra de grano se mide y se ingresa en el cálculo de superficies específicas junto con el área de superficie calculada. Aplicando el método de recubrimiento, Mohsenin (1986) determinó la S por unidad de volumen en diversos granos y semillas.

5.4.4.3. Esfericidad (ϕ)

La esfericidad (ϕ) expresa la forma característica de un objeto sólido en relación con la de una esfera del mismo volumen, el diámetro más largo (mayor) y el diámetro más corto (menor) serán los que describen el tamaño de un objeto elipsoidal como los granos cereales (Troccoli y di Fonzo, 1999).

Bayram (2005) sugirió que la determinación de la esfericidad suele ser difícil y poco práctica, debido a irregularidades en la forma del material granular y es el cálculo del volumen exacto y el área de superficie que implican mediciones de longitud múltiple.

Mohsenin (1986) estimó la esfericidad de una partícula elipsoidal triaxial como la relación del diámetro medio geométrico con el diámetro del círculo inscrito más grande de la partícula. Una esfericidad de 1.0 se considera una esfera perfecta.

5.4.5. Propiedades de peso, volumen y densidad

5.4.5.1. Peso individual del grano (*PIG*)

El *PIG* representa como tal la masa por unidad que posee una cariósida. Suele relacionarse con la sanidad del grano, ya que cuando se registran *PIG* bajos, frecuentemente se debe a que el grano está perforado o ha sido atacado por insectos, o bien, son cariósidas de tamaño pequeño. Sin embargo, no necesariamente el tamaño del grano implica su peso individual, ya que puede presentarse el caso de que granos pequeños sean compactos y/o densos (alto *PIG*), o que granos de buen tamaño no se encuentren llenos, con la consecuente pérdida de peso. Aún más, este indicador se puede utilizar para determinar la madurez de las cariósidas (Ponce-García *et al.*, 2017a).

5.4.5.2. Peso de 1,000 granos (*PMG*)

El peso del grano usualmente se expresa en gramos (g) por 1,000 granos (g/1,000-granos) y está en función del tamaño y densidad del grano. Cuanto más grande y densa es la cariósida, se espera que la proporción de endospermo sea mayor, prevaleciendo una relación más precisa con el rendimiento de harina respecto a la prueba de peso por volumen. A mayor peso de los granos, se comprende mayor densidad y mayor rendimiento de harina. La prueba es sencilla y rápida, ya que utiliza un contador semiautomático de granos, los cuales se pesan analíticamente determinando su peso (Posner y Hibbs, 1999).

De igual forma, esta propiedad se relaciona con la proporción de endospermo de germen y pericarpio (Serna-Saldivar, 2010). El peso del grano está influenciado tanto por el medio ambiente como por las características genéticas y se ve significativamente afectado por la velocidad de llenado durante su maduración (Seibel *et al.*, 2012). Cuando el grano no está dañado puede esperarse un peso alto, debido a una mayor proporción de endospermo (Pagani *et al.*, 2014). El *PMG* es un parámetro esencial para la selección de cultivares con la mejor calidad de semilla física y fisiológica. En general, los valores más altos se relacionan positivamente con la extracción o el rendimiento potencial de harina (Gutiérrez-García, *et al.*, 2006). Los mejoradores de trigo y los molineros de harina emplean este método como complemento para evaluar el peso y describir mejor la composición del grano de trigo y la posible extracción de harina (U.S. Wheat Associates, 2007). El *PMG* suele utilizarse como un índice del valor de molienda de trigo (Dziki y Laskowski, 2005). El-Fawad *et al.* (2009) precisaron que determinar la masa o *PMG* contribuye a estimar el número de semillas necesarias durante la siembra.

5.4.5.3. Volumen elipsoidal (V_e)

El volumen de la unidad de peso indica la densidad y la compactación de un volumen dado de grano, especificación utilizada para clasificar los granos (Carson *et al.*, 2009).

Se pueden elegir diámetros equivalentes alternativos para ser el diámetro de la esfera que tiene el área de superficie como la partícula real, o el diámetro de un círculo perfecto que encierra el área como el área proyectada de la partícula real, o el diámetro de un círculo perfecto que tiene una circunferencia igual al perímetro del área proyectada de la partícula real. El volumen elipsoidal se considera un tipo de diámetro geométrico equivalente. (Figura y Teixeira, 2007).

5.4.5.4. Densidad aparente (ρ_b)

Es el espacio que ocupa la cantidad de material por unidad de volumen (ρ) y se expresa en unidades de masa por unidad de volumen. La densidad de partículas es la masa dividida por el volumen de la partícula sola. La masa de un grupo de partículas individuales divididas por el espacio ocupado por toda la masa (volumen) incluyendo el espacio aéreo es la densidad aparente (ρ_b).

Se utiliza para determinar la capacidad de almacenamiento y transporte, mientras que la densidad real es útil para diseñar equipos de separación adecuados (Brooker *et al.*, 1992; Kachru *et al.*, 1994). La ρ_b es la relación entre la muestra de masa del grano y su volumen total (Mohsenin, 1986). Deshpande *et al.* (1993) utilizaron un contenedor para determinar la densidad aparente, que es la relación de la muestra de masa de las semillas a su volumen total llenándola a una altura constante, golpeando el nivel superior y luego pesando el contenedor.

5.4.5.5. Densidad real (ρ_t)

La densidad real (ρ_t) se define como la relación del volumen de partículas y puede calcularse utilizando agua (Tabatabaeefar, 2003) o gas como vehículo de desplazamiento, para determinar el volumen de la muestra. Mohsenin (1986) midió la densidad real, que es una proporción de la muestra en masa de semillas a su volumen puro con el método de desplazamiento de tolueno. Se utiliza tolueno en lugar de agua, debido a que este se absorbe por los granos en menor medida. El volumen de tolueno desplazado se determina sumergiendo una cantidad ponderada de granos en dicho compuesto (Tavakkoli *et al.*, 2009).

La densidad en granos de trigo es una característica de calidad física considerada principalmente por los molineros de harina y sémola. En general, el alto peso puede indicar una muestra de grano saludable y una apariencia óptima, mientras que el bajo peso puede ocurrir como resultado de uno o más eventos adversos como daño por insectos, estrés por calor o retraso en la cosecha (Troccoli y di Fonzo, 1999).

5.4.5.6. Porosidad en volumen (\mathcal{E}_v)

Es el porcentaje de aire entre las partículas comparado con una unidad de volumen de partículas. Permite que los gases, como el aire y los líquidos, fluyan a través de una masa de partículas denominada lecho compacto en las operaciones de secado y destilación. Los granos con baja porosidad son más resistentes al flujo de fluidos y, por lo tanto, son más difíciles de secar, calentar o enfriar. Con alta porosidad, el aire fluye fácilmente a través de ellos, el secado es rápido y la potencia requerida por los ventiladores y bombas es baja. (Mohsenin, 1986).

La densidad aparente, la densidad real y la porosidad pueden ser útiles para dimensionar tolvas de grano e instalaciones de almacenamiento. Pueden afectar la velocidad del calor y la transferencia de masa de humedad durante los procesos de aireación y secado. El grano con baja porosidad tendrá una mayor resistencia al escape de vapor de agua durante el proceso de secado (Aviara *et al.*, 1999; Omobuwajo *et al.*, 1999; Ogunjimi *et al.*, 2002). La variación en la porosidad depende de las densidades aparente y real. Singh y Goswami (1996), así como Gupta y Das (1997) determinaron que la porosidad aumenta linealmente con el contenido de humedad en semillas de comino, girasol, lino y frijol, respectivamente.

5.4.6. Propiedades mecánicas

5.4.6.1. Fuerza máxima (F_{max})

La F_{max} indica la fuerza de compresión aplicada al grano, mientras éste se somete a una deformación pre-establecida. Los materiales oponen cierta resistencia a la deformación, la cual tiende a ser mayor proporcionalmente a la dureza del grano. La F_{max} se determina en la región lineal si es que se desea evaluar viscoelasticidad del grano, es decir, cuando la deformación no excede el 5% (Ponce-García *et al.*, 2013).

5.4.6.2. Dureza (D)

La dureza es una característica importante, ya que influye en el comportamiento de cereales durante su procesamiento. El principio de evaluación de las propiedades mecánicas de granos de trigo tiene amplia relación con los procesos de molienda, por lo que diversas investigaciones han descrito el comportamiento de los granos en función de su resistencia a la fractura (dureza).

La dureza es un inherente factor de calidad (Simmonds, 1989) y, por lo tanto, se utiliza muy a menudo en la clasificación de los granos. En la ciencia de los cereales, se suele coincidir en que, la cantidad y calidad de proteína, así como la dureza del grano son tres parámetros mínimos que podrían identificar el "mejor uso final" del cereal. Las investigaciones sobre cereales referentes a métodos para evaluar índices de dureza (textura) han sido objeto de muchos estudios.

Gorji *et al.* (2010) midieron la resistencia a la fractura de granos en términos de fuerza y energía. La fuerza requerida para el inicio de la ruptura del grano decreció, cuando se incrementó el nivel de humedad. También se estableció que el grano en posición

horizontal al momento de la compresión es más elástico y que su máxima fuerza mecánica se asocia con niveles bajos de humedad y una menor velocidad de prueba.

La dureza de los granos ha sido un tema de amplio interés en la industria ganadera, molinera y de panificación entre otras. La fuerza requerida para fracturar el grano determina una relación cualitativa y cuantitativa de la dureza del grano. Se han realizado varios intentos para encontrar un objetivo y una medida cuantitativa de la dureza de los granos individuales. Los datos se utilizan para determinar la relación entre la dureza y ciertas propiedades físicas y químicas y las características de molienda del grano (Mohsenin, 1986).

La dureza es un determinante principal de la calidad de molienda y de uso final del grano, principalmente en granos de trigo (Jirsa *et al.*, 2008). Además, los parámetros determinados sobre la base de la prueba de compresión y la prueba de cizallamiento se utilizan para la descripción del proceso de molienda de cereales (Laskowski y Skonecki, 1999; Dziki, 2008). Especialmente, en el caso de las propiedades mecánicas del grano de trigo y su dureza, la gran variación se debe a las interacciones de la proteína y los gránulos de almidón (Greenwell y Schofield, 1986).

Se ha descrito que el comportamiento de granos cereales como una función de su resistencia a la fractura. Debido a esta descripción, la evaluación de las propiedades mecánicas de los cereales está fuertemente relacionada con los procesos de molienda. La molienda es una operación unitaria que reduce el volumen medio de las partículas sólidas mediante la división y/o fraccionamiento de una muestra sólida. La fuerza aplicada depende de la magnitud, dirección y velocidad y permite que las partículas para absorber la fuerza como una forma de tensión, que produce una deformación en su estructura. Sin embargo, cuando se excede un límite, el material se fractura, provocando de ese modo

nuevas superficies. La cantidad de energía necesaria para la molienda es una función del tamaño inicial y final, la fuerza aplicada y las características de la materia prima. Otros factores que limitan la reducción de tamaño se deben considerar, tales como el contenido de humedad y lípidos y la geometría de la muestra (Cortázar-Figueroa *et al.*, 2008).

Gorji *et al.* (2010) han medido la resistencia a la fractura en términos de fuerza y energía. La aplicación de la carga se llevó a cabo mediante la colocación de los granos cereales acondicionado (templado) a diferentes niveles de humedad en posición vertical y horizontal y la evaluación de los granos a dos velocidades de carga. La fuerza requerida para iniciar la fractura del núcleo disminuye cuando el contenido de humedad aumenta. También se estableció que los granos cereales en posiciones horizontales eran más elásticos y que la máxima fuerza mecánica se asoció con bajos contenidos de humedad y bajas velocidades de ensayo.

En un estudio similar (Kalkan y Kara, 2011) determinaron el efecto del contenido de humedad en los granos cereales individuales sometidos a cargas de compresión cuasi estáticas en dos direcciones: (X-X) y (Y-Y). La fuerza de los valores de ruptura en los granos disminuye con el aumento de los niveles de humedad y fue mayor para la orientación X-X. En general, la cepa de granos obtenidos por los valores de ruptura mostró variaciones irregulares, independientemente del contenido de humedad.

Marzec *et al.* (2011) desarrollo un método que utiliza los ensayos mecánicos de compresión uniaxial y de emisión acústica para determinar los parámetros de calidad de los granos cereales. Los ensayos mecánicos demostraron la prevalencia de diferencias significativas en casi todas las propiedades mecánicas. La desviación estándar era suficientemente amplia para revelar la heterogeneidad del material biológico, que es

causada por las interacciones que se producen en el interior del endospermo entre los componentes de proteína y gránulos de almidón.

5.5. Reología y viscoelasticidad

5.5.1. Generalidades

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia y la manera en la cual los materiales responden a la aplicación de un esfuerzo o deformación externa, es decir, cuando la acción de fuerzas resulta en una deformación y flujo del material (Steffe, 1996). De acuerdo con Mohsenin (1986), las propiedades mecánicas son aquéllas que guardan una relación con el comportamiento de un material bajo la aplicación de fuerzas. El comportamiento esfuerzo-deformación de un material bajo carga estática y dinámica exhibirá algunas características, ya sea en el aire o agua.

La reología considera el efecto del tiempo mientras permanece una carga en el material. Reológicamente, el comportamiento mecánico de un material se expresa en términos de esfuerzo, deformación y tiempo. En este sentido, la viscoelasticidad es la propiedad de los materiales que presentan características tanto viscosas como elásticas cuando se someten a una deformación. Los materiales elásticos vuelven rápidamente a su estado original una vez que se retira el esfuerzo que se aplicó sobre ellos, mientras que en los materiales viscosos permanece una deformación producto de la fuerza externa aplicada. Así, los productos viscoelásticos recuperan parcialmente su estado original y al mismo tiempo conservan una deformación relativa al retirar la fuerza que sobre ellos se aplicó Mohsenin (1986).

Las propiedades mecánicas de los granos se han estudiado de manera sumamente general, a pesar de las importantes implicaciones tecnológicas y datos que de ellas se desprenden.

En granos, la evaluación de las propiedades mecánicas es particularmente difícil porque estos parámetros pueden verse seriamente afectados por el porcentaje (intensidad) de deformación, la temperatura y el contenido de humedad. Esto explica, en parte, la amplia gama de valores de módulo de elasticidad reportados (Shelef y Mohsenin 1967; Singh *et al.*, 1991; Haddad *et al.*, 1999). Además, la conformación de un material biológico puede alterar su mecánica estructural y el comportamiento mecánico resultante, precisamente en granos como los cereales. Por lo tanto, para obtener datos realistas sobre las respuestas mecánicas de los granos de cereales, en la medida de lo posible, estos deben analizarse en su estado natural, es decir, intactos (Singh *et al.*, 1991).

5.5.2. Conceptos reológicos fundamentales

En el ámbito y campo de la reología, diversos son los conceptos y términos asociados al comportamiento de un material, sin embargo, específicamente para la mejor comprensión de algunos datos e información relacionada con la presente investigación, será importante definir claramente algunos de ellos:

El estudio de los materiales puede tener un buen inicio a partir de la aplicación de los principios y conceptos fundamentales de su comportamiento mecánico y reológico, tales como los que a continuación se definen brevemente:

i. Deformación (Strain). Se define a la unidad de cambio en tamaño o forma de un material ($\Delta L/L$), debido a la aplicación de una fuerza, respecto a su tamaño o forma original. Es una medida adimensional comúnmente representada por (ϵ). La deformación axial es una deformación lineal en un plano paralelo al eje longitudinal del material.

- ii. Esfuerzo (stress). Es la intensidad de la fuerza manifiesta en un punto del cuerpo o material producida por tensión, compresión o corte. Se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (F/A), comúnmente en Pascales (N/m²). Un esfuerzo uniaxial se representa bajo el símbolo sigma (σ).
- iii. Elasticidad. Capacidad de un material para recuperarse de una deformación por efecto de la acción de fuerza.
- iv. Plasticidad. Capacidad de un material para conservar una deformación permanente.
- v. Viscosidad. Resistencia al flujo de un material.
- vi. Viscoelasticidad. Combinación del comportamiento sólido-líquido, en la cual la relación esfuerzo-deformación es dependiente del tiempo.
- vii. Viscoelasticidad lineal. Comportamiento viscoelástico en el cual la relación esfuerzo-deformación es una función del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo.
- viii. Módulo de elasticidad o módulo de Young (E). Relación o cociente del esfuerzo respecto a la deformación. Se simboliza como *E*.
- ix. Límite elástico. Esfuerzo máximo al cual un material es capaz de mantenerse sin deformación permanente, mientras permanece el esfuerzo.
- x. Punto de cedencia (yield point). En una curva esfuerzo-deformación o fuerza deformación, es el punto en el cual ocurre un incremento en la deformación con incremento o no de la fuerza. En algunos materiales agrícolas, este punto es un indicativo de la ruptura inicial de la estructura celular (Menjivar, 1989; Rao y Quintero, 2005).

