



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

PRODUCCIÓN DE SEMILLAS

**CONTENIDO DE HUMEDAD Y TIPO DE ENDOSPERMO
EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN
EN SEMILLA DE MAÍZ**

ARTURO MANCERA RICO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada: “**Contenido de humedad y tipo de endospermo en la resistencia a compresión en semilla de maíz**”, realizada por el alumno: **Arturo Mancera Rico**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
PRODUCCIÓN DE SEMILLAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. GABINO GARCÍA DE LOS SANTOS

ASESOR:



DR. AQUILES CARBALLO CARBALLO

ASESOR:



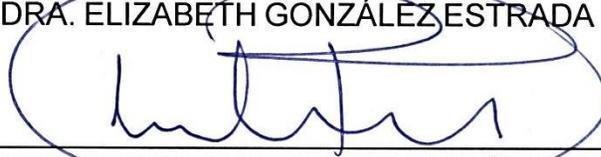
DR. JOSÉ ALFREDO CARRILLO SALAZAR

ASESOR:



DRA. ELIZABETH GONZÁLEZ ESTRADA

ASESOR:



DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

ASESOR



DRA. HILDA ARACELI ZA VALETA MANCERA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2014

CONTENIDO DE HUMEDAD Y TIPO DE ENDOSPERMO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN SEMILLA DE MAÍZ

Arturo Mancera Rico, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2014

La calidad física, fisiológica y sanitaria de la semilla se reduce debido al daño mecánico ocasionado por la mecanización de la cosecha y del acondicionamiento. Conocer la resistencia al daño mecánico en función de la humedad y textura de la semilla, permitirá minimizar el mismo durante las etapas de limpieza, secado y almacenaje. En el presente estudio se evaluó el desplazamiento, la fuerza y la energía a ruptura por compresión en cinco variedades con diferente textura de endospermo (genotipo): harinoso, semi-dentado, dentado, semi-cristalino y cristalino; y a siete niveles de humedad: 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 32 % (base húmeda); se comparó el daño visible y la calidad fisiológica, y se evaluó el daño tisular y celular de semillas de maíz harinoso, semi-dentado y cristalino comprimidas hasta ruptura y testigo con humedad de 12 y 20 %. La relación entre contenido de humedad y a) desplazamiento a ruptura, fue lineal y directamente proporcional para los cinco genotipos estudiados; b) fuerza a ruptura, fue lineal y directamente proporcional para el genotipo harinoso e inversamente proporcional para los genotipos semi-cristalino y cristalino; para el semi-dentado y dentado, fue cuadrática; c) energía a ruptura, fue lineal y directamente proporcional en el harinoso y semi-cristalino, y cuadrática en el semi-dentado, dentado y cristalino. El genotipo semi-dentado obtuvo el mayor índice de daño y el cristalino el menor. La germinación fue de 85.2 y 55.0 % para el testigo y para semillas sometidas a ruptura; la reducción de germinación no estuvo afectada por el índice de daño. La germinación fue mayor en el genotipo semi-dentado, a humedad de 12 % en condiciones estándar y a humedad de 20 % en frío. En semillas comprimidas hasta ruptura, la ruptura celular en endospermo y aleurona tuvo una proporción significativamente superior a la separación celular, no se detectaron fracturas en tejido embrionario ni en escutelo, no obstante, la germinación y el vigor fueron significativamente inferiores al testigo. Se concluye que los resultados obtenidos permitirán un mejor manejo pos cosecha y diseño de maquinaria para el manejo de semilla.

Palabras clave: cristalino, daño mecánico, fractura celular, harinoso, microestructura, regresión.

MOISTURE CONTENT AND ENDOSPERM KIND ON THE CORN SEED COMPRESSION STRENGTH

Abstract

Mechanization on seed harvesting and conditioning inflicts mechanical damage, which causes physical, physiological and sanitary quality loss. Determining the mechanical damage resistance according to seed moisture and seed endosperm kind, will allow minimize its magnitude during cleaning, drying and storage. In this study, the rupture compression strain, strength and energy were evaluated on corn seeds from five cultivars with floury, semi-dented, dented, semi-flint and flint endosperm kind (genotype), at 8, 12, 16, 20, 24, 28 and 32 % moisture content (wet basis); visible damage and physiological quality were compared, and cell rupture and separation were evaluated on floury, semi-dented and flint genotypes corn seeds uncompressed (control) and compressed until rupture was detected at 12 and 20 % moisture content. Relation of moisture content and a) rupture strain, was linear and positively related on the five genotypes; b) rupture strength, was linear and positively related on the floury genotype, but negatively related on the semi-flint and flint genotypes; meanwhile it was quadratic on the semi-dented and dented genotypes; c) rupture energy, was linear and positively related on the floury and semi-flint genotypes, and quadratic on the semi-dented, dented and flint genotypes. The highest and least damage indexes were presented by the semi-dented and flint genotypes. Controls and rupture compressed seeds germination were of 85.20 and 55.00 %; germination loss was not affected by damage index. The highest germination was presented on the semi-dented genotype at 12 % moisture content on standard conditions, and at 20 % after cold stress. On rupture compressed seeds, cellular rupture area proportion was superior to cellular separation on endosperm and aleurone tissues; there were no fractures neither on embryo nor scutellum tissues, however, germination and vigor were significantly lower than on controls. It was concluded that these results will be useful for a better postharvest handling and machinery design.

Key words: cell fracture, flint, floury, mechanical damage, microstructure, regression.

*A quienes estuvieron presentes en la inspiración de este sueño, y lo avivaron
hasta su culminación:*

*Mi esposa, padres, suegros, familiares y amigos,
y en especial, a mis profesores...*

*It is the glory of God to conceal a thing;
but the honour of kings is to search out a matter.
Proverbs 25:2
(The Holy Book)*

*La gloire de Dieu, c'est de cacher les choses;
La gloire des rois, c'est de sonder les choses.*

דבר הסתר אלהים כבוד
דבר חקר מלכים וכבוד
(Kabod Elohim sathar dabar
Kabod melek chaqar dabar)

事を隠すのは神の誉であり、事を窮めるのは王の誉である

*Es ist Gottes Ehre, eine Sache verbergen;
aber der Könige Ehre ist's, eine Sache zu erforschen.*

将事隐秘，乃 神的荣耀；将事察清，乃君王的荣耀。

*Gloria de Dios es encubrir un asunto;
Pero honra del rey es escudriñarlo.
Proverbios 25:2
(La Biblia)*

Agradecimientos

Al Rey de los cielos, el Dios de Israel, por acordarse de mí, y por permitirme realizar este estudio.

A mis hermanos en Cristo, especialmente a la Fam. Ortiz-Ventura, Fam. Cortés-Arriaga, Fam. Robledo-Miranda y Fam. Jiménez-Cruz por sus oraciones.

A mi esposa, por su risa, su amor y tolerancia, y por acompañarme durante este viaje.

A mi México, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios doctorales.

Al Colegio de Postgraduados, en especial a mis profesores de curso por su gran disposición por compartir su conocimiento y experiencia.

A mi Consejo Particular por su orientación y amabilidad, así como por su paciencia y entusiasmo en la dirección, revisión y correcciones.

Al Dr. Aquiles Carballo, por el incremento del material necesario para el experimento.

A la Dra. Hilda Araceli Zavaleta Mancera, por las facilidades brindadas en la Unidad de Microscopía Electrónica UME, COLPOS.

A la Dra. Micaela de la O Olán (INIFAP) por su contribución con semilla de la raza “Palomero Toluqueño” y “Cacahuacintle”.

A la M. C. Greta Hanako Rosas Saito (UME, COLPOS), por su paciencia y esmero en conseguir las mejores tomas de MEB.

Al Ing. Gonzalo de Jesús Novelo González, profesor de la DICIFO-UACH, por su auxilio, orientación, paciencia, atención y las facilidades otorgadas para el uso de la máquina universal de ensayos.

Al Ing. Marco Antonio Rojas, director del DIMA-UACH, por las facilidades para el uso del laboratorio de materiales.

Al M. C. Adrián Hernández Livera, por las facilidades otorgadas en el laboratorio de análisis de semillas REGEP-CP, y por su orientación.

Al M. C. Erik Acuayte Valdés, por su amistad y su auxilio en el laboratorio de análisis de semillas.

Al Lic. Carlos Ruvalcaba, Profesor José Luis, Sr. Juan Morales, Sr. Juan Castillo y Sr. Hugo, del Centro de Documentación y Biblioteca del CP, por su valiosa amistad y su auxilio.

A la Sra. Adriana Acosta de la DICIFO por su auxilio en la operación de la máquina de ensayo universal; a Beto “el chino” Toledo.

Por su valiosa amistad y orientación: José Marín Sánchez, José Alfredo Benítez Vázquez y Camelia Jaimes Albíter.

Por estar presente al inicio de este viaje: González Trinidad Lydí.

Al Sr. Andrés Gorzo Castillo (QEPD) e hijo C.P. Felipe Gorzo Ortega, por haber compartido de su experiencia, sencillez y amistad. Al Sr. Tito Coyotl Tlachi y Sr. Pedro Torres Ortega por sus atenciones y amistad.

Falta mencionar a muchas otras personas, que también contribuyeron, algunos quizá sin saberlo, en mi formación; y compartieron de sí con toda atención.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
CAPÍTULO PRIMERO.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y REVISIÓN DE LITERATURA.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.1. Objetivos generales	3
1.2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
1.2.1. Descripción anatómica del maíz.....	4
1.2.2. Aspectos anatómicos y sustancias de reserva en células de semillas de maíz.....	10
1.2.3. Contenido de humedad en almacenamiento y germinación	13
1.2.4. Determinación de humedad en semillas de maíz.....	14
1.2.5. Conceptos físico-mecánicos en el estudio de compresión de las semillas de maíz.....	14
1.2.6. Compresión de productos biológicos conforme al estándar de la ASAE (2005)	17
1.2.7. Esfuerzos máximos.....	18
1.3. LITERATURA CITADA	22
CAPÍTULO SEGUNDO.....	24
2. CONTENIDO DE HUMEDAD Y TIPO DE ENDOSPERMO EN SEMILLA DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN AXIAL	24
RESUMEN.....	25
SUMMARY	26
2.1. INTRODUCCIÓN.....	27
2.1.1. Objetivo	28
2.1.2. Hipótesis.....	28
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.2.1. Factores de estudio	29
2.2.2. Determinación del peso final de la semilla a la humedad deseada.....	30
2.2.3. Evaluación previa de ganancia de humedad a través del tiempo.....	32
2.2.4. Compresión de las semillas y determinación de la fuerza, desplazamiento y energía en el punto de ruptura.....	33
2.2.5. Diseño experimental y análisis estadístico	33
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
2.3.1. Evaluación previa de ganancia de humedad a través del tiempo.....	35
2.3.2. Peso volumétrico	37

2.3.3. Densidad aparente	39
2.3.4. Componentes de la semilla en cinco variedades.....	40
2.3.5. Fuerza y desplazamiento en la compresión de semillas	45
2.4. CONCLUSIONES.....	55
2.5. LITERATURA CITADA	56
CAPÍTULO TERCERO	59
3. DAÑO TISULAR EN SEMILLAS DE MAÍZ SOMETIDAS A COMPRESIONES EQUIVALENTES A RUPTURA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD FISIOLÓGICA	59
RESUMEN.....	60
SUMMARY	62
3.1. INTRODUCCIÓN.....	64
3.1.1. Objetivos.....	68
3.1.2. Hipótesis.....	68
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	69
3.2.1. Factores de estudio	69
3.2.2. Componentes de la semilla.....	70
3.2.3. Caracterización morfológica de daños externos y evaluación del índice de daño.....	70
3.2.4. Proporción del área de fractura en semillas de maíz comprimidas hasta ruptura.....	72
3.2.5. Proporción de ruptura y separación celular en la microestructura.....	72
3.2.6. Evaluación de la calidad fisiológica mediante conductividad eléctrica, germinación estándar, velocidad de emergencia, germinación en prueba de frío y peso seco de las plántulas.....	73
3.2.7. Diseño experimental y análisis estadístico	76
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
3.3.1. Componentes de la semilla en tres variedades	78
3.3.2. Fuerza y desplazamiento a ruptura	80
3.3.3. Caracterización morfológica de daños externos	82
3.3.4. Porcentaje de área fracturada sobre la superficie de la semilla	86
3.3.5. Microestructura de ruptura y separación celular	88
3.3.6. Evaluación de la calidad fisiológica	100
3.4. CONCLUSIONES.....	108
3.5. LITERATURA CITADA	109
CAPÍTULO CUARTO	114
4. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	114
CONCLUSIONES GENERALES	115

RECOMENDACIONES.....	116
ANEXOS	117
A. DATOS DE RESULTADOS	117
Datos del Capítulo 3	118
Datos del Capítulo 4	128

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

2.1. Tiempos aproximados de inmersión y humedades previas en semillas de maíz harinoso (Cacahucintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero).	36
2.2. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el peso volumétrico.....	38
2.3. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo sobre el peso volumétrico a humedad de equilibrio.	39
2.4. Cuadros medios y efectos principales del Genotipo sobre la densidad aparente a humedad de equilibrio.	40
2.5. Cuadros medios y efectos principales del Genotipo sobre las variables de componentes de semilla.....	42
2.6. Coeficientes de correlación de Pearson y su significancia, entre peso volumétrico (PVOL), densidad aparente (DAP) y componentes de semilla: Endospermo duro (ED), suave (ES), embrión (EM), pericarpio (PC) y endospermo total (ET).	43
2.7. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía en el punto de ruptura de semillas sometidas a compresión.....	47
2.8. Cuadros medios y efectos combinados de Genotipo y Humedad sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía en el punto de ruptura de semillas sometidas a compresión.....	48
3.1. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo sobre las variables de componentes de semilla.....	79
3.2. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía a ruptura.	81
3.3. Cuadros medios y efectos principales de Humedad, Genotipo y Ubicación de fractura, sobre las frecuencias porcentuales de fractura en semillas comprimidas hasta ruptura.....	84
3.4. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el índice de daño.	85
3.5. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo, Humedad y Cara de la semilla, sobre el porcentaje de área fracturada.	87
3.6. Cuadros medios y comparación de medias entre proporción de área con ruptura celular y proporción de área con separación celular en células de endospermo.....	89
3.7. Cuadros medios y efectos principales de genotipo y humedad sobre las proporciones de área de endospermo con pared celular expuesta.	89
3.8. Cuadros medios y comparación de medias entre proporción de área con ruptura celular y proporción de área con separación celular en células de la capa de aleurona.....	98
3.9. Cuadros medios de Genotipo, Humedad y Compresión, sobre conductividad eléctrica.	101
3.10. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo, Humedad y Compresión, sobre variables de calidad fisiológica.....	103
3.11. Reducción de germinación en semillas comprimidas a ruptura en comparación con los tratamientos testigo.	105
3.12. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo, Humedad y Compresión, sobre la calidad fisiológica (prueba de frío).	107

Cuadro

A.1. Peso volumétrico en semillas de tres variedades a seis humedades.	118
A.2. Peso volumétrico en semillas de cinco variedades a humedad de equilibrio.	121
A.3. Densidad aparente de semillas de maíz a humedad de equilibrio determinado con un contenedor de latón de 115 mL.....	122
A.4. Peso seco de los componentes de semilla de maíz (g).	122
A.5. Fuerza y desplazamiento a ruptura en semillas de maíz, promedio por muestra de 30 semillas.	123
A.6. Fuerza y desplazamiento a ruptura en tres variedades de maíz, promedio de muestras de 60 semillas.	128
A.7. Frecuencias porcentuales de la localización de fractura en semillas de maíz sometidas a compresión de ruptura con 12 y 20% de humedad.	129
A.8. Área de la muestra, de fractura y proporción del área fracturada en la muestra (15 semillas).	131
A.9. Proporción de área de endospermo con pared celular expuesta.	134
A.10. Proporción de área de aleurona sin pared celular expuesta sobre el plano de observación.	135
A.11. Conductividad eléctrica de semillas con 12 y 20 % de humedad sin comprimir y comprimidas hasta ruptura.	136
A.12. Diferencia entre conductividad a Ruptura (y_{ijk}) y el promedio correspondiente al Testigo (x_{ij}); donde: i = nivel de humedad, j = nivel de variedad, k = repetición.	138
A.13. Plántulas normales, materia seca de plántulas normales y velocidad de germinación en la prueba de Germinación estándar de semillas con 12 y 20 % de humedad sin comprimir y comprimidas hasta ruptura.	139
A.14. Plántulas normales, su longitud y peso seco en la prueba de Frío de semillas con 12 y 20 % de humedad sin comprimir y comprimidas hasta ruptura.	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura

1.1. Anatomía de una plántula de maíz. Izq. Fase inicial, posterior a germinación; Der. Plántula establecida, mostrando las raíces permanentes (Reyes, 1990).....	4
1.2. Anatomía de una planta de maíz. De derecha a izquierda se muestra: A. La arquitectura de la planta; B. Tallo sin hojas; C. Corte con yema floral y segmento con: nudos, entrenudo, yema floral y canalito en dirección de la yema y D. Corte de tallo con haces conductores (Reyes, 1990; Llanos, 1984).....	6
1.3. Anatomía de una hoja de maíz (Reyes, 1990).....	6
1.4. Anatomía de las flores de maíz (Reyes, 1990; Llanos, 1984).....	8
1.5. Anatomía de los frutos de maíz (Reyes, 1990).....	9
1.6. Semillas de maíz con texturas diferentes (Reyes, 1990).....	9
1.7. Mazorcas de maíz con diferente textura de semilla, de izquierda a derecha: palomero, dulce, harinoso, cristalino, dentado y tunicado (Martin <i>et al.</i> , 1976).....	10
1.8. Curva Fuerza-Deformación para un producto agrícola. LL: límite proporcional; Y: punto de biocedencia; y R: punto de ruptura (Mohsenin, 1986).....	17
1.9. Curvas Fuerza-Deformación para materiales con y sin punto de biocedencia. PI = Punto de inflexión, D _{PI} = Deformación en el punto de inflexión (ASAE, 2005).....	18
1.10. Diagrama de secuencias de corte para el estudio de esfuerzos: A. Fuerzas externas (P ₁ y P ₂) e internas (las tres flechas, una de las cuales marcada como ΔP) en un cuerpo seccionado; B. Vista ampliada donde se muestran las componentes de ΔP; C. Estado más general de esfuerzo que puede actuar en un elemento, todos los esfuerzos tienen sentido positivo (Popov, 1976).....	20
1.11. Trayectorias de esfuerzo principal en una viga rectangular (Popov, 1976).....	21
1.12. Localización de las trayectorias de esfuerzo principal: A. Fotografía de las franjas en una viga rectangular obtenida utilizando el método fotoelástico; B. Principio del método fotoelástico de análisis de esfuerzos (Popov, 1976).....	21
2.1. Ganancia de humedad (b. h.) de semillas de maíz harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero) sumergidas en agua destilada.....	36
2.2. Relación lineal entre Peso volumétrico (PVOL) y Porcentaje de endospermo suave (ES): A. $ES = -2.3268(PVOL) + 33.3555, R^2 = 0.92$; B. Sin considerar al genotipo harinoso, $ES = -1.31(PVOL) + 1.9969, R^2 = 0.39$	44
2.3. Curvas del Desplazamiento-Fuerza de cuatro semillas de maíz palomero a 8 % de humedad: A) y C) Comportamiento global; B) y D) Comportamiento de la curva donde se presentó la ruptura R, la cual coincide con el cambio de pendiente (relajación). Cada “probeta” corresponde a una semilla ensayada.....	46
2.4. Relación lineal entre contenido de humedad (C.H.) y desplazamiento a ruptura (D) en Genotipos: A. Harinoso (Cacahuacintle), $D = 5.6638(C.H.) - 0.2798, R^2 = 0.98$; B. Semi-dentado (HS-2), $D = 4.2408(C.H.) - 0.1707, R^2 = 0.97$; C. Dentado (CPV20), $D = 3.8615(C.H.) + 0.0057, R^2 = 0.98$; D. Semi-cristalino (Toluqueño), $D = 2.2681(C.H.) + 0.1823, R^2 = 0.98$; E. Cristalino (Palomero), $D = 3.1229(C.H.) - 0.0719, R^2 = 0.97$	52

Figura

- 2.5. Relación entre contenido de humedad (C.H.) y fuerza a ruptura (F) en Genotipos: A. Harinoso (Cacahuacintle), $F = 557.09(\text{C.H.}) + 186.49$, $R^2 = 0.97$; B. Semi-dentado (HS2), $F = -4,855.2(\text{C.H.})^2 + 1,593.9(\text{C.H.}) + 194.75$, $R^2 = 0.95$; C. Dentado (CPV20), $F = -7,882.9(\text{C.H.})^2 + 3,040.5(\text{C.H.}) + 109.3$; $R^2 = 0.89$; D. Semi-cristalino (Toluqueño), $F = -532.82(\text{C.H.}) + 356.98$, $R^2 = 0.94$; E. Cristalino (Palomero), $F = -1,194.3(\text{C.H.}) + 548.89$; $R^2 = 0.96$53
- 2.6. Relación entre contenido de humedad (C.H.) y energía (E) a ruptura en Genotipos: A. Harinoso (Cacahuacintle), $E = 1,092.8(\text{C.H.}) - 81.41$, $R^2 = 0.95$; B. Semi-dentado (HS2), $E = -2,794(\text{C.H.})^2 + 1,569.1(\text{C.H.}) - 90.903$, $R^2 = 0.92$; C. Dentado (CPV20), $E = -4,259.4(\text{C.H.})^2 + 2,271.9(\text{C.H.}) - 120.61$, $R^2 = 0.93$; D. Semi-cristalino (Toluqueño), $E = 112.32(\text{C.H.}) + 53.336$, $R^2 = 0.65$; E. Cristalino (Palomero), $E = -1,524.8(\text{C.H.})^2 + 728.66(\text{C.H.}) - 1.4967$, $R^2 = 0.78$54
- 3.1. Zonas de daño en la semilla: fractura en la base B, comprendida por el primer cuarto de la longitud; en la parte media M, comprendida entre el 25 y 75 % de la longitud; en la corona C, correspondiente al cuarto distal de la longitud de la semilla; y, en la región sobre el embrión y escutelo EE, en la cara ventral.....71
- 3.2. Caracterización morfológica de daños externos en Cacahuacintle: A. Semilla sin fractura; B. Con fractura severa; C. Fractura en la base; D. Fractura en la parte media; E. Fractura en la corona; F. Fractura en el embrión. La imagen fue editada (coloreada) para contrastar el área de fractura.83
- 3.3. Semillas de maíz Cacahuacintle con 12 % de humedad coloreadas para determinar la proporción del área de fractura mediante el software ImageJ 1.47v.....86
- 3.4. Micrografías electrónicas de Barrido MEB de fracturas internas en una semilla de maíz semi-dentado (HS-2) con 12 % de humedad sometida a compresión: A. Posición de la semilla al momento del ensayo; la flecha indica la dirección de desplazamiento del plato de compresión “dpc”, se muestra la zona del escutelo “s”, el endospermo suave “es” y duro “ed”; B. Micrografía electrónica perpendicular ($90^\circ \cup$) al recuadro en A donde se muestra superficie de la fractura; C. Detalle del recuadro en B (a $45^\circ \cup$), donde se aprecia la orientación de las células periféricas de endospermo, así como el pericarpio “p” y la capa de aleurona “ca”, y D. Detalle del recuadro en C, donde se aprecian los granos de almidón “ga”, el límite celular “lc”, una fractura celular “fc” y porción de la pared celular “pc”.92
- 3.5. Micrografías Electrónicas de Barrido de fracturas internas en una semilla de maíz cristalino (Palomero) con 12 % de humedad sometida a compresión: A. Posición de la semilla al momento del ensayo; B. Micrografía donde se muestra la superficie de la fractura; C. Aumento de B; D. Recuadro “a” en B, en la zona de endospermo duro, donde se observan granos de almidón “ga” y pared celular “pc”; E. Recuadro “b” en B, en la zona de endospermo duro, se aprecia la ausencia de granos de almidón expuestos, por lo que se asume que la superficie corresponde a pared celular, y F. Contornos de las células del área en E.....93
- 3.6. Micrografías Electrónicas de Barrido de fracturas internas en una semilla de maíz cristalino (Palomero) con 12 (A y B) y una con 20 % (C y D) de humedad sometidas a compresión: A. Recuadro “c” en la 3.5 B, B. Recuadro “d” en la 3.5 B, nótese la estructura que rodea a los granos de almidón correspondiente a la matriz proteica que le da al endospermo la apariencia compacta típica del endospermo cristalino; C. Células con restos de pared celular y granos de almidón con restos de la matriz de proteína; D. Granos de almidón rodeados de una densa matriz proteica.94

Figura

- 3.7. Micrográficas Electrónicas de Barrido donde se observa el detalle de la superficie de fractura en la zona cercana al pericarpio en una semilla de maíz harinoso (Cacahuacintle) con 12 % de humedad sometida a compresión: A. En la posición mostrada, el embrión se ubica en la parte superior, el recuadro muestra el área de fractura provocada durante el ensayo de compresión, el resto se fracturó al separar la semilla utilizando unas pinzas; B. Aumento del recuadro en A; C. Aumento de B; D. Aumento de C, donde se observan superficies de límites celulares “lc” o pared celular, y de granos de almidón “ga”.95
- 3.8. Micrográficas Electrónicas de Barrido de fracturas internas en una semilla de maíz semi-dentado (HS-2) con 12 % de humedad sometida a compresión: A. Vista panorámica; B. Recuadro “a” en A, mostrando endospermo duro con granos de almidón rodeados de una densa matriz proteica; C. Recuadro “b” en A, mostrando endospermo suave, se observan los límites celulares, los granos de almidón y la ausencia de pared celular sobre esta superficie; D. Endospermo suave mostrando paredes celulares al centro y tres granos de almidón de la célula superior y dos de la inferior.96
- 3.9. Micrográficas Electrónicas de Barrido de fractura en células de una semilla de maíz semi-dentado (HS-2) a 12 % de humedad (A y C) y harinoso (Cacahuacintle) a 20 % de humedad (B y D): A. Pericarpio “p” y capa de aleurona “a”, se muestran cristales de carbonato de calcio “cc” (EDS); B. Célula de aleurona que muestra una posible punteadura “t” entre dos células y el núcleo “n”; C. Eje embrionario, sin presentar daño y D. Superficie del escutelo, mostrando células redondas sin presentar daño.99

CAPÍTULO PRIMERO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo de gran importancia a nivel nacional e internacional. En México, representa una parte importante en la dieta de la población; y por ello ha sido uno de los cultivos con mayor volumen y superficie cultivada; tan sólo en el 2003 ocupó el segundo lugar, después de la caña de azúcar, con un volumen de casi 21 millones de toneladas; la producción mundial en 2008-2009 fue de 791.29 millones de toneladas, de las cuales México participó con 25 millones de toneladas (<http://www.grains.org/corn>).