5.5.3 Compresión uniaxial

Particularmente las pruebas de compresión contribuyen sustancialmente en la determinación de las propiedades mecánicas y otros aspectos de control de calidad del grano, ya que por ejemplo, en sistemas en los que se maneja un flujo de granos el comportamiento mecánico del material no sólo debe centrarse al flujo en sí, sino también en la deformación resultante de los granos individuales (Afkari y Minaei, 2004; Raji y Favier, 2004).

La determinación de las propiedades mecánicas a partir de pruebas de compresión inicia con la información que proporciona una curva fuerza-deformación. Evaluaciones como el límite elástico, punto de inflexión, punto de cedencia, ruptura, módulo de elasticidad, fuerza y resistencia máxima, se pueden obtener a partir de esta curva, ya que se basan en la aplicación de carga quasi-estática, más que en cargas de impacto (Cenkowski *et al.*, 1991; Bargale e Irudayaraj, 1995; ASABE Standards, 2009). Durante la compresión de materiales agrícolas se aprecia que éstos no siguen la ley de Hooke, tal como ocurre con los materiales ideales, debido a que las propiedades de los primeros se ven más afectadas por factores como el contenido de humedad y la temperatura (Delwiche, 2000).

La respuesta esfuerzo-deformación de un grano a la compresión está determinada por dos aspectos principales: (a) la forma y tipo de compresión aplicada (espacio entre superficies, velocidad, orientación de la muestra, entre otras) y (b) las diferencias botánicas de las capas del grano al momento de su compresión (Anderssen y Haraszi, 2009). Durante los ensayos de compresión es importante tener en cuenta factores como el equipo de prueba, las condiciones específicas de preparación, la geometría de la muestra y la velocidad del ensayo, entre otros aspectos (ASABE Standards, 2009).

Los métodos de prueba incluyen el uso de una placa paralela para grano entero, con un indentador esférico y un indentador cilíndrico, y una placa paralela en muestras de núcleo. A pesar de las mejoras sucesivas, los métodos basados en la teoría de Hertz y Boussinesq tienen problemas debido a la estructura completa del grano. Cualquier variabilidad en la forma del grano o las propiedades induce errores en la medición de las características viscoelásticas del endospermo (Haddad *et al.*, 1999).

Para superar estos problemas, proponemos tener en cuenta el grano entero y aplicar las técnicas de carga y desplazamiento utilizando al grano como un indentador. El uso de técnicas de indentación de detección de carga y desplazamiento se está volviendo cada vez más popular para medir los módulos elásticos de los materiales. Estas técnicas se basan en el hecho de que los desplazamientos recuperados durante la carga y la descarga son en gran medida elásticos, en cuyo caso, la teoría del punzón elástico se puede usar para determinar los parámetros viscoelásticos (Figura 9). Se ha propuesto la estimación de la dureza en materiales blandos en términos de la carga máxima aplicada dividida por el área proyectada de la impresión permanente que es equivalente al trabajo plástico dividido por el volumen deformado plásticamente (Pharr *et al.*, 1992; Tuck *et al.*, 2001)

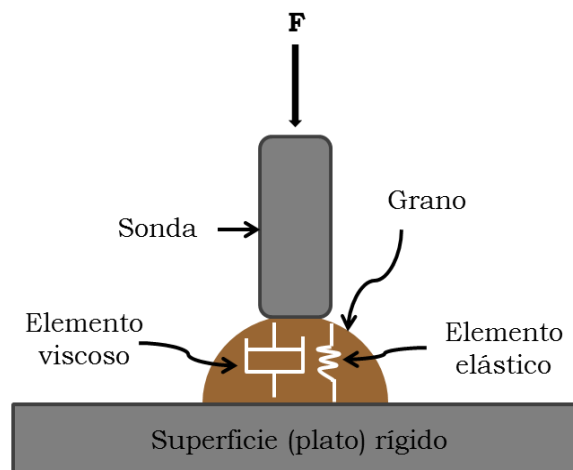


Figura 9. Representación esquemática de la compresión uniaxial sobre un grano cereal.

Las pruebas de compresión comúnmente se realizan a velocidad de deformación constante. Esto implica que este factor es cada vez mayor debido a la reducción progresiva de la longitud (altura). Lo anterior significa que, en caso de que se presentara un dominio del mecanismo de fractura en el material, la curva esfuerzo-deformación mostraría una tendencia a declinar, a pesar de que la deformación y el efecto de la velocidad se incrementan. Por el contrario, si ocurre que domina el mecanismo de contacto, la curva mostraría un aumento en la inclinación hacia una velocidad mayor, lo que implicaría un aumento en la deformación (Molenda y Horabik, 2005).

5.5.4. Propiedades reológicas y viscoelásticas en granos cereales

De acuerdo con la evidencia experimental, Mohsenin (1986) señaló que los productos agrícolas (por ejemplo, los granos cereales) deben ser considerados como materiales viscoelásticos. Los análisis realizados en granos enteros representan una alternativa de evaluación no destructiva, rápida, objetiva y complementaria a otros métodos, que pueden generar información interesante del estado original de la materia prima y de la posible funcionalidad del producto final (Eckhoff *et al.*, 1988). El estudio del comportamiento fuerza-deformación de granos en su estado natural, es un acercamiento interesante que provee mediciones y datos objetivos que pueden utilizarse en el mejoramiento de procesos aplicados específicamente en granos (Khodabakhshian y Emadi, 2011).

Parámetros como la elasticidad volumétrica de materiales granulares se relacionan estrechamente con la elasticidad de granos individuales. Sin embargo, los granos cereales poseen una forma geométrica compleja, hecho que dificulta el estudio mecánico y reológico de sus propiedades, por lo que para el análisis de un modelo considerando granos individuales, son tres las propiedades mecánicas que deben tomarse en cuenta:

fuerza de ruptura, límite de deformación y módulo de elasticidad o módulo de Young (Glenn *et al.*, 1991).

Por otro lado, diversas investigaciones coinciden sustancialmente en la preponderante influencia y efecto que conllevan dos aspectos en relación a la compresibilidad y elasticidad de los granos: la dureza y el contenido de humedad, e inclusive ambos parámetros en forma conjunta. Delwiche (2000) señala que los materiales agrícolas no siguen la ley de Hooke (materiales elásticos), debido a que sus propiedades se ven más afectadas por factores como el contenido de humedad y la temperatura.

Los materiales viscoelásticos son los de comportamiento más complejo, ya que se encuentran entre sólidos elásticos y fluidos con cualquier comportamiento reológico. Los materiales viscoelásticos se comportan de la siguiente forma:

- a. Ante la aplicación de un esfuerzo, un material viscoelástico responde deformándose instantáneamente con algún comportamiento elástico, la tensión aplicada produce una deformación.
- b. A partir del instante cero, el material fluye de acuerdo a un modelo reológico, de forma que la tensión se relaja al aproximarse el material a una nueva posición de equilibrio.
- c. A tiempo infinito, la tensión puede haberse relajado totalmente si el material fluye de acuerdo al modelo newtoniano, o bien, puede conservar un valor si el flujo es plástico general.
- d. Si el esfuerzo cesa en cualquier momento antes de la relajación, el material se retrotrae recuperando algo de su forma inicial.

Todo fluido tiene algo de comportamiento viscoelástico. Sin embargo, la viscoelasticidad sólo se hace notar cuando el tiempo de relajación es apreciable. El tratamiento de los

materiales viscoelásticos es muy complejo y debe ser abordado de manera especial para cada caso específico integrando el comportamiento elástico y viscoso (flujo) en el modelo. Se han propuesto algunos modelos para este tipo de materiales, siendo las analogías de Maxwell y Kelvin (Figura 10) las que describen el comportamiento viscoelástico como un elemento viscoso (representado por un pistón) y otro elástico (resorte) dispuestos en serie o en paralelo (Núñez *et al.*, 2001; Rao y Quintero, 2005).

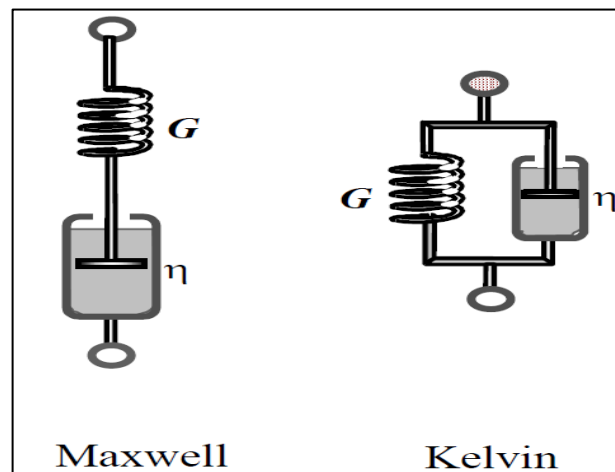


Figura 10. Modelos mecánicos viscoelásticos (Adaptado de Barnes, 2000).

El comportamiento mecánico de los granos bajo carga de compresión es dependiente del tiempo, por lo que la caracterización de éstos debe considerar los principios de la teoría viscoelástica. Esto debido a que los materiales viscoelásticos exhiben el fenómeno de esfuerzo-relajación, principalmente cuando se aplican esfuerzos suficientemente pequeños. Este comportamiento puede representarse por el modelo generalizado de Maxwell (Mohsenin, 1986; Singh *et al.*, 1991; Bargale e Irudayaraj, 1995).

Waananen y Okos (1992) determinaron que la manera más directa de evaluar el esfuerzo-relajación es por medio de la aplicación de una deformación constante (comúnmente por compresión), midiendo el esfuerzo en función del tiempo. Las pruebas de velocidad de

deformación constante permiten determinar simultáneamente la pérdida de las propiedades de relajación. Khazaei y Mann (2005) establecieron que el tiempo de relajación determina cómo el material disipa el esfuerzo después de que fue aplicada una deformación rápida y repentina, por lo que el resultado de la prueba de relajación puede ser útil para estimar la susceptibilidad al daño del material.

El comportamiento viscoelástico de los granos utilizando compresión uniaxial con diferentes dispositivos, incluye en general platos paralelos. En granos individuales, la determinación de las propiedades mecánicas es particularmente difícil, debido a que estos parámetros se ven seriamente afectados por el porcentaje de deformación, temperatura y contenido de humedad. Al seccionar o cortar las muestras se altera su estructura y el resultado de su comportamiento, específicamente en mayor medida para granos pequeños. Por lo tanto, para obtener datos reales de la respuesta mecánica de los granos de cereales, en medida de lo posible se deberán evaluar los granos intactos (Ponce-García *et al.*, 2008). Se han sugerido varios métodos para la determinación del módulo elástico de pequeñas piezas de materiales agrícolas mediante pruebas de compresión. Los métodos se basan en los supuestos de Hertz y Boussinesq (Pharr *et al.*, 1992; Gubicza *et al.*, 1996; Wei *et al.*, 2001).

El estudio del comportamiento viscoelástico es de interés en varios contextos. Primero, los materiales utilizados para aplicaciones estructurales de interés práctico pueden exhibir un comportamiento viscoelástico que tiene una profunda influencia en el rendimiento de ese material. Los materiales utilizados en aplicaciones de ingeniería pueden exhibir un comportamiento viscoelástico como un efecto secundario involuntario. En las aplicaciones, uno puede hacer uso deliberado de la viscoelasticidad de ciertos materiales en el proceso de diseño, para lograr un objetivo particular. Segundo, la matemática

subyacente a la teoría de la viscoelasticidad es de interés dentro de la comunidad matemática aplicada. Por último, los vínculos causales entre la viscoelasticidad y la microestructura son explotados en el uso de pruebas viscoelásticas como herramienta de inspección (Lakes, 1999).

Las propiedades viscoelásticas son importantes, no sólo porque afectan el comportamiento estructural durante la cosecha, manipulación, transformación y almacenamiento de los granos, sino también porque se relacionan estrechamente con la textura y la calidad final de los productos alimenticios elaborados. Dobraszczyk y Morgenstern (2003) señalan que para obtener una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas del material, es necesario contar con información relacionada a la estructura molecular y a la composición del material, para así caracterizar y simular el comportamiento del biomaterial durante su procesamiento y control de calidad.

Se ha encontrado que el comportamiento mecánico de los granos alimenticios depende del tiempo. Por lo tanto, su caracterización requiere la aplicación de principios de viscoelasticidad en los que se consideren respuestas tanto viscosas como elásticas (Zoerb y Hall, 1960). Los materiales viscoelásticos exhiben fenómenos de relajación del estrés que constituyen uno de los parámetros importantes para caracterizar los materiales agrícolas (Husain *et al.*, 1971; Pappas *et al.*, 1988). El tiempo de relajación, una importante propiedad reológica, muestra la rapidez con que un material disipa el estrés después de ser sometido a una deformación repentina.

El daño mecánico a los productos agrícolas generalmente se debe a cargas compresivas, por lo que se pueden encontrar más datos para la compresión que para las pruebas de tracción. La mayoría de los trabajos anteriores consideraron el contenido de humedad

como un factor crítico en las propiedades mecánicas y reológicas de los granos (Zoerb y Hall, 1960; Shelef y Mohsenin, 1967; Husain *et al.*, 1971).

5.5.4.1. Módulo elástico o módulo de Young (E)

Es la relación entre la tensión y la presión correspondiente por debajo del límite proporcional. Para materiales donde la relación tensión-deformación es curvilínea en lugar de lineal, se pueden usar uno de los cuatro siguientes términos: modulo tangente inicial, modulo tangente, módulo secante y módulo de acorde (Mohsenin, 1986).

Además de la dureza, el módulo elástico o módulo de Young, se considera una propiedad mecánica interesante debido a su naturaleza viscoelástica. (Shelef y Mohsenin, 1967) realizaron un experimento en el que se evaluaron cuatro métodos de compresión uniaxial en la determinación del módulo de elasticidad en los granos cereales individuales. Los resultados concluyeron que los datos obtenidos fueron depende del método que se utilizó. Por otra parte, el contenido de humedad y el tamaño del núcleo afectadas significativamente esas mediciones.

Afkari y Minaei (2004) aplicaron una carga quasi-estática a velocidad constante en granos cereales intactos en dos niveles de contenido de humedad. Los valores de los módulos elásticos aparentes fueron más altos en las variedades de cereales con un bajo contenido de humedad. De la misma manera, a partir de los datos obtenidos de las curvas de esfuerzo-deformación, que era posible diferenciar los granos y los efectos de la geometría y la forma de los granos.

En una prueba de inflexión en tres puntos realizada por Elbatawi y Arafa (2008), determinaron que la distribución de la fuerza en la ruptura de los granos. Adicionalmente estimaron que las fuerzas no se relacionaron significativamente con la anchura y la altura

de los granos, sino a su espesor. Los valores de los módulos de elasticidad aparente, fuerza inflexión y fuerza de fractura aumentaron a medida que disminuye el contenido de humedad.

Khodabakhshian y Emadi (2011) describieron la importancia de evaluar el módulo elástico mediante el uso de núcleos intactos. Consideraron que este parámetro permite la medición de la firmeza (un atributo de textura) y que es posible determinar la tensión de fractura mediante el uso de la teoría de la elasticidad.

La indentación como un método alternativo a la compresión con placas paralelas para evaluar el módulo de Young. Establecieron que cuando una carga se aplicó y se libera a la misma velocidad, era posible evaluar la viscoelasticidad (trabajo elástico y plástico) de los materiales (Gubicza *et al.*, 1996).

5.5.4.2. Trabajo total (W_t), trabajo elástico (W_e) y trabajo plástico (W_p)

El comportamiento viscoelástico de materiales como los granos se puede calcular utilizando pruebas de compresión uniaxial, así, la energía (trabajo) de compresión se determinará a partir de las curvas fuerza-tiempo (Figura 11) que se despliegan como resultado de la deformación aplicada al material. El área bajo la curva de carga representa el trabajo total (W_t) realizado como resultado de la resistencia del material durante la compresión. La contribución elástica reversible (W_e) derivada de W_t puede deducirse a partir del área bajo la curva de descarga (remoción de la compresión), por lo que la energía absorbida representará la deformación plástica (W_p), es decir, es posible calcularla a partir de la diferencia entre W_t y W_e ($W_p = W_t - W_e$) (Ponce-García *et al.*, 2008).

W_p es la capacidad de un material para soportar deformaciones permanentes no recuperables. Dado que las deformaciones desde el punto de biocampo hasta el punto de

ruptura no son todas recuperables, la parte irrecuperable se puede tomar como una medida de la deformación plástica (Mohsenin, 1986).

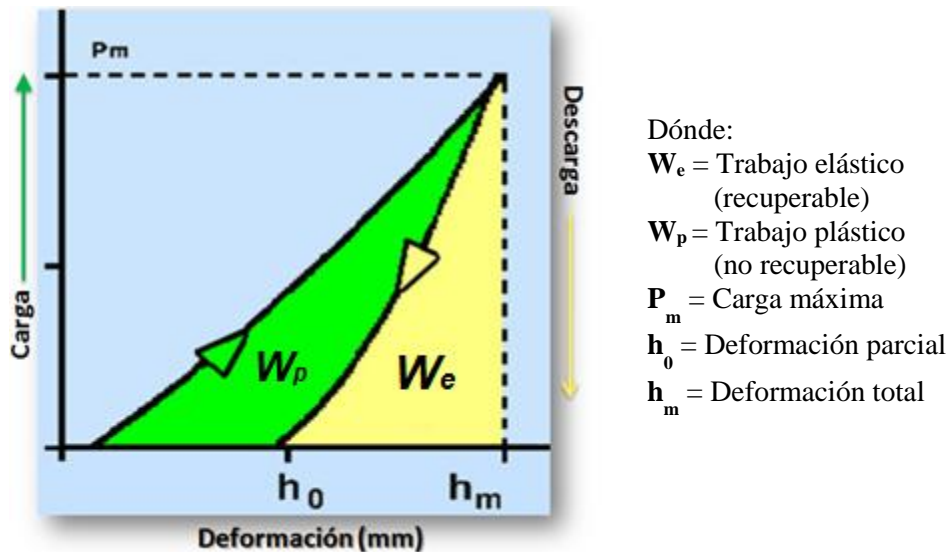


Figura 11. Representación esquemática de un ciclo de compresión (respuesta viscoelástica) durante un ciclo de carga y descarga (Adaptado de Ponce-García *et al.*, 2008).

5.5.4.3. Grado de elasticidad (GE)

Es la relación entre la deformación elástica y la deformación total, cuando un material se carga a un cierto valor y luego se descarga (Mohsenin, 1986). A partir de lo anterior, se considera que la elasticidad es la propiedad de un material para recuperar su forma y dimensiones originales, parcial o totalmente al cesar la acción del esfuerzo aplicado. Un cuerpo es perfectamente elástico si la deformación ocurre instantáneamente con la aplicación de un esfuerzo y esta deformación desaparece completa e instantáneamente cuando se retira el esfuerzo aplicado. Se asume generalmente que existe una relación biunívoca entre el estado de esfuerzo y la deformación en los cuerpos elásticos, de aquí que los efectos dependientes del tiempo sean excluidos (Lakes, 1999).

El *GE* se expresa en porcentaje (%), a fin de que la interpretación (proporción) de la elasticidad respecto a W_t se interprete bajo fines más prácticos, además de que se apertura el comparativo con la resiliencia que en ocasiones se determina en un análisis de perfil de textura. En contexto, la relación de W_e respecto a W_t cuando el material es sujeto a un ciclo de carga y descarga representa *GE*. De manera similar, la relación W_p respecto W_t representaría el grado de plasticidad (*GP*) (Figueroa *et al.*, 2011)

5.5.4.4. Resiliencia (*Res*)

La resiliencia es una medida de cómo la muestra se recupera de la deformación, tanto en términos de velocidad como de fuerzas derivadas. Se calcula a partir de la relación de áreas considerando desde el primer punto de inversión (retroceso) de la sonda hasta el cruce del eje x y el área producida desde el primer ciclo de compresión. La proporción resultante permite tener una idea más objetiva y clara de la recuperación elástica de la muestra. A fin de obtener mejores resultados, es recomendable que la prueba se desarrolle a baja velocidad, lo que permite al material recuperar parcialmente su estado original gracias a su elasticidad (si es que el material posee esta propiedad).

Se considera como la capacidad de un material para almacenar energía de deformación en el rango elástico. Así el área bajo la curva de descarga es una medida de la resistencia del material. Como en el caso de la tenacidad, cuando se usa una curva fuerza-deformación, es deseable conocer la fuerza aplicada y preferentemente establecer el área que recibió la carga, es decir, reconocer el esfuerzo ($\sigma = \frac{F}{A}$) (Mohsenin, 1986).

Específicamente con el uso del macro del analizador de textura universal TA-XT2 será posible recopilar y calcular este parámetro a partir del valor del Área 2:3 / Área 1:2 (Figura

12). Es un valor adimensional que va de 0 a 1; cuanto más cercano a 1, mayor elasticidad (TA-XT2 Plus Texture Analyzer, Operation Manual).

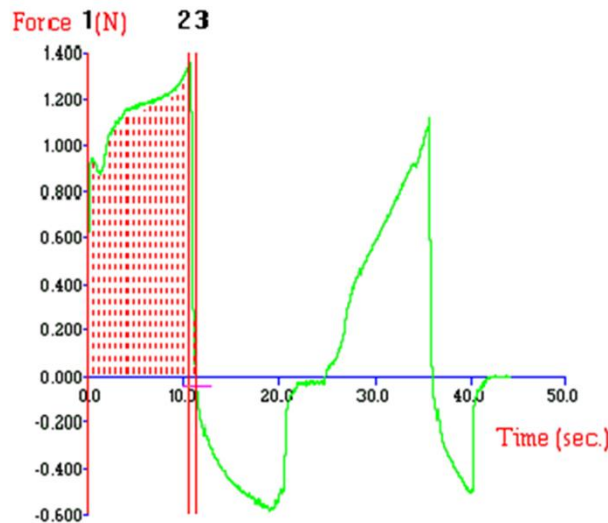


Figura 12. Curva fuerza-tiempo obtenida del Analizador de Textura Universal TA-XT2 en la que se identifican las áreas consideradas para el cálculo de la Resiliencia (TA-XT2 Plus Texture Analyzer Universal, Operation Manual).

5.5.5. Influencia del contenido de humedad del grano sobre sus propiedades físicas y viscoelásticas

El contenido de humedad del grano es una consideración básica de calidad que determina su seguridad durante el almacenamiento, aunque el contenido máximo de humedad aconsejable varía según la especie de grano y la temperatura de almacenamiento esperada (Batey, 2010). Las propiedades físicas dependen de la especie y la variedad, las condiciones climáticas, las medidas agrotécnicas y el contenido de humedad (Al-Mahasneh y Rababah, 2007; Markowski *et al.*, 2013; Warechowska *et al.*, 2013).

En un estudio exhaustivo que comparó el efecto de la humedad sobre diferentes métodos de medición de dureza, (Obuchowski y Bushuk 1980) mostraron que diferentes técnicas

y diferentes cultivares variaban en su sensibilidad al aumento del contenido de humedad. Muchas de las dificultades asociadas con la medición de la dureza se pueden evitar si las muestras se equilibran a un contenido de humedad similar antes de tomar las mediciones de dureza y solo se comparan los resultados de los aparatos que utilizan mecanismos similares para medir la dureza.

El contenido de humedad en el grano afecta considerablemente sus condiciones físicas (Laskowski y Skonecki, 1999; Tabatabaeefar, 2003; Karimi *et al.*, 2009). Aunque se ha informado que el contenido de humedad influye en varias propiedades físicas, Gupta y Prakash (1992) informaron variaciones no significativas de la esfericidad para una amplia gama de contenidos de humedad en el grano de cártamo.

Se encontró que un aumento en el contenido de humedad del grano aumenta el ángulo de reposo en el frijol faba, así como el coeficiente de fricción estática en los granos de cártamo (Gupta y Prakash, 1992). Por lo tanto, varias propiedades físicas de los granos y sus fracciones dependen del contenido de humedad y parecen ser importantes en el diseño de equipos de manipulación y procesamiento.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Consideraciones generales

La investigación comprendió la evaluación de 20 propiedades: 14 físicas y 6 viscoelásticas de granos de trigo, triticale y centeno. La determinación de cada uno de los atributos se realizó en 2 momentos identificados como Etapa 1 y Etapa 2, dependiendo del contenido de humedad (%) de los granos, a decir, 12 y 16%, respectivamente. En cada etapa se realizaron en primera instancia las determinaciones físicas y posteriormente las viscoelásticas. En la Figura 13 se presenta el diagrama de flujo general correspondiente al desarrollo de la investigación.

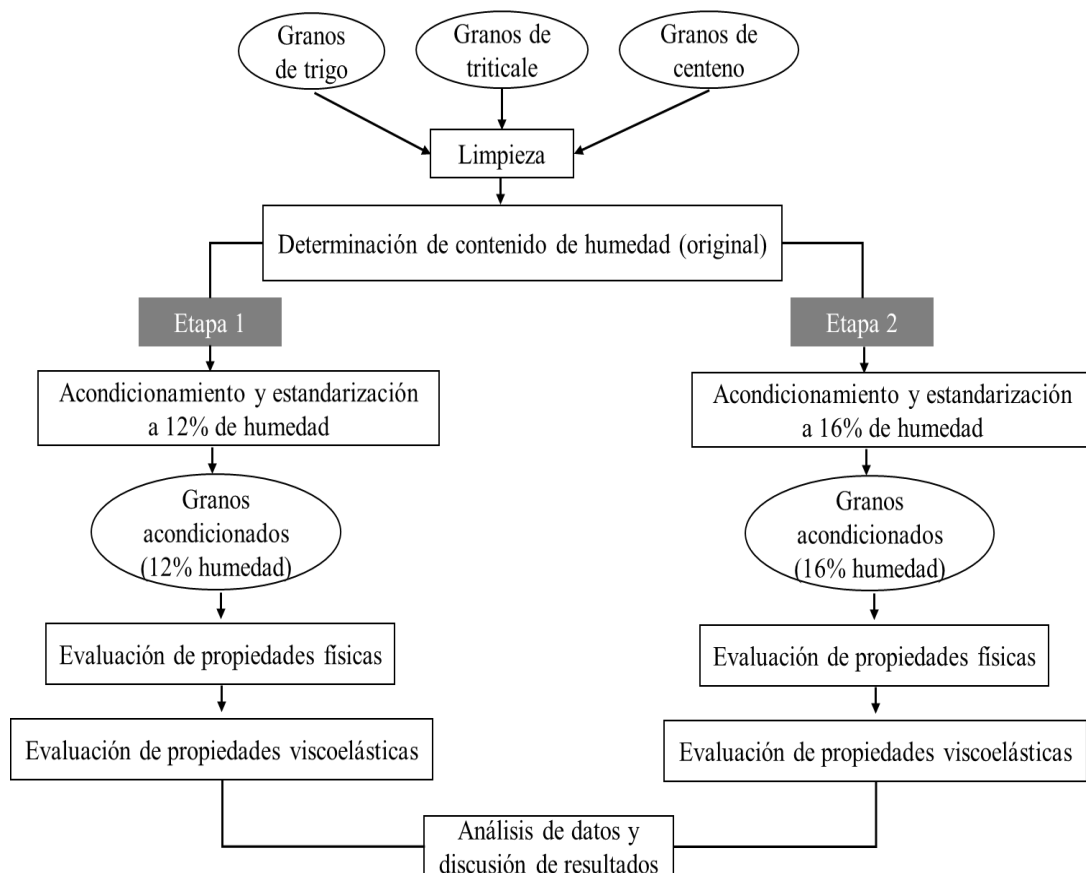


Figura 13. Diagrama de flujo general del desarrollo de la investigación.

6.2. Ubicación del sitio experimental

La investigación se desarrolló en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMéx, en los laboratorios de Bromatología y de Textura.

6.3. Material biológico

Tres tipos de granos cereales fueron evaluados en esta investigación: trigo (var. Rayón), triticale (var. Rebeca) y centeno (criollo Tlaxcala). Cada muestra de granos se limpió manualmente utilizando cribas de aluminio con perforaciones triangulares de 1.98 mm (5/64") (Seedburo Equipment Co. IL, USA) para remover material extraño e impurezas, hasta obtener 1 kg de cada tipo de grano. Cada muestra limpia se depositó en bolsa doble de polietileno y permanecieron en refrigeración (4°C) hasta su utilización.

6.4. Determinación del contenido de humedad y acondicionamiento de los granos

El contenido de humedad de las muestras se determinó en 3 ocasiones a lo largo de la investigación, siguiendo el método ASAE standard S352.2.567 (1999). Para la determinación inicial (humedad original), los granos limpios se retiraron del refrigerador y se dejaron a temperatura ambiente durante 24 horas; una vez temperadas las muestras se aplicó el método. A partir del resultado de humedad inicial obtenido en cada una de las muestras de grano, separadamente se realizó su acondicionamiento a 12% de humedad aplicando la ecuación propuesta por Serna-Saldivar (2012), utilizando 250 g de muestra para cada caso.

$$\text{Agua a adicionar} = \left\{ \left[\frac{100 - \% \text{ humedad inicial}}{100 - \% \text{ humedad deseada}} \right] - 1 \right\} \times (\text{Cantidad de grano a acondicionar}) \quad (1)$$

Concluido el proceso de acondicionamiento a 12% de humedad, se procedió a verificar el contenido de humedad de cada una de las muestras. Finalmente, cuando se requirió se acondicionaron las 3 muestras de grano a 16% de humedad, siguiendo los procedimientos de acondicionamiento y determinación del contenido de humedad ya citados.

Considerar distintos contenidos de humedad en el grano durante la evaluación de sus propiedades es de gran valía para el diseño de equipos utilizados en las operaciones de pre y poscosecha, debido a que en ocasiones es necesario cosechar los granos con alto contenido de humedad (Markowska *et al.*, 2016), además de que durante su almacenamiento y procesamiento prevalecen fluctuaciones.

6.5. Caracterización de las propiedades físicas

Cada una de las determinaciones se realizó de acuerdo con las ecuaciones propuestas a continuación. En todos los casos se reportó el valor promedio de la medición de 20 granos (repeticiones) seleccionados aleatoriamente, correspondientes a cada tipo de grano y a los dos diferentes contenidos de humedad. Las 14 propiedades físicas se agruparon en cuatro categorías: apariencia (2), geométricas (4), peso-volumen-densidad (6) y mecánicas (2).

6.5.1. Apariencia

6.5.1.1. Dimensiones axiales. Se midieron el largo (L), ancho (A) y grosor (G), reportando los resultados en milímetros (mm). La medición de L y A de cada grano se realizó con un vernier digital (modelo CD-6 CS, Mitutoyo, Japón). Por otro lado, el grosor de los granos se determinó con el analizador de textura universal (TA-XT2 Plus, Texture Technologies Corporation, Stable Micro Systems, Surrey, England), siguiendo el método reportado por Ponce-García *et al.* (2013), modificando únicamente el valor de deformación de 3 a 5%.

De acuerdo con este método, el grosor total de un grano equivalente al 100% de su deformación, sin embargo, como sólo se ejercerá un 5% de deformación, la distancia de compresión (mm) que recorre la sonda se utilizó como dato para calcular el grosor del grano, de acuerdo con la ecuación 2:

$$G = (d/5) \times 100 \quad (2)$$

Dónde: G es el grosor del grano en mm; d es la distancia (mm) recorrida por la sonda del analizador de textura luego de aplicar 5% de deformación sobre el grano.

6.5.1.2. Relación ancho-largo (R_{AL}). Parámetro físico obtenido a partir de la siguiente relación (Mohsenin, 1986; Markowski *et al.*, 2013):

$$R_{AL} = \left(\frac{A}{L} \right) \times 100 \quad (3)$$

Dónde: R_{AL} es la relación largo ancho del grano en %; A y L corresponden al ancho y largo en mm, respectivamente.

6.5.2. Propiedades geométricas

6.5.2.1. Diámetro geométrico (D_g) y diámetro aritmético (D_a). Determinaciones calculadas a partir de las dimensiones axiales, siguiendo las ecuaciones propuestas por Sangamithra *et al.* (2016):

$$D_g = (LAG)^{1/3} \quad (4)$$

$$D_a = \frac{(LAG)}{3} \quad (5)$$

Dónde: D_g es el diámetro geométrico en mm; D_a es el diámetro aritmético en mm; L , A y G corresponden respectivamente al largo, ancho y grosor del grano en mm.

6.5.2.2. Superficie de área de grano (S). Característica física determinada a partir de la siguiente ecuación (Sangamithra *et al.*, 2016):

$$S = \pi (D_g)^2 \quad (6)$$

Dónde: D_g es el diámetro geométrico del grano en mm^2 .

6.5.2.3. Esfericidad (ϕ). Atributo físico determinado a partir de la ecuación 7 (Mohsenin, 1986), reportado en % (Sologubik *et al.*, 2013):

$$\phi = \left[\frac{D_g}{L} \right] \times 100 \quad (7)$$

Dónde: ϕ , es la esfericidad del grano en %; D_g , es el diámetro aritmético en mm, y L es el largo del grano en mm.

6.5.3. Propiedades de peso, volumen y densidad

6.5.3.1. Peso individual de grano (PIG). Cada grano evaluado se pesó individualmente en una balanza analítica (OHAUS, mod. BBL61, Boeco, Alemania), registrando su peso en gramos (g).

6.5.3.2. Peso de mil granos (PMG). Manualmente se contaron exactamente 1,000 granos de cada muestra y se reportó su peso en gramos. Esta determinación se realizó por triplicado y se reportó el peso promedio.

6.5.3.3. Volumen elipsoidal (V_e). Considerando las dimensiones axiales determinadas para cada grano y siguiendo la fórmula propuesta por Markowski *et al.* (2013) se realizó esta determinación. Se reportó el valor promedio de 20 lecturas por grano.

$$V_e = \frac{\pi}{6} (LAG) \quad (8)$$

Dónde: V_e es el volumen elipsoidal en mm^3 ; L , A , y G son respectivamente el largo, ancho y grosor del grano en mm.