En México se tiene la necesidad de incrementar la productividad de semilla mejorada y uno de los factores que podrían coadyuvar a lograrlo, es la mejora en las estrategias de manejo en la planta de beneficio; pues en general, se tiene un periodo breve de tiempo para realizar tales operaciones, lo que obliga a incrementar los regímenes de trabajo de la mayoría de la maquinaria.

Descripción del problema

La mecanización de la producción de semilla usualmente ocasiona de manera inherente, daño mecánico, lo que incurre en un decremento de la calidad física, fisiológica y sanitaria de la misma (Copeland y McDonald, 1985; Tuite *et al.*, 1985). La resistencia a compresión axial se encuentra relacionada a la susceptibilidad al daño mecánico durante su procesamiento en la planta de beneficio; por lo que es posible mejorar el manejo durante las etapas de limpieza, secado y almacenaje, si se conoce la resistencia a compresión (Mohsenin, 1986).

Se sabe que en la mayoría de los casos, la susceptibilidad a daño mecánico se encuentra influenciada por el fenotipo del material así como otros factores como madurez y manejo agronómico. En el caso del maíz, la susceptibilidad al daño mecánico depende de la textura del endospermo (Vázquez, 2002), del contenido de humedad y ubicación de la semilla en la mazorca (Mancera, 2005), y de la tasa de secado (Kamst *et al.*, 2002). A pesar de que se han realizado ciertos estudios que permiten conocer la resistencia a daño mecánico, no se ha determinado aún una relación matemática entre el contenido de humedad y susceptibilidad al

daño mecánico; información que es de utilidad en distintas etapas del proceso de beneficio de semilla como es la cosecha, el secado y el almacenaje.

1.1.1. Objetivos generales

- a) Determinar la resistencia a compresión de semillas con diferentes contenidos de humedad y diferentes texturas de endospermo.
- b) Observar el daño tisular y/o celular de semillas sometidas a compresión de ruptura.

1.2. REVISIÓN DE LITERATURA

1.2.1. Descripción anatómica del maíz

Raíz. El maíz presenta un sistema radicular bien definido en tres estadios (Figura 1.1 y Figura 1.2): **1) raíces temporales**, las cuales emergen al germinar desde el primer nudo y son funcionales durante el desarrollo de la plántula, desapareciendo al agotarse el endospermo e iniciarse las funciones de las raíces permanentes; **2) raíces permanentes**, que nacen en el segundo nudo de la plántula o nudo superior del mesocotilo, como no son embrionales se conocen como adventicias. Son profusamente ramificadas en forma horizontal cerca de la superficie, alcanzando un área con diámetro de hasta 1.8 m y una profundidad mayor a 2 m. Intervienen en el sostén y nutrición de la planta; y **3) raíces adventicias**, este tipo de raíz, a diferencia de las raíces permanentes, emergen en los nudos basales, fuera del suelo, y al profundizar en este sirven de anclaje y como medio de absorción de nutrientes (Reyes, 1990).

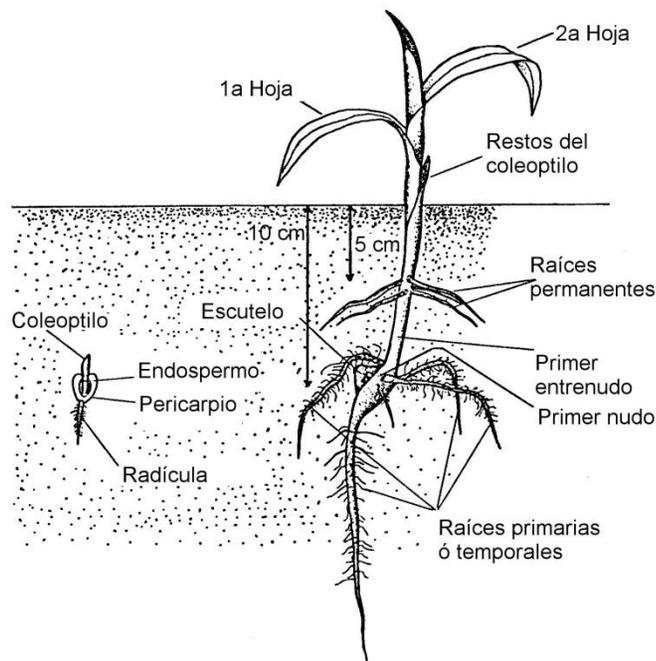


Figura 1.1. Anatomía de una plántula de maíz. Izq. Fase inicial, posterior a germinación; Der. Plántula establecida, mostrando las raíces permanentes (Reyes, 1990).

Tallo. El tallo del maíz es una caña formada por nudos y entrenudos macizos, de longitud variable, gruesos en la base y de menor grosor en los entrenudos superiores (Figura 1.2). El número de nudos es variables en las diferentes razas y variedades con un rango de 8 a 26 (7 a 25 entrenudos), en la base de cada entrenudo puede haber una yema floral femenina que se extiende a lo largo de una depresión (canalito) del entrenudo; en una planta pueden haber 10 o más yemas florales; pero sólo una a tres yemas florales pueden desarrollar grano de maíz por el fenómeno conocido como “dominancia apical” que inhibe el desarrollo de las yemas inferiores. Los maíces de clima caliente no desarrollan amacollamiento o hijuelos, estos brotan en el nudo donde nacen las raíces permanentes, el cual es conocido como “corona”; en los maíces de clima frío el ahijamiento es variable (Reyes, 1990).

Hojas. La hoja está formada por una vaina que envuelve al entrenudo y cubre a la yema floral; una lámina o limbo de tamaño variable en largo y ancho, con una nervadura central bien definida, el haz o parte superior con pequeñas vellosidades, el envés o parte inferior sin vellosidades; la lígula o lengüeta en la base de la hoja; la aurícula que envuelve al entrenudo, también en la base (Figura 1.3). La lígula y la aurícula protegen al entrenudo y drenan el agua que cae sobre la hoja. Las hojas nacen en los nudos, se distribuyen de manera alterna a lo largo del tallo. En variedades de clima caliente son perpendiculares, anchas y largas, en las de clima frío son más colgantes, flexibles, angostas y cortas (Reyes, 1990).

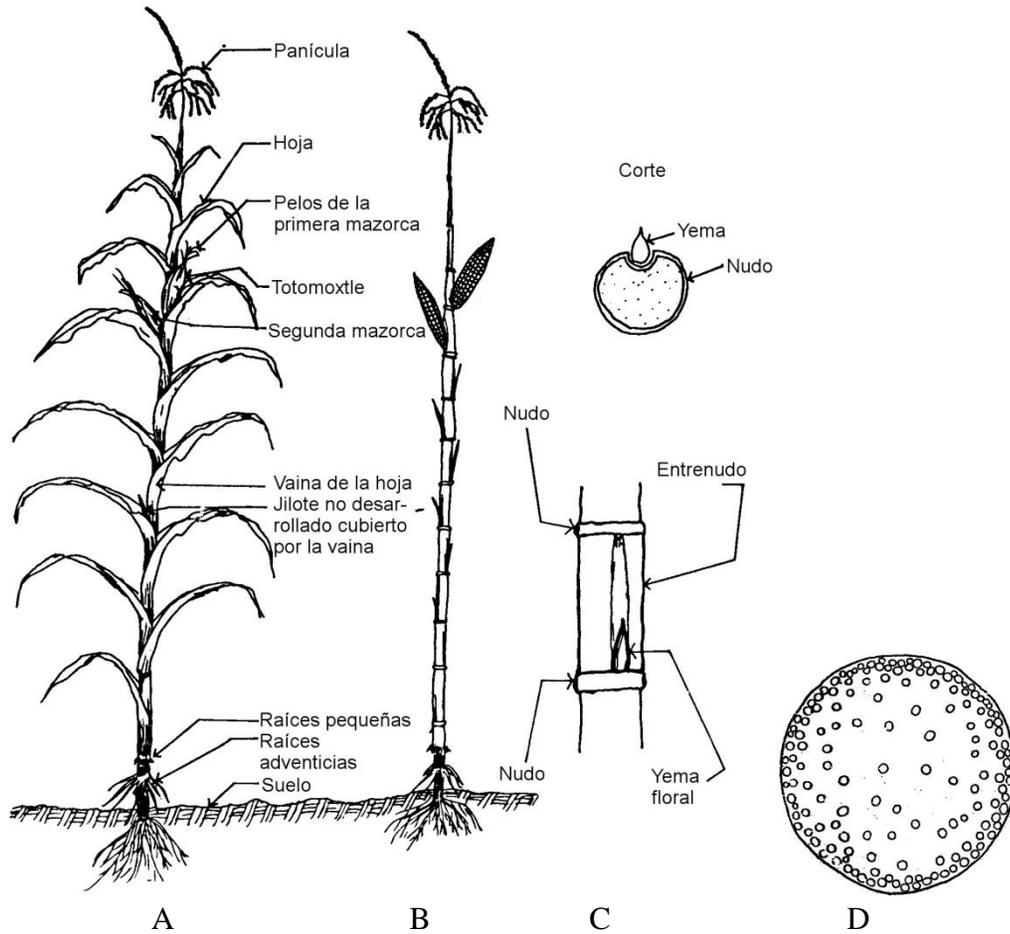


Figura 1.2. Anatomía de una planta de maíz. De derecha a izquierda se muestra: **A.** La arquitectura de la planta; **B.** Tallo sin hojas; **C.** Corte con yema floral y segmento con: nudos, entrenudo, yema floral y canalito en dirección de la yema y **D.** Corte de tallo con haces conductores (Reyes, 1990; Llanos, 1984).

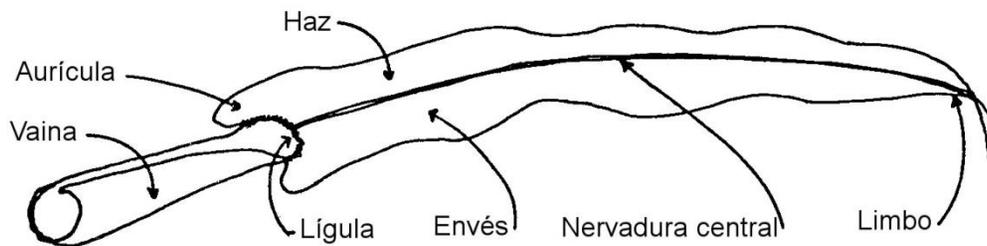


Figura 1.3. Anatomía de una hoja de maíz (Reyes, 1990).

Flores. El maíz es una planta monoica de flores unisexuales muy separadas y bien diferenciadas (Figura 1.4); las flores que producen el polen se localizan en la inflorescencia terminal llamada “panícula”, “panoja”, “miahuatl” y más generalmente “espiga”. La panícula consiste en un eje central, ramas laterales primarias, secundarias y terciarias; las panículas de variedades de clima caliente son largas, muy ramificadas y producen abundante polen, las de clima frío son más cortas, menos ramificadas, más laxas y producen menos polen. En el eje central o en las ramificaciones se distribuyen por pares alternamente a lo largo del eje o raquis, las espiguillas; cada espiguilla está protegida por dos brácteas o glumas, y en su interior hay un eje o raquilla con dos flósculos, cada uno tiene la flor estaminada protegida por la lema y la palea. La flor estaminada contiene tres estambres, en la base de los estambres están dos lodículos y un pistilo rudimentario. Esto explica la ocasional formación de granos de maíz en la panícula. Cada panícula produce de 10 a 25 millones de granos de polen (Reyes, 1990).

Las flores pistiladas se localizan en las yemas florales; que en el proceso de su desarrollo se denominan: yema floral pistilada, jilote, elote, elocinte (camahua o barroceo) y mazorca (Figura 1.4). Las flores pistiladas se agrupan también por pares, distribuyéndose a lo largo de la inflorescencia femenina, que es una espiga cilíndrica: consiste de un raquis central u olote en donde se insertan a lo largo, las espiguillas por pares, con glumas, lema y palea rudimentarias; cada espiguilla con dos flores, una fértil y una estéril. Las flores pistiladas consisten en un ovario con pedicelo unido al raquis u olote; un óvulo único, un estilo o estigma muy largo, en toda su longitud es receptivo y germina el grano de polen. La inflorescencia está cubierta por brácteas cuyo conjunto se denomina “totomoxtle”. La estructura de una inflorescencia femenina es similar al de una rama modificada, con un pedúnculo de longitud variable. Los estilos de un jilote pueden durar de una a dos semanas receptivos, continúan creciendo hasta que son polinizados, una vez ocurrida la fecundación se secan (Reyes, 1990).

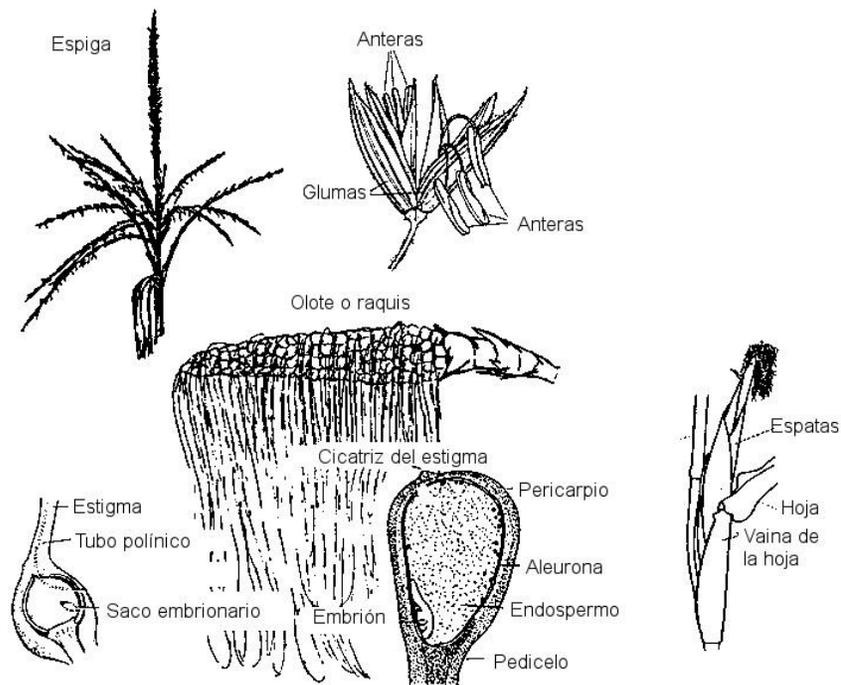


Figura 1.4. Anatomía de las flores de maíz (Reyes, 1990; Llanos, 1984).

Fruto. Botánicamente es un cariopse, y comúnmente se le llama grano o semilla de maíz. Consta de las siguientes partes (Figura 1.5): **1) Pericarpio**, corresponde a la pared del ovario, es parte del tejido materno, el color puede ser rojo o incoloro, siendo dominante el rojo; **2) Endospermo**, es el tejido de reserva de la semilla; un tercio de los cromosomas son de origen masculino y dos tercios de origen femenino, siendo $3n$. El color del endospermo de reserva puede ser amarillo o blanco. La aleurona es una capa de células de endospermo que puede ser incolora, roja o púrpura; contiene sustancia proteica en forma granular; y se considera un elemento importante en el proceso de germinación; **3) Embrión**, el cual representa la nueva planta en miniatura y consiste en radícula, plúmula con tres a cinco hojas, escutelo o cotiledón y dos capas: el coleótilo que cubre a la plúmula y la coleorriza que cubre a la radícula.

El fruto o grano es muy variable en su tamaño, composición, textura y forma (Figura 1.6); existen granos muy pequeños de unos cuantos mm y muy grandes de más de 3 cm de ancho o largo; la corona puede ser aguda como en pepitillas y palomeros, redonda como en los

cristalinos, hendida como en los dentados y rugosa como en los maíces céreos y dulces (Reyes, 1990).

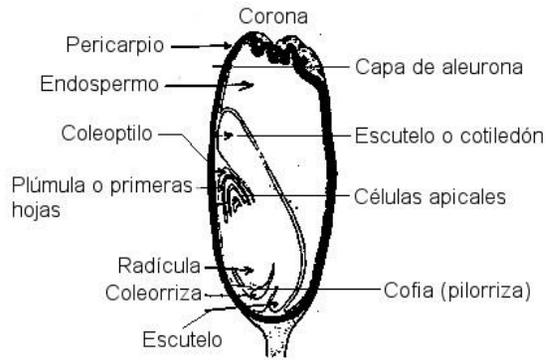


Figura 1.5. Anatomía de los frutos de maíz (Reyes, 1990).



Figura 1.6. Semillas de maíz con texturas diferentes (Reyes, 1990).

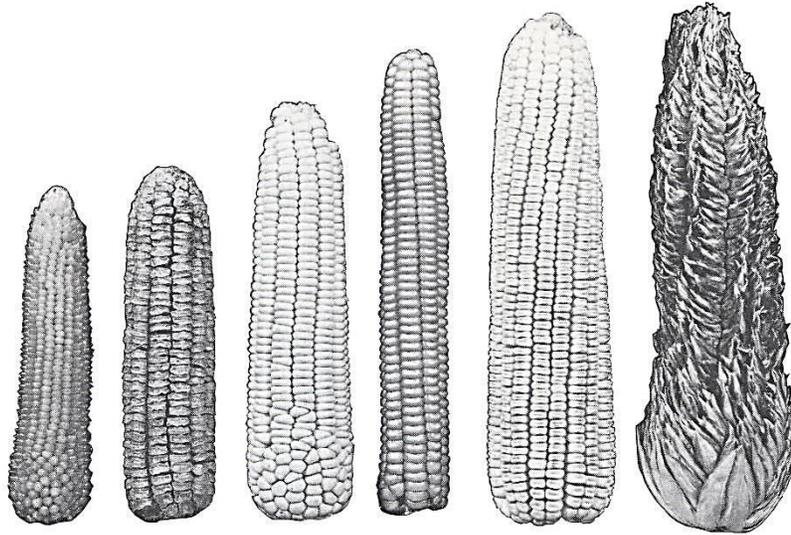


Figura 1.7. Mazorcas de maíz con diferente textura de semilla, de izquierda a derecha: palomero, dulce, harinoso, cristalino, dentado y tunicado (Martin *et al.*, 1976).

1.2.2. Aspectos anatómicos y sustancias de reserva en células de semillas de maíz

Leucoplastos. Los leucoplastos en el endospermo de semillas de maíz, usualmente especializados como amiloplastos (reserva de almidón), son cuerpos protoplásmicos limitados por una membrana en donde se forman uno o varios granos de almidón de tamaños variables, que pueden crecer de manera discreta o bien, de manera conjunta como un grano compuesto. Los leucoplastos son relativamente frágiles, por lo que se rompen fácilmente en preparaciones frescas. Algunos leucoplastos se especializan en la formación de lípidos, los *elaioplastos*, que son comunes en las monocotiledóneas (Esau, 1965).

Vacuolas. Las vacuolas son cavidades dentro del citoplasma rellenas de savia celular de variada composición en función del tejido, tipo de célula e incluso de la vacuola dentro de la misma célula. Los materiales presentes en las vacuolas se clasifican como ergásticos, siendo sustancias de reserva o para el funcionamiento de la célula o subproductos del metabolismo. Algunas sustancias que se han encontrado en las vacuolas son sales, azúcares, ácidos orgánicos, proteínas, sustancias grasas, taninos y antocianinas. Las vacuolas son variables en su forma y tamaño según la etapa de desarrollo y estado metabólico de la célula. En células

meristemáticas frecuentemente son numerosas y pequeñas, mientras que en células maduras regularmente sólo se encuentra una vacuola de gran tamaño (Esau, 1965).

Sustancias ergásticas

Carbohidratos. Las principales sustancias ergásticas del protoplasto son la celulosa y el almidón. La celulosa es el principal componente de la pared celular, mientras que el almidón se encuentra como sustancia de reserva dentro del protoplasto (Esau, 1965). El almidón consiste en dos polímeros de D-glucosa, uno lineal y otro ramificado; el polímero lineal es la amilosa y está formado por unidades con enlaces α -1,4, mientras que la amilopectina aunque tiene enlaces α -1,4, también tiene algunos enlaces α -1,6 donde se dan lugar las ramificaciones, como referencia, el peso molecular de amilosa y amilopectina para trigo son de 14×10^3 y 4×10^6 , respectivamente (Potter y Hassid, 1948, citados por Bewley y Black, 1978). Las proporciones de amilosa y amilopectina son variables entre diferentes variedades de maíz, siendo de un 25 % de amilosa para muchas de ellas, mientras que para variedades cerosas este porcentaje es sumamente bajo. El almidón es depositado en cuerpos discretos, los granos de almidón, el cual tiene una forma característica en función de la especie, siendo esférico, elíptico o angular, dependiendo principalmente del contenido de amilosa, siendo los granos menos angulares, redondeados, los que contienen niveles más altos. Aunque en un mismo grano de almidón se encuentran frecuentemente ambos tipos de polímeros, no se encuentran en la misma proporción, variando incluso según su posición dentro de la semilla; en sorgo, por ejemplo, los granos de almidón en el área central consisten predominantemente de amilopectina, que es roja al teñir con yodo, mientras que en otras áreas predomina la amilosa, la cual se colorea de azul al teñir con yodo. Los granos de almidón de maíces cerosos y no cerosos contienen alrededor de 0.5 % de proteína, la cual es predominantemente enzimática (Bewley y Black, 1978).

Proteínas. La proteína almacenada como sustancia ergástica puede depositarse en una forma cristalina o de manera amorfa. El gluten es una proteína ergástica que se combina con almidón en el endospermo de trigo. En muchas semillas, el embrión, el endospermo o el perispermo contienen proteína en forma de granos de aleurona (aleurona significa harina de trigo en

griego, fue usado por Harting en 1855 para los cuerpos proteicos que logró aislar), los cuales tienen un diámetro de 1 a 20 μ , siendo para el endospermo de maíz de 0.2 a 2 μ y localizados dentro de una matriz proteica. Algunos estudios sugieren que los granos de aleurona se originan en la vacuola. (Esau, 1965). En cereales, al igual que el almidón, casi toda la proteína se localiza en el endospermo en forma de granos, llamados cuerpos proteicos, diferenciándolos con ese nombre de los granos de aleurona, término usado para designar a la proteína localizada en la capa de aleurona; la capa de aleurona posee cuerpos proteicos (granos de aleurona) de tamaño relativamente grande, mientras que la capa por debajo de esta generalmente contiene cuerpos de proteína más pequeños. Los cuerpos proteicos tienen secciones ovales o circulares y están rodeados por una membrana de lipoproteína (Bewley y Black, 1978).

Grasas y similares. Las grasas y los aceites se encuentran distribuidos por toda la planta. Las ceras, suberina y cutina son de naturaleza grasa y se encuentran con frecuencia como sustancias protectoras dentro y sobre la pared celular. Como inclusiones protoplasmicas, las grasas y aceites son materiales de reserva comunes en semillas, esporas y embriones, en células meristemáticas y ocasionalmente en diversos tejidos diferenciados. En general, las semillas ricas en aceite tienen alto contenido de proteína, pero no de almidón y suelen ser más pequeñas que las semillas con alto contenido de proteína o almidón (Esau, 1965). En cereales, las mayores proporciones de aceite en las semillas se encuentran en el escutelo, y en pequeñas cantidades también en el endospermo, especialmente en la capa de aleurona; en el embrión de maíz, se tiene aproximadamente un 4.7 % de aceite. Los aceites se almacenan en cuerpos de aceites, conocidos también como vesícula de lípidos, oleosoma, esferosoma, etc., y tienen un tamaño de entre 0.2 a 6 μ , en células de aleurona, estos cuerpos de aceite rodean a los granos de aleurona (Bewley y Black, 1978).

Taninos. Los taninos son un grupo heterogéneo de derivados fenólicos usualmente relacionados a los glucósidos. Son abundantes en hojas, xilema, floema, peridermis de tallo y raíz, frutos inmaduros y testa de semillas. Los taninos protegen al protoplasto de la desecación, deterioro y daño por animales; además se relaciona al metabolismo de almidón, a la formación

y transporte de azúcares; se consideran antioxidantes e importantes en mantener la homogeneidad del citoplasma (Esau, 1965).

Cristales. En contraste con los animales, que normalmente eliminan el exceso de materiales inorgánicos, las plantas depositan tales materiales en sus tejidos. Los depósitos inorgánicos en plantas consisten predominantemente en sales de calcio y en anhídros de sílica. Entre las sales de calcio más comunes se encuentra el oxalato de calcio, el cual se presenta en muchas formas cristalinas. Los cristales pueden presentarse en formas complejas como las drusas, los cristales elongados se denominan estiloides o rafidios, los cuales se agrupan en manojos. Los cristales pueden ser demasiado pequeños o muy grandes, casi al tamaño de la célula que residen, estos se forman comúnmente en las vacuolas, aunque también se encuentran en el citoplasma y en la pared celular (Esau, 1965).

1.2.3. Contenido de humedad en almacenamiento y germinación

En algunos estudios, se han utilizado técnicas que permiten generar condiciones artificiales de almacenamiento; Brenes (2007) utilizó diferentes concentraciones de sal para generar diversos ambientes, en su estudio logró que las semillas se equilibraran a contenidos de humedad de hasta 16 %. Es probable mantener la semilla a la humedad deseada cubriéndola con una capa de material impermeable (como cera), o bien, almacenarla en recipientes herméticos. No obstante, debe considerarse que la actividad fisiológica puede ocasionar el deterioro de las mismas y modificar sus propiedades físicas.

Las semillas de maíz inician su germinación cuando han alcanzado el contenido de humedad adecuado y se les deja un tiempo en ese estado, pues en caso de que se sequen nuevamente, se evitaría la germinación de las mismas (McDonald, 2000). La rehidratación de la semilla es entonces el primer requisito para la germinación, siendo un proceso meramente físico, una vez que alcanzan un contenido de humedad óptimo, la tasa de absorción de agua disminuye de manera drástica, y es en ese momento en que ocurre actividad metabólica que dará inicio a la nueva planta, por lo que se incrementa la tasa de respiración, y en el crecimiento posterior de la plántula se han de requerir cantidades mayores de agua (Bewley y Black, 1994). En

condiciones en que la semilla de maíz tiene agua disponible a discreción, se ha encontrado que la cantidad de agua en la que se observó una reducción en la tasa de absorción es de 200 g/kg (Rangel 2004); lo cual equivale a un 20 % de humedad en base húmeda, aunque es probable que la absorción de agua sea diferente entre genotipos.

1.2.4. Determinación de humedad en semillas de maíz

De acuerdo a la ISTA (2005), la determinación de humedad en semillas de maíz se realiza al secar aproximadamente 4 a 5 g de semilla molida (tamaño de partícula menor a 1 mm, o incluso menor a 0.5 mm), para semillas con humedad superior a 25 % se utiliza el pre-secado por 2-5 h a 70 °C. h y posteriormente se realiza el secado por cuatro horas a 130-133 °C. El cálculo del contenido de humedad se efectúa utilizando la fórmula siguiente:

$$CH= 100*(Ph-Ps)/Ph; \quad (2.1)$$

Donde:

CH: Contenido de humedad de la semilla (%); base húmeda (b. h.)

Ph: Peso húmedo de la muestra (g);

Ps: Peso seco de la muestra (g);

100: Constante utilizada para que el resultado sea expresado en porcentaje y no en fracción de entero.

1.2.5. Conceptos físico-mecánicos en el estudio de compresión de las semillas de maíz

De acuerdo con Mohsenin (1986), las propiedades mecánicas se pueden definir como aquellas que intervienen en el comportamiento de los materiales bajo la acción de fuerzas. Por otro lado, la reología ha sido definida como la “ciencia dedicada al estudio de la deformación y el flujo”, por lo que, cuando la acción de fuerzas resulta en deformación y flujo de material, las propiedades mecánicas son referidas como propiedades reológicas y en ese momento se puede hablar tanto de propiedades mecánicas como de propiedades reológicas; cabe señalar que la

reología considera adicionalmente el efecto del tiempo de carga sobre un cuerpo. Por lo tanto, desde el punto de vista reológico, el comportamiento mecánico de un material es expresado en términos de tres parámetros: fuerza, deformación y tiempo; ejemplos de propiedades reológicas son comportamiento esfuerzo-deformación, relajación del esfuerzo y de la deformación, y viscosidad. Por otro lado, algunos ejemplos de propiedades mecánicas que están fuera de la reología son coeficiente de deslizamiento y velocidad final, rebote y flujo de material a granel (Mohsenin, 1986).

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales biológicos es posible sólo mediante una aproximación empírica, ya que estos resultan ser muy complejos. Debido a que se trata de entes vivos, estos sufren de un cambio constante en forma, tamaño, respiración y otros aspectos relacionados a sus procesos vitales. Durante el desarrollo y almacenaje, el organismo está influenciado por los factores ambientales tales como humedad, temperatura y concentración de gases en la atmósfera (Mohsenin, 1986). Como resultado de lo anterior, las propiedades mecánicas de los materiales biológicos, se encuentran en constante cambio, variando de acuerdo a la edad, y condición fisiológica. A continuación se presentan algunos conceptos importantes relacionados con las propiedades mecánicas de productos agrícolas.

Fuerza: Acción de un cuerpo sobre otro, que tiende a moverlo en la dirección de la acción, usualmente se expresa en newton [N] (Meriam y Kraige, 1987).

Esfuerzo: Es la intensidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área. Por ejemplo [N/m²] (Popov, 1976).

Esfuerzo de compresión: La ASTM (American Society for Testing and Materials) lo define como “esfuerzo normal debido a fuerzas dirigidas hacia el plano en el que actúan” (Mohsenin, 1986).

Deformación: Desplazamiento relativo de puntos dentro de un cuerpo. En general, la deformación es acompañada por un cambio de forma y/o de volumen (Mohsenin, 1986).

Límite proporcional (Ley de Hooke), Límite lineal: El máximo esfuerzo que un material es capaz de soportar, sin que se pierda la proporcionalidad lineal de la gráfica fuerza-desplazamiento o esfuerzo-deformación, expresado como “LL” en la Figura 1.8 (definición de la ASTM, según Mohsenin, 1986).

Límite elástico: El máximo esfuerzo que puede soportar un material sin sufrir deformación permanente, una vez que es liberado del esfuerzo o la fuerza (Mohsenin, 1986). Para el acero, así como para muchos otros metales, el límite proporcional y elástico casi coinciden, pero para un material como el caucho, la propiedad de elasticidad puede continuar mucho más allá del límite proporcional (Timoshenko y Gere, 1984).

Elasticidad: La capacidad de un material para recuperar su forma original al dejar de actuar la acción externa que provocó su deformación (Mohsenin, 1986). En la Figura 1.8, las elongaciones en las porciones de la curva, antes de que el punto “LL” sea alcanzado, son recuperables y representan una medida de la deformación elástica (Mohsenin, 1986).

Plasticidad: Deformación permanente que se observa al rebasar el límite elástico y dejar de actuar la acción externa que provocó su deformación (Mohsenin, 1986).

Cedencia: Cuando la deformación aumenta sin que haya incremento alguno en el esfuerzo (definición de la ASTM, según Mohsenin, 1986).

Biocedencia: Concepto que se utiliza en los materiales biológicos y se define como el punto de la curva esfuerzo-deformación en el cual ocurre un incremento de la deformación sin que haya incremento alguno en el esfuerzo. En ciertos productos agrícolas, la biocedencia es un indicador del inicio de la ruptura celular. Corresponde al daño en la microestructura de los materiales biológicos. En la Figura 1.8 se representa por una “Y” (Mohsenin, 1986).

Ruptura: Es el punto de la curva esfuerzo-deformación en el cual el espécimen se rompe por efecto de la carga; en los materiales biológicos puede indicar la ruptura de la cáscara, piel o cubierta, correspondiendo al daño en la macroestructura del material biológico (Mohsenin, 1986). En la Figura 1.8 se representa por una “R”.

Resistencia última o esfuerzo último: Esfuerzo unitario correspondiente a la ruptura (Mohsenin, 1986).

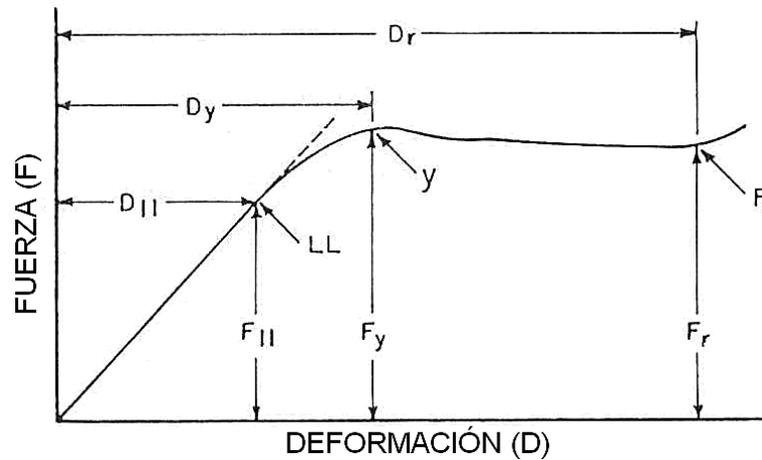


Figura 1.8. Curva Fuerza-Deformación para un producto agrícola. LL: límite proporcional; Y: punto de biocedencia; y R: punto de ruptura (Mohsenin, 1986).

1.2.6. Compresión de productos biológicos conforme al estándar de la ASAE (2005)

El estándar de la ASAE (2005) de compresión de materiales biológicos (alimenticios) de forma convexa tiene la finalidad de determinar los atributos mecánicos de materiales tales como frutas, vegetales, semillas y granos, así como alimentos procesados. En la Figura 1.9 se muestran dos curvas de Fuerza-Deformación en la que se presenta el punto de inflexión; las curvas mostradas presentan concavidad hacia arriba y posteriormente concavidad hacia abajo, el punto de inflexión se encuentra en donde la tasa de cambio de pendiente (segunda derivada) se hace cero; se considera que el cambio de pendiente sugiere algún tipo de falla del material. El procedimiento recomendado para granos y semillas incluye el uso de pegamento para fijar las semillas al plato inferior, así como una velocidad de desplazamiento de la cruceta de $1.25 \text{ mm/min} \pm 50 \%$, pero la metodología empleada estará en función de la precisión deseada, la sensibilidad del equipo y del espécimen.

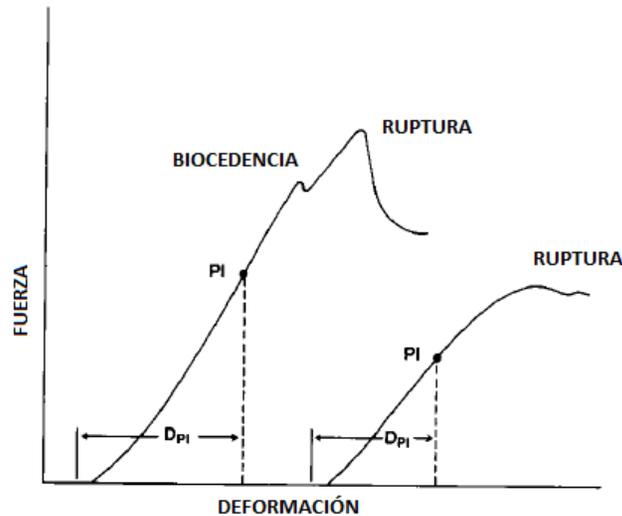


Figura 1.9. Curvas Fuerza-Deformación para materiales con y sin punto de biocedencia. PI = Punto de inflexión, D_{PI} = Deformación en el punto de inflexión (ASAE, 2005).

1.2.7. Esfuerzos máximos

Los esfuerzos máximos (esfuerzo principal o esfuerzo normal máximo o mínimo y esfuerzo cortante máximo) son los que tienden a producir la falla de los materiales, por lo que su estudio y determinación es de gran importancia.

Las fuerzas internas que actúan sobre áreas infinitesimales en una sección transversal para mantener en equilibrio a las fuerzas exteriormente aplicadas sobre un cuerpo determinan la resistencia a la deformación y a la ruptura; estas son de naturaleza vectorial, de magnitud y dirección variables. Para su estudio, generalmente se descomponen en direcciones perpendicular y paralela al área de la sección de estudio (Figura 1.10); las componentes de fuerza perpendicular al área de estudio producen los *esfuerzos normales*, mientras que las fuerzas paralelas a dicha área producen los *esfuerzos cortantes* (Popov, 1976).

Se denomina *esfuerzo principal* al esfuerzo normal máximo o mínimo que ocurren sobre un cuerpo; para su determinación es necesario localizar primero al plano en que ocurren dichos esfuerzos, los cuales se denominan *planos principales*. En planos en que se presentan los

esfuerzos normales máximo o mínimo no hay esfuerzos cortantes. Una teoría, conocida como *teoría del esfuerzo normal máximo* afirma que la falla o fractura de un material ocurre cuando el esfuerzo normal máximo en un punto alcanza un valor crítico, independientemente de los otros esfuerzos. Es posible investigar la magnitud, dirección y sentido de los esfuerzos principales en un gran número de puntos, y al conectar dichos puntos se puede obtener una interpretación visual a manera de mapa (Figura 1.11). Para determinar las trayectorias de esfuerzos principales de manera experimental, es posible utilizar un material con propiedades ópticas adecuadas aplicando el *método fotoelástico de análisis de esfuerzos* (Figura 1.12). Nótese que es evidente que la fractura de la viga en la Figura 1.11, ocurriría de modo perpendicular a la trayectoria de los esfuerzos principales al centro de la misma.

Los *esfuerzos cortantes máximos o mínimos* se localizan en planos a 45° respecto a los planos principales. A diferencia de los esfuerzos principales, en cuyos planos no ocurren esfuerzos cortantes, los esfuerzos cortantes máximos actúan en planos que usualmente no están exentos de esfuerzos normales. La teoría conocida como *teoría del esfuerzo cortante máximo* resulta de la observación de que en un material dúctil aparece deslizamiento durante la fluencia, a lo largo de planos críticamente orientados, lo cual sugiere que la fluencia del material depende únicamente del máximo esfuerzo cortante que se alcanza dentro de un elemento.

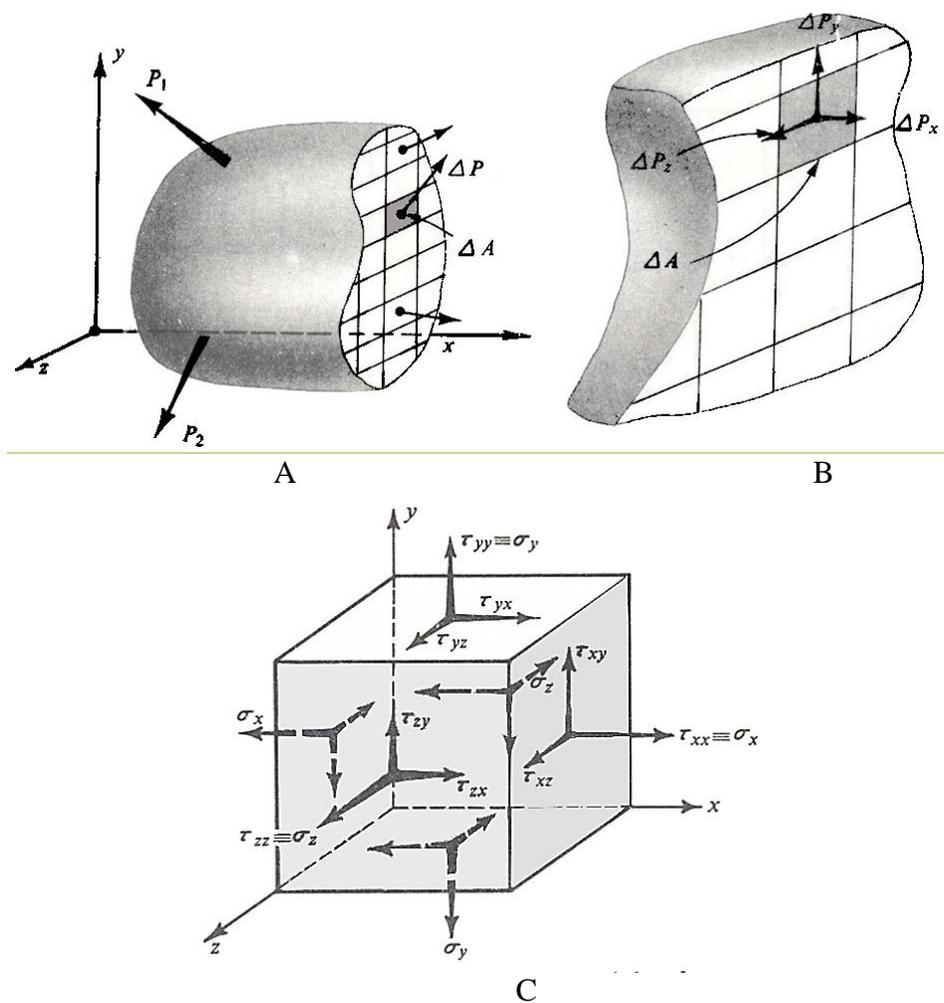


Figura 1.10. Diagrama de secuencias de corte para el estudio de esfuerzos: **A.** Fuerzas externas (P_1 y P_2) e internas (las tres flechas, una de las cuales marcada como ΔP) en un cuerpo seccionado; **B.** Vista ampliada donde se muestran las componentes de ΔP ; **C.** Estado más general de esfuerzo que puede actuar en un elemento, todos los esfuerzos tienen sentido positivo (Popov, 1976).

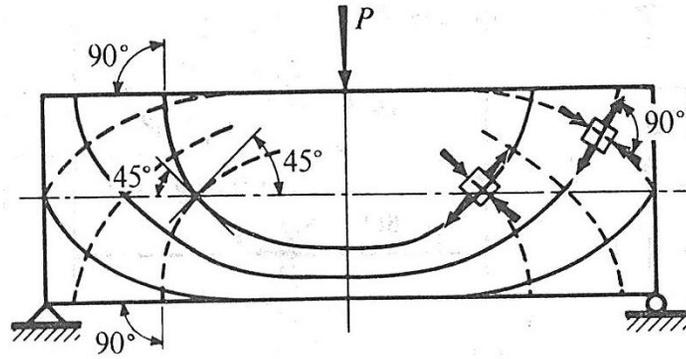


Figura 1.11. Trayectorias de esfuerzo principal en una viga rectangular (Popov, 1976).

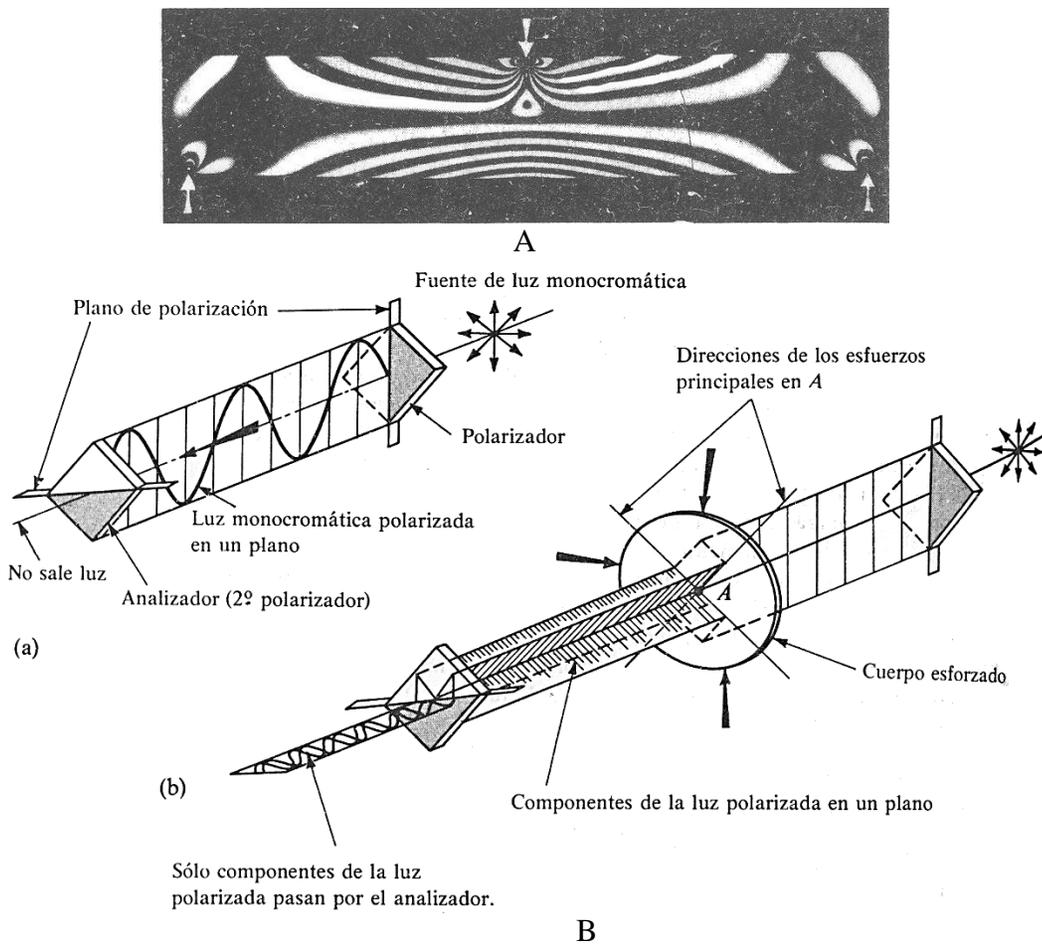


Figura 1.12. Localización de las trayectorias de esfuerzo principal: **A.** Fotografía de las franjas en una viga rectangular obtenida utilizando el método fotoelástico; **B.** Principio del método fotoelástico de análisis de esfuerzos (Popov, 1976).

1.3. LITERATURA CITADA

- Bewley J, D and Black, M. 1978.** Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination. V. 1 Development, Germination and Growth. Springer-Verlag. Heidelberg, Germany. Pp. 17, 24-26, 28-30, 34-37.
- Bewley, D and Black, M. 1994.** Seeds: Physiology of Development and Germination. Second edition. Plenum Press. New York, United States of America. Pp. 147-155, 296-303, 245-246.
- Brenes A, E. 2007.** Decremento de la calidad fisiológica durante el almacenamiento en semillas de maíz, frijol y canola. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Copeland O, L and McDonald B, M. 1985.** Principles of Seed Science and Technology. Second Edition. Burgess Publishing company. Minneapolis Minnesota, United States of America, 307 p.
- Esau, K. 1965.** Plant Anatomy. Second edition. John Wiley & Sons. New York, United States of America. Pp. 19-29, 636.
- International Seed Testing Association (ISTA) 2005.** International Rules for Seed Testing. Edition 2005. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Kamst G, F; Bonazzi, C; Vasseur, J and Bimbenet J, J. 2002.** Effect of deformation rate and moisture content on the mechanical properties of rice grains. *American Society of Agricultural Engineers (USA)*, **45**: 145-151.
- Llanos C, M. 1984.** El maíz, su cultivo y aprovechamiento. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 63-69.
- Mancera R, A. 2005.** Resistencia de la semilla del híbrido de maíz (*Zea mays* L.) HS-2 a impacto y compresión axial. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.

- Martin H, J; Leonard H, W and Stamp L, D. 1976.** Principles of Field Crop Production. Third Edition. Collier McMillan International Editions. NY, USA. Pp. 338.
- McDonald B, M. 2000.** Seed priming, *IN: Seed technology and its biological basis, edited by Black, M & Bewley, D J.* Sheffield Academic Press Ltd., Sheffield, UK. Pp. 294-295.
- Mohsenin N, N. 1986.** Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers. Second Edition. United States of America, 891 p.
- Popov P, E. 1976.** Introducción a la Mecánica de Sólidos. Editorial Limusa, México. Pp. 90-93, 99, 346-348, 376, 383-384, 393- 401-407.
- Rangel F, M A. 2004.** Pérdida de tolerancia a la desecación y comportamiento de cuerpos lipídicos durante la germinación en semillas de maíz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Reyes C, P. 1990.** El maíz y su cultivo. AGT Editor, S. A. México, D. F. Pp. 103-141.
- Tuite, J; Koh-Knox, C; Stroshine, R; Cantone A, F and Bauman F, L. 1985.** Effect of physical damage to corn kernels on the development of *Penicillium* species and *Aspergillus glaucus* in storage. *Phytopathology* (USA), **75**: 1137-1140.
- Vázquez M, F. 2002.** Daño físico por efecto del desgrane en variedades de maíz con diferentes texturas de endospermo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.

CAPÍTULO SEGUNDO

2. CONTENIDO DE HUMEDAD Y TIPO DE ENDOSPERMO EN SEMILLA DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN AXIAL

RESUMEN

La mecanización de la producción de semilla usualmente ocasiona de manera inherente, daño mecánico, lo que incurre en un decremento de la calidad física, fisiológica y sanitaria. El daño mecánico está relacionado con la humedad y textura de la semilla y conocer la resistencia al daño mecánico en función de estas variables, permitirá minimizar el mismo durante las etapas de limpieza, secado y almacenaje. En el presente estudio se evaluó el desplazamiento, la fuerza y la energía a ruptura por compresión en cinco variedades con diferente textura de endospermo (genotipo): harinoso, semi-dentado, dentado, semi-cristalino y cristalino; y a siete niveles de humedad: 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 32 %. La relación entre contenido de humedad y desplazamiento (deformación) a ruptura fue lineal y directamente proporcional para los cinco genotipos estudiados. La relación entre contenido de humedad y fuerza a ruptura fue lineal y, directamente proporcional para el genotipo harinoso (Cacahuacintle) e inversamente proporcional para los genotipos semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero); mientras que para los genotipos semi-dentado (HS-2) y dentado (CPV-20), la relación fue cuadrática. La relación entre contenido de humedad y energía a ruptura fue lineal y directamente proporcional en el genotipo harinoso (Cacahuacintle) y semi-cristalino (Toluqueño), y cuadrática en los genotipos semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20) y cristalino (Palomero). Se determinó el porcentaje de cada uno de los componentes en las cinco variedades, donde el contenido de endospermo suave fue mayor en el genotipo harinoso y menor en el genotipo cristalino. Ni el peso volumétrico ni la densidad aparente tuvieron una relación lineal con el contenido de endospermo suave o duro.

Palabras clave: cristalino, endospermo, harinoso, humedad, regresión.

SUMMARY

Mechanization on seed production usually inflicts mechanical damage which decreases the physical, physiological and sanitary quality. Mechanical damage is related to the seed moisture content and endosperm kind, and by knowing that relationship, the mechanical damage may be lowered during cleaning drying and storage stages. In this study the compression rupture strain, strength and energy were evaluated on five cultivars differing on the endosperm kind (genotype): floury, semi-dented, dented, demi-flint and flint, and seven seed moisture contents: 8, 12, 16, 20, 24, 28 and 32 %. A linear positive relation between moisture content and strain to rupture was found on the five cultivars. A linear positive relation between moisture content and strength to rupture was found on the Cacahuacintle (floury) and a negative on the Toluqueño (semi-flint) and Palomero (flint) cultivars; meanwhile, a quadratic relation was found on the HS-2 (semi-dented) and CPV-20 (dented) cultivars. The relationship between moisture content and rupture energy was linear and positive on Cacahuacintle (floury) and Toluqueño (semi-flint), and a quadratic on the HS-2 (semi-dented), CPV-20 (dented) and Palomero (flint) cultivars. Floury endosperm content was higher on the floury (Cacahuacintle) and lower on the flint (Palomero) genotypes. The volumetric weight and the apparent density were not linearly related to floury nor flint endosperm content.

Key words: endosperm, flint, floury, moisture, regression.

2.1. INTRODUCCIÓN

Contenido de humedad sobre el daño mecánico

Diversos autores mencionan que el contenido de humedad influye sobre la susceptibilidad al daño mecánico; la mayoría de las semillas son más resistentes a mayor contenido de humedad (Mohsenin, 1986). Por otro lado los enlaces del receptáculo (mazorca o vaina, por ejemplo) con la semilla también son más fuertes, por lo cual se tiene la necesidad de que la semilla pierda humedad y con ello la fuerza requerida para desprender las semillas sea menor (Bosoi *et al.*, 1991). A la vez se debe tener en cuenta que el contenido de humedad tiene un gran efecto sobre la calidad fisiológica, debido a que la actividad metabólica y el deterioro son una función del contenido de humedad (Bewley y Black, 1994).