6.5.3.4. Densidad aparente en volumen (ρ_b). Esta determinación se realizó considerando el principio del método 55-10.01 (AACCI, 2000), sustituyendo el recipiente sugerido en el método oficial, por un vaso de precipitado de 100 mL al cual se le determinó su volumen exacto. Se reportó el valor promedio de 3 repeticiones. Se realizó la determinación siguiendo la fórmula (Bhise *et al.*, 2014):

$$\rho_b = \frac{W_s}{V_s} \quad (9)$$

Dónde: ρ_b es la densidad aparente o densidad en volumen reportada en kg/m^3 ; W_s es el peso de la muestra en kg, y V_s es el volumen ocupado por la muestra en m^3 .

6.5.3.5. Densidad real (ρ_t). Siguiendo el método propuesto por Babić *et al.* (2011) se determinó este parámetro. Se reportó el valor promedio de 3 repeticiones.

$$\rho_t = \frac{P_g}{V_d} \quad (10)$$

Dónde: ρ_t es la densidad real en kg/m^3 ; P_g es el peso del grano en g; V_d es el volumen de desplazamiento del grano en mL.

6.5.3.6. Porosidad en volumen (ϵ_v). Propiedad física evaluada mediante la fórmula siguiente (Mohsenin, 1986). Se reportó el valor promedio de 3 repeticiones.

$$\varepsilon_v = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100 \quad (11)$$

Dónde: ε_v es la porosidad en volumen en %; ρ_b es la densidad en volumen o aparente en kg/m^3 ; ρ_t es la densidad real en kg/m^3 .

6.5.4. Propiedades mecánicas

6.5.4.1. Fuerza máxima (F_{max}) a 5% de deformación. La F_{max} indica la fuerza máxima de compresión aplicada al grano (en Newtons) a una deformación constante de 5%.

6.5.4.2. Dureza (D). Este parámetro se evaluó por compresión uniaxial, mediante el uso del analizador de textura universal TA-XT2 Plus equipado con una sonda SMSP/2 (2 mm) (Figura 14a). La prueba consistió en colocar cada grano en la plataforma del equipo con la parte ventral hacia abajo (Figura 14b) y se comprimió hasta su ruptura (Ponce-García *et al.*, 2013). Los parámetros de evaluación considerados fueron los siguientes: 30% de deformación (compresión) y velocidades de pre-test, test y post-test de 2, 3.5 y 3.5 mm/s, respectivamente.

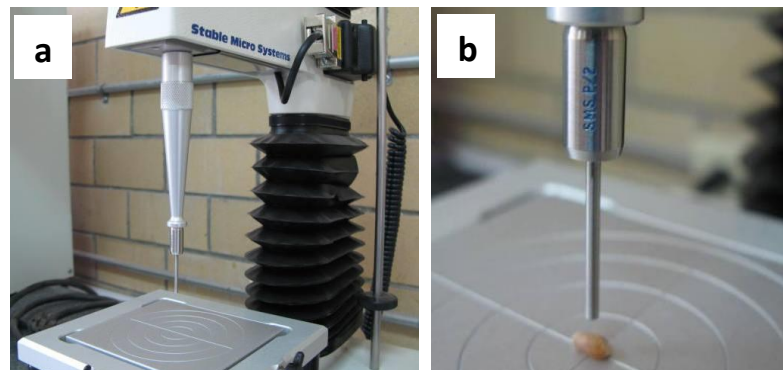


Figura 14. (a) Analizador de textura Universal TA-XT2 con sonda SMSP/2. (b) Posición del grano sobre la plataforma para determinar dureza.

De cada grano se obtuvo una curva fuerza-tiempo, a partir de la cual se recuperó el valor correspondiente a la fuerza máxima (dureza) requerida para su ruptura. Se realizaron 20 repeticiones de cada tipo de grano, reportando el valor promedio. Se determinó esta propiedad de los granos en los 2 niveles de humedad de acondicionamiento (12 y 16%).

6.6. Caracterización de las propiedades viscoelásticas

Para la evaluación de las propiedades viscoelásticas se utilizó el analizador de textura universal TA-XT2 Plus con sonda SMS P/1KS (10 mm), siguiendo el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación reportado por Ponce-García *et al.* (2017b) con dos modificaciones: se sustituyó el modo de compresión simple (Return to start) por el modo TPA (doble compresión). Como segundo ajuste, se incrementó de 3% a 5% el índice de deformación durante la compresión.

Los parámetros de configuración en el analizador de textura fueron: modo TPA, 5% de deformación constante y velocidades de pre-test, test y post-test de 1, 0.1 y 0.1 mm/s, respectivamente. La determinación de las propiedades viscoelásticas se practicó en cada una de las muestras (tipos de grano) y para cada una de las humedades de acondicionamiento (12 y 16%).

Se realizaron 20 mediciones y se reportó el valor promedio correspondiente. A continuación, se describen los procedimientos específicos desarrollados para evaluar los parámetros viscoelásticos.

6.6.1. Módulo de elasticidad o módulo de Young (E). Se evaluó de acuerdo con la metodología de Ponce-García *et al.* (2008). Este parámetro se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (12)$$

Dónde: E es el módulo de elasticidad o Young en MPa; σ es el esfuerzo ($\frac{F_{max}}{\text{área}}$) en $\frac{N}{m^2}$ y ε es la constante de deformación (5%).

Para determinar el área de contacto, cada grano se posó brevemente sobre un cojín con tinta previo a la compresión. Posteriormente, este se transfería cuidadosamente a la plataforma del analizador de textura que contenía una pieza de papel blanco, sobre la cual quedaba impresa el área del grano luego de la compresión (Figura 15). Al concluir el ensayo los granos se desechaban y cada impresión se identificaba y digitalizaba para calcular el área correspondiente utilizando el software IMAGE-J.

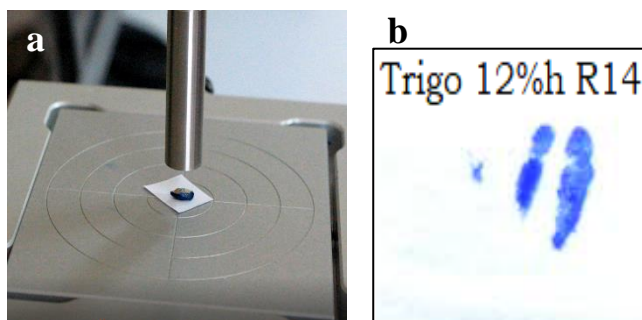


Figura 15. (a) Grano con tinta sobre papel antes de la compresión. (b) Impresión (ampliada) sobre el papel, posterior a la compresión.

6.6.2. Trabajo total (W_t), elástico (W_e) y plástico (W_p). El trabajo de compresión se determinó a partir de las respectivas curvas carga-descarga obtenidas luego de la compresión (Ponce-García *et al.*, 2008). El área bajo la curva de compresión (carga) determinó el trabajo total (W_t). La contribución elástica reversible (W_e) del trabajo total se calculó a partir del área bajo la curva de descarga y la energía absorbida por la

deformación plástica (W_p), misma que se calculó considerando la diferencia entre las dos primeras ($W_p = W_t - W_e$) (Gubicza *et al.*, 1996).

6.6.3. Grado de elasticidad (GE). Es la proporción de W_e respecto a W_t luego de aplicar el ciclo de carga y descarga. GE se expresa cómo % (Figueroa *et al.*, 2011).

6.6.4. Resilencia (Res). Esta determinación (adimensional) se obtuvo directamente del análisis de perfil de textura realizado con el analizador de textura (TA-XT2 Plus Texture Analyzer Universal, Operation Manual). Sin embargo, al multiplicar el valor obtenido por 100, entonces el resultado se interpreta como dato porcentual.

6.7. Diseño y análisis estadístico

Para evaluar las propiedades físicas y viscoelásticas de los granos se consideró un diseño de experimentos completamente aleatorizado de dos factores. Los factores evaluados fueron: tipo de grano y contenido de humedad (12% y 16%). Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia del 95% y una prueba de Tukey para observar las diferencias entre las medias de los tratamientos ($P < 0.05$). Se llevaron a cabo correlaciones simples de Pearson, considerándose significativas y muy significativas si $P < 0.05$ y $P < 0.01$, respectivamente. El análisis estadístico se realizó con el software SAS, versión 9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC, USA 2002).

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Caracterización de las propiedades físicas de los granos

Los resultados de las propiedades físicas de los granos de trigo, centeno y triticale evaluados en la presente investigación, se discuten a continuación.

7.1.1. Características de apariencia

De acuerdo con el análisis de varianza (ANDEVA) realizado en esta investigación, se determinó que el tipo de grano (trigo, centeno y triticale) y su contenido de humedad (12% y 16%) tuvieron un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) sobre la longitud (L), ancho (A), grosor (G) y relación ancho-largo (R_{AL}) de los granos, excepto en la R_{AL} , sobre la cual el contenido de humedad no mostró un efecto estadísticamente significativo, pero sí el tipo de grano. En el Cuadro 3 se presentan los valores medios de las propiedades físicas de apariencia de los tres tipos de grano a 12% y 16% de humedad de acondicionamiento.

Longitud (L). Los tres tipos de granos presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí en ambos contenidos de humedad, siendo los granos de triticale los que registraron los valores medios más elevados, tanto a 12% como a 16% de humedad, a pesar de que en los granos de trigo la longitud (L) se incrementó en mayor proporción (6.3%) con el aumento del contenido de humedad. En promedio y considerando los tres tipos de grano en conjunto, L incrementó apenas un 2.8% (de 6.9 a 7.1 mm) (Figura 16).

Ancho (A). De acuerdo con los resultados del Cuadro 3, a 12% de humedad los granos de trigo, centeno y triticale presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí, mientras que a 16% de humedad los granos de centeno y triticale no presentaron diferencias entre ellos, pero sí con los de trigo, siendo estos últimos los granos que incrementaron en mayor proporción su valor de A (11%) como consecuencia del aumento

del contenido de humedad, además de que registraron los valores medios más altos en ambos contenidos de humedad. En promedio y derivado del incremento de humedad de los granos, A aumentó 6.2% su valor considerando los tres granos en conjunto (Figura 16).

Grosor (G). A 12% de humedad, los tres tipos de grano presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí. A 16% de humedad, los granos de trigo y triticale no mostraron diferencias estadísticas entre ellos, pero sí con los granos de centeno. En ambas humedades de acondicionamiento, los valores medios más elevados de G correspondieron a los granos de triticale (Cuadro 3). Por otro lado, el aumento más significativo de G (11.5%) se registró en los granos de centeno. En promedio y considerando los tres tipos de grano en conjunto, G incrementó 6.6% con el aumento de la humedad de acondicionamiento de los granos (Figura 16).

Relación ancho largo (R_{AL}). En el Cuadro 3 se observa que tanto a 12% como a 16% de humedad, los granos de trigo mostraron los valores medios más elevados de R_{AL} (56.6% y 58.1%, respectivamente) siendo estadísticamente diferentes a los granos de centeno y triticale. Por otro lado, se determinó que los granos de centeno fueron los que incrementaron en mayor proporción su valor de R_{AL} (3.7%) con el incremento de humedad, y en contraste los granos de triticale tuvieron un incremento mínimo (0.2%) en este parámetro. En promedio, el valor de R_{AL} incrementó apenas 2% al pasar de 12% a 16% de humedad (Figura 16).

De acuerdo con Solomon y Zewdu (2009), el aumento de tamaño (dimensiones en general) podría atribuirse a la expansión del grano como resultado de la absorción de humedad en los espacios intracelulares dentro de la semilla.

Cuadro 3. Valores medios de las propiedades físicas de apariencia (L , A , G y R_{AL}) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.

	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H
	L (mm)		A (mm)		G (mm)		R_{AL} (%)	
Trigo	6.3 ±0.24c	6.7 ±0.38c	3.6 ±0.24a	4.0 ±0.70a	3.2 ±0.15b	3.3 ±0.19a	56.6 ±3.87a	58.1 ±5.24a
Centeno	7.0 ±0.47b	7.2 ±0.36b	2.8 ±0.23c	3.0 ±0.32b	2.6 ±0.17c	2.9 ±0.16b	40.1 ±3.50b	41.6 ±4.31b
Triticale	7.5 ±0.42a	7.6 ±0.46a	3.2 ±0.25b	3.2 ±0.18b	3.3 ±0.22a	3.5 ±0.21a	42.5 ±3.75b	42.6 ±3.75b
Promedio	6.9	7.1	3.2	3.4	3.0	3.2	46.4	47.4

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con letras diferentes indican diferencias estadísticas. L =Largo; A =Ancho; G =Grosor; R_{AL} =Relación ancho-largo. n=20.

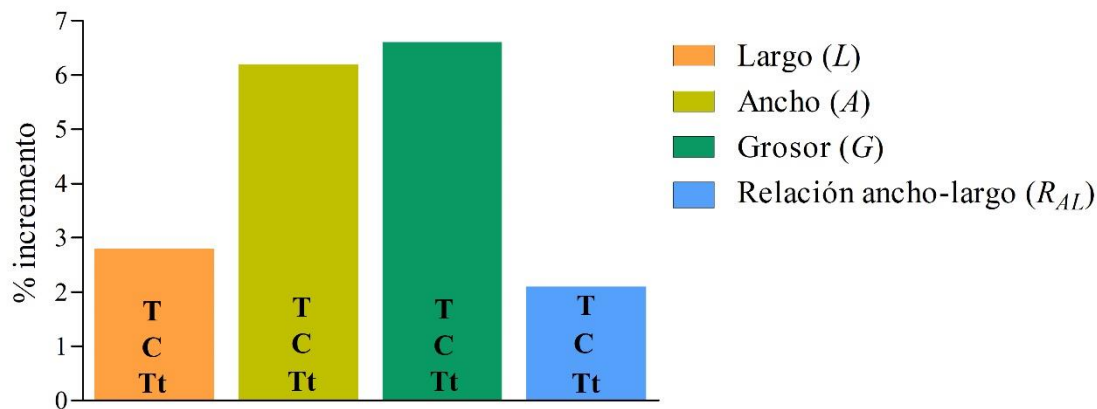


Figura 16. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades de apariencia (L , A , G y R_{AL}).

Estudios similares realizados en granos de trigo (Al-Mahasneh y Rababah, 2007) y cebada (Sologubik *et al.*, 2013) concuerdan con la presente investigación, en el sentido de que L es la dimensión que en menor proporción aumentó su tamaño. En contraste, otros estudios determinaron que el parámetro A fue el que aumentó en mayor medida, mientras que en la presente investigación se concluyó que fue G la dimensión que se incrementó en mayor proporción. En coincidencia, se determinó que el incremento de tamaño (%) de A y G fue muy cercano. De manera similar, Shahbazi *et al.* (2014) determinaron un incremento de 0.1% y 5%, respectivamente para L y A en granos de triticale cuyo contenido de humedad pasó de 12% a 17%, por lo que sus hallazgos confirman que L es el parámetro que sufre el menor efecto como consecuencia del incremento de humedad, además de que A presentó un incremento similar al determinado en nuestra investigación.

Determinar las dimensiones axiales de los granos facilita un mejor diseño y selección de equipos utilizados durante la poscosecha, por ejemplo, para determinar el tamaño (selección) de las cribas de limpieza y clasificación, así como para realizar cálculos más precisos sobre el flujo del aire durante las operaciones de aireación y el secado, entre otras ventajas (El-Fawal *et al.*, 2009). Por ejemplo, Gorial y O'Callahan (1990) mencionan que derivado de las diferencias físicas que existen entre los granos de trigo y cebada, resulta más fácil separar impurezas de los granos de trigo.

Los resultados de esta investigación concuerdan con los reportados por Aprodu y Banu (2017), quienes estimaron R_{AL} en granos de trigo, centeno y triticale a 14% de humedad, determinando valores de 55.7%, 37.9% y 46.6%, respectivamente. De acuerdo con lo anterior, es posible inferir que las dimensiones axiales y las propiedades geométricas de los granos guardan cierta relación positiva directa entre algunos de sus parámetros, por

ejemplo, cuanto mayor es el valor de R_{AL} , la apariencia de estos tiende a ser más esférica, debido a que la proporción o diferencia entre A y L es menor.

7.1.2. Propiedades geométricas

Las dimensiones axiales y las propiedades geométricas de los granos guardan una amplia relación entre sí, debido a que las últimas se calculan en función de las primeras. En esta investigación, el análisis de varianza (ANDEVA) realizado indicó que el tipo de grano (trigo, centeno y triticale) y el contenido de humedad de estos (12% y 16%) tuvieron un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) en todas las propiedades geométricas evaluadas en esta investigación, excepto que el contenido de humedad sólo mostró un efecto estadísticamente significativo ($P < 0.05$) sobre la esfericidad. En el Cuadro 4 se presentan los valores medios de las propiedades geométricas de los tres tipos de grano a 12% y 16% de humedad de acondicionamiento.