Babić *et al.* (2013) encontraron una mayor deformación a mayor humedad, aunque en uno de los híbridos que reportan, no se tiene una tendencia creciente; mientras que la fuerza a ruptura, reportada por estos autores, se incrementó para algunos híbridos, mientras que para otros decreció o tuvieron comportamiento variable.

Textura del endospermo sobre el daño mecánico

Por otra parte, la textura de la semilla influye también sobre la resistencia al daño mecánico. Vázquez (2002) encontró un mayor porcentaje de semillas quebradas en semillas harinosas comparadas con cristalinas y dentadas luego de ser desgranadas mecánicamente; no obstante, se atribuyó en parte al contenido de humedad, ya que las semillas harinosas tienen menor humedad que las cristalinas y las dentadas en condiciones de equilibrio. El mismo autor encontró una menor germinación en semillas harinosas. Gaytán *et al.* (2006) encontraron diferencias en la dureza de la semilla en 21 variedades, la cual pudo ser explicada mediante una función cuyos componentes fueron el índice de flotación y la densidad, donde esta última pudo explicarse en función del tamaño del grano de almidón, cristalinidad y porcentaje de endospermo.

2.1.1. Objetivo

Conocer la relación existente entre el contenido de humedad y el tipo de endospermo con el desplazamiento y la fuerza necesaria para la ruptura.

2.1.2. Hipótesis

- i) La relación entre contenido de humedad de la semilla y la fuerza, desplazamiento y energía a compresión de ruptura es lineal y directamente proporcional para el rango del contenido de humedad al que se maneja la semilla (5 a 30 %).
- ii) Existe una alta correlación positiva de la fuerza a compresión de ruptura con el peso volumétrico y el porcentaje de endospermo duro de la semilla.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Factores de estudio

Tipo de endospermo

Se utilizaron semillas de maíz de cinco variedades con genotipo o tipo de endospermo: **a)** harinoso (Cacahuacintle); **b)** semi-dentado (híbrido HS-2); **c)** dentado (CPV-20); **d)** semi-cristalino (Palomero Toluqueño, en adelante “Toluqueño”) y **e)** cristalino (Palomero comercial, en adelante “Palomero”).

El híbrido HS-2 se produjo en el 2011 en el Rancho Santa Rosa, Texcoco, México, por el Centro de Capacitación e Innovación Tecnológica (CCIT) del Colegio de Postgraduados. La variedad Cacahuacintle, CPV-20 y Toluqueño se produjeron en el 2011 por el Dr. Aquiles Carballo en el Campo Experimental del Campus Montecillo, Texcoco, México. La semilla de maíz Palomero se adquirió en el 2011 en una casa comercial.

Contenido de humedad

Se evaluaron siete niveles de humedad: 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 32 % (± 0.10) en base húmeda (b.h.); para lograr estos porcentajes, las semillas se humedecieron sumergiéndose en agua destilada hasta obtener el peso correspondiente a una humedad de 2 a 2.5 % por encima de la deseada, y posteriormente fueron secadas a temperatura ambiente hasta obtener el peso correspondiente al contenido de humedad deseado (véanse los apartados 2.2.2 y 2.2.3, así como los resultados preliminares mostrados en el apartado 2.3.1); las semillas se mantuvieron (no más de 4 h) en frascos herméticos hasta el momento de la compresión.

Peso volumétrico

El peso volumétrico PVOL se obtuvo utilizando el método descrito por Salinas y Vázquez (2006) para determinar densidad, pero modificado para lograr un procedimiento más sencillo: se utilizaron tres repeticiones de aproximadamente 45 mL de semilla de maíz a la humedad de estudio (8 a 32 % en incrementos de cuatro puntos porcentuales), en los genotipos harinoso

(Cacahuacintle), dentado (CPV-20) y cristalino (Palomero) así como a humedad de equilibrio (8 a 11 %, b. h.) en los cinco genotipos: semi-dentado (HS-2) y semi-cristalino (Toluqueño), además de los anteriores. Cada muestra se colocó en una probeta graduada a 50 mL; posteriormente, de una probeta con 50 mL de etanol 96 %, se vertió sobre la probeta con semilla hasta llegar a 50 mL, la cantidad vertida se determinó mediante el faltante en la probeta que inicialmente contenía el etanol. Para disminuir la vaporización del etanol, se utilizó un pedazo de papel aluminio. En los casos necesarios, se utilizó un agitador de vidrio para asegurar la inmersión total de las semillas.

Densidad aparente

Se utilizaron tres repeticiones de muestras de semilla a su humedad de equilibrio, cada muestra se vertió en recipientes de latón cilíndrico con capacidad de 115 mL y se rasó con una regla de aluminio, posteriormente se obtuvo su peso, el cual se dividió entre el volumen del contenedor para obtener la densidad aparente DAP.

Textura de la semilla

La textura de la semilla, cuantificada mediante el peso de la biomasa seca de los componentes de la semilla, se determinó utilizando el método de disección descrito por Salinas y Vázquez (2006): se pesaron tres repeticiones de 25 semillas, y se remojaron en agua a 70-80 °C por 15 min; posteriormente se separaron los componentes de la semilla (pedicelo, pericarpio PC, embrión EM, endospermo duro ED y suave ES) con la ayuda de un bisturí, a los que se les determinó su peso de biomasa seca mediante la metodología descrita por la ASABE (2006), la cual consiste en secar las muestras en una estufa a 103 °C por 24 h.

2.2.2. Determinación del peso final de la semilla a la humedad deseada

Para lograr la humedad deseada en las muestras de estudio, se agregó o removió humedad de las mismas. A partir de la fórmula recomendada por la ISTA (2005) para la determinación de humedad, se estimó el peso a la humedad deseada dados un peso y humedad iniciales. El

procedimiento algebraico empleado en obtener la fórmula que permite determinar el peso húmedo final (Phf) o el peso húmedo inicial (Phi), se muestra a continuación:

Partiendo de la ecuación 2.1, usando la proporción en vez de porcentaje obtenemos:

Para la semilla a la humedad final:

$$H_f = (Phf - P_s) / Phf; \quad (2.2)$$

Para la semilla a la humedad inicial:

$$H_i = (Phi - P_s) / Phi; \quad (2.3)$$

Para la semilla seca:

$$H_s = (P_s - P_s) / P_s = 0; \quad (2.4)$$

Donde:

H_f: Contenido de humedad final unitario (proporción)

Ph_f: Peso húmedo final

P_s: Peso seco

H_i: Contenido de humedad inicial unitario

Phi: Peso húmedo inicial

H_s: Contenido de humedad en seco unitario, teóricamente es igual a cero

En las ecuaciones (2.2) y (2.3) el elemento común es P_s, el cual despejamos de ambas ecuaciones; así, de (2.2):

$$(H_f)(Phf) = (Phf - P_s)$$

$$(H_f)(Phf) = Phf - P_s$$

$$(H_f)(P_{hf}) - P_s = -P_s$$

Multiplicando por -1 ambos lados de la ecuación y reacomodando:

$$P_s = P_{hf} - (H_f)(P_{hf})$$

$$P_s = P_{hf}(1 - H_f) \quad (2.5)$$

Similarmente, de la ecuación (2.3):

$$P_s = \Phi(1 - H_i) \quad (2.6)$$

De (2.5) y (2.6):

$$P_{hf}(1 - H_f) = \Phi(1 - H_i) \quad (2.7)$$

Despejando Φ y P_{hf} :

$$\Phi = P_{hf}(1 - H_f)/(1 - H_i) \quad (2.8)$$

$$P_{hf} = \Phi(1 - H_i)/(1 - H_f) \quad (2.9)$$

Note que se deben usar humedades unitarias y no porcentajes, si se desea utilizar la humedad como porcentaje en la fórmula se usarán las siguientes ecuaciones:

$$\Phi = P_{hf}(100 - H_f)/(100 - H_i) \quad (2.10)$$

$$P_{hf} = \Phi(100 - H_i)/(100 - H_f) \quad (2.11)$$

2.2.3. Evaluación previa de ganancia de humedad a través del tiempo

Para determinar el tiempo de ganancia de humedad se utilizaron tres muestras de 15 semillas, tomadas de lotes cuya humedad se determinó de manera previa mediante el método de la estufa recomendado por la ISTA (2005), las cuales se sumergieron en agua destilada y se determinó su peso cada 10 minutos durante las primeras dos horas, y posteriormente cada hora

durante 49 horas. Al final se determinó el peso seco correspondiente y la humedad en cada lectura de peso.

2.2.4. Compresión de las semillas y determinación de la fuerza, desplazamiento y energía en el punto de ruptura

Cada semilla fue sometida a compresión en posición de descanso, con el embrión hacia arriba entre superficies planas y pulidas (ASAE, 2005), a una velocidad de desplazamiento de la cruceta de 7 mm/min; se utilizó una máquina de ensayo universal INSTRON modelo 3385H (INSTRON, Corp., Norwood, MA, USA) con célula de carga de 50 kN. El desplazamiento de la cruceta se fijó de 1.0 a 2.5 mm en función de la humedad y genotipo, para lograr la fractura de la semilla; la tasa de muestreo de puntos se estableció en 10 ms.

Los algoritmos utilizados para la detección de ruptura se basaron en los cálculos disponibles en el software BlueHill 2.0 ® (INSTRON ®, 2006), para cada uno de los casos siguientes:

- a) **Corrección a cero.** El plato superior se desplazó hacia la semilla a una distancia menor a 0.5 mm; antes o después del ensayo, se programó el cálculo de la *corrección de pretensión*. La corrección de pretensión se ajustó a una carga de 5 N.
- b) **Ruptura.** Se asignó al primer *pico local máximo*, con una sensibilidad de 0.5 a 5 %, según la humedad y variedad; en algunos casos se asignó al valor inicial de un segmento con pendiente cero (*fluencia cero*) antes del pico local máximo. El software proporcionó el dato correspondiente al desplazamiento (D) y a la fuerza (F); la energía (E) se calculó a partir del área aproximada bajo la curva de la gráfica de Desplazamiento-Fuerza ($E = D \cdot F / 2$).

2.2.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Para conocer la relación entre el contenido de humedad de la semilla y tipo de endospermo con la resistencia a la compresión (desplazamiento, fuerza y energía), se utilizó un diseño experimental completamente al azar con dos factores de estudio: Genotipo (harinoso, semi-dentado, dentado, semi-cristalino y cristalino) y Contenido de humedad (8, 12, 16, 20, 24, 28 y

32 %). Se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias; para cada tipo de endospermo, se realizó un análisis de regresión del contenido de humedad como variable explicativa y de la resistencia a compresión (desplazamiento, fuerza y energía) como variable dependiente. Se efectuaron análisis de correlación entre peso volumétrico y densidad aparente con los porcentajes de endospermo duro y suave.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Evaluación previa de ganancia de humedad a través del tiempo

La ganancia de humedad a través del tiempo se muestra en la Figura 2.1, la curva de hidratación es semejante a la reportada por Bewley y Black (1994), aunque debido a la falta de oxígeno y a la ausencia en la elongación radicular, sólo se observaron dos de las tres fases mencionadas por dichos autores. Para humedecer las semillas a 30 % fue necesario sumergirlas en el agua destilada por un periodo de entre 6 y 10 h, según el genotipo; mientras que para lograr una humedad de 34 %, se requirieron de 17 a 25 h (Cuadro 2.1).

La resistencia en ensayos previos de compresión difirió en semillas con el mismo contenido de humedad donde esta se alcanzaba desde una humedad superior y una humedad inferior. Esta diferencia se atribuye a una humedad diferente en el pericarpio y células adyacentes. Debido a lo anterior, las semillas fueron humectadas por encima de 2 puntos porcentuales de la humedad deseada y posteriormente secadas hasta la humedad del ensayo (± 0.05 %). Cabe destacar que la variación entre los genotipos en el tiempo necesario para alcanzar un nivel de humedad fue relativamente importante en algunos casos; en el Cuadro 2.1 se muestran los tiempos de inmersión para lograr la humedad de las semillas previa a la humedad deseada. Una vez obtenida la humedad previa, las muestras se secaron lentamente a la humedad planeada, lo cual requirió de 30 min a 2 h.

Debido a que se observó que las semillas con humedad superior a 24 % presentaron protrusión de la radícula, fue necesario apresurarse a realizar los ensayos en semillas con humedades iguales o superiores a este porcentaje; en semillas a 20 y 18 % también fue necesario realizar los ensayos rápidamente para evitar deterioro, aunque en esos casos no se observó protrusión; otro aspecto importante fue el efecto de la ausencia de aire, ya que las semillas con un alto contenido de humedad (superior a 24 %) no iniciaron la protrusión hasta por cinco o más días cuando se encontraban inmersas en agua, sin embargo se desconoce si debido al metabolismo por procesos enzimáticos sobre el almidón, existan cambios en las propiedades mecánicas de las semillas.

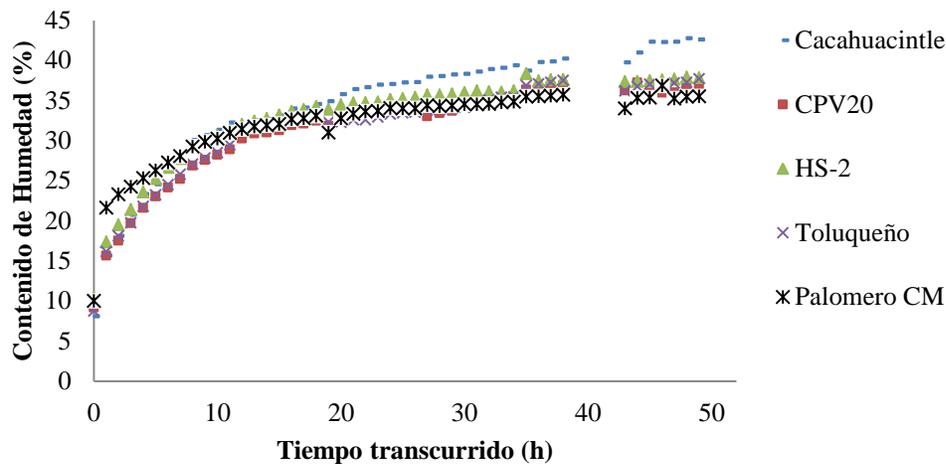


Figura 2.1. Ganancia de humedad (b. h.) de semillas de maíz harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero) sumergidas en agua destilada.

Cuadro 2.1. Tiempos aproximados de inmersión y humedades previas en semillas de maíz harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero).

Genotipo	Tiempo (min)						
	Harinoso	5-10	5-10	40-50	180	300	420
Dentado	---	10-15	60	180	360	540	1,500
Semi-dentado	---	5-10	20-40	120	360	480	900
Semi-cristalino	5-10	5-10	30-60	180	360	600	1,260
Cristalino	---	5-6	10-20	30	180	360	1,020
Humedad previa:	Equilibrio	13.5 %	18 %	22 %	26 %	30 %	34 %
Humedad final:	8 %	12 %	16 %	20 %	24 %	28 %	32 %

2.3.2. Peso volumétrico

De los factores de variación estudiados, solamente el genotipo tuvo un efecto significativo sobre el peso volumétrico (Cuadro 2.2). El genotipo cristalino (Palomero) obtuvo el mayor peso volumétrico junto con el dentado (CPV-20), mientras que el genotipo harinoso (Cacahuacintle) obtuvo el menor. La falta de diferencia significativa en peso volumétrico a diferentes humedades se puede explicar por el incremento en volumen luego de la absorción de agua de manera lineal, donde 1 mL de agua ocasionó un incremento en volumen de 1 mL; este resultado difiere del reportado por Isik e Izli (2007) en semillas de maíz dentado, donde sí hubo un incremento a mayor humedad; y además, contrasta con el incremento lineal en peso volumétrico respecto al contenido de humedad reportado en comino (*Cuminum cyminum* L.) por Singh y Goswami (1996) y Mollazade *et al.* (2009); pero al parecer, la relación entre peso volumétrico y humedad depende de otros factores, pues Baümler *et al.* (2006) reportaron una relación parabólica (cuadrática) curvada hacia arriba en semillas de cártamo.

En un segundo análisis, donde se determinó el peso volumétrico de los cinco genotipos a humedad de equilibrio, el análisis de varianza mostró que el genotipo tuvo un efecto significativo sobre el peso volumétrico (Cuadro 2.3). Toluqueño, Palomero y HS-2 tuvieron el mayor peso volumétrico, mientras que Cacahuacintle tuvo el menor. Cabe señalar que el peso volumétrico del genotipo harinoso fue el más cercano al reportado por Isik e Izli (2007) para una variedad dentada (1.1100 g/mL) a una humedad equivalente a 19 %, b. h. (24 % b. s.). El peso volumétrico no tuvo un orden que coincidiera completamente con la clasificación de la textura del endospermo en los genotipos, aunque en el cristalino se obtuvo uno de los valores más altos y en el harinoso se obtuvo el menor valor.

Cuadro 2.2. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el peso volumétrico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Peso volumétrico (g/mL)	
Humedad (H)	8	0.0039	NS
Genotipo (G)	2	0.19365	**
H*G	2	0.0033	NS
Error	54	0.0075	
C.V. (%)		7.13	
R ²		0.54	
<i>Efectos principales de factores</i>			
<i>Genotipo</i>			
Cristalino (Palomero)		1.28	a
Dentado (CPV-20)		1.23	a
Harinoso (Cacahuacintle)		1.12	b
DMS 0.05		0.0566	
<i>Humedad (%)</i>			
24		1.23	a
28		1.23	a
8		1.22	a
10		1.22	a
20		1.22	a
14		1.21	a
32		1.21	a
12		1.21	a
16		1.16	a
DMS 0.05		0.1314	

** significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey).

Cuadro 2.3. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo sobre el peso volumétrico a humedad de equilibrio.

Fuente de variación	Grados de libertad	Peso volumétrico (g/mL)	
Genotipo	4	0.0290	**
Error	10	0.0007	
C.V. (%)		2.04	
R ²		0.94	
<i>Efectos principales de Genotipo</i>			
Semi-cristalino (Toluqueño)		1.38	a
Cristalino (Palomero)		1.35	ab
Semi-dentado (HS-2)		1.31	ab
Dentado (CPV-20)		1.29	b
Harinoso (Cacahuacintle)		1.12	c
DMS 0.05		0.0708	

** significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey).

2.3.3. Densidad aparente

El genotipo tuvo un efecto significativo sobre la densidad aparente DAP (Cuadro 2.4). El genotipo cristalino (Palomero) obtuvo la mayor DAP, seguido del semi-dentado (HS-2), semi-cristalino (Toluqueño), dentado (CPV-20) y del harinoso (Cacahuacintle) que obtuvo el menor valor en DAP. La densidad aparente en semillas de los genotipos semi-dentado y semi-cristalino estuvieron por encima y por debajo, respectivamente, de la densidad aparente en semillas de maíz dentado a 10 % de humedad reportada por Isik e Izli (2007), la cual fue de 0.7005 g/mL, con una tendencia inversa entre la humedad y la DAP, siendo de 0.6011 g/mL a una humedad de 19 % b. h. (24 % b. s.). La DAP tuvo un orden que coincidió con la clasificación de tipo de endospermo, siendo mayor en el cristalino y menor en el harinoso, y en los tres genotipos intermedios semi-dentado, dentado y semi-cristalino la DAP tomó un valor intermedio entre el cristalino y el harinoso, sin diferencia significativa.

Cuadro 2.4. Cuadrados medios y efectos principales del Genotipo sobre la densidad aparente a humedad de equilibrio.

Fuente de variación	Grados de libertad	Humedad de Equilibrio (%)	Densidad aparente (g/mL)
Genotipo	4	--	0.02058 **
Error	10	--	0.00047
C.V. (%)		--	3.15
R ²		--	0.95
<i>Efectos principales de Genotipo</i>			
Cristalino		9.00	0.80 a
Semi-dentado		9.20	0.71 b
Semi-cristalino		7.33	0.69 b
Dentado		8.31	0.67 b
Harinoso		7.93	0.57 c
DMS 0.05			0.0582

** significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero).

2.3.4. Componentes de la semilla en cinco variedades

El efecto de los genotipos fue significativamente diferente ($P \leq 0.01$) sobre los porcentajes de peso seco de cada uno de los componentes: pedicelo, pericarpio, embrión, endospermo suave, duro y total (Cuadro 3.5). El genotipo harinoso (Cacahuacintle) tuvo el mayor porcentaje de endospermo suave y el menor porcentaje de endospermo duro y pericarpio; en el cristalino (Palomero) el comportamiento fue inverso.

La clasificación de tipo de endospermo coincidió, numéricamente, con los porcentajes de endospermo suave y endospermo duro, siendo (de menos a más endospermo duro): harinoso, semi-dentado, dentado, semi-cristalino y cristalino; el genotipo dentado no tuvo diferencia significativa al semi-dentado, ni con el semi-cristalino en cuanto a endospermo duro; y éste mismo, no tuvo diferencia significativa respecto del semi-dentado en cuanto a porcentaje de endospermo suave (Cuadro 3.5). Leyva *et al.* (2002) reportan valores superiores (86.54 %) de endospermo suave al obtenido en la variedad Cacahuacintle (76.21 %) en cuatro líneas de

maíz; y asimismo, valores superiores de endospermo cristalino (69.11 %) al obtenido en la variedad Palomero (65.21 %) en cuatro líneas de maíz; en su estudio, incluyeron 22 líneas de maíz. Otros trabajos, han empleado materiales genéticos cuyas proporciones de endospermo suave y endospermo duro caen dentro del rango de las variedades estudiadas en este trabajo, por ejemplo, el realizado por Salinas y Aguilar (2010), quienes estudiaron 27 muestras provenientes de Puebla y Tlaxcala para determinar el rendimiento y calidad de la tortilla en función de la dureza del grano de maíz.

Cuadro 2.5. Cuadrados medios y efectos principales del Genotipo sobre las variables de componentes de semilla.

Fuente de variación	Grados de libertad	Pedicelo (%)	Pericarpio (%)	Embrión (%)	Endospermo suave (%)	Endospermo duro (%)	Endospermo total (%)
Genotipo	4	0.2801 **	11.28 **	8.96 **	1690.16 **	1609.07 **	5.41 **
Error	10	0.0388	0.06	0.30	4.62	4.15	0.17
C.V. (%)		8.92	4.06	4.91	6.05	4.52	0.51
R ²		0.74	0.99	0.92	0.99	0.99	0.93
<i>Efectos principales de Genotipo</i>							
Harinoso		2.58 a	4.45 d	11.50 b	76.21 a	5.25 d	81.46 ab
Semi-dentado		2.09 ab	4.88 cd	10.67 b	33.43 b	48.93 c	82.36 a
Dentado		2.42 a	5.35 c	11.97 ab	29.30 b	50.96 bc	80.26 c
Semi-cristalino		2.17 ab	6.02 b	13.02 a	23.47 c	55.32 b	78.79 d
Cristalino		1.79 b	9.31 a	8.42 c	15.27 d	65.21 a	80.48 bc
DMS 0.05		0.53	0.66	1.47	5.78	5.48	1.11

** significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero).

El peso volumétrico y la densidad aparente mostraron una alta correlación con el porcentaje de endospermo suave y endospermo duro; asimismo, el porcentaje de endospermo duro tuvo una alta correlación con el suave (Cuadro 2.6). Por otro lado, en el análisis de regresión lineal simple para predecir el porcentaje de endospermo suave en función de PVOL, se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.92$, sin embargo, al eliminar al genotipo harinoso (Cacahuacintle), el coeficiente disminuyó abruptamente a $R^2 = 0.39$ (Figura 2.2), por lo que se consideró que el modelo no es lo suficientemente *robusto* en la predicción del porcentaje de endospermo suave en función del peso volumétrico; una regresión lineal para predecir el porcentaje de endospermo duro y suave en función de la densidad aparente, tampoco resultó robusta (resultados no mostrados).

Cuadro 2.6. Coeficientes de correlación de Pearson y su significancia, entre peso volumétrico (PVOL), densidad aparente (DAP) y componentes de semilla: Endospermo duro (ED), suave (ES), embrión (EM), pericarpio (PC) y endospermo total (ET).

	PVOL	DAP	ED	ES	EM	PC	ET
PVOL	---						
DAP	0.58**	---					
ED	0.79**	0.90**	---				
ES	-0.80**	-0.88**	-1.00**	---			
EM	0.13**	-0.67**	-0.29**	0.25**	---		
PC	0.31**	0.86**	0.66**	-0.67**	-0.70**	---	
ET	-0.47**	-0.14**	-0.38**	0.44**	-0.44**	-0.34**	---

** significativo con $\alpha = 0.01$.

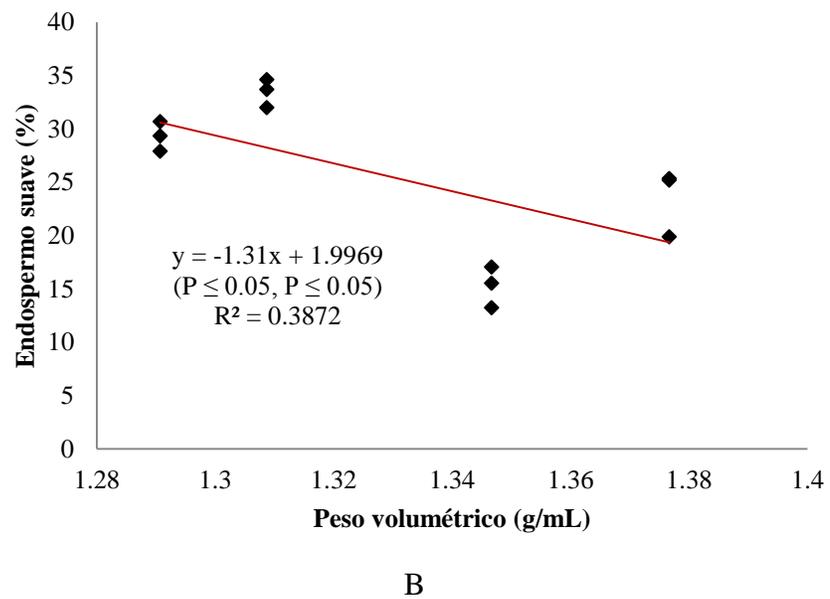
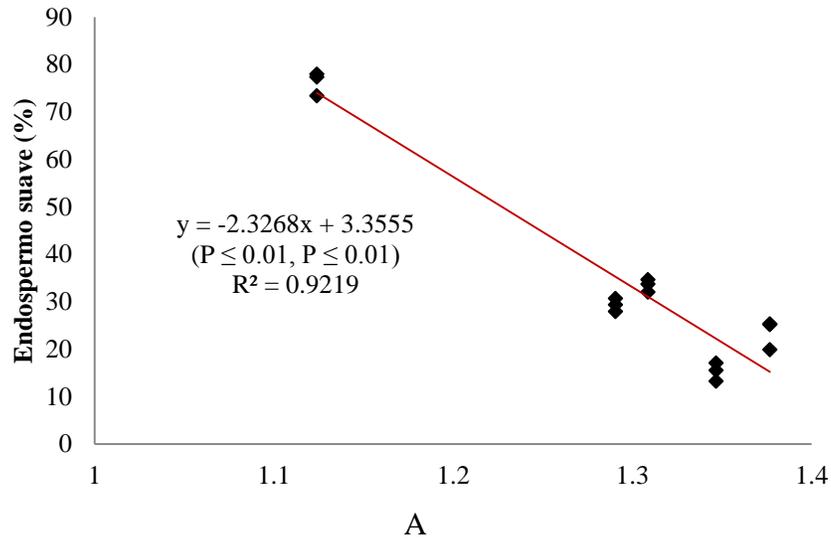
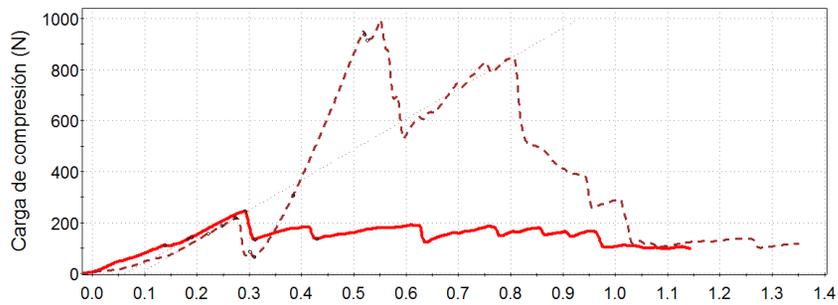


Figura 2.2. Relación lineal entre Peso volumétrico (PVOL) y Porcentaje de endospermo suave (ES): **A.** $ES = -2.3268 (PVOL) + 33.3555$, $R^2 = 0.92$; **B.** Sin considerar al genotipo harinoso, $ES = -1.31 (PVOL) + 1.9969$, $R^2 = 0.39$.

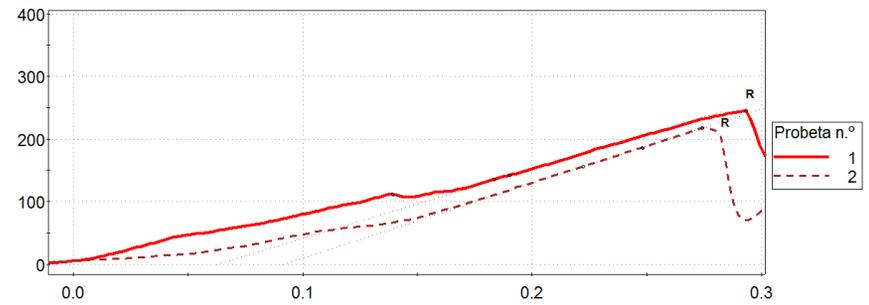
2.3.5. Fuerza y desplazamiento en la compresión de semillas

En los resultados obtenidos de fuerza y desplazamiento, no se observó, de manera generalizada, el punto correspondiente a biocedencia; y, en la mayoría de los casos, el límite lineal coincidió con ruptura, razón por la que en los resultados se incluyó únicamente el estudio de la resistencia a ruptura. En la Figura 2.3 se muestran los gráficos Desplazamiento-Fuerza de cuatro semillas de maíz cristalino (Palomero) con humedad de 8 %, los trazados de las curvas se mantienen aproximadamente similares, o con una variación menor, hasta el punto de ruptura, denotado por un cambio de pendiente que manifiesta, de manera parcial, “relajación” de la probeta; posteriormente, el trazado de la curva presenta una variación mayor, aunque en este y diversos estudios, como el de Murthy y Bhattacharya (1998), el comportamiento de la curva más allá de la ruptura no reviste de mucha importancia, especialmente por carecer de algún significado físico importante (al menos, en este estudio), aunque en otros casos sea de interés conocer, por ejemplo, la fuerza máxima y la deformación sufrida en tal punto.

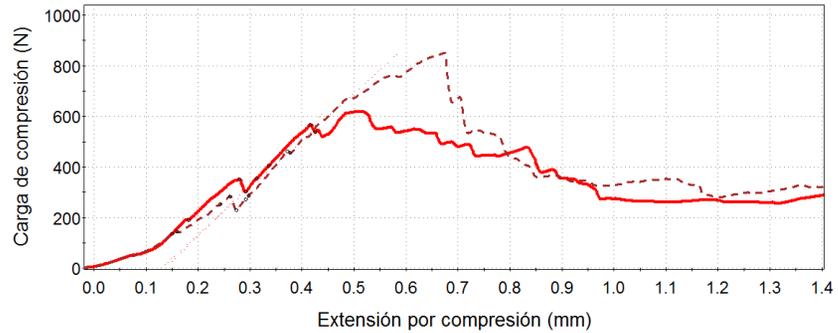
El genotipo y el contenido de humedad tuvieron efecto significativo sobre el desplazamiento ($P \leq 0.01$), la fuerza ($P \leq 0.01$) y la energía ($P \leq 0.01$) en el punto de ruptura (Cuadro 2.7). Hubo interacción significativa entre genotipo y humedad en cuanto a las variables de respuesta de desplazamiento, fuerza y energía, pero en los efectos simples, Cacahuacintle mostró el mayor desplazamiento a ruptura, y obtuvo el valor más alto de energía, mientras que Palomero mostró el menor desplazamiento y obtuvo el valor más bajo de energía (Cuadro 2.7). A una humedad de 32 % se obtuvo el mayor desplazamiento y uno de los valores más altos de energía, pero el menor valor en fuerza; en contraparte, la humedad de 8 % presentó el menor desplazamiento y uno de los valores más bajos de energía, pero uno de los valores más altos en fuerza; cabe destacar que el desplazamiento fue significativamente diferente entre todas las humedades (Cuadro 2.7). Los cuadrados medios y la comparación de medias para efectos combinados de genotipo y humedad sobre los valores de desplazamiento, fuerza y energía se presentan en el Cuadro 2.8.



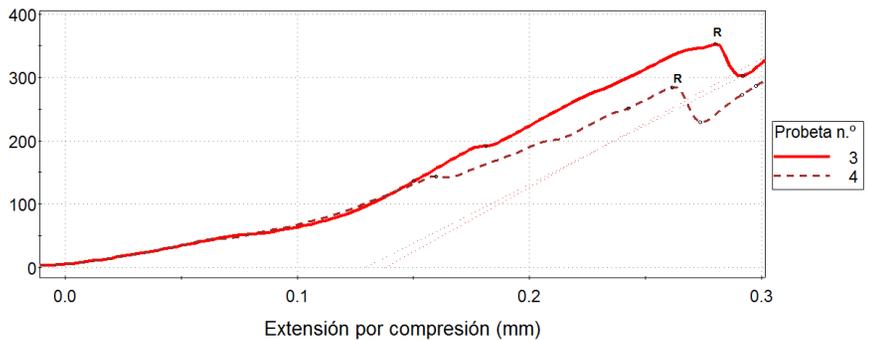
A



B



C



D

Figura 2.3. Curvas del Desplazamiento-Fuerza de cuatro semillas de maíz palomero a 8 % de humedad: **A)** y **C)** Comportamiento global; **B)** y **D)** Comportamiento de la curva donde se presentó la ruptura R, la cual coincide con el cambio de pendiente (relajación). Cada “probeta” corresponde a una semilla ensayada.

Cuadro 2.7. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía en el punto de ruptura de semillas sometidas a compresión.

Fuente de variación	G.L.	Desplazamiento (mm)		Fuerza (N)		Energía (mJ)	
Genotipo	4	0.5190	**	38,150.78	**	34,570.86	**
Humedad	6	2.1918	**	24,354.42	**	34,700.71	**
G*H	24	0.0469	**	14,081.37	**	6,071.51	**
Error	3911	0.0058		1,022.26		508.36	
C.V. (%)		10.82		10.62		21.45	
R ²		0.97		0.86		0.90	
<i>Efectos principales de factores</i>							
<i>Genotipo</i>							
Harinoso		0.8978	a	303.17	b	148.17	a
Semi-dentado		0.6774	c	288.25	b	93.44	b
Dentado		0.7959	b	352.99	a	140.12	a
Semi-cristalino		0.6360	c	250.41	c	76.15	c
Cristalino		0.5461	d	311.64	b	73.12	c
DMS 0.05		0.0572		23.9150		16.8640	
<i>Humedad (%)</i>							
32		1.1581	a	238.16	b	148.19	a
28		1.0334	b	267.47	b	143.69	a
24		0.8776	c	307.28	a	138.73	a
20		0.6712	d	324.13	a	111.42	b
16		0.5091	e	332.22	a	84.49	c
12		0.3762	f	316.57	a	58.82	d
8		0.2742	g	323.15	a	44.30	d
DMS 0.05		0.0732		30.6480		21.6120	

** Significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con diferente letra dentro de cada columna difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20), semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero).

Cuadro 2.8. Cuadrados medios y efectos combinados de Genotipo y Humedad sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía en el punto de ruptura de semillas sometidas a compresión.

Fuente de variación	G.L.	Desplazamiento (mm)		Fuerza (N)		Energía (mJ)	
GxH	34	13.7217	**	532,224.05	**	477,817.31	**
Error	3911	0.0580		17,413.27		6,703.1	
C.V. (%)		34.17		43.85		74.39	
R ²		0.67		0.21		0.38	

Efectos combinados de factores

Genotipo	Humedad (%)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Energía (mJ)
Harinoso (Cacahuacintle)	32	1.6421 a	368.79 bcdef	324.11 a
	28	1.3403 b	339.56 cdefgh	261.58 b
	24	1.0410 def	330.06 defgh	190.36 cd
	20	0.7730 hij	307.97 efghij	127.78 ef
	16	0.6162 klmn	284.00 hijkl	93.85 fghijk
	12	0.4128 opqr	246.80 jklmn	54.70 klmn
	08	0.2442 st	229.26 jlmno	30.64 n
	Semi-dentado (HS-2)	32	1.1298 cd	215.45 mnop
28		1.0079 def	245.20 jklmno	129.09 ef
24		0.9657 efg	303.46 fghij	150.88 de
20		0.6781 jkl	317.56 efgh	111.94 efghi
16		0.5063 nop	337.92 cdefgh	94.38 fghijk
12		0.2630 st	304.98 fghij	41.07 mn
08		0.1962 t	295.85 ghijk	30.78 n
Dentado (CPV-20)		32	1.2125 c	282.79 hijklm
	28	1.0874 de	330.50 defgh	184.53 cd
	24	1.0082 def	393.91 abcd	206.91 c
	20	0.8161 hi	429.39 ab	186.71 cd
	16	0.6001 lmn	374.82 abcde	119.12 efgh
	12	0.4578 opq	343.78 cdefgh	81.96 hijklm
	08	0.2971 rst	314.92 efghi	51.19 lmn
	Semi-cristalino (Toluqueño)	32	0.8841 gh	177.67 op
28		0.8652 gh	225.90 lmno	100.08 Fghij
24		0.7388 ijk	215.59 mnop	84.13 ghijkl
20		0.6121 lmn	249.36 ijklmn	84.44 ghijkl
16		0.5245 mno	285.89 hijkl	81.51 hijklm
12		0.4406 opq	287.74 hijkl	62.50 jklmn
08		0.3928 pqr	312.45 efghij	58.64 jklmn

** Significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con diferente letra dentro de cada columna difieren estadísticamente (Tukey).

(Continúa en la página siguiente)

Cuadro 2.8 (Continuación)

Fuente de variación	G.L.	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Energía (mJ)
<i>Efectos combinados de factores</i>				
<i>Genotipo</i>	<i>Humedad (%)</i>			
Cristalino (Palomero)	32	0.9449 fg	151.86 p	72.76 ijklm
	28	0.8504 ghi	194.31 mnop	84.02 ghijkl
	24	0.6424 klm	296.91 ghij	99.89 fghij
	20	0.5296 mno	329.88 defgh	90.32 fghijk
	16	0.3613 qrs	360.03 cdefg	66.58 jklmn
	12	0.2995 rst	400.96 abc	61.72 jklmn
	08	0.2422 st	437.56 a	53.44 klmn
DMS 0.05		0.1234	67.56	41.92

** Significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con diferente letra dentro de cada columna difieren estadísticamente (Tukey).

En cuanto a la relación entre humedad y desplazamiento a ruptura, todos los genotipos mostraron un incremento en el desplazamiento a ruptura a mayor humedad con una tendencia lineal (Figura 2.4), todos los valores para R^2 fueron superiores a 0.95. Babić *et al.* (2013) reportan también una relación lineal en tres de seis híbridos estudiados, con coeficientes de determinación de 0.93 a 0.98 (dos híbridos tipo dentado y uno semi-cristalino); sin embargo, los mismos autores señalan que en los otros tres híbridos (dentados) no se presentó una relación lineal.

Por otro lado, se observó que la fuerza a ruptura se incrementa a mayor humedad en el genotipo harinoso (Cacahuacintle), pero decrece en el cristalino y en el semi-cristalino (Palomero y Toluqueño); mientras que en los genotipos dentado (CPV-20) y semi-dentado (HS-2) no se tuvo una relación lineal, sino cuadrática (Figura 2.5). El comportamiento del genotipo dentado (CPV-20) difiere del reportado por Isik e Izli (2007) en semillas de maíz dentado, y más bien los genotipos semi-cristalino y cristalino se asemejan al comportamiento reportado por dichos autores, aunque cabe señalar que ellos determinaron la resistencia con un penetrómetro y no reportan el porcentaje de los componentes de la semilla (endospermo duro, suave, etc.). La relación inversa entre fuerza y contenido de humedad de los genotipos semi-cristalino y cristalino coincidió además con la encontrada en semillas de chícharo (*Pisum*

sativum L; Konak *et al.*, 2002), algodón (*Gossypium*; Özarlan, 2002), veza (*Vicia sativa* L; Yalçın y Özarlan, 2002) quienes estudiaron tres, cuatro y cinco niveles de humedad; considerando que los genotipos cristalino y semi-cristalino (Palomero y Toluqueño) se asemejan entre sí, y que los genotipos palomeros así como los denominados cerosos (Bewley y Black, 1978), poseen una alta proporción de proteína, se explica el comportamiento similar al de las semillas con alto contenido de proteína, como chícharo (*Pisum sativum* L) y veza (*Vicia sativa* L). En el estudio realizado por Babić *et al.* (2013), el comportamiento de fuerza aparenta tener tendencias más o menos cuadráticas en función de la humedad en cuatro de los seis híbridos, no obstante, los autores no reportan algún tipo de tendencia.

La energía se incrementó a mayor humedad en los genotipos harinoso (Cacahuacintle) y semi-cristalino (Toluqueño), registrándose una relación lineal; mientras que las curvas de regresión correspondientes a los genotipos semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20) y cristalino (Palomero) tuvieron un comportamiento cuadrático (Figura 2.6); estos resultados difieren al comportamiento en semillas de *Cannabis* reportado por Taheri *et al.* (2012), en las que se obtuvo una relación lineal inversa entre la energía y la humedad; por otro lado, en semillas de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) de dos variedades, la energía decreció a mayor humedad (Akinoso y Raji, 2011), pero los autores no reportaron si la relación entre humedad y energía fue lineal. Sin embargo, Barnwal *et al.* (2012), reportaron un comportamiento que aparenta ser cuadrático en la dirección de carga transversal, y lineal en la dirección de carga longitudinal para semillas de maíz de la variedad Jai Kisan (cultivada en Karnataka, India) sometidas a compresión con cuatro humedades (12.8, 19.5, 25.1 y 29.0 %, b. h.). Kingsly *et al.* (2006) se refieren a la energía como tenacidad, y en su estudio, la relación entre la humedad y esta magnitud fue lineal e inversa para semilla de granada (*Punica granatum* L.), al igual que la fuerza.

En este estudio se observó que en cada genotipo: harinoso, semi-dentado, dentado, semi-cristalino y cristalino, el desplazamiento, la fuerza y la energía, presentó un tipo de relación respecto a la humedad de manera particular (Figuras 3.4, 3.5 y 3.6), algunas de las cuales tuvieron comportamiento lineal y otras tuvieron comportamiento cuadrático. Al parecer, el

comportamiento en la relación humedad-fuerza de los genotipos semi-dentado y dentado corresponden al comportamiento de los genotipos harinoso y cristalino de manera alternante (primer tramo ascendente similar al genotipo harinoso, y último tramo descendente similar al cristalino) y de manera aditiva o multiplicativa (tramo intermedio, donde la pendiente se aproxima a cero).

No hubo correlación entre el peso volumétrico con el desplazamiento, la fuerza o la energía a ruptura, ya que a pesar que hubo significancia, los coeficientes de correlación de Pearson fueron inferiores a 0.5 (Resultados no mostrados).

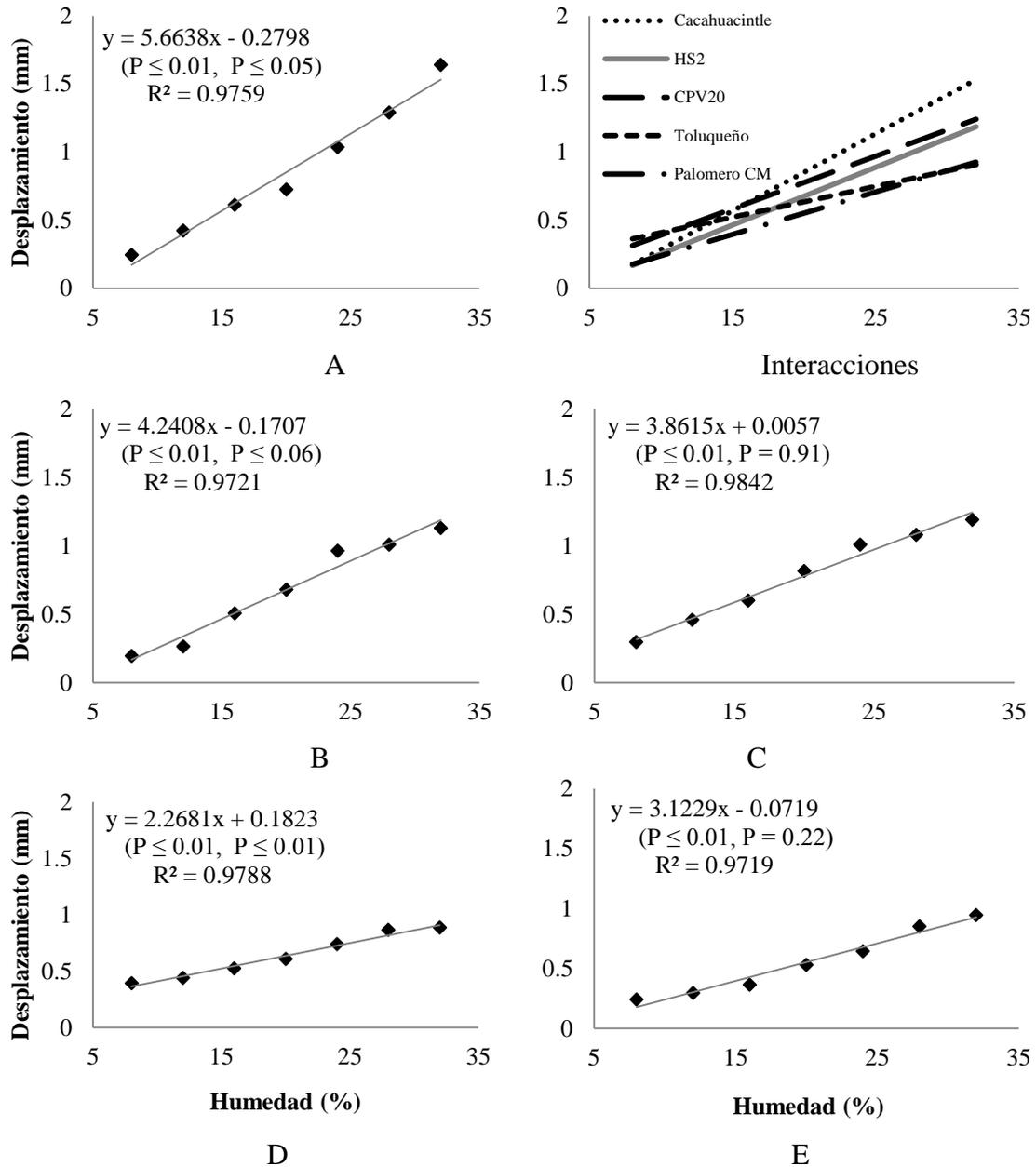


Figura 2.4. Relación lineal entre contenido de humedad (C.H.) y desplazamiento a ruptura (D) en Genotipos: **A.** Harinoso (Cacahuacintle), $D = 5.6638(C.H.) - 0.2798$, $R^2 = 0.98$; **B.** Semi-dentado (HS-2), $D = 4.2408(C.H.) - 0.1707$, $R^2 = 0.97$; **C.** Dentado (CPV20), $D = 3.8615(C.H.) + 0.0057$, $R^2 = 0.98$; **D.** Semi-cristalino (Toluqueño), $D = 2.2681(C.H.) + 0.1823$, $R^2 = 0.98$; **E.** Cristalino (Palomero), $D = 3.1229(C.H.) - 0.0719$, $R^2 = 0.97$.

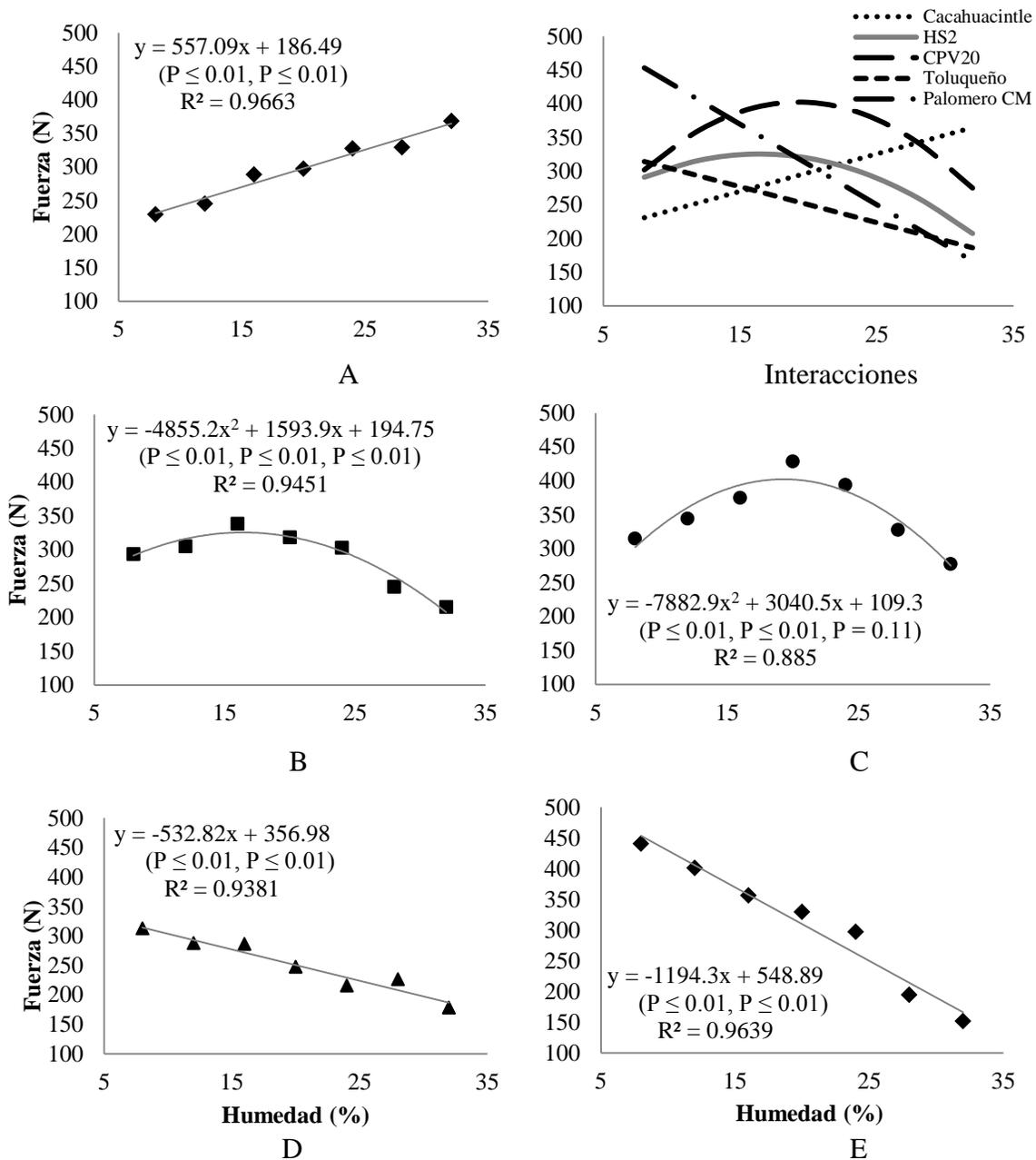


Figura 2.5. Relación entre contenido de humedad (C.H.) y fuerza a ruptura (F) en Genotipos: **A.** Harinoso (Cacahuacintle), $F = 557.09(C.H.) + 186.49$, $R^2 = 0.97$; **B.** Semi-dentado (HS2), $F = -4,855.2(C.H.)^2 + 1,593.9(C.H.) + 194.75$, $R^2 = 0.95$; **C.** Dentado (CPV20), $F = -7,882.9(C.H.)^2 + 3,040.5(C.H.) + 109.3$; $R^2 = 0.89$; **D.** Semi-cristalino (Toluqueño), $F = -532.82(C.H.) + 356.98$, $R^2 = 0.94$; **E.** Cristalino (Palomero), $F = -1,194.3(C.H.) + 548.89$; $R^2 = 0.96$.