A 12% de humedad, las diferentes características geométricas presentaron los siguientes rangos de valores: D_g (3.7 - 4.3 mm), D_a (4.1 - 4.6 mm), S (44.3 - 58.6 mm²) y esfericidad ϕ (53.0 - 65.9%). Por otro lado y de manera general, cuando el contenido de humedad de los granos incrementó a 16%, los valores medios de las propiedades geométricas tendieron a incrementarse, registrándose datos comprendidos entre los siguientes rangos: D_g (4.0 - 4.4 mm), D_a (4.4 - 4.7 mm), S (50.5 - 61.8 mm²) y ϕ (55.3 - 66.2%). Los granos de centeno presentaron los valores medios más bajos en todas las determinaciones geométricas, tanto a 12% como a 16% de humedad, siendo en consecuencia estadísticamente diferentes a los granos de trigo y triticale.

Sin embargo, fueron precisamente los granos de centeno los que registraron los incrementos más considerables en los cuatro parámetros geométricos cuando el contenido

de humedad pasó de 12% a 16%. En contraparte, los granos de triticale fueron los que incrementaron en menor proporción sus respectivos parámetros geométricos (excepto en la esfericidad). Considerando conjuntamente los tres tipos de grano y el incremento de humedad, los valores promedio de D_g , D_a , S y ϕ aumentaron 5.0%, 4.6%, 9.2% y 1.9%, respectivamente (Figura 17).

Gürsoy y Güzel (2010) reportaron valores promedio ligeramente inferiores (3.8 mm) a los de la presente investigación para D_g y D_a , pero similares para ϕ (55.5%) en granos de trigo con contenido de humedad entre 8.6% y 9.77%. De manera similar, Al-Mahasneh y Rababah (2007) y Bhise *et al.* (2014) refirieron valores de D_g en granos de trigo cercanos a los de esta investigación, mientras que tendencias y comportamientos semejantes para D_g en granos de cebada fueron reportados por Sologubik *et al.* (2013) y en granos de soya, cacahuete y semillas de algodón por El-Gamal *et al.* (2011). Específicamente con relación al D_g y la respuesta que tiende a presentar cuando se incrementa el contenido de humedad de los granos, Gorial y O'Callahan (2004) señalaron que el D_g puede variar considerablemente para objetos irregulares como los granos, por lo que, para definir más objetivamente la forma de estos, se debe considerar el D_g con relación al diámetro de una esfera (esfericidad).

Derivado de lo anterior, Al-Mahasneh y Rababah (2007) determinaron que prevalece una relación positiva entre la esfericidad (ϕ) y el contenido de humedad del grano. En contraparte, Bhise *et al.* (2014) afirmaron que la relación esfericidad-humedad es inversa, es decir, que se presenta un descenso de la ϕ como resultado del incremento del contenido de humedad en el grano.

Cuadro 4. Valores medios de las propiedades geométricas (D_g , D_a , S y ϕ) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.

	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H
	D_g (mm)		D_a (mm)		S (mm ²)		ϕ (%)	
Trigo	4.2 ±0.17a	4.4 ±0.15A	4.4 ±0.16b	4.6 ±0.15A	55.5 ±4.4a	61.8 ±3.9A	65.9 ±2.3a	66.2 ±3.3A
Centeno	3.7 ±0.17b	4.0 ±0.22B	4.1 ±0.21c	4.4 ±0.21B	44.3 ±4.3b	50.5 ±5.6B	53.0 ±2.7c	55.3 ±2.8C
Triticale	4.3 ±0.23a	4.4 ±0.16A	4.6 ±0.23a	4.7 ±0.19A	58.6 ±5.9a	61.1 ±4.3A	57.4 ±2.4b	58.1 ±2.4B
Promedio	4.0	4.2	4.3	4.5	52.8	57.8	58.7	59.8

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras minúsculas o mayúsculas son estadísticamente diferentes para 12% y 16% de humedad (b.h.), respectivamente. D_g =Diámetro Geométrico; D_a =Diámetro Aritmético; S =Superficie de área; ϕ =Esfericidad. n=20.

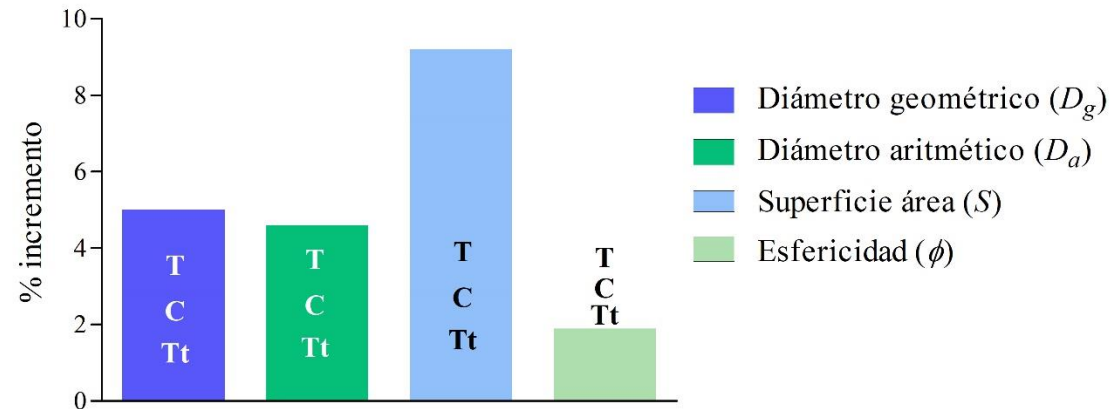


Figura 17. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades geométricas (D_g , D_a , S y ϕ).

A este respecto, Sahoo y Srivastava (2002) señalaron que un aumento inicial en los valores de ϕ puede deberse a un incremento proporcional en la longitud, ancho y grosor del grano. Sin embargo, si la humedad del grano es muy alta, puede ocasionarse mayor aumento de L en comparación con A y G , lo que podría llegar a provocar una tendencia a la baja en los valores de esfericidad. Partiendo de lo anterior y de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación (Cuadro 4), la ϕ mostró un ligero incremento en los tres tipos de grano cuando el contenido de humedad aumentó de 12% a 16%, es decir, prevaleció una relación positiva entre estas variables.

Estadísticamente, los tres tipos de grano fueron diferentes entre sí en su ϕ en ambos contenidos de humedad, siendo los granos de trigo los que presentaron los valores más elevados (65.9% y 66.2%, respectivamente) y los de centeno los más bajos (53% y 55.3%, respectivamente). Lo anterior demuestra que los granos de trigo tienden a ser marcadamente más esféricos que sus contrapartes, o en otro sentido y como ya se ha comentado, los granos de centeno guardan una relación ancho-largo (R_{AL}) menor, lo que en consecuencia determina que su ϕ tienda a ser menor.

En lo que respecta a la superficie área (S), Al-Mahasneh y Rababah (2007) determinaron que prevalece una relación positiva entre este parámetro y el contenido de humedad. Como puede apreciarse en el Cuadro 4, para ambos contenidos de humedad (12% y 16%) los granos de trigo y triticale no presentaron diferencias estadísticas entre sí, siendo estadísticamente diferentes a los granos de centeno, los cuales registraron los valores más bajos de S tanto a 12% como a 16% de humedad (44.3 mm² y 50.5 mm², respectivamente). Adicionalmente, los granos de centeno presentaron el incremento más significativo de S (13.9%) cuando el contenido de humedad aumentó. Comportamientos y tendencias

similares a los de esta investigación han sido reportados en granos de quinoa (Jan *et al.*, 2019) y arroz (Zareiforoush *et al.*, 2009).

7.1.3. Propiedades de peso, volumen y densidad

De acuerdo con los resultados del ANDEVA realizado en esta investigación, se determinó que el tipo de grano (trigo, centeno y triticale) tuvo un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) en todas las propiedades de peso, volumen y densidad evaluadas. Por otro lado, el contenido de humedad tuvo un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) en la mayoría de las propiedades, excepto en el peso individual de los granos (*PIG*), donde el efecto sólo fue significativo ($P < 0.05$), además de no mostrar significancia ($P > 0.05$) sobre la porosidad. En el Cuadro 5 se presentan los valores medios de las propiedades de peso, volumen y densidad de los tres tipos de granos a 12% y 16% de humedad.

Peso individual de los granos (*PIG*). El valor promedio de este parámetro a 12% de humedad considerando los tres tipos de grano fue 0.048 g, siendo los granos de centeno los que registraron el menor peso (0.038 g) y los de triticale el mayor (0.054 g), por lo que estadísticamente los granos de centeno fueron diferentes a los otros dos tipos de grano. Cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó a 16%, el *PIG* de centeno y triticale incrementó 18.4% y 7.4%, respectivamente, (12.9% en promedio). Contrario a esta tendencia, el *PIG* de trigo mostró un descenso de 5.6% (Figura 18).

Gürsoy y Güzel (2010) determinaron el *PIG* de trigo de diferentes variedades a niveles de humedad que oscilaron entre 8.6% y 9.7%. Los resultados reportados indicaron que la variedad de trigo con mayor contenido de humedad (9.7%) registró el *PIG* más alto (0.053 g), valor idéntico al reportado en esta investigación también para granos de trigo, pero con contenido de humedad de 12%.

Cuadro 5. Valores medios de las propiedades físicas de peso (*PIG* y *PMG*), volumen (V_e) y densidad (ρ_b , ρ_t y \mathcal{E}_v) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.

	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H
	<i>*PIG</i> (g)		<i>**PMG</i> (g)		<i>*V_e</i> (mm ³)		<i>**ρ_b</i> (kg/m ³)		<i>**ρ_r</i> (kg/m ³)		<i>**P</i> (%)	
Trigo	0.053 ±0.007a	0.050 ±0.007B	50.7 ±0.4a	51.0 ±2.7A	39.1 ±4.7a	45.9 ±4.4A	800 ±2.5b	763 ±7.0A	1115 ±3.6b	1018 ±3.6B	28.2 ±0.8b	25.3 ±0.7B
Centeno	0.038 ±0.005b	0.045 ±0.005B	37.7 ±0.5b	37.6 ±1.6B	27.9 ±4.0b	41.6 ±4.3B	811 ±2.7a	754 ±15.1A	1033 ±6.2c	1020 ±7.5B	21.5 ±0.6c	26.0 ±1.3B
Triticale	0.054 ±0.009a	0.058 ±0.010A	50.5 ±0.4a	50.0 ±0.3A	42.5 ±6.3a	45.2 ±4.7A	749 ±4.1c	721 ±5.5B	1201 ±3.0a	1099 ±8.7A	37.5 ±0.7a	34.7 ±0.6A
Promedio	0.048	0.051	46.3	46.2	36.5	44.2	786	746	1116	1045	29.0	28.6

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras minúsculas o mayúsculas son estadísticamente diferentes para 12% y 16% de humedad (b.h.), respectivamente. *PIG* = Peso Individual de Grano; *PMG* = Peso de Mil Granos; V_e = Volumen elipsoidal; ρ_a = Densidad aparente; ρ_r = Densidad real; P = Porosidad en volumen. *n=20; **n=3.

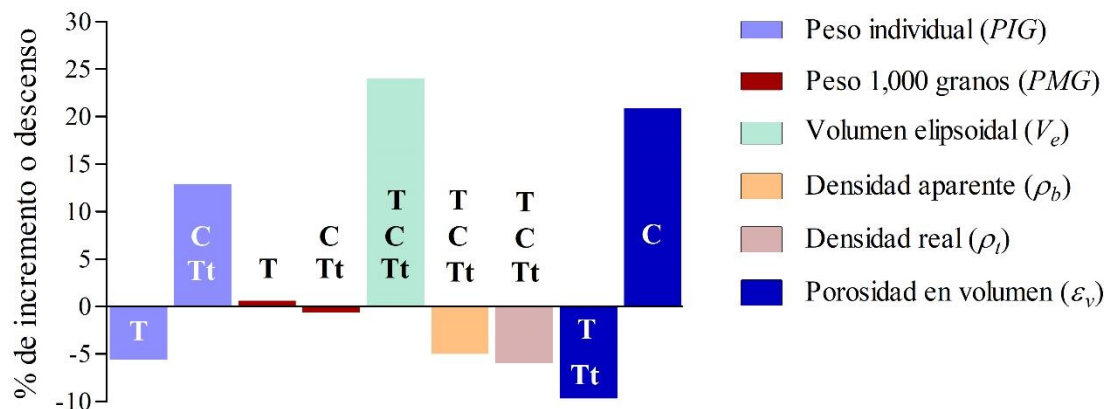


Figura 18. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades de peso (*PIG* y *PMG*), volumen (V_e) y densidad (ρ_b , ρ_t y \mathcal{E}_v).

Peso de 1,000 granos (PMG). Los granos de trigo y triticale no presentaron diferencias estadísticas entre sí, tanto a 12% como a 16% de humedad, por lo que fueron estadísticamente diferentes a los granos de centeno en ambos contenidos de humedad (Cuadro 5). Contrario a la tendencia que se observó en el *PIG*, cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó a 16%, el *PMG* descendió en el centeno (0.2%) y el triticale (1.0%), mientras que en los granos de trigo se presentó un comportamiento inverso, incrementándose 0.6% el *PMG* (Figura 18).

De manera general, se observó que el efecto o influencia del incremento del contenido de humedad sobre el *PMG* en los tres tipos de grano fue mínimo, destacando la marcada diferencia entre los valores del *PMG* de los granos de centeno respecto a sus contrapartes. Markowska *et al.* (2016) determinaron que en granos de trigo cuyo contenido de humedad oscilaba entre 14%-18%, el *PMG* no mostraba diferencias estadísticas significativas. En contraste, Karimi *et al.* (2009) reportaron un incremento notable del *PMG* (18.3 g a 22.4 g) en granos de trigo cuyo contenido de humedad aumentó de 8% a 18%. De manera similar, Al-Mahasneh y Rababah (2007) también reportaron incrementos importantes en el *PMG* de trigo cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó. En granos de cacahuate, soya y semillas de algodón, El-Gamal *et al.* (2011) reportaron incrementos del *PMG* cuando el incremento de humedad osciló entre 6% y 16%.

Volumen elipsoidal (V_e). Se determinó que los granos de trigo y triticale no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí tanto a 12% como a 16% de humedad, siendo, por tanto, estadísticamente diferentes a los granos de centeno. Los valores medios de V_e a 12% de humedad oscilaron entre 27.9 mm³ (centeno) y 42.5 mm³ (triticale), con un valor promedio de 36.5 mm³ considerando los tres tipos de grano (Cuadro 5). Al incrementarse el contenido de humedad a 16%, los valores medios de V_e del trigo, centeno

y triticale aumentaron 17%, 49% y 7%, respectivamente, 24% en promedio considerando los tres tipos de grano (Figura 18).

Los valores medios de la **densidad aparente** (ρ_b) o densidad en bulk de los granos evaluados se presentan en el Cuadro 5. Se observó que a 12% de humedad, los granos de centeno alcanzaron el valor medio más alto de ρ_b (811 kg/m³), seguido de los granos de trigo (800 kg/m³) y de triticale (749 kg/m³). Es posible que los granos de centeno hayan alcanzado el valor medio más elevado de ρ_b , probablemente debido a su forma y tamaño, ya que estos fueron los granos que registraron el menor tamaño respecto a su anchura y grosor, lo que pudo propiciar que su acomodo y distribución en el contenedor (recipiente de medición) haya sido mayor.

Al incrementarse el contenido de humedad de los granos a 16%, los granos de trigo (763 kg/m³) y centeno (754 kg/m³) no presentaron diferencias estadísticas entre sí en su densidad aparente (ρ_b), siendo en consecuencia diferentes a los de triticale (721 kg/m³). El incremento del contenido de humedad de los granos tuvo un efecto inverso (relación negativa) sobre la ρ_b , ya que los valores de este parámetro descendieron 4.6%, 6.9% y 3.8% para trigo, centeno y triticale respectivamente, cuando el contenido de humedad de los granos pasó de 12% a 16%, es decir, el descenso promedio de ρ_b considerando los tres tipos de grano fue alrededor de 5% (Figura 18).

Este efecto se asocia al hecho de que cuando el contenido de humedad de los granos aumenta, estos tienden a hincharse y, en consecuencia, ocupan más espacio intergranario en el recipiente de medición o de contención, es decir, la cantidad de granos contenidos en el recipiente desciende, lo que en consecuencia provoca un descenso de la masa o peso y a pesar de que el incremento de humedad del grano contribuye a elevar su peso, el efecto ocasionado por el aumento de volumen (tamaño) influye en mayor proporción que el

efecto del agua de acondicionamiento. Gürsoy y Güzel (2010) determinaron valores de ρ_b en granos de trigo coincidentes con los de esta investigación.

Densidad real (ρ_t). Los valores medios registrados en ambos contenidos de humedad se presentan en el Cuadro 5. Los granos de trigo, centeno y triticale con 12% de humedad fueron estadísticamente diferentes entre sí. El valor promedio de ρ_t de los granos de triticale fue el mayor (1201 kg/m³), seguido del trigo (1115 kg/m³) y el centeno (1033 kg/m³). Los granos de centeno y triticale a 12% de humedad presentaron un comportamiento inverso entre sus densidades aparente y real, es decir, mientras que los granos de centeno registraron el mayor valor medio de ρ_b y el menor de ρ_t , en los granos de triticale ocurrió precisamente el efecto contrario.

Shahbazi *et al.* (2014) presentaron resultados de ρ_t semejantes a los de la presente investigación, al evaluar granos de triticale y trigo a 12% y 17% de humedad. Estos autores determinaron que el valor promedio de ρ_t se incrementó 1.6% en cada uno de los dos tipos de grano cuando el contenido de humedad aumentó. Contrariamente, en nuestra investigación la ρ_t tuvo descensos de 8.6% (trigo), 1.2% (centeno) y 8.4% (triticale) (promedio de 6%), cuando el contenido de humedad pasó de 12% a 16% (Figura 18). Una tendencia similar al de la presente investigación en granos de soya y semillas de algodón fue reportada por El-Gamal *et al.* (2011), quienes determinaron un descenso en los valores medios de ρ_t cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó.

Por otro lado, Gürsoy y Güzel (2010) determinaron valores de ρ_t en granos de trigo ligeramente superiores a los de la presente investigación, siendo importante señalar que el contenido de humedad de los granos evaluados en ambos estudios difirió, siendo ligeramente mayores los considerados en nuestra investigación.

Los valores medios de la **porosidad en volumen** (\mathcal{E}_v) se aprecian en el Cuadro 5. Cuando el contenido de humedad de los granos fue 12%, la \mathcal{E}_v fue estadísticamente diferente entre los tres tipos de granos, siendo el triticale y el centeno los cereales que presentaron los valores medios mayor (37.5%) y menor (21.5%), respectivamente.

Por otro lado, cuando el contenido de humedad de los granos fue de 16%, el trigo y el centeno no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí, siendo estadísticamente diferentes a los granos de triticale, los cuales registraron el valor promedio más elevado (34.7%). En este nivel de humedad, se observó un comportamiento contrastante, ya que el valor medio de la \mathcal{E}_v se redujo 11.4% en trigo y 8% en triticale (9.7% en promedio), mientras que aumentó considerablemente (20.9%) en los granos de centeno (Figura 18).

7.1.4. Propiedades mecánicas

El ANDEVA realizado permitió establecer que el tipo de grano (trigo, centeno y triticale) tuvo un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) sobre la fuerza máxima (F_{max}) y la dureza (D) de los granos, mientras que el contenido de humedad (12% y 16%) mostró un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) sobre la F_{max} y significativo ($P < 0.05$) sobre la D . En el Cuadro 6 se presentan los valores medios de F_{max} de los tres tipos de grano a 12% y 16% de humedad.

Fuerza máxima (F_{max}). De acuerdo con los resultados, a 12% de humedad los granos de centeno registraron el valor medio más alto de F_{max} (21.0 N), siendo estadísticamente diferentes a los granos de trigo y triticale, los cuales prácticamente tuvieron el mismo valor medio. Considerando conjuntamente los tres tipos de grano, el valor promedio de F_{max} a 12% de humedad fue 16.8 N.

Con el incremento del contenido de humedad de los granos a 16%, el valor medio de la F_{max} disminuyó considerablemente en los tres tipos de grano, siendo más pronunciada esta disminución en los granos de triticale (49.3%). En promedio, la F_{max} de los tres tipos de grano a 16% de humedad fue 10.0 N, por lo que la disminución promedio de este parámetro al pasar de 12% a 16% de humedad, fue 40.4% (Figura 19).

Cuadro 6. Valores medios de las propiedades mecánicas (F_{max} y D) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.

	12%H	16%H	12%H	16%H
	F_{max} (N)		$Dureza$ (N)	
Trigo	14.7 ±1.6b	10.8 ±4.0A	74 ±21b	69 ±30B
Centeno	21.0 ±2.5a	11.8 ±2.1A	87 ±20ab	76 ±15AB
Triticale	14.6 ±2.1b	7.4 ±2.4B	99 ±29a	87 ±15A
Promedio	16.8	10.0	87	77

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras minúsculas o mayúsculas son estadísticamente diferentes para 12% y 16% de humedad (b.h.), respectivamente. F_{max} = Fuerza máxima (a 5% de deformación). n=20.

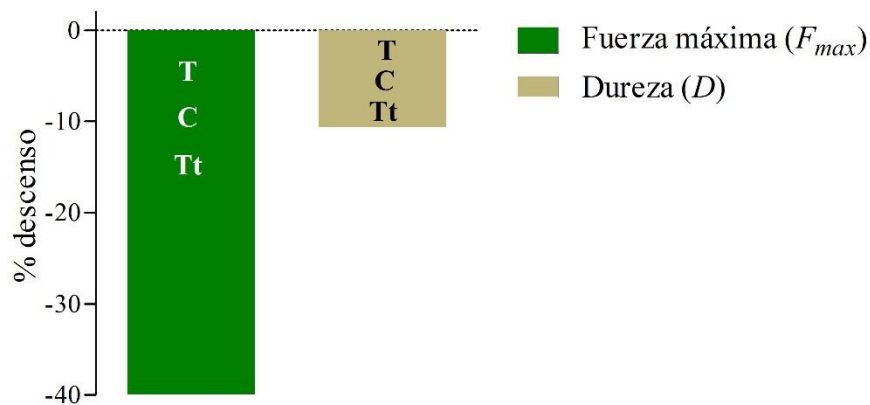


Figura 19. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio de sus propiedades mecánicas (F_{max} y D).

Los valores medios de **dureza (D)** de los tres tipos de grano a 12% y 16% de humedad se presentan en el Cuadro 6. De acuerdo con los resultados de esta investigación, a 12% de humedad, los granos de triticale fueron los que registraron la mayor dureza (99 N) y en contraste, los de trigo resultaron ser menos duros (74 N). Estadísticamente, estos dos tipos de granos fueron diferentes, mientras que los granos de centeno fueron estadísticamente iguales a los de trigo y triticale. El valor promedio de D a 12% de humedad y considerando los tres tipos de grano en conjunto fue de 87 N.

Como era de esperarse, al incrementarse el contenido de humedad de los granos a 16%, la D de los tres tipos de grano disminuyó y nuevamente se presentó la misma tendencia y comportamiento que a 12% de humedad, es decir, los granos de triticale registraron el mayor valor (87 N) y los granos de trigo el menor (69 N), manteniéndose los de centeno con un valor intermedio. En promedio, la D de los granos disminuyó 11.5%, debido al incremento del contenido de humedad de los granos (Figura 19). La D de los granos siempre presentará una relación negativa o inversa respecto a su contenido de humedad, es decir, a mayor contenido de humedad en el grano, menor será su dureza.

7.2. Caracterización de las propiedades viscoelásticas de los granos

Los resultados de las propiedades viscoelásticas de los granos de trigo, centeno y triticale evaluados a 12% y 16% de humedad se discuten a continuación. Con base en los resultados obtenidos a partir del ANDEVA, se determinó que el tipo de grano (trigo, centeno o triticale) y el contenido de humedad (12% y 16%) tuvieron un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) sobre todas las propiedades viscoelásticas evaluadas (módulo de elasticidad, trabajo total, trabajo elástico, trabajo plástico, grado de elasticidad y resiliencia), excepto para el trabajo plástico (W_p), donde el tipo de grano no tuvo un efecto

significativo ($P > 0.05$). En el Cuadro 7 se presentan los valores medios correspondientes a cada una de las determinaciones viscoelásticas realizadas en los tres tipos de granos a dos diferentes contenidos de humedad (12% y 16%).

Módulo de elasticidad (E). Cuando el contenido de humedad de los granos fue 12%, los granos de centeno registraron un valor de E (12.1 N) considerablemente superior (más del doble) al de sus contrapartes. Como resultado de lo anterior, el trigo y el triticale no presentaron diferencias estadísticas entre sí, pero fueron diferentes al centeno (Cuadro 7). Entre otras relaciones, cuando el agua está en combinación con el almidón de los granos, se produce un efecto plastificante, lo que en consecuencia incrementa el trabajo viscoso y disminuye el trabajo elástico del material. En este contexto, resulta evidente que cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó de 12 % a 16%, los respectivos valores medios de E disminuyeron.

A 16% de humedad, nuevamente se presentó la misma tendencia que a 12%, es decir, estadísticamente los granos de centeno fueron diferentes a los de trigo y triticale, sólo que, en este nivel de humedad, los respectivos valores de E fueron menores para todos los tipos de grano. El rango de E a 16% de humedad osciló entre 3.2 MPa (triticale) y 5.2 MPa (centeno). Se presentó un descenso del 45% en el valor promedio de E al incrementarse el contenido de humedad de los granos de 12% a 16%. De manera particular, los granos de centeno registraron el mayor descenso (57%) en este parámetro, sin embargo, es importante notar que, para ambos niveles de humedad, los granos de centeno manifestaron mejores propiedades elásticas que sus contrapartes.

Cuadro 7. Valores medios de las propiedades viscoelásticas (W_t , W_e , W_p , GE y Res) de granos de trigo, centeno y triticale acondicionados a 12% y 16% de humedad.

	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H	12%H	16%H
	E (MPa)		W_t (N·mm)		W_e (N·mm)		W_p (N·mm)		GE (%)		Res	
Trigo	5.6 ±1.3b	4.2 ±1.5B	0.82 ±0.1b	0.55 ±0.2A	0.52 ±0.1b	0.32 ±0.1A	0.30 ±0.0a	0.23 ±0.1AB	62 ±3.0b	54 ±6.4A	0.67 ±0.0b	0.60 ±0.0A
Centeno	12.1 ±4.2a	5.2 ±1.2A	1.17 ±0.1a	0.58 ±0.1A	0.87 ±0.1a	0.32 ±0.1A	0.29 ±0.0a	0.26 ±0.0A	74 ±4.6a	54 ±4.2A	0.79 ±0.0a	0.60 ±0.0A
Triticale	5.5 ±1.0b	3.2 ±1.0B	0.79 ±0.1b	0.34 ±0.1B	0.47 ±0.1b	0.16 ±0.0B	0.32 ±0.1a	0.18 ±0.0B	59 ±3.8b	44 ±5.8A	0.64 ±0.0b	0.50 ±0.0B
Promedio	7.7	4.2	0.92	0.49	0.62	0.26	0.30	0.22	65	51	0.70	0.57

± Desviación estándar. En una misma columna, valores medios con diferentes letras minúsculas o mayúsculas son estadísticamente diferentes para 12% y 16% de humedad (b.h.), respectivamente. E =Módulo de elasticidad; W_t =Trabajo total; W_e =Trabajo elástico; W_p =Trabajo plástico; GE =Grado de Elasticidad; Res =Resiliencia. n=20.

Trabajo total (W_t), trabajo elástico (W_e) y trabajo plástico (W_p). Como se comentó anteriormente en la sección de Materiales y Métodos, es posible determinar el comportamiento viscoelástico de los granos mediante la aplicación de una compresión uniaxial, obteniendo como respuesta las respectivas curvas carga-descarga. Así, el área total bajo la curva de compresión (carga) determina el trabajo total (W_t); la contribución elástica reversible (que se manifiesta durante la descarga) corresponde al trabajo elástico (W_e) y la energía absorbida (debido a la deformación del material), representa el trabajo plástico (W_p), es decir, $W_p = W_t - W_e$. En el Cuadro 7 y Figura 20 se observan los valores medios correspondientes a W_t , W_e y W_p para los tres tipos de grano (trigo, centeno y triticale) evaluados a dos diferentes contenidos de humedad (12% y 16%).

Trabajo total (W_t). A 12% de humedad, los granos de centeno mostraron el valor medio de W_t más alto (1.17 N·mm), mientras que los valores medios del trigo y triticale se asemejaron más entre sí (0.82 N·mm y 0.79 N·mm, respectivamente). De acuerdo con lo anterior, a 12% de humedad el trigo y triticale fueron estadísticamente iguales para W_t , siendo estadísticamente diferentes respecto a los granos de centeno.

Cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó a 16%, el valor promedio de W_t descendió 46% en promedio (Figura 20). A este nivel de humedad, los granos de trigo y centeno no presentaron diferencias estadísticas entre sí, a diferencia de los granos de triticale, los cuales fueron estadísticamente diferentes a sus contrapartes, probablemente ocasionado porque los granos de triticale presentaron la disminución más evidente (57%) de W_t al pasar de 12% a 16% de humedad.

Los valores medios del **trabajo elástico (W_e)** a 12% de humedad (Cuadro 7) oscilaron entre 0.47 N·mm (triticale) y 0.87 N·mm (centeno). Estadísticamente, los granos de trigo

y triticale no presentaron diferencias estadísticas entre ellos, pero si fueron diferentes a los de centeno. En promedio, el W_e de los tres granos en este rango de humedad fue 0.62 N·mm, valor que disminuyó a 0.26 N·mm cuando el contenido de humedad aumentó a 16%, es decir, en promedio disminuyó 58%, comportamiento que indica claramente la influencia que tiene el agua sobre la disminución de la elasticidad y el incremento de la plasticidad del biomaterial (Figura 20).

A 16% de humedad, el trigo y el centeno fueron estadísticamente iguales, mientras que el triticale fue estadísticamente diferente, además de presentar el descenso más considerable de W_e (66%) al incrementarse el contenido de humedad. W_e representa la contribución elástica del material, generando información de gran utilidad al momento de determinar la viscoelasticidad de biomateriales como los granos cereales. Cuanto mayor es la proporción del valor de W_e respecto al valor de W_p , el biomaterial exhibe una respuesta (comportamiento) viscoelástico tendiente a que su capacidad de “recuperación” luego de la aplicación de un esfuerzo, sea mayor y más estable (disipación de energía).

De manera general, cuando los granos de trigo exhiben mayor proporción de W_e , sus respectivas masas tienden a presentar mejores parámetros reológicos, tales como la estabilidad y tiempo de desarrollo (Ponce-García *et al.*, 2017b). Cuando el contenido de humedad de los granos se incrementa, la tendencia “normal” es que el valor de W_e disminuya en mayor proporción que W_p , es decir, con el incremento del contenido de humedad, los valores de W_t y W_e mostrarán una disminución de sus respectivos valores más pronunciada que W_p .

Cuando el contenido de humedad de los granos se incrementa, ocurre una parcial hidratación y plastificación del endospermo, propiciando que el esfuerzo (energía)

aplicado durante la compresión se absorba, ocasionando en consecuencia, la deformación (W_p) más pronunciada del biomaterial.

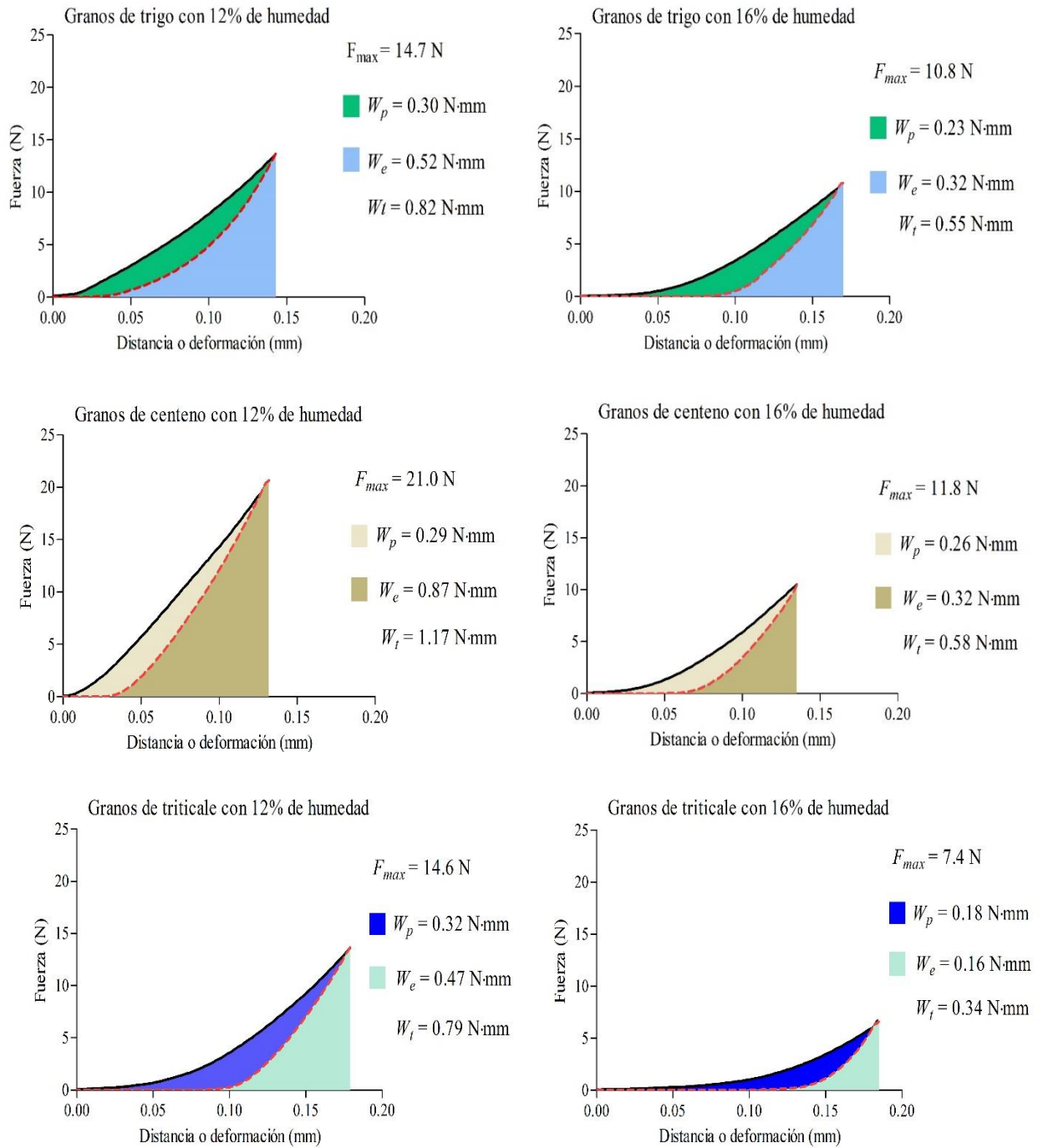


Figura 20. Curvas promedio del comportamiento viscoelástico (W_t , W_e , W_p) de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad.