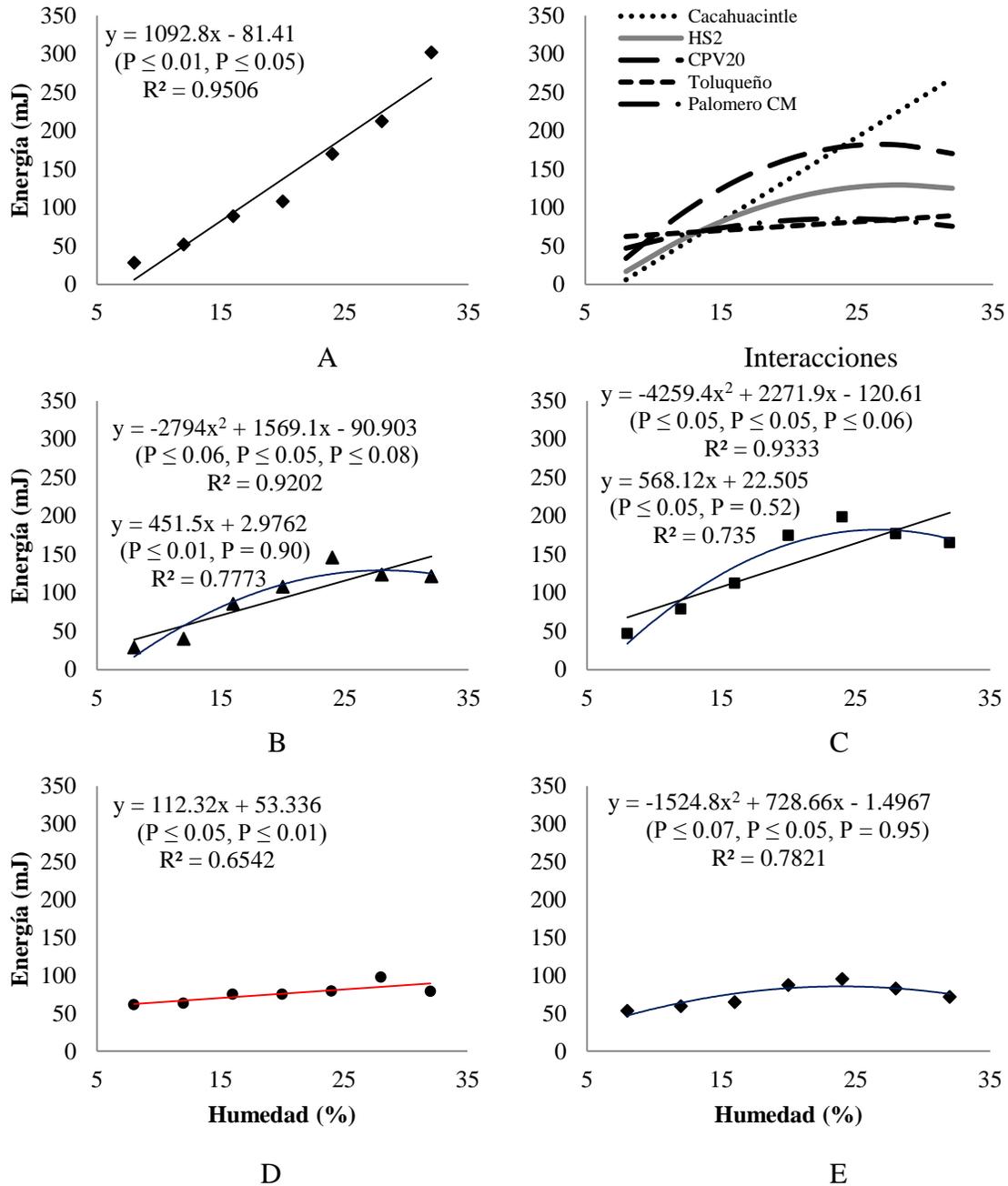


Figura 2.6. Relación entre contenido de humedad (C.H.) y energía (E) a ruptura en Genotipos: **A.** Harinoso (Cacahuacintle), $E = 1,092.8(C.H.) - 81.41$, $R^2 = 0.95$; **B.** Semi-dentado (HS2), $E = -2,794(C.H.)^2 + 1,569.1(C.H.) - 90.903$, $R^2 = 0.92$; **C.** Dentado (CPV20), $E = -4,259.4(C.H.)^2 + 2,271.9(C.H.) - 120.61$, $R^2 = 0.93$; **D.** Semi-cristalino (Toluqueño), $E = 112.32(C.H.) + 53.336$, $R^2 = 0.65$; **E.** Cristalino (Palomero), $E = -1,524.8(C.H.)^2 + 728.66(C.H.) - 1.4967$, $R^2 = 0.78$.

2.4. CONCLUSIONES

El comportamiento de las curvas de regresión del desplazamiento, fuerza y energía graficadas en función del contenido de humedad fue diferente para cada genotipo.

La relación entre contenido de humedad y desplazamiento (deformación) a ruptura de la semilla fue lineal y directamente proporcional para los cinco genotipos estudiados (harinoso, dentado, semi-dentado, semi-cristalino y cristalino).

La relación entre contenido de humedad y fuerza a ruptura fue lineal y, directamente proporcional para el genotipo harinoso (Cacahuacintle) e inversamente proporcional para los genotipos semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero); y para los genotipos semi-dentado (HS-2) y dentado (CPV-20), la relación fue cuadrática.

La relación entre contenido de humedad y energía a ruptura fue lineal y directamente proporcional en el genotipo harinoso (Cacahuacintle) y en el semi-cristalino (Toluqueño), y cuadrática en los genotipos semi-dentado (HS-2), dentado (CPV-20) y cristalino (Palomero); el modelo mostró un bajo coeficiente de determinación para los genotipos semi-cristalino (Toluqueño) y cristalino (Palomero).

Los valores más altos de desplazamiento y energía se obtuvieron en el genotipo harinoso (Cacahuacintle), decreciendo para genotipos con menor porcentaje de endospermo suave; mientras que el valor más alto de fuerza se obtuvo en el genotipo dentado (CPV-20) y el menor en el semi-cristalino (Toluqueño).

Los valores más altos de desplazamiento y energía se obtuvieron a mayor contenido de humedad; mientras que los valores más altos de fuerza se obtuvieron a menor humedad, con el máximo en 16 % y el mínimo en 32 %.

No hubo una alta correlación de la fuerza a compresión de ruptura con el peso volumétrico ni con el porcentaje de endospermo duro de la semilla.

2.5. LITERATURA CITADA

- Akinoso, R and Raji O, A. 2011.** Physical properties of fruit, nut and kernel of oil palm. *International Agrophysics* (Poland), **25**: 85-88.
- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2006.** ASABE Standard S358.2 FEB03: Moisture Measurement-Forages. ASABE Standards 2006 (USA). 53rd Edition. Standards Engineering Practices Data. Pp. 608.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 2005.** ASAE Standard S368.4 DEC00: Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASAE Standards 2005 (USA). 52nd Edition. Standards Engineering Practices Data. Pp. 601-608.
- Babić, L J; Radojčin, M; Pavkov, I; Babić, M; Turan, J; Zoranović, M and Stanišić, S. 2013.** Physical properties and compression loading behaviour of corn seed. *International Agrophysics* (Poland). **27**: 119-126.
- Barnwal, P; Kadam M, D and Singh K, K. 2012.** Influence of moisture content on physical properties of maize. *International Agrophysics* (Poland), **26**: 331-334.
- Bäumler, E; Cuniberti A; Nolasco M, S and Riccobene C, I. 2006.** Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. *Journal of Food Engineering* (The Netherlands), **72**: 134-140.
- Bewley J, D and Black, M. 1978.** Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination. V. 1 Development, Germination and Growth. Springer-Verlag. Heidelberg, Germany. Pp 17, 24-26, 28-30, 34-37, 147-153.
- Bewley, D and Black, M. 1994.** Seeds: Physiology of Development and Germination. Second edition. Plenum Press. New York, United States of America. Pp. 147-155, 296-303, 245-246.

- Bosoi S, E; Verniaev V, O; Smirnov I, I and Sultan-Shakh G, E. 1991.** Theory, Construction and Calculations of Agricultural Machines. Volume Two. Translated of: *Teoriia, Konstruktsiia i Raschett Sel' skokhoziaistvennykh Mashin, Russian*, by Jaganmohan, A. A A Balkema/Rotterdam Ed., Rotterdam, The Netherlands. Pp. 469-470.
- Gaytán-Martínez, M; Figueroa-Cárdenas, J D; Reyes-Vega, M L; Rincón-Sánchez F y Morales-Sánchez, E. 2006.** Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnia Mexicana (México)*, **29 (Núm. Especial 2)**: 135 – 139.
- INSTRON (R). 2006.** INSTRON BlueHill referencia de cálculos. Manual de referencia de software. Revisión A (Help V 2.3). INSTRON Corporation.
- International Seed Testing Association (ISTA) 2005.** International Rules for Seed Testing. Edition 2005. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Isik, E and Izli, N. 2007.** Moisture Dependent Physical and Mechanical Properties of Dent Corn (*Zea mays* var. *indentata* Sturt.) Seeds (Ada-523). *American Journal of Food Technology (USA)*, **2**: 342-353.
- Kingsly P, A R; Singh B, D; Manikantan R, M and Jain K, R. 2006.** Moisture dependent physical properties of dried pomegranate seeds (*Anardana*). *Journal of Food Engineering (The Netherlands)*, **75**: 492-496.
- Konak, M; Çarman, K and Aydin, C. 2002.** Physical Properties of Chick Pea Seeds. *Biosystems Engineering (The Netherlands)*, **82 (1)**: 73–78.
- Leyva O, O R; Carballo C, A; Mejía C, J A y Vázquez C, M G. 2002.** Procesamiento digital de imágenes para la estimación de textura de endospermo en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana (México)*, **25 (4)**: 355-365.
- Mohsenin N, N. 1986.** Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers. Second Edition. United States of America, 891 p.

- Mollazade, K; Ahmadi, H; Khorshidi, J; Rajabipour, A and Mohtasebi, S S. 2009.** Moisture-dependent physical and mechanical properties of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seed. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering (China)*, **2** (2): 49-56.
- Murthy T, C and Bhattacharya, S. 1998.** Moisture dependant physical and uniaxial compression properties of black pepper. *Journal of Food Engineering (The Netherlands)*, **37**: 193-205.
- Özarslan, C. 2002.** Physical Properties of Cotton Seed. *Biosystems Engineering (The Netherlands)*, **83** (2): 169–174.
- Salinas M, Y y Aguilar M, L. 2010.** Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas (México)*, **2** (1), 5-11.
- Salinas M, Y y Vázquez C, G. 2006.** Metodologías de análisis de calidad nixtamalera-tortillera en maíz. Folleto técnico No. 23. INIFAP. Campo experimental del Valle de México. Chapingo, Edo. De México, México, 91 p.
- Singh K, K and Goswami K, T. 1996.** Physical Properties of Cumin Seed. *Journal of Agricultural Engineering Research (The Netherlands)*, **64**: 93-98.
- Taheri-Garavand, A; Nassiri, A and Gharibzahedi T, S M. 2012.** Physical and mechanical properties of hemp seed. *International Agrophysics (Poland)*, **26**: 211-215
- Yalçin, I and Özarslan, C. 2002.** Physical Properties of Vetch Seed. *Biosystems Engineering (The Netherlands)*, **88** (4): 507–512.

CAPÍTULO TERCERO

3. DAÑO TISULAR EN SEMILLAS DE MAÍZ SOMETIDAS A COMPRESIONES EQUIVALENTES A RUPTURA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD FISIOLÓGICA

RESUMEN

La calidad física, fisiológica y sanitaria de la semilla se reduce debido al daño mecánico ocasionado por la mecanización del proceso de acondicionamiento. La separación y la ruptura celular es causa de deterioro de los productos agrícolas, pero se considera que este es mayor cuando ocurre ruptura celular. Conocer los valores críticos de la fuerza y el desplazamiento a la compresión, permitirá minimizar el daño mecánico durante dicho proceso, mientras que un estudio de la separación y ruptura celular permitirá asociar el deterioro de la semilla a la desnaturalización de los componentes celulares en el caso de la ruptura celular, o a la reducción en la capacidad de la translocación de nutrientes o señalización en el caso de la separación celular. En el presente estudio se evaluaron: la fuerza, el desplazamiento y la energía a compresión de ruptura, el daño visible, la ruptura y separación celular y la calidad fisiológica de semillas de maíz Cacahuacintle (harinoso), HS-2 (semi-dentado) y Palomero (duro) con humedad de 12 y 20 %. El contenido de endospermo suave y duro difirió entre Cacahuacintle (76 y 5 %), HS-2 (33 y 49 %) y Palomero (15 y 65 %). Cacahuacintle presentó el mayor desplazamiento (0.83 mm), la menor fuerza (274 N) y la menor energía (118 mJ); HS-2 y Palomero no difirieron en desplazamiento (0.55 y 0.51 mm) ni en energía (87 y 88 mJ) pero sí en fuerza (309 y 357 N); a 12 % de humedad se obtuvo menor desplazamiento y energía (0.33 mm y 50 mJ) que a 20 % de humedad (0.95 mm y 148 mJ), la fuerza no difirió entre humedades (313 y 314 N). La mayor frecuencia de fractura se presentó en HS-2 (48 %), mientras que Cacahuacintle y Palomero (40 y 35 %) no difirieron significativamente; a 20 % de humedad la frecuencia de fractura fue mayor (44 %) que a 12 % de humedad (39 %). Morfológicamente, el mayor daño ocurrió en la corona (82 %) seguido de la parte media (39 %) y el menor daño fue en la base y embrión (24 y 20 %). El índice de daño fue mayor en HS-2 (328) seguido de Cacahuacintle (277) y Palomero (220); no hubo diferencia significativa (265 y 285) entre los dos contenidos de humedad, 12 y 20 %. La proporción de área de fractura sobre la superficie de la semilla fue mayor en Cacahuacintle (1.18 %) seguido de HS-2 y Palomero (0.71 y 0.60 %); siendo mayor en la superficie ventral (0.98 %) que en la dorsal (0.66 %). La proporción de ruptura celular en el endospermo fue superior (92.20 %) a la separación celular (7.80 %), a humedad de 12 % la proporción de separación celular (18.05 %)

fue superior que a 20 % de humedad (5.72 %); entre variedades no hubo diferencias significativas en la proporción de separación celular. En células de la capa de aleurona, la proporción de área con ruptura celular (87.75 %) fue superior a la de separación celular (12.25 %). En el embrión y escutelo no se observó ruptura ni separación celular, ya que el daño ocasionado no alcanzó a dichos tejidos. Aunque se determinaron diversas variables de calidad fisiológica, se consideró a la germinación estándar como la más importante. En los tratamientos no sometidos a compresión, la germinación (85.20 %) fue más alta que en los sometidos a ruptura (55.00 %); mientras que a 12 % de humedad, la germinación (74 %) fue mayor que la obtenida a 20 % (66 %). En contraste, en la prueba de frío la germinación (66 %) fue mayor a 20 % de humedad que a 12 % (60 %). Con base en los resultados obtenidos se concluye, que una humedad del 20 % posterior al desgranado ocasiona menor daño físico a la semilla durante el manejo comparado con una humedad de 12 %, pero se deben atender los límites seguros de humedad (20 a 25 %) y/o tiempo (dos a quince días) en el que las semillas pueden permanecer sin afectar su calidad fisiológica.

Palabras clave: cristalino, daño mecánico, endospermo, harinoso, humedad, microestructura, ruptura celular.

SUMMARY

Mechanization on seed production inflicts mechanical damage, which causes physical, physiological and sanitary quality loss. Cell separation and cell rupture provokes agricultural products detriment, but it is higher with cell rupture. Knowing the compression strength and strain critical values will allow minimize its magnitude during cleaning, drying and storage, and a study about cell separation and cell rupture will allow associate the seed detriment to cell components denaturation on cell rupture, or to the nutrient translocation and signaling ability reduction on cell separation. Rupture compression strength and strain, visible damage, cell separation and cell rupture, and physiological quality on seeds of Cacahuacintle (floury), HS-2 (semi-dented) and Palomero (flint) maize cultivars at 12 and 20 % moisture contents (mc) were evaluated. Flint and floury endosperm content was different for Cacahuacintle (5 and 75 %), HS-2 (49 and 33 %) and Palomero (65 and 15 %). Cacahuacintle showed the highest strain (0.83 mm), the least strength and energy (274 N and 118 mJ); HS-2 and Palomero were not significantly different on strain and energy (0.55 and 0.51 mm; 87 and 88 mJ) but showed a different strength (309 and 357 N); at 12 % mc strain and energy were lower (0.33 mm and 50 mJ) than at 20 % mc (0.95 and 148 mJ), but the strength were not different (313 and 314 N). HS-2 showed the highest fracture frequency (48 %), and Cacahuacintle and Palomero did not differ significantly (40 and 35 %); at 20 % mc the fracture frequency was higher (44 %) than at 12 % mc (39 %). Morphologically, the highest damage was on the seed crown (82 %), in the middle was of 39 %, in the base was of 24 %, and the least was over the embryo and scutellum (20 %). HS-2 got the highest damage index (328), for Cacahuacintle it was of 277, and Palomero got the least (220); the damage indexes were not significantly different (265 and 285) for both mc (12 and 20 %). Fracture area proportion on seed surface was highest on Cacahuacintle (1.18 %), for HS-2 it was of 0.71, and Palomero got the least (0.60 %); and it was higher on the ventral than on the dorsal surface (0.98 and 0.66 %). Endosperm cell rupture was higher than cell separation (92.20 and 7.80 %); cell separation proportion was higher at 12 % mc (18.05 %) than at 20 % mc (5.72 %); cell separation proportion was not statistically different for the three cultivars. On aleurone layer cells, ruptured cell proportion area (87.75 %) was higher than separated cell proportion area (12.25 %). Neither cell separation nor cell

rupture was present over embryo and scutellum because these tissues were not damaged. Standard germination was considered the most important physiological quality variable, and it was higher for the uncompressed (85.20 %) than for the compressed (55.00 %) seeds; and it was higher for 12 % mc (74 %) than for 20 % mc (66 %). The germination on the cold test, however, was higher for 20 % mc (66 %) than for 12 % (60 %). According to these results, we concluded that a moisture content of 20 % after shelling causes less seeds physical damage than a moisture content of 12 %, but safe moisture content and time (two to fifteen days) in which seeds can stay without physiological quality loss, must be attended.

Key words: cell rupture, endosperm, flint, floury, mechanical damage, microstructure, moisture.

3.1. INTRODUCCIÓN

El daño mecánico en semillas y granos, usualmente es producido durante el desgranado y en el manejo realizado por máquinas transportadoras como tornillos y elevadores; el daño físico se refleja como la falla o ruptura del producto bajo deformación excesiva cuando estas son forzadas a través de canales de dimensiones fijas, o bien, cuando son sujetas a cargas de impacto o compresión excesivas (Mohsenin, 1986). El daño mecánico en semillas repercute de manera directa sobre la calidad física y además puede ocasionar la pérdida o inestabilidad de diversos componentes celulares que acelerarán el detrimento fisiológico y sanitario de las mismas.

Reducción de la calidad física, fisiológica y sanitaria:

I. Calidad física

La calidad física de la semilla es un atributo de gran importancia para las empresas comercializadoras de semilla, y eventualmente, para las instituciones de investigación encargadas del estudio, investigación y preservación de las mismas; cabe destacar que una pequeña fisura en las semillas puede ser precursora de partiduras completas durante su manejo y almacenamiento, tal como ocurre con las “grietas rápidas” en varios tipos de material, según Ashby y Jones (2009).

II. Calidad fisiológica

En semillas de algodón (*Gossypium*), la ruptura de la cubierta seminal aumenta los ácidos grasos que ocasionarán una reducción en el porcentaje de germinación (Mohsenin, 1986). En algunos casos, los tejidos que no son completamente “funcionales” (vivos), dañados mecánicamente, podrían ocasionar un detrimento en la calidad fisiológica. Se sugiere que la ruptura en el endospermo puede ocasionar una plántula anormal o afectar la calidad de la semilla al restringir la translocación de nutrientes hacia el eje embrionario (Cicero *et al.*, 1998; Moreira de Carvahlo *et al.*, 1999).

III. Calidad sanitaria

La ruptura en semillas puede ser causa de una mayor invasión por patógenos como los hongos. Un estudio realizado en trigo (*Triticum aestivum* L) mostró que el daño ocasionado en la capa de aleurona o en la testa, permite una mayor penetración por hongos (Caldwell y Davies, citados por Mohsenin, 1986); mientras que en semillas de maíz se encontró que pequeñas grietas realizadas sobre el embrión o la remoción del pedicelo ocasionaron un incremento en el desarrollo de hongos y una reducción en la germinación (Tuite *et al.*, 1985). Al dañarse las barreras físicas de la semilla, como la cubierta seminal, se esperaría una mayor penetración de los productos químicos utilizados para prevenir o disminuir el ataque por hongos e insectos. Marchi y Cicero (2003) encontraron valores de conductividad eléctrica de 15.77, 20.53 y 25.90 $\mu\text{mho} \times \text{cm}^{-1} \times \text{g}^{-1}$ en semillas con daño mecánico de 16, 39 y 50 %, y de hasta 26.25, 38.56 y 36.90 $\mu\text{mho} \times \text{cm}^{-1} \times \text{g}^{-1}$ en semillas con 16, 39 y 50 % de daño mecánico tratadas con Vitavax-Thiram 200 SC + K-obiol + Actelic, Maxim XL + K-obiol + Actelic y Maxim XL + K-obiol + Actelic, respectivamente. Estos tratamientos ocasionaron un máximo de conductividad eléctrica entre siete diferentes preparaciones. Aunque para estos casos, los incrementos en conductividad eléctrica ocasionados por el tratamiento químico, en promedio fueron inferiores en semillas con mayor porcentaje de daño (29, 24 y 5 % para semillas con 16, 39 y 50 % de daño mecánico, respectivamente), los efectos combinados sí son superiores en semillas con mayor daño mecánico, especialmente en un segundo periodo de prueba (23.6, 30.9 y 36.7 $\mu\text{mho} \times \text{cm}^{-1} \times \text{g}^{-1}$ en semillas con 16, 39 y 50 % tratadas con Maxim XL + K-obiol + Actelic, Vitavax-Thiram 200 SC + K-obiol + Actelic y Maxim XL + K-obiol + Actelic, respectivamente); en tanto que ocurrió una reducción desde 98 a 93 % en la germinación para semillas con conductividad de 14.8 y 20.5 $\mu\text{mho} \times \text{cm}^{-1} \times \text{g}^{-1}$, respectivamente, correspondientes a semillas con daños mecánicos de 16 y 39 % respectivamente.

Importancia de los estudios de compresión a nivel microscópico

Un estudio realizado a nivel microscópico (Miles y Rehkugler, 1973; citados por Mohsenin, 1986), sugiere que la ruptura celular inicial ocasiona discontinuidad en la curva fuerza-deformación, y

menciona que la mayor parte de las células localizadas a uno y otro lado de la línea de fractura aparentaban no tener daño. Mohsenin (1986) menciona que en semillas de maíz, una ruptura en el endospermo puede derivarse de exceder la deformación elástica o inelástica de la capa de aleurona, ocasionando así rupturas visibles o invisibles al ojo humano.

Durante el acondicionamiento, las semillas, además de estar sujetas a cargas de compresión, también están sujetas a cargas de impacto. De acuerdo a Mohsenin (1986), para causar el mismo daño de magulladura en frutos de manzana, se requirió aproximadamente 50 % más energía de impacto que de compresión. Estos resultados pueden sugerir que un ensayo de compresión en semillas de maíz puede reflejar de manera significativa la resistencia a impacto; Mohsenin (1986), señala además, que aún se requieren estudios que permitan entender la mecánica de las fallas de tejidos, entre las que se encuentra la ocasionada por compresión, y en cuyo caso se desconoce si esta ocurre mediante la ruptura o separación celular; cabe señalar que al momento no se han realizado suficientes estudios que permitan comprender ese fenómeno.

Mohsenin (1986) señala asimismo, que algunos términos, como la biocedencia, no han sido completamente comprendidos y/o definidos, y sugiere que ésta pudiera definirse como el “inicio de la ruptura celular”. Los estándares de la ASAE (2005), no definen a éste término (biocedencia) en función del fenómeno que ocurre en el espécimen, sino en función del comportamiento de la curva fuerza-desplazamiento (o esfuerzo-deformación), siendo ésta la definición más aceptada aunque sería más completa si se pudiera afirmar que en ese caso se inicia o no la ruptura tisular y/o celular. Mohsenin (1986) menciona que “la limitada información está basada en estándares arbitrarios derivados de algunas pruebas subjetivas más que en medidas físicas bien definidas”. Lucas *et al.* (2000) mencionan que la fuerza de cedencia de un material es una propiedad verdadera del material, definida como el esfuerzo en el que da inicio la deformación permanente en un tejido.

Por otra parte, diversos estudios en biología aseguran que la pared celular es uno de los principales elementos responsables de proporcionar resistencia mecánica a las células vegetales, y su composición confiere tenacidad a los órganos vegetales (Lucas *et al.*, 2000). La tenacidad, al menos en madera y acero, determina si ocurrirá una falla enseguida de una “grieta rápida” (Ashby y Jones, 2009), y puede definirse como la capacidad de un material de absorber energía antes de la

fractura (Callister, 1995). Considerando a la pared celular como un componente tenaz, y que las fallas ocurrirán a través de los elementos menos resistentes, es probable que la ruptura se inicie y en muchos casos comprenda únicamente la separación celular, siempre y cuando las sustancias cementantes que se encuentran entre las células sean menos resistentes que la pared. Además de la pared celular, se puede deducir que cualquier tejido firme puede, asimismo, brindar, contribuir o modificar las propiedades mecánicas de un tejido, como las sustancias de reserva contenidas en el endospermo de las semillas (Engleman y Espinosa, 1998).