Los valores medios de **trabajo plástico** (W_p) a 12% de humedad (Cuadro 7) indican que no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tres tipos de granos, registrándose un valor promedio para este parámetro de 0.30 N·mm. Sin embargo, a 16% de humedad prevalecieron diferencias estadísticas significativas entre los granos de centeno (0.26 N·mm) y triticale (0.18 N·mm), mientras que los granos de trigo no presentaron diferencias estadísticas significativas por separado, respecto al centeno y al triticale.

El valor promedio del W_p descendió 26% respecto al obtenido a 12% de humedad, confirmándose el hecho de que el W_e tiende a disminuir considerablemente en mayor proporción que el W_p luego de que el contenido de humedad del grano se incrementa (Figura 20).

Grado de elasticidad (GE). En cierta medida, el GE permite interpretar de manera alternativa el W_e , ya que al considerar la proporción porcentual de elasticidad respecto al W_t , los datos obtenidos suelen dar una idea más clara respecto al comportamiento viscoelástico del grano, en este caso, del comportamiento elástico. De igual forma y como se comentará más adelante, el GE guarda una amplia relación con la resiliencia (Res), ya que en ambas determinaciones se busca interpretar el comportamiento elástico del grano, pero utilizando diferentes metodologías. En el Cuadro 7 se observan los valores medios correspondientes a esta característica.

A 12% de humedad, marcadamente el valor medio del GE (74%) de los granos de centeno superó al de los otros dos granos, lo que en consecuencia determinó que este cereal fuera estadísticamente diferente a sus contrapartes. Cuando el contenido de humedad de los granos se incrementó a 16%, el valor promedio de GE disminuyó 21% (Figura 21), sin

embargo, los tres tipos de grano resultaron estadísticamente iguales, registrando valores medios que oscilaron entre 54% (trigo y centeno) y 44% (triticale).

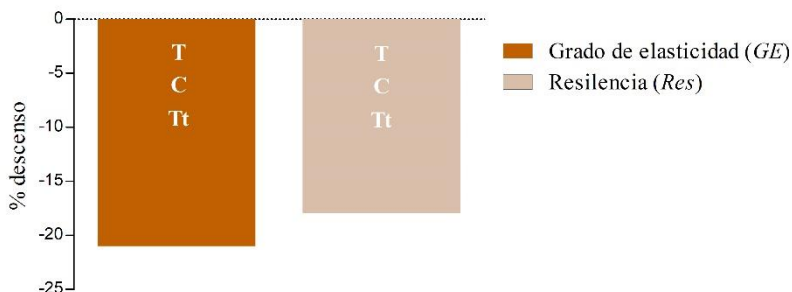


Figura 21. Efecto del aumento del contenido de humedad (12% a 16%) en granos de trigo (T), centeno (C) y triticale (Tt), sobre el valor promedio del grado de elasticidad (GE) y resiliencia (Res).

Resiliencia (Res). En general, los valores medios y tendencia de la resiliencia a 12% y 16% de humedad (Cuadro 7) resultaron ser muy semejantes a los registrados para el GE, lo que permite establecer que la metodología (compresión uniaxial a pequeña deformación) utilizada para el cálculo del GE en esta investigación, es capaz de emitir resultados equiparables a los que determina el analizador universal al ejecutar un análisis de perfil de textura.

En concordancia con lo anteriormente comentado, a 12% de humedad la Res de los granos de centeno fue la más elevada (0.79), lo que resultó en que estadísticamente estos granos fueran diferentes a los de trigo y triticale. Al incrementarse el contenido de humedad de 12% a 16%, el valor promedio de la resiliencia decreció 18%, dato muy semejante al registrado en la disminución promedio del GE (21%). De igual manera, tanto para la Res como para el GE, los granos de trigo fueron los que disminuyeron en menor proporción sus respectivos valores promedio, mientras que los de centeno fueron los que disminuyeron en mayor proporción. A 16% de humedad, el trigo y el centeno no

presentaron diferencias estadísticas entre sí para la *Res*, siendo estadísticamente diferentes a los granos de triticale.

7.3. Correlaciones simples

Con la finalidad de determinar posibles relaciones entre las propiedades físicas y las viscoelásticas evaluadas en los tres tipos de grano, se llevó a cabo un análisis de correlaciones simples de Pearson, considerándose significativas y muy significativas si $P < 0.05$ y $P < 0.01$, respectivamente. En el Cuadro 8 se presentan las correlaciones simples resultantes entre las propiedades físicas y viscoelásticas de los granos.

Cuadro 8. Correlaciones simples de Pearson entre las propiedades físicas y viscoelásticas de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad^a.

		Propiedades viscoelásticas				
		<i>E</i>	<i>W_t</i>	<i>W_e</i>	<i>GE</i>	<i>Res</i>
Propiedades físicas	<i>G</i>	-0.877*	ns	ns	-0.793*	-0.809*
	<i>D_g</i>	-0.900**	ns	-0.830*		-0.796*
	<i>D_a</i>	-0.918**	-0.865*	-0.863*	-0.881*	-0.891**
	<i>S</i>	-0.870*	ns	-0.825*	ns	ns
	<i>PIG</i>	-0.841*	ns	ns	ns	ns
	<i>V_e</i>	-0.976**	-0.910**	-0.949**	-0.901**	-0.904**
	<i>ρ_b</i>	ns	0.874*	ns	0.909**	0.911**
	<i>F_{max}</i>	0.933**	0.998**	0.952**	0.991**	0.989**

^a *G*=Grosor, *D_g*=Diámetro geométrico, *D_a*=Diámetro aritmético, *S*=Superficie de área, *PIG*=Peso individual de grano, *V_e*=Volumen elipsoidal, *ρ_b*=Densidad aparente, *F_{max}*=Fuerza máxima, *E*=Módulo de elasticidad, *W_t*=Trabajo total, *W_e*=Trabajo elástico, *GE*=Grado de elasticidad y *Res*=Resilencia. (*) Significativo $P < 0.05$, (**) Altamente significativo $P < 0.01$.

Como puede observarse en el Cuadro 8, existen diversas correlaciones entre ambos tipos de propiedades, destacando entre otras, la amplia interacción que presentaron los parámetros viscoelásticos módulo de elasticidad (*E*) y Resilencia (*Res*) respecto a varias propiedades físicas. De manera similar, el diámetro aritmético (*D_a*), el volumen elipsoidal (*V_e*) y la Fuerza máxima (*F_{max}*) fueron las propiedades físicas de los granos que a su vez mostraron más interacciones en relación con las propiedades viscoelásticas.

El módulo de elasticidad (E) se caracteriza por ser una propiedad viscoelástica de los granos que permite conocer y estimar en buena medida el uso potencial y final de los granos, principalmente en el caso del trigo. Bajo este contexto y considerando los resultados de la presente investigación, es posible establecer que E cobra mayor importancia en la caracterización y control de calidad de los granos, toda vez que esta propiedad mostró una correlación inversamente proporcional (negativa) con diversos parámetros físicos, por lo que su evaluación debería ser considerada con mayor significancia al momento de establecer características generales de calidad de los granos. De manera general, otros resultados derivados del Cuadro 8 permiten establecer que los parámetros viscoelásticos dependientes de la elasticidad del grano (W_e , GE , Res) son los que mayor asociación presentan con las características físicas del grano. En este sentido, destaca principalmente el parámetro físico diámetro aritmético (D_a), el cual de manera directa involucra las dimensiones axiales (largo, ancho y grosor) del grano en su determinación, por lo que entonces dichas dimensiones axiales juegan un papel importante en la correlación con las propiedades viscoelásticas. Esto comprueba que el tamaño y forma del grano se establecen como características de peso en la determinación de la calidad del grano.

Por otro lado, si bien uno de los principales objetivos de esta investigación fue establecer correlaciones entre las propiedades físicas y viscoelásticas de los granos, cabe destacar que al subdividir las propiedades físicas en categorías (apariencia, geométricas, peso-volumen-densidad y mecánicas) fue posible establecer algunas correlaciones entre estas (Cuadro 9).

De acuerdo con los resultados del Cuadro 9, destacan las correlaciones del grosor (apariencia) respecto a la categoría geométricas (D_g , D_a y S) y de peso (PIG y PMG). De

igual manera, se presentaron correlaciones interesantes entre D_a y D_g (geométricas) y las categorías de peso (PIG , PMG), volumen (V_e), densidad (ρ_b) y mecánicas (F_{max}).

Cuadro 9. Correlaciones simples de Pearson entre las distintas categorías físicas de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad^a.

	Apariencia		Geométricas			Mecánica
	G		D_g	D_a	S	F_{max}
Apariencia	G		0.978**	0.954**	0.969**	ns
Peso, volumen y densidad	PIG	0.970**	0.911**	0.894**	0.877**	ns
	PMG	0.895**	0.892**	ns	0.896**	ns
	V_e	0.866*	0.919**	0.944**	0.902**	-0.916**
	ρ_b	ns	ns	-0.857*	ns	0.855*
Mecánica	F_{max}	-0.800*	-0.807*	-0.874*	ns	

^a G =Grosor, D_g =Diámetro geométrico, D_a =Diámetro aritmético, S =Superficie de área, PIG =Peso individual de grano, PMG =Peso de mil granos, S =Superficie de área, V_e =Volumen elipsoidal, ρ_b =Densidad aparente, F_{max} =Fuerza máxima. ns=no significativo, (*) Significativo $P<0.05$, (**) Altamente significativo $P<0.01$.

VIII. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se basan en los resultados obtenidos en la presente investigación, la cual consistió sustancialmente en la determinación y evaluación de las propiedades físicas y viscoelásticas (mediante compresión uniaxial a pequeña deformación) de granos de trigo, centeno y triticale a 12% y 16% de humedad.

- Fue posible determinar y diferenciar el comportamiento viscoelástico de los granos evaluados a diferente contenido de humedad, mediante el método de compresión uniaxial a baja deformación.
- El contenido de humedad y el tipo de grano tuvieron un efecto significativo sobre la mayoría de las determinaciones físicas y viscoelásticas realizadas.
- De manera general, derivado del incremento del contenido de humedad de los granos de 12% a 16%, los valores medios de las propiedades físicas correspondientes a las categorías de *apariencia* y *geométricas* aumentaron; los de la categoría *mecánicas* disminuyeron, mientras que en la categoría *peso-densidad-volumen*, la tendencia de comportamiento fue diversa dependiendo del parámetro y tipo de grano, ya que mientras en algunas de ellas sus valores medios disminuyeron (ρ_b, ρ_t), en otras como el *PIG*, *PMG*, \mathcal{E}_v no se presentaron tendencias claras, debido a que los valores medios aumentaron o disminuyeron, en función del tipo de grano.
- Respecto a las propiedades viscoelásticas, como resultado del incremento del contenido de humedad de los granos, los valores medios de cada una de estas propiedades disminuyeron, es decir, se observó un comportamiento inversamente

proporcional, sin embargo, en el caso específico del W_p , si bien los valores medios manifestaron esta tendencia, es importante precisar que proporcionalmente W_p mostró mayor presencia respecto al W_t , debido al incremento del contenido de humedad.

- Se lograron establecer correlaciones simples entre propiedades físicas y viscoelásticas de los granos. Particularmente, destacaron las correlaciones inversamente proporcionales (negativas) que presentó el módulo de elasticidad (E) con 7 propiedades físicas, 5 de las cuales fueron altamente significativas. De manera similar, el D_a y el V_e fueron las propiedades físicas que mostraron mayor cantidad de correlaciones (todas negativas) con las propiedades viscoelásticas.

IX. REFERENCIAS CONSULTADAS

1. Al-Mahasneh, M.A. y Rababah, T.M. 2007. Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. *Journal of Food Engineering*, 79:1467–1473.
2. American Association of Cereal Chemists (AACC Int.). 2000. Método 55-10.01. En: *Approved Methods of the AACC Int.* St. Paul, MN, USA.
3. Afkari, S.A.H. y Minaei, S. 2004. Behavior of wheat kernels under quasi-static loading and its relation to grain hardness. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 6(1-2), 11-19.
4. Anderssen, R.S. y Haraszi, R. 2009. Characterizing and exploiting the rheology of wheat hardness. *European Food Research & Technology*, 229(1):159-174.
5. Aprodu, I. y Banu, I. 2017. Milling, functional and thermo-mechanical properties of wheat, rye, triticale, barley and oat. *Journal of Cereal Science*, 77:42-48.
6. Arendt, E.K. y Zannini, E. 2013. Cereal grains for the food and beverage industries. Woodhead Publishing, UK. 518 p.
7. ASABE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2009. Compression test of food materials of convex shape. *ASABE S368.4. DEC2000 (R2008)*, 676-686.
8. ASAE Standards, Moisture measurement – unground grain and seeds. 1999. ASAE S352.2.
9. Atwell, W.A. 2001. Wheat flour. AACC. St. Paul, MN, USA. 133 p.
10. Aviara, N.A., Gwandzang, M.I. y Haque, M.A. 1999. Physical properties of guna seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73:105–111.
11. Babić, L., Babić, M., Turan, J., Matić-Kekić, S., Radojčin, M., Mehandžić-Stanišić, S., Pavkov, I. y Zoranović, M. 2011. Physical and stress–strain properties of wheat (*Triticum aestivum*) kernel. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91:1236-1243.
12. Bayram, M. 2005. Determination of the Sphericity of Granular Food Materials. *Journal of Food Engineering*, 68:385–390.
13. Bargale, P.C. e Irudayaraj, J. 1995. Mechanical strength and rheological behaviour of barley kernels. *International Journal of Food Science and Technology*, 30(5):609-623.
14. Barnes, H.A. 2000. A handbook of elementary rheology. University of Wales. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth. 210 p.

15. Batey, I.L. 2010. Maintaining grain quality during storage and transport. En: Wrigley, C.W. y Batey, I.L. (Eds.). *Cereal grains. Assessing and managing quality*. CRS Press. Woodhead Publishing Limited, UK. 533 p.
16. Bechtel, D.B, Abecassis, J., Shewry, P.R. y Evers, A.D. 2009. Development, structure and mechanical properties of the wheat grain. En: Khan, K. y Shewry, P.R. (Eds.) *Wheat: Chemistry and Technology*. 4th ed. AACCC Int. 467 p.
17. Bhise, S.R., Kaur, A. y Manikantan, M.R. 2014. Moisture dependent physical properties of wheat grain (PBW 621). *International Journal of Engineering Practical Research*, 3:40–45.
18. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F. y Hall, C.W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. Springer Science & Business Media. USA. 450 p.
19. Carson, G.R. y Edwards, N.M. 2009. Criteria of Wheat and Flour Quality. En: Khan K, Shewry, P.R. (Eds.). *Wheat: Chemistry and Technology*. 4th ed. AACCC Int. 467 p.
20. Cenkowski, S., Bielewicz, J., y Britton, M.G. 1991. A single kernel creep and recovery test. *Transactions of the ASAE*, 34(6):2484-2490.
21. Corke, H. 2016. Grain. Morphology of internal structure. En: Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman K. y Faubion, J. (Eds.). *Encyclopedia of food grains*. 2nd. Ed. Vol. 1. The World of Food Grains. Academic Press, Elsevier. UK. 463 p.
22. Cortázar-Figueroa, L.M., Meléndez-Pérez, R., Oliver-Hernández, D.M. 2008. Energy consumption and particle size distribution on cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) and black pepper (*Piper niger* L.) milling. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7:123–130.
23. Delwiche, S.R. 2000. Wheat endosperm compressive strength properties as affected by moisture. *Transaction of ASAE*, 43(2):365-373.
24. Deshpande, S.O., Bal, S. y Ojha, T.P. 1993. Physical properties of soybean. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 56:89–98.
25. Dobraszczyk, B.J. y Morgenstern, M.P. 2003. Rheology and the breadmaking process. A Review. *Journal of Cereal Science*, 38(3):229–245.
26. Dziki D, Laskowski J. 2005. Wheat Physical Properties and Milling Process. *Acta Agrophysica*, 6:59–71.