Mohsenin (1986) menciona que el contenido de las células de un fruto de manzana que sufren ruptura son liberadas a los espacios intercelulares ocasionando oscurecimiento del tejido, lo cual, de ocurrir en células funcionales (vivas, como la aleurona o las del embrión) de una semilla de maíz, podría implicar un mal funcionamiento de las mismas ocasionado por una disociación de los elementos contenidos por la pared celular; asimismo, si lo que ocurriera en la ruptura tisular fuera más bien separación celular, se perdería la comunicación entre estas células disminuyendo así su funcionalidad como conjunto, y en ambos casos una consecuencia podría ser la disminución del vigor o viabilidad de las semillas. Se propone que en el primer caso, el deterioro resultaría de mayor magnitud a través del tiempo, al quedar el contenido celular expuesto a la intemperie y su consecuente modificación funcional como en el caso mencionado, mientras que en la separación celular, la célula queda intacta y no sufre cambios. Asimismo, se considera que la pared celular, puede conferir resistencia al ataque de insectos como los gorgojos (García-Lara, *et al.*, 2004), dejando a la semilla muy vulnerable luego de la ruptura o desprendimiento de la misma.

3.1.1. Objetivos

- a. Observar la presencia de ruptura y separación celular en compresiones de ruptura.
- b. Evaluar la resistencia y calidad fisiológica en función del tipo de endospermo.

3.1.2. Hipótesis

En semillas comprimidas a ruptura:

- i) La frecuencia de fractura en la superficie externa, es menor sobre el embrión que sobre el endospermo.
- ii) La proporción de área fracturada en la superficie externa, es menor a mayor contenido de endospermo duro.
- iii) La proporción de área fracturada en la superficie externa es mayor en semillas con menor humedad.
- iv) Existe ruptura y separación celular, pero predomina la última.
- v) La proporción de área con ruptura celular es mayor sobre el genotipo harinoso.
- vi) La proporción de área con ruptura celular es superior en semillas con baja humedad.
- vii) La calidad fisiológica es mayor en genotipos con mayor proporción de endospermo duro.
- viii) Las semillas con baja humedad tienen mayor pérdida de calidad fisiológica.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para probar las hipótesis propuestas, se realizó una evaluación al microscopio electrónico de barrido de semillas sometidas a compresión de ruptura probando humedades de 12 y 20 %, observando la superficie de fractura y determinando la presencia de separación y/o ruptura celular.

Asimismo, se realizó la evaluación de fractura tisular mediante una caracterización morfológica, se determinó la proporción del área de fractura, y se realizó una evaluación de la calidad fisiológica en semillas de maíz harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero), con humedad de 12 y 20 % y compresión de ruptura y testigo (sin comprimir). La metodología para cada tratamiento y evaluación, así como para el análisis estadístico se describe a continuación.

3.2.1. Factores de estudio

Tipo de endospermo

Se utilizaron semillas de maíz de variedades con endospermo: **a)** harinoso, Cacahuacintle; **b)** semi-dentado, híbrido HS-2; y **c)** cristalino, Palomero; los cuales se obtuvieron de acuerdo a lo mencionado en el apartado 2.2.1.

Contenido de humedad de la semilla

Se evaluaron dos niveles de humedad de la semilla: 12 y 20 % \pm 0.1 en base húmeda (b. h.). Para lograr estos porcentajes de humedad, se siguió la metodología mencionada en los apartados 2.2.1 al 2.2.3; las semillas se mantuvieron (no más de 4 h) en frascos herméticos hasta el momento de la compresión. Posterior a la compresión, las semillas se deshidrataron bajo condiciones ambientales por 24 h, y en estufa a 30 °C de 20 a 24 h más; finalmente, las semillas fueron expuestas a temperatura ambiente hasta alcanzar una humedad de 9 a 10 % y se conservaron en fresco y seco hasta el momento de su evaluación, 45 a 60 días después.

Intensidad de compresión

Se evaluaron semillas sin comprimir y semillas comprimidas hasta ocasionar la ruptura. La compresión se realizó siguiendo la metodología indicada en el subcapítulo 2.2.4, salvo que la velocidad de la cruceta se fijó en 1 mm/min y el desplazamiento de la cruceta se detuvo en cuanto se observó el cambio de pendiente característico de la ruptura o bien, el ruido ocasionado por la fractura interna o externa, el cual se detectó con auxilio de un micrófono en contacto con el soporte de la semilla (plato inferior) conectado a la computadora con una amplificación de sonido de 36 dB y supresión digital de ruidos y eco acústico, el volumen de las bocinas se ajustó a un nivel suficientemente audible con auxilio del gráfico de nivel de sonido para evitar descartar sonidos poco audibles.

Para cada tratamiento (genotipo y humedad) se analizaron los datos correspondientes a fuerza (F) y desplazamiento (D) recabados con el Software BlueHill 2.0 ®, y la Energía (E) se determinó mediante el cálculo del área aproximada bajo la curva ($E = D \times F/2$), conforme a la metodología descrita en el apartado 2.2.4. Cada tratamiento se evaluó en muestras de 30 semillas con seis repeticiones.

3.2.2. Componentes de la semilla

El peso de la biomasa seca de los componentes de la semilla se determinó según la metodología descrita en el apartado 2.2.1 correspondiente a textura de semilla.

3.2.3. Caracterización morfológica de daños externos y evaluación del índice de daño

Con la ayuda de un microscopio estereoscópico, se realizó una caracterización morfológica de los daños externos, contabilizándose la cantidad de semillas: **1**) sin fractura (SF), **2**) con desprendimiento de tejido, es decir, fractura severa (FS), **3**) con fractura en la base (B), que corresponde a la zona del primer cuarto proximal de la semilla con respecto al hilo, **4**) en la región media de la semilla (M), **5**) en la región del embrión y escutelo (EE), y **6**) en la corona (C), que corresponde al $\frac{1}{4}$ distal de la semilla (Figura 3.1), de dichos conteos se obtuvo la frecuencia relativa dividiendo la ocurrencia de cada categoría entre el tamaño de la muestra.

Posteriormente, para determinar el índice de daño, se categorizó el tipo o ubicación del daño asignándole un grado de severidad a cada categoría: SF = 0, C = 1, B y M = 2 y FS y EE = 3; se considera que los valores más elevados reflejarán un daño más severo y en consecuencia una menor calidad física y fisiológica de la semilla; el índice de daño se obtuvo a partir de la sumatoria del producto de la proporción de frecuencia de las categorías mencionadas para la caracterización y el grado de severidad de cada categoría:

$$ID = \sum (\text{frecuencia del tipo de daño})(\text{grado de severidad asignado al tipo de daño})$$

Dónde:

ID: Índice de daño.

El tamaño de muestra para esta caracterización fue de 45 semillas por tratamiento, compuesta por tres repeticiones de 15 semillas.

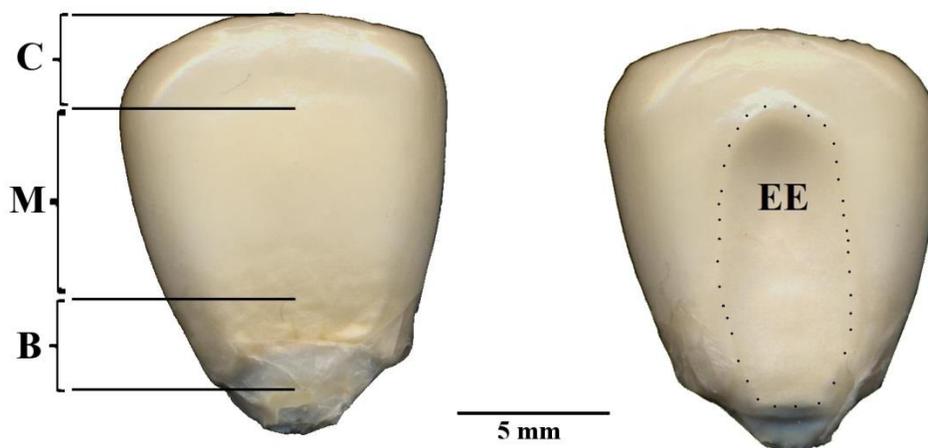


Figura 3.1. Zonas de daño en la semilla: fractura en la base B, comprendida por el primer cuarto de la longitud; en la parte media M, comprendida entre el 25 y 75 % de la longitud; en la corona C, correspondiente al cuarto distal de la longitud de la semilla; y, en la región sobre el embrión y escutelo EE, en la cara ventral.

3.2.4. Proporción del área de fractura en semillas de maíz comprimidas hasta ruptura

Se evaluó la proporción de las áreas de fractura en semillas teñidas con verde fijo FCF (0.12 % de verde fijo FCF en etanol 95 %). Para la tinción, las semillas se sumergieron en la solución por 4-5 min., y después se enjuagaron en agua corriente. Posteriormente, se determinó el área total de las fracturas y de las semillas mediante software ImageJ 1.47v (Schneider, 2012), para lo que las semillas se escanearon en su cara dorsal y ventral (Figura 3.1, izquierda y derecha, respectivamente). El tamaño de muestra fue de 45 semillas por tratamiento, compuesta por tres repeticiones de 15 semillas.

3.2.5. Proporción de ruptura y separación celular en la microestructura

Para estudiar la proporción de ruptura y separación celular en el endospermo, se usó Microscopía Electrónica de Barrido MEB, en la Unidad de Microscopía Electrónica del COLPOS.

Para exponer el área fracturada a la observación en el microscopio, las semillas sometidas a ruptura fueron abiertas con el auxilio de unas pinzas; se eligieron las semillas con mayor fractura ocasionada por la compresión para facilitar la visualización; las semillas sin comprimir fueron desgastadas con el auxilio de lijas de agua FANDELI A-99 360 SIC y A-99 500 SIC, finalmente, el polvo (almidón) se eliminó de la superficie con vibración ultrasónica por 5 min en un limpiador ultrasónico modelo CD2800 (DOXPRO, México).

Los fragmentos de semilla se montaron sobre portaobjetos de latón adheridos con cinta adhesiva conductiva de carbono, luego se sometieron a vacío por 10 min, y se bombardearon en un ionizador de oro/paladio modelo JFC-1100 (JEOL Ltd., Akishima, Tokyo, Japón) por un periodo de 5 min, con lo que se logró un recubrimiento total de las muestras y una coloración dorada. Finalmente se observaron en un microscopio electrónico de barrido modelo JSM6390 (JEOL Ltd., Akishima, Tokyo, Japón) operado a 10 kV. En el caso de semillas con desprendimiento de tejido, se observó además la zona de almidón duro, almidón suave (según

el caso) y zonas aledañas al embrión. Se capturaron imágenes en aumentos de 10, 150, 300, 600 y 1,200 x.

Para determinar la proporción de ruptura y separación celular en la microestructura del endospermo, se analizaron cinco micrografías por cada tratamiento con superficie de muestra equivalente a 1.37 mm²; para determinar esas proporciones en la capa de aleurona, se analizaron 21 micrografías con acercamiento de 300 a 1,000 aumentos. En tejido embrionario y escutelo se tomaron 2 y 4 micrografías respectivamente; para el caso del embrión, la compresión ejercida sobre la semilla fue superior al resto de los tratamientos, con la finalidad de exponer dicho tejido.

3.2.6. Evaluación de la calidad fisiológica mediante conductividad eléctrica, germinación estándar, velocidad de emergencia, germinación en prueba de frío y peso seco de las plántulas

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica CE se midió según la metodología descrita por la ISTA (2005) para chícharo (*Pisum sativum* L). Se usaron tres repeticiones de 30 semillas, las cuales se pesaron y se colocaron en vasos de vidrio con 100 mL de agua deionizada por 24 h a una temperatura de 20-22 °C cubiertos con papel aluminio. Para medir la conductividad eléctrica, se agitó el vaso con la muestra antes de efectuar la lectura, dejándose unos segundos precipitar el exceso de solutos presentes en el agua (con la finalidad de que la lectura se estabilizara más rápido). Se utilizaron tres “ajustes” de agua, en los que se siguió la metodología descrita, a excepción de que los vasos contenían agua sin semilla, cuyo promedio se restó de cada una de las lecturas correspondientes. Para determinar la conductividad eléctrica se utilizó un conductímetro modelo WD-35607 (OAKTON Instruments, Vernon Hills, IL, USA). El reporte de los resultados se expresó en $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de acuerdo al siguiente cálculo:

$$CE = \frac{\text{Lectura de la } n \text{ repetición} - \text{Lectura promedio del ajuste}}{\text{Peso de las semillas de la } n \text{ repetición}}$$

Germinación estándar

La prueba de germinación se llevó a cabo utilizando la metodología “entre papel”, que consiste en colocar las semillas en toallas de papel “sanitas” enrolladas y puestas dentro de una bolsa de polietileno (25 x 35 cm) y finalmente colocadas en una cámara de germinación a temperatura de 25 ± 5 °C, suficientemente hidratadas. El conteo de plántulas normales se realizó a los siete días (ISTA, 2005). Para evaluación de velocidad de emergencia y germinación estándar, el tamaño de muestra fue de 90 semillas, usando tres repeticiones de 30 semillas para cada tratamiento.

Posteriormente, se determinó la reducción de germinación como el cociente de la diferencia de la germinación promedio en tratamientos testigo menos la germinación en tratamientos de ruptura, entre la germinación promedio en tratamientos testigo.

$$PG = \frac{(\bar{G}_t - G_r)}{\bar{G}_t}$$

Donde:

PG: Pérdida en germinación ocasionada por compresión de ruptura, %

\bar{G}_t : Promedio de la germinación para cada tratamiento testigo, %

G_r : Germinación en cada tratamiento de ruptura, %

Así, se obtuvo un valor de PG para cada tratamiento y repetición de ruptura: Cacahuacintle, HS-2 y Palomero a 12 y 20 % de humedad, es decir, seis tratamientos con tres repeticiones.

Velocidad de germinación

Para determinar la velocidad de germinación, se realizó un conteo de semillas con emisión de radícula cada 24 h durante siete días. El índice de velocidad de germinación se calculó con la fórmula propuesta por Maguire (1962):

$$VG = X_1/Y_1 + (X_2 - X_1)/Y_2 + \dots + (X_n - X_{n-1})/Y_n \dots$$

Donde:

VG: velocidad de germinación

X_1, X_2 y X_n : son el porcentaje¹ de semillas con emisión de radícula en cada uno de los siete días

Y_1, Y_2 y Y_n : son el número de días desde la siembra

Vigor mediante prueba de frío

Para determinar el vigor mediante la prueba de frío, se siguió la metodología descrita por la AOSA (1983), que consiste en preparar las semillas para la prueba de germinación estándar según la metodología anteriormente descrita, y colocar los rollos de papel con la semilla en una cámara de refrigeración a 7-10 °C por un periodo de 7 días y posteriormente colocarlos en una cámara de germinación a 20-30 °C por un periodo adicional de 4 a 7 días. Se reporta el porcentaje de plántulas normales. El tamaño de muestra fue de 90 semillas por tratamiento, siendo de tres repeticiones de treinta semillas.

¹ Se utilizó porcentaje porque en el método descrito por Maguire (1962) se considera el número de semillas de un total de 100 semillas por ensayo, en este trabajo no se utilizaron 100 semillas, sino 30 por cada repetición.

Longitud, peso seco e índice de vigor de la plántula

De las plántulas obtenidas en la prueba de germinación estándar, se determinó el peso seco de la plúmula y de la radícula, y se utilizó el peso seco de la plántula (suma de las anteriores) como un indicador de vigor.

De las plántulas obtenidas en la prueba de vigor, se determinó la longitud de la plántula y el peso seco de la parte aérea, de la radícula y de los remanentes de las semillas. Los pesos secos se determinaron de acuerdo a la metodología descrita por la ASAE (2005), la cual consiste en secar las muestras a la estufa por 24 h a 103 °C. El índice se calculó mediante la siguiente fórmula (Abdul-Baki y Anderson, 1973):

Índice de vigor IVL = proporción de germinación x longitud promedio de las plántulas (cm).

En este estudio se propuso además un índice de vigor calculado en base al peso seco de la plántula en lugar de la longitud:

Índice de vigor IVMS = porcentaje de germinación x peso seco de las plántulas (g).

Se utilizó proporción y porcentaje de germinación en los cálculos del índice de vigor IVL e IVMS, respectivamente, con la finalidad de tener escalas similares.

3.2.7. Diseño experimental y análisis estadístico

Para evaluar el efecto ocasionado por el Genotipo sobre la proporción de los componentes de semilla se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un factor de estudio. Luego se efectuó un análisis de varianza y una comparación de medias.

Para evaluar el efecto ocasionado por el Genotipo y la Humedad sobre la fuerza, desplazamiento y energía, se utilizó, en cada caso, un diseño experimental completamente al azar con dos factores de estudio. Luego se efectuó un análisis de varianza y una comparación de medias.

Para evaluar el efecto ocasionado por el Genotipo y la Humedad sobre la proporción de semillas con y sin fractura, índice de daño y proporción del área de fractura, se utilizó en cada caso, un diseño experimental completamente al azar con dos factores de estudio. Luego se efectuó un análisis de varianza y una comparación de medias.

Para evaluar la proporción de ruptura y separación celular en endospermo, células de la capa de aleurona, embrión y escutelo, se utilizó en cada caso, un diseño experimental completamente al azar con un factor de estudio: proporción de áreas con ruptura celular y con separación celular (contabilizado principalmente por la presencia de pared celular). Luego se efectuó un análisis de varianza y se efectuó una comparación de medias.

Finalmente, en la evaluación del efecto ocasionado por los tratamientos sobre el daño físico y calidad fisiológica, se utilizó en cada caso, un diseño experimental completamente al azar con tres factores de estudio: Genotipo, Contenido de humedad e Intensidad de compresión. Se efectuaron los análisis de varianza y comparación de medias para cada caso. Para evaluar la pérdida de germinación ocasionada por la compresión de ruptura, se procedió de manera análoga, salvo que se utilizó un diseño experimental completamente al azar con dos factores de estudio: Genotipo y Contenido de humedad; y en este caso se presentó únicamente la prueba de comparación de medias.

En cada caso se realizaron pruebas de homogeneidad de varianzas, y no fue necesaria la transformación a los datos originales para asegurar varianzas homogéneas, según la metodología descrita por Little y Hills (1972).

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Componentes de la semilla en tres variedades

Las variedades presentaron diferencias significativas en los porcentajes de pedicelo ($P \leq 0.05$), pericarpio ($P \leq 0.01$), embrión ($P \leq 0.01$) y endospermo suave ($P \leq 0.01$), duro ($P \leq 0.01$) y total ($P \leq 0.01$, Cuadro 3.1). Cacahuacintle mostró el porcentaje más alto de biomasa seca de embrión, endospermo suave y pedicelo, no difiriendo estadísticamente de HS-2 respecto a la biomasa del pedicelo. En contraparte, Palomero tuvo los porcentajes más altos de la biomasa seca de la semilla destinada a pericarpio y endospermo duro; mientras que la semilla de HS-2 presentó el mayor porcentaje de biomasa seca de endospermo total (Cuadro 3.1). De acuerdo con Serna *et al.* (2008), las semillas más pequeñas tienen una proporción mayor de pericarpio que las grandes, y es una característica heredable, lo que explica la diferencia de pericarpio entre Palomero (semilla de menor tamaño), HS-2 y Cacahuacintle (semilla de mayor tamaño). En el apartado 2.3.4, se mencionan algunos de los resultados obtenidos por otros autores referentes a los componentes de semillas en otras variedades.

Cuadro 3.1. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo sobre las variables de componentes de semilla.

Fuente de variación	G.L.	Pedicelo (%)	Pericarpio (%)	Embrión (%)	Endospermo Suave (%)	Endospermo Duro (%)	Endospermo Total (%)
Genotipo	2	0.4728 *	21.7414 **	7.5917 **	2936.03 **	2883.49 **	2.6808 **
Error	6	0.0553	0.0565	0.1067	3.84	3.79	0.0217
C.V. (%)		10.91	3.82	3.20	4.70	4.89	0.18
R ²		0.74	0.99	0.96	0.99	0.99	0.98
<i>Efectos principales de Genotipo</i>							
Harinoso		2.58 a	4.45 b	11.50 a	76.21 a	5.25 c	81.46 b
Semi-dentado		2.09 ab	4.88 b	10.67 b	33.43 b	48.93 b	82.36 a
Cristalino		1.79 b	9.31 a	8.43 c	15.27 c	65.21 a	80.47 c
DMS 0.05		0.59	0.60	0.82	4.91	4.88	0.37

*, ** significativo con $\alpha = 0.05$ y 0.01 ; NS, no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey).

Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero).

3.3.2. Fuerza y desplazamiento a ruptura

El factor genotipo, representado en tres variedades, tuvo efecto significativo sobre el desplazamiento, la fuerza y energía en el punto de ruptura de la semilla ($P \leq 0.01$), mientras que el contenido de humedad de la semilla tuvo efecto significativo ($P \leq 0.01$) sobre el desplazamiento y la energía de ruptura de la semilla (Cuadro 3.2). La interacción entre Genotipo y Humedad fue significativa para el Desplazamiento, la Fuerza y la Energía, lo que implica que la tendencia de estos valores en función de la humedad fue específica para cada genotipo, como se menciona en el apartado 2.3.5, Cuadro 2.7 y Figura 2.4, Figura 2.5 y Figura 2.6.

En las comparaciones de efectos simples, el genotipo harinoso (Cacahuacintle) registró el mayor desplazamiento y la menor fuerza en ruptura, mientras que el cristalino (Palomero) obtuvo el menor desplazamiento y la mayor fuerza, no difiriendo estadísticamente del semi-dentado (HS-2) en cuanto a desplazamiento (Cuadro 3.2). El genotipo harinoso (Cacahuacintle) registró el valor más alto de la energía necesaria para producir ruptura, a pesar que la fuerza fue menor que en el dentado (HS-2) y el cristalino (Palomero). Asimismo, se requirió más energía para producir ruptura en semillas con alta humedad (20 %) que en semillas con baja humedad (12 %, Cuadro 3.2), lo que se atribuyó a un mayor desplazamiento en el genotipo Cacahuacintle y en la humedad de 20 %, respectivamente. En cambio, Izik e Izli (2007) encontraron que la resistencia mecánica disminuye conforme la humedad de la semilla incrementa; esto se debe principalmente al método usado, ya que estos autores midieron la dureza con un penetrómetro; aunque también puede deberse a una relación no lineal entre la humedad y la fuerza, como en el caso de semillas de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) evaluado en un ensayo de compresión (Baümler *et al.*, 2006). No obstante, los resultados obtenidos en el presente trabajo concuerdan con los obtenidos por Mesquita y Hanna (1993) en soya (*Glycine max* (L.) Merrill), con Bilanski (1966) citado por Mohsenin (1986) en maíz (*Zea mays* L), trigo (*Triticum aestivum* L) y soya, en los cuales se requirió de mayor energía para producir ruptura en semilla con alto contenido de humedad. Además, Mohsenin (1986) y Multon (1981, citado por Foutz *et al.*, 1993) indican que las semillas con

mayor humedad se deforman en mayor magnitud sin llegar a la ruptura, permitiéndoles soportar una mayor cantidad de energía durante la colisión por impacto sin experimentar fractura (Tipler y Mosca, 2005).

En el apartado 2.3.5, se indican algunos de los resultados obtenidos por otros autores referentes al desplazamiento, fuerza y energía obtenidos en ensayos de compresión realizados en semillas de maíz y de otras especies; cabe señalar que considerando los resultados mencionados en dicho apartado, la falta de diferencia significativa de valor de la fuerza entre humedades (Cuadro 3.2), pudo deberse a la interacción y a la tendencia para cada genotipo.

Cuadro 3.2. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía a ruptura.

Fuente de variación	G.L.	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Energía (mJ)
Genotipo (G)	2	0.1835 **	10,073.05 **	1,928.64 **
Humedad (H)	1	1.8452 **	7.91 NS	45,304.40 **
G*H	2	0.0467 **	3,654.35 **	1,457.21 **
Error	13	0.0022	509.63	208.06
C.V. (%)		7.55	7.21	14.92
R ²		0.99	0.81	0.95
<i>Efectos principales de factores</i>				
<i>Genotipo</i>				
Harinoso		0.8264 a	274.71 c	117.61 a
Semi-dentado		0.5499 b	309.07 b	86.48 b
Cristalino		0.5066 b	356.29 a	87.55 b
DMS 0.05		0.07	33.59	21.46
<i>Humedad (%)</i>				
12		0.3279 b	312.52 a	50.33 b
20		0.9520 a	313.81 a	148.12 a
DMS 0.05		0.0467	22.41	14.32

** significativo con $\alpha = 0.01$; NS, no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero).

3.3.3. Caracterización morfológica de daños externos

En la Figura 3.2 se muestran seis semillas de maíz harinoso (Cacahuacintle) correspondientes a las diferentes categorías de la caracterización luego de ser sometidas a compresión. El análisis de varianza presentado en el Cuadro 3.3, muestra que los niveles de Genotipo y los niveles de Ubicación tuvieron efecto significativo ($P \leq 0.01$) sobre la frecuencia de fracturas externas, no así los niveles de humedad ($P \leq 0.07$); en dicho análisis se encontró que hubo interacción entre humedad y ubicación de la fractura, es decir, en cada humedad la frecuencia de fractura no fue la misma para las ubicaciones estudiadas.

El genotipo semi-dentado (HS-2) obtuvo la mayor frecuencia de fracturas, seguido del harinoso (Cacahuacintle) y cristalino (Palomero); a humedad de 20 %, la frecuencia de fracturas fue superior que a humedad de 12 %; la mayor frecuencia de fracturas ocurrió sobre la corona, seguida de la parte media, la base y el embrión (Cuadro 3.3).

Cabe señalar que al igual que la corona, tanto la fractura en la parte media como en la base corresponde a endospermo. Este análisis muestra que sobre el endospermo sucede una mayor cantidad de daño visible que sobre el embrión. El diseño de la semilla proporciona protección mecánica al embrión, pues regularmente posee un mayor espesor en la corona que en la base y existe una depresión sobre el área del embrión; pero aunque se protege el principal órgano metabólico de la semilla (el embrión), la capa de aleurona, que también es importante en el metabolismo inicial de la plántula, sufre las consecuencias del daño al ubicarse sobre el tejido de endospermo (Becraft, 2007); afortunadamente, la capa de aleurona rodea a todo o casi todo el endospermo (Ritchie *et al.*, 2000; Watson, 2003), por lo que el efecto del daño resultó en un bajo índice de vigor, reflejado en el peso seco de la plántula, resultado de una limitada movilización de reservas desde el endospermo, sin ocasionar la muerte de la semilla (Debeaujon *et al.*, 2000 y Downies *et al.*, 2004, citados por Nonogaki *et al.*, 2007; Cicero *et al.* 1998; Ritchie *et al.*, 2000). Cicero *et al.* (1998) sugieren que un análisis de daño mecánico realizado con imágenes procesadas a partir de rayos X, permite una mejor estimación de la calidad fisiológica que las evaluaciones realizadas mediante otras pruebas como verde rápido o yodo; no obstante, en el presente trabajo, se plantearon objetivos para los cuales era necesaria

la evaluación de la proporción del daño externo y la prueba con verde rápido nos permitió caracterizar morfológicamente los daños externos.