27. Dziki, D. 2008. The crushing of wheat kernels and its consequence. *Powder Technology*, 185(2):181-186.
28. Eckhoff, S.R., Supak, W.A. y Davis, A.B. 1988. A rapid single-kernel wheat hardness tester. *Cereal Chemistry*, 65(6):503-508.
29. Elbatawi, I.E. y Arafa, G.K. 2008. Factors affecting breaking force distribution of wheat kernel before milling. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 25(3):1004-1025.
30. El-Fawal, Y.A., Tawfik, M.A. y El-Shal, M. 2009. Study on physical and engineering properties for grains of some field crops. *Mirs Journal of Agricultural Engineering*, 26(4): 1933-1951.
31. El-Gamal, R.A., Radwan, S.M.A., El-Amir, M.S. y El-Masry, G.M.A. 2011. Aerodynamic properties of some oilseed crops under different moisture content. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2(5):495–507.
32. Figueroa, J.D.C., Hernández, Z.J.E., Véles, M.J.J., Rayas-Duarte, P., Martínez-Flores, H. E. y Ponce-García, N. 2011. Evaluation of degree of elasticity and other mechanical properties of wheat kernels. *Cereal Chemistry*, 88(1):12-18.
33. Figura, L.O. y Teixeira A.A. 2007. Food physics. Physical properties – Measurement and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 554 p.
34. Gaston, A.L., Abalone, R.M. y Giner, S.A. 2002. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *Journal of Food Engineering*, 52:313–322.
35. Glenn, G.M., Younce, F.L. y Pitts, M.J. 1991. Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. *Journal of cereal Science*, 13(2):179-194.
36. Gooding, M.J. 2010. The effects of growth environment and agronomy on grain quality. En: Wrigley, C.W. y Batey, I.L. (Eds.). *Cereal grains. Assessing and managing quality*. CRS Press. Woodhead Publishing Limited, UK. 409 p.
37. Gorial, B.Y. y O'Callaghan, J.R. 1990. Aerodynamic properties of grain/straw materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 46:275-290.
38. Gorji, A., Rajabipour, A. y Tavakoli, H. 2010. Fracture resistance of wheat grain as a function of moisture content, loading rate and grain orientation. *Australian Journal of Crop Science*, 4(6):448-452.

39. Greenwell, P. y Schofield, J.D. 1986. A starch granule protein associated with endosperm softness in wheat. *Cereal Chemistry*, 63:379–380.
40. Grundy, M.M., Fardet, A., Tosh, S.M., Rich, G.T. y Wilde, P.J. 2018. Processing of oat: the impact on oat's cholesterol lowering effect. *Food and Function*, 9(3):1328-1343.
41. Gubicza, J., Juhász, A., Tasnádi, P., Arató, P. y Vörös, G. 1996. Determination of the hardness and elastic modulus from continuous Vickers indentation testing. *Journal of Material Science*, 31(12):3109-3114.
42. Gupta, R.K., Prakash, S. 1992. The effect of grain moisture content on the physical properties of JSF-1 safflower. *Journal of Oil Grains Research*, 9(1992):209-216.
43. Gupta, R.K. y Das, S.K. 1997. Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 66(1):1–8.
44. Gürzoy, S. y Güzel, E. 2010. Determination of properties of some agricultural grains. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2(5):492-498.
45. Gutiérrez-García, A.S., Carballo-Carballo, A., Mejía-Contreras, J.A., Vargas-Hernández, M., Trethowan, R. y Villaseñor-Mir, H.E. 2006. Characterization of bread wheat using seed physical and physiological quality parameters. *Agricultura Técnica en México*, 32(1):45–55.
46. Haddad, Y., Mabilie, F., Mermet, A., Abecassis, J. y Benet, J.C. 1999. Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behavior. *Powder Technology*, 105(1-3):89-94.
47. Husain, A, Agarwal, K.K., Ojha, T.P. y Bhole, N.G. 1971. Viscoelastic behaviour of rough rice. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 14(2):313-314, 318.
48. Jan, K.N., Panesar, P.S. y Singh, S. 2019. Effect of moisture content on the physical and mechanical properties of quinoa seeds. *International Agrophysics*, 33(1):41-48.
49. Jayan, P.R. y Kumar, V.J.F. 2004. Planter design in relation to the physical properties of seeds. *Journal of Tropical Agriculture*, 42(1-2):69–71.
50. Jirsa O., Hrušková M. y Švec I. 2008. Near-infrared prediction of milling and baking parameters of wheat varieties. *Journal of Food Engineering*, 87(1):21-25.
51. Kachru, R.P., Gupta, R.K. y Alam, A. 1994. Physico-chemical constituents and engineering properties of food crops. Scientific Publishers. India. 198 p.

52. Kalkan, F. y Kara, M. 2011. Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. *Powder Technology*, 213(1-3):116-122.
53. Karimi, M., Kheiralipour, K., Tabatabaeefar, A., Khoubakht, G.M., Naderi, M. y Heidarbeigi, K. 2009. The effect of moisture content on physical properties of wheat. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(1):90-95.
54. Khazaei, J. y Mann, D.D. 2005. Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. *International Agrophysics*, 19:305-313.
55. Khodabakhshian, R. y Emadi, B. 2011. Determination of modulus of elasticity in agricultural seeds on the basis of elasticity theory. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7(3):367-373.
56. Lakes, R.S. 1999. Viscoelastic composite materials. *Viscoelastic Solids*. CRC Press, Taylor & Francis Group. ASA. 490 p.
57. Laskowski J. y Skonecki, S. 1999. Influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of cereal grains. *International Agrophysics*, 13:477-486.
58. MacRitchie, F. 2010. *Concepts in Cereal Chemistry*. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. USA. 192 p.
59. Markowska, A., Warechowska, M. y Warechowski, J. 2016. Influence of moisture on external friction coefficient and basic physical properties of Astoria variety wheat grain. *Technical Sciences*, 19(1):17–26.
60. Markowski, M., Majewska, K., Kwiatkowski, D., Malkowski, M. y Burdylo, G. 2010. Selected geometric and mechanical properties of barley (*Hordeum vulgare* L.) grain. *International Journal of Food Properties*, 13:890–903.
61. Markowski, M., Żuk-Gołaszewska, K. y Kwiatkowski, D. 2013. Influence of variety on selected physical and mechanical properties of wheat. *Industrial Crops and Products*, 47:113-117.
62. Marzec, A., Cacak-Pietrzak, G. y Gondek, E. 2011. Mechanical and acoustic properties of spring wheat versus its technological quality factors. *Journal of Texture Studies*, 42(4):319-329.

63. McGoverin, C.M., Snyders, F., Muller, N., Botes, W., Fox, G. y Manley, M. 2011. A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(7):1155–1165.
64. Menjivar, J.A. 1989. Fundamental aspects of dough rheology. En: Faridi, H. y Faubion, J.M. (Eds.). *Dough rheology and baked product texture*. AVI Book. Van Nostrand Reinhold, NY. 607 p.
65. Mohsenin, N.N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties. 2nd ed. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc. 891 p.
66. Molenda, M. y Horabik, J. 2005. Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. En: Horabik, J. y Laskowski, J. (Eds.). *Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice*. Institute of Agrophysics PAS. Lublin. 145 p.
67. Núñez, S.M.C., Méndez, M.M.C. y Solorza, F.J. 2001. Principios de Reología. México, IPN. 110 p.
68. Obuchowski, W. y Bushuk, W. 1980. Wheat hardness: Comparison of methods of its evaluation. *Cereal Chemistry*, 57:421-425.
69. Ogunjimi, L.A.O, Aviara, N.A. y Aregbesola, O.A. 2002. Some engineering properties of locust bean grain. *Journal of Food Engineering*, 55:95-99.
70. Omobuwajo, O.T., Akande, A.E. y Sann, A.L. 1999. Selected physical, mechanical and aerodynamic properties African Breadfruit (*Treculia africana*) seeds. *Journal of Food Engineering*, 40:241-244.
71. Pagani, M.A., Marti, A. y Bottega, G. 2014. Wheat milling and flour quality evaluation. En: Zhou, W. (Ed.). *Bakery Products Science and Technology*. 2nd ed. Wiley Blackwell & Sons Ltd. USA. 780 p.
72. Pappas, G., Skinner, G.E. y Rao, V.N.M. 1988. Effect of imposed strain and moisture content on some visco-elastic characteristics of cowpeas (*Vigna unguiculata*). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39:209-219.
73. Pharr, G. M., Oliver, W. C., y Brotzen, F. R. 1992. On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation. *Journal of Materials Research*, 7:613-617.

74. Ponce-García, N., Figueroa, J.D.C., López-Huape, G.A., Martínez, H.E. y Martínez-Peniche, R. 2008. Study of viscoelastic properties of wheat kernels using compression load method. *Cereal Chemistry*, 85(5):667-672.
75. Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P.I., Figueroa-Cárdenas, J.D., Serna-Saldívar, S.O. y Cortez-Rocha, M.O. 2013. Effect of moisture content on the viscoelastic properties of individual wheat kernels evaluated by the uniaxial compression test under small strain. *Cereal Chemistry*, 90(6):558-563.
76. Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Escalante-Aburto, A., Torres-Chávez, P.I., Figueroa-Cárdenas, J.D.D. 2016. Mechanical properties in wheat (*Triticum aestivum*) kernels evaluated by compression tests: A review. En: El-Amin, M. (Ed). *Viscoelastic and viscoplastic materials*. Chapter 2. InTech. Croatia. pp. 21-33.
77. Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Escalante-Aburto, A., Torres-Chávez, P.I. y Serna-Saldívar, S.O. 2017a. Grading factors of wheat kernels based on their physical properties. En: Wanyera, R. y Owoche, J. (Eds). *Wheat improvement, management and utilization*. Chapter 13. InTech. Croatia. pp. 275-291.
78. Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P.I., Figueroa-Cárdenas, J.D., Serna-Saldívar, S.O., Cortez-Rocha, M.O. y Escalante-Aburto, A. 2017b. Evaluation of viscoelastic properties of conditioned wheat kernels and their doughs using a compression test under small strain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(4):1235-1243.
79. Posner, E.S. y Hibbs, A.N. 2011. Wheat flour milling. 2a Ed. AACC Int. St. Paul, MN, USA. 495 p.
80. Raji, A.O. y Favier, J.F. 2004. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. I: Theory, model development and validation. *Journal of Food Engineering*, 64(3):359-371.
81. Rao, M.V.N. y Quintero, X. 2005. Rheological properties of solid foods. En: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H. y Datta, A.K. (Eds.). *Engineering properties of foods*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA. 812 p.
82. Riahi, E. y Ramaswamy, S.H. 2003. Structure and composition of cereal grains and legumes. En: Chakraverty, A., Mujumdar, A., Vijaya, R.G.S., Ramaswamy, H.S. (Eds). *Handbook of postharvest technology cereals, fruits, vegetables, tea, and spices*. Marcel Dekker, Inc. USA. 884 p.

83. Sahoo, P.K. y Srivastava. A.P. 2002. Physical properties of okra seed. *Biosystems Engineering*, 83(4):441–448.
84. Sangamithra A., Swamy G.J., Prema S.R., Nandini K., Kannan K., Sasikala S. y Suganya, P. 2016. Moisture dependent physical properties of maize kernels. *International Food Research Journal*, 23(1):109–115.
85. Seibel, W., Kim C.O., Weipert, D. y Park, S-H. 2012. Cereals. Ullmann's. Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol. 8. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 40 p.
86. Serna-Saldivar, S.O. 2010. Cereal grains. Properties, processing, and nutritional attributes. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL. 747 p.
87. Serna-Saldivar, S.O. 2012. Cereal grains. Laboratory reference and procedures manual. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL. 360 p.
88. Serna, S.S.O. 2013. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. AGT Editor. 2nd. Ed. México. 703 p.
89. Shahbazi, F., Valizadeh, S. y Dowlatshah, A. 2014. Aerodynamic properties of Makhobeli, triticale and wheat seeds. *International Agrophysics*, 28:389-394.
90. Shelef, L. y Mohsenin, N.N. 1967. Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chemistry*, 44:392-402.
91. Simmonds, D. H. 1989. Wheat and wheat quality in Australia. 2nd ed. Williams Books. Queensland, Sidney.
92. Singh, S.S., Finner, M.F., Rohatgi, P.K., Buelow, F.H. y Schaller, M. 1991. Structural and mechanicals properties of corn kernels: a hybrid composite material. *Journal of Materials Science*, 26:274-284.
93. Singh, K.K. y Goswami, T.K. 1996. Physical properties of cumin seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64:93-98.
94. Sitkei, G. 1986. Physical properties of agricultural materials. En: Sitkei, G. (Ed.). *Mechanics of agricultural materials. Developments in agricultural engineering*. Elsevier Science Publishers. Budapest. 488 p.
95. Sologubik, C.A., Campañone L.A., Pagano, A.M. y Gely, M.C. 2013. Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43:762-767.

96. Solomon, W.K. y Zewdu, A.D. 2009. Moisture-dependent physical properties of niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) seed. *Industrial Crops and Products*, 29:165-170.
97. Soyoye, B.O., Ademosun, O.C. y Agbetoye, L.A.S. 2018. Determination of some physical and mechanical properties of soybean and maize in relation to planter design. *AgricEngInt: CIGR Journal*. <http://www.cigrjournal.org>, 20(1):81-89.
98. Steffe, F.J. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2da. Ed. Freeman Press. USA. 428 p.
99. Tabatabaeefar, A. 2003. Moisture-Dependent physical properties of wheat. *International Agrophysics*, 17:207–211.
100. Tavakkoli, H., Rajabipour, A., Mohtasebi, S.S. 2009. Moisture dependent some engineering properties of soybean grains. *Agricultural Engineering International*, 11:1-14.
101. Troccoli, A. y di Fonzo, N. 1999. Relationship between kernel size features and test weight in *Triticum durum*. *Cereal Chemistry*, 76(1):45–49.
102. Tuck, J.R., Korsunsky, M.A., Bull, J.S. y Davidson, I.R. 2001. On the application of work-of-indentation approach to depth-sensing indentation experiments in coated system. *Surface and Coatings Technology*, 127:217-224.
103. U.S. Wheat Associates. 2007. Overview of U.S. Wheat Inspection of Wheat and Flour Testing Methods: A Guide to Understanding Wheat and Flour Quality: Version 2. 72 p.
104. Waanenen, K.M. y Okos, M.R. 1992. Stress-relaxation properties of yellow-dent corn kernels under uniaxial loading. *Transactions of the ASAE*, 35(5):1249-1258.
105. Warechowska, M., Warechowski J. y Markowska, A. 2013. Interrelations between selected physical and technological properties of wheat grain. *Technical Sciences*, 16(4):281–290.
106. Wei, C., Lintilhac, P.M. y Tanguay, J.J. 2001. An insight into cell elasticity and load-bearing ability measurement and theory. *Plant Physiology*, 126:1129-1138.
107. Wilhelm, L.R., Suter, A.D. y Brusewitz, G.H. 2004. Physical properties of food materials. *Food & Process Engineering Technology*. ASAE. Chapter 2. 23–49.
108. Wrigley, C.W. 2010a. An introduction to the cereal grains: Major providers for mankind's food needs. En: Wrigley, C.W. y Batey, I.L. (Eds). *Cereal grains. Assessing and managing quality*. CRS Press. Woodhead Publishing Limited, UK. 533 p.

109. Wrigley, C.W. 2010b. Cereal-grain morphology and composition. En: Wrigley, C.W. y Batey, I.L. (Eds). *Cereal grains. Assessing and managing quality*. CRS Press. Woodhead Publishing Limited, UK. 533 p.
110. Wrigley, C.W. 2016. An Overview of the family of cereal grains prominent in world agriculture. En: Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman K., Faubion, J. (Eds). *Encyclopedia of food grains*. 2a. Ed. Academic Press, Elsevier. UK. 1956 p.
111. Wrigley, C.W., Corke, H. y Faubion, J. 2016. The grains that feed the world. En: Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman, K., Faubion, J. (Eds.). *Encyclopedia of Food Grains*. 2ª. Ed. Academic Press, Elsevier. UK. 1956 p.
112. Zareiforush, H., Komarizadeh, M.H. y Alizadeh, M.R. 2009. Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 1(3):132-139.
113. Zoerb, G.C. y Hall, C.W., 1960. Some mechanical and rheological properties of grains. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 5:83-93.

Sitios de internet

1. FAO. 2019. Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales. [Consultado 4 octubre 2019]. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>