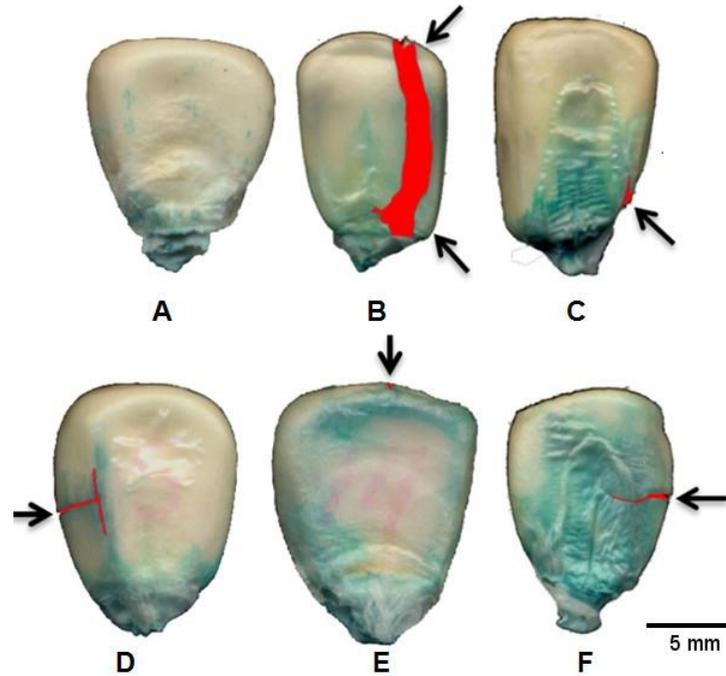


Figura 3.2. Caracterización morfológica de daños externos en Cacahuacintle: **A.** Semilla sin fractura; **B.** Con fractura severa; **C.** Fractura en la base; **D.** Fractura en la parte media; **E.** Fractura en la corona; **F.** Fractura en el embrión. La imagen fue editada (coloreada) para contrastar el área de fractura.

Cuadro 3.3. Cuadrados medios y efectos principales de Humedad, Genotipo y Ubicación de fractura, sobre las frecuencias porcentuales de fractura en semillas comprimidas hasta ruptura.

Fuente de variación	Grados de libertad	Fractura (%)	
Humedad	1	385.96	SIG
Genotipo	2	1,048.69	**
Ubicación	3	14,747.54	**
H*G	2	78.42	NS
H*U	3	777.70	**
G*U	6	161.50	NS
H*G*U	6	134.33	NS
Error	48	110.48	
C.V. (%)		25.51	
R ²		0.91	
<i>Efectos principales de factores</i>			
<i>Genotipo</i>			
Semi-dentado		48.33	a
Harinoso		40.00	b
Cristalino		35.28	b
DMS 0.05		7.3384	
<i>Humedad (%)</i>			
20		43.52	a
12		38.89	b
DMS 0.07		4.5915	
<i>Ubicación</i>			
Corona		82.22	a
Parte media		39.26	b
Base		23.70	c
Embrión		19.63	c
DMS 0.05		9.3246	

SIG y ** significativo con $\alpha = 0.07$ y 0.01 ; NS, no significativo. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero).

Los niveles de Genotipo tuvieron un efecto significativo ($P \leq 0.05$) sobre el índice de daño (Cuadro 3.4), pero los niveles de humedad no tuvieron efecto significativo. El mayor índice de daño se presentó en el genotipo semi-dentado (HS-2), y el menor en el cristalino (Palomero). Se esperaba que el índice de daño reflejaría el desempeño fisiológico de las semillas, donde aquellos tratamientos con un mayor índice de daño presentarían una mayor pérdida de

germinación, pero, según se menciona en el apartado 3.3.6 en los resultados correspondientes a la prueba de Germinación estándar. El índice de daño está basado en la intensidad de daño, donde el daño al embrión y al escutelo (los cuales son, en realidad un solo miembro, embrión) pueden resultar en la pérdida de viabilidad, mientras que el daño a otras áreas de la semilla, simplemente ocasionarían una baja en vigor, puesto que el embrión tiene la capacidad de germinar aún de manera aislada al resto del endospermo, sin embargo, la plántula que produciría tendría un desarrollo o vigor demasiado bajo (Ritchie *et al.*, 2000). En el apartado 3.3.6 se evaluó la pérdida de germinación en semillas comprimidas hasta ruptura en comparación con los tratamientos testigo, los resultados que allí se presentan están relacionados tanto al índice de daño, como a la frecuencia de fractura.

Cuadro 3.4. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo y Humedad sobre el índice de daño.

Fuente de variación	Grados de libertad	Índice de daño
Genotipo (G)	2	17,438.61 *
Humedad (H)	1	1670.81 NS
G*H	2	1452.27 NS
Error	12	3246.65
C.V. (%)		20.73
R ²		0.50
<i>Efectos principales de factores</i>		
<i>Genotipo</i>		
Semi-dentado (HS-2)		327.78 a
Harinoso (Cacahuacintle)		276.67 ab
Cristalino (Palomero)		220.01 b
DMS 0.05		87.7610
<i>Humedad (%)</i>		
12		265.19 a
20		284.45 a
DMS 0.05		58.5240

* significativo con $\alpha = 0.05$; NS, no significativo. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey).

3.3.4. Porcentaje de área fracturada sobre la superficie de la semilla

En la Figura 3.3 se muestran semillas antes y después de ser editadas para analizar las áreas y las proporciones mediante software. Los niveles de Genotipo y de Cara tuvieron un efecto significativo ($P \leq 0.01$ y 0.05 , respectivamente) sobre el porcentaje del área fracturada (Cuadro 3.5). Cacahuacintle presentó el mayor porcentaje de área fracturada; mientras que HS-2 y Palomero no difirieron de manera significativa; este resultado difiere del análisis del índice de daño, donde HS-2 obtuvo el valor más alto (Cuadro 3.4). Por su parte, la superficie ventral tuvo un mayor porcentaje de área fracturada que la dorsal (Cuadro 3.5), lo cual pudo atribuirse, además del diseño de la semilla, a la manera en que se aplicó la compresión, ya que el plato en movimiento se desplazó hacia la superficie ventral de la semilla. Cabe resaltar que el tejido embrionario se ubica más cercano respecto a la superficie ventral que respecto a la dorsal.

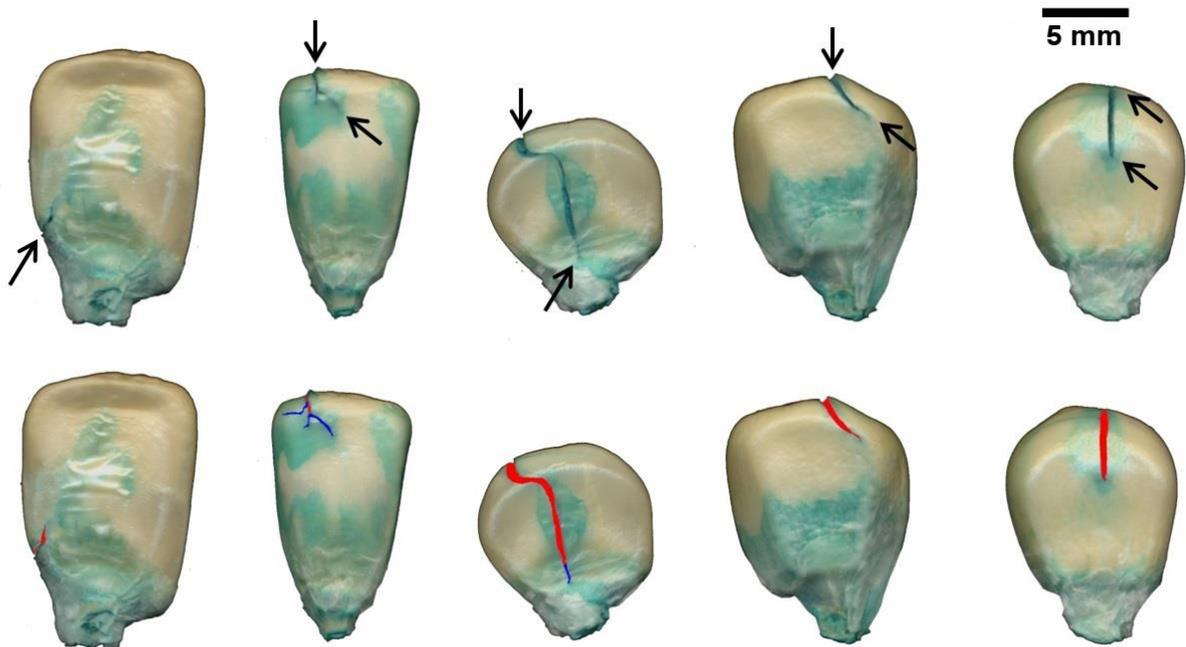


Figura 3.3. Semillas de maíz Cacahuacintle con 12 % de humedad coloreadas para determinar la proporción del área de fractura mediante el software ImageJ 1.47v.

Todas las semillas se sometieron al mismo nivel de compresión (ruptura), pero el desplazamiento y la fuerza aplicada no fueron necesariamente iguales para cada tratamiento y para cada semilla dentro de un mismo tratamiento. Las diferencias en porcentaje de área fracturada se atribuyen a las propiedades mecánicas de cada genotipo; produciéndose un tipo de falla particular, donde uno de los factores pudo ser la velocidad con la que se propaga la falla (Ashby y Jones, 2009; Callister, 1995). Las propiedades mecánicas se vieron afectadas, pues el genotipo y los componentes de la semilla, su proporción y arreglo geométrico: endospermo duro y suave, embrión y pericarpio, tuvieron una gran influencia.

Cuadro 3.5. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo, Humedad y Cara de la semilla, sobre el porcentaje de área fracturada.

Fuente de variación	Grados de libertad	Área fracturada (%)	
Humedad (H)	1	0.3080	NS
Genotipo (G)	2	1.1296	**
Cara (C)	1	1.0438	*
H*G	2	0.0616	NS
H*C	1	0.4830	NS
G*C	2	0.2977	NS
H*G*C	2	0.3675	NS
Error	24	0.1672	NS
C.V. (%)		49.44	
R ²		0.58	
<i>Efectos principales de factores</i>			
<i>Genotipo</i>			
Harinoso (Cacahuacintle)		1.18	a
Semi-dentado (HS-2)		0.71	b
Cristalino (Palomero)		0.60	b
DMS 0.05		0.4168	
<i>Cara</i>			
Ventral		1.00	a
Dorsal		0.66	b
DMS 0.05		0.2813	

* y ** significativo con $\alpha = 0.05$ y 0.01 ; NS, no significativo. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey).

3.3.5. Microestructura de ruptura y separación celular

Endospermo

El análisis realizado a la microestructura de endospermo observada en Microscopía Electrónica de Barrido MEB, mostró que la fractura tisular estuvo compuesta principalmente por ruptura celular y, en menor proporción, por separación celular (Cuadro 3.6). El endospermo, excluyendo la capa de aleurona, está conformado por células que almacenan carbohidratos, lípidos y proteínas y mueren a la madurez de la semilla (Ritchie *et al.*, 2000), por consiguiente, la ruptura celular puede representar únicamente algunos cambios en los compuestos de almacenamiento, especialmente si tiene intercambio de gases directamente con la atmósfera, pues el oxígeno podría desnaturalizar algunos compuestos como las proteínas y los lípidos al ser expuestos a radicales libres, ocasionando efectos de envejecimiento (Smith y Berjak, 1995; Schwember y Bradford, 2011), además de la exposición de las reservas al ataque de patógenos (Mycock y Berjak, 1995). Aunque la pared celular brinda integridad y regularmente confiere resistencia mecánica (Lucas *et al.*, 2000), en el caso de las células de endospermo, las paredes son muy delgadas (310 nm de espesor en un par de paredes adyacentes, Figura 3.8 D) y no dan resistencia (Watson, 2003) en comparación con la pared celular de otros tejidos. Es probable que debido a ello se presentó una mayor proporción de ruptura celular. Es común que en estudios realizados donde se provocan fracturas de manera artificial, al observar la microestructura del endospermo, éste presenta una alta proporción de granos de almidón expuestos (véase, por ejemplo, los estudios realizados por Narváez *et al.*, 2007b; Gaytán *et al.*, 2006 y Moreira-De Carvahlo *et al.*, 1999).

La humedad tuvo efecto significativo ($P \leq 0.08$) sobre la proporción de área de endospermo con pared celular (equivalente a área con separación celular); el genotipo no tuvo efecto significativo sobre dicha proporción (Cuadro 3.7). A humedad de 12 % se tuvo una mayor proporción de área con separación celular, en comparación con 20 % de humedad, no obstante, en ambos casos el porcentaje resultó muy bajo (inferior a 20 %). La menor proporción de área con separación celular podría atribuirse a la hidratación de la pared celular en el endospermo, haciéndola más frágil a la ruptura (Ziegler, 1995), pues de otro modo, se habría esperado mayor resistencia al incrementarse su capacidad de deformación como lo mencionan Mohsenin (1986).

Cuadro 3.6. Cuadrados medios y comparación de medias entre proporción de área con ruptura celular y proporción de área con separación celular en células de endospermo.

Fuente de variación	Grados de libertad	Área (%)
Clasificación	1	160,295.86 **
Error	88	252.75
C.V. (%)		31.80
R ²		0.89
<i>Comparación de medias</i>		
<i>Clase de daño</i>		
Ruptura celular		92.20 a
Separación celular		7.80 b
DMS 0.05		6.66

**, significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey).

Cuadro 3.7. Cuadrados medios y efectos principales de genotipo y humedad sobre las proporciones de área de endospermo con pared celular expuesta.

Fuente de variación	Grados de libertad	Proporción de área con pared celular (%)
Humedad (H)	1	1093.00 SIG
Genotipo (G)	2	280.97 NS
H*G	2	407.91 NS
Error	23	323.15
C.V. (%)		154.30
R ²		0.25
<i>Efectos principales</i>		
<i>Humedad (%)</i>		
12		18.01 a
20		5.72 b
DMS 0.08		12.24

SIG, significativo con $\alpha = 0.08$; NS, no significativo. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey).

En la Figura 3.4 D, correspondiente al genotipo semi-dentado, HS-2, comprimido a 12 % de humedad, se observan rupturas celulares denotadas por la exposición de granos de almidón y la ubicación del límite celular, pared celular y el contorno de la fractura celular. En la Figura 3.4 C se observó un patrón sobre la superficie fracturada que pudiera representar las trayectorias de los esfuerzos principales, el cual está asociado a la forma y orientación de las células de endospermo duro; dicho patrón es casi perpendicular a la dirección de aplicación de la fuerza (Figura 3.4 A, B y C), lo que se aproxima a la teoría indicada por Popov (1976), en la que se dedujo que la fractura ocurriría de manera perpendicular a la trayectoria de los esfuerzos principales (Figura 1.11). Aunque el patrón de falla observado pudo deberse más bien al arreglo celular, los esfuerzos principales siempre explican la dirección y ubicación de la falla (Popov, 1976).

En la Figura 3.5 D, correspondiente al genotipo cristalino, Palomero, comprimido a 12 % de humedad, se observan células con pared y células con gránulos de almidón expuesto, ubicadas en área de endospermo duro, cerca de la zona central de la semilla. Hay que enfatizar que en este último grupo de células, el desprendimiento de pared no fue completo sino parcial en cada célula, como lo observado en la Figura 3.4 C y D y Figura 3.7 D; esto puede deberse al arreglo celular, ya que en estas micrografías, las células están alternadas sobre la superficie, mientras que en la Figura 3.5 las fronteras celulares se ubicaban sobre el mismo plano.

En la Figura 3.5 E y F, correspondiente al genotipo cristalino, Palomero, comprimido a 12 % de humedad, se aprecian total o parcialmente nueve células separadas, lo cual se deduce por la presencia de los contornos celulares, y de la ausencia de amiloplastos (granos de almidón) y otros leucoplastos sobre la superficie observada, así como por la presencia de una cubierta continua que muy probablemente corresponde a la superficie interna y/o externa de la pared celular.

En la Figura 3.6 B, correspondiente al genotipo cristalino, Palomero, comprimido a 12 % de humedad, se observa una envoltura fina o restos de ella alrededor de los granos de almidón (amiloplastos), que corresponde a la membrana lipoproteica característica de los genotipos conocidos como cerosos y palomeros (Bewley y Black, 1978); los amiloplastos de estas

superficies están rodeados también por unos gránulos más pequeños (Figura 3.6 D) que pudieran ser también de almidón, proteína u otras sustancias (Bewley y Black, 1978); al respecto, Narváez *et al.* (2007) menciona que en razas de maíz palomero predominan los gránulos de almidón pequeño ($< 12 \mu\text{m}$) de forma hexagonal y rodeados de una densa matriz proteica.

En la Figura 3.7, correspondientes al genotipo harinoso, Cacahuacintle, comprimido a 12 % de humedad, se observan superficies correspondientes a límites celulares *lc* (superficie interna o externa de pared celular) y superficies con granos de almidón *ga* expuestos.

En la Figura 3.8 B, correspondiente al genotipo semi-dentado, HS-2, comprimido a 12 % de humedad, se observan células de almidón suave; una mayor frecuencia de ruptura celular está representada por la proporción grande de granos de almidón expuestos.

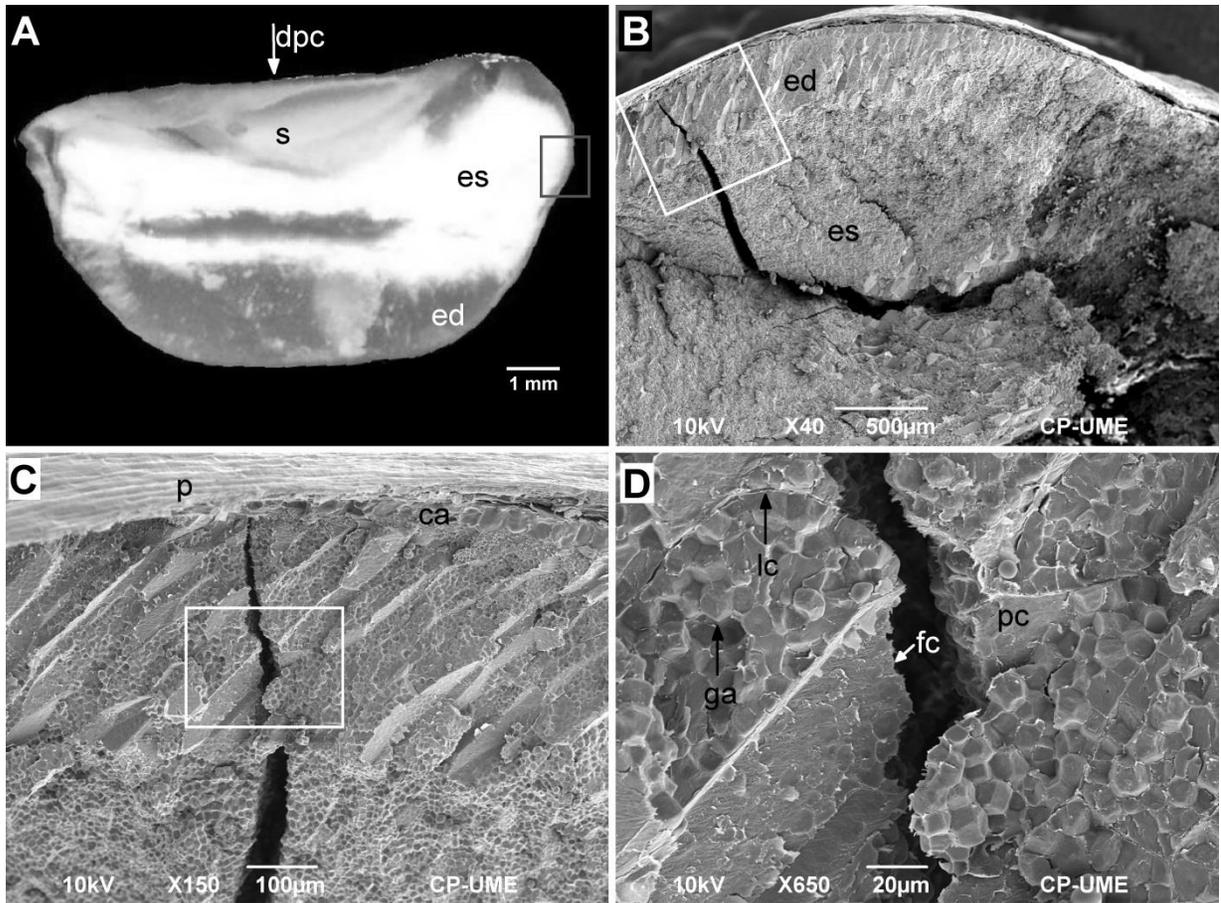


Figura 3.4. Micrografías electrónicas de Barrido MEB de fracturas internas en una semilla de maíz semi-dentado (HS-2) con 12 % de humedad sometida a compresión: **A.** Posición de la semilla al momento del ensayo; la flecha indica la dirección de desplazamiento del plato de compresión “dpc”, se muestra la zona del escutelo “s”, el endospermo suave “es” y duro “ed”; **B.** Micrografía electrónica perpendicular (90°) al recuadro en A donde se muestra superficie de la fractura; **C.** Detalle del recuadro en B (a 45°), donde se aprecia la orientación de las células periféricas de endospermo, así como el pericarpio “p” y la capa de aleurona “ca”, y **D.** Detalle del recuadro en C, donde se aprecian los granos de almidón “ga”, el límite celular “lc”, una fractura celular “fc” y porción de la pared celular “pc”.

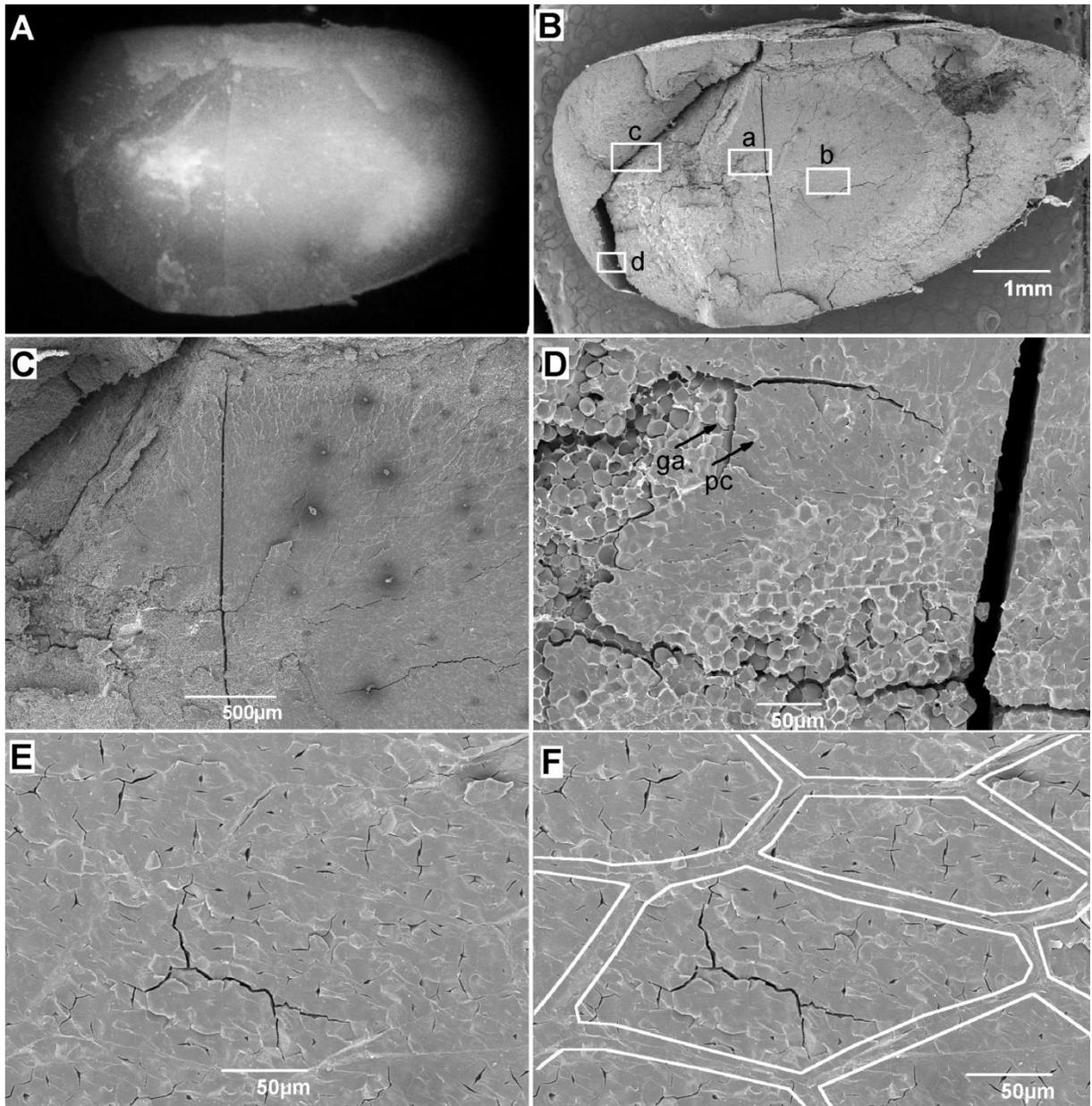


Figura 3.5. Micrografías Electrónicas de Barrido de fracturas internas en una semilla de maíz cristalino (Palomero) con 12 % de humedad sometida a compresión: **A.** Posición de la semilla al momento del ensayo; **B.** Micrografía donde se muestra la superficie de la fractura; **C.** Aumento de B; **D.** Recuadro “a” en B, en la zona de endospermo duro, donde se observan granos de almidón “ga” y pared celular “pc”; **E.** Recuadro “b” en B, en la zona de endospermo duro, se aprecia la ausencia de granos de almidón expuestos, por lo que se asume que la superficie corresponde a pared celular, y **F.** Contornos de las células del área en E.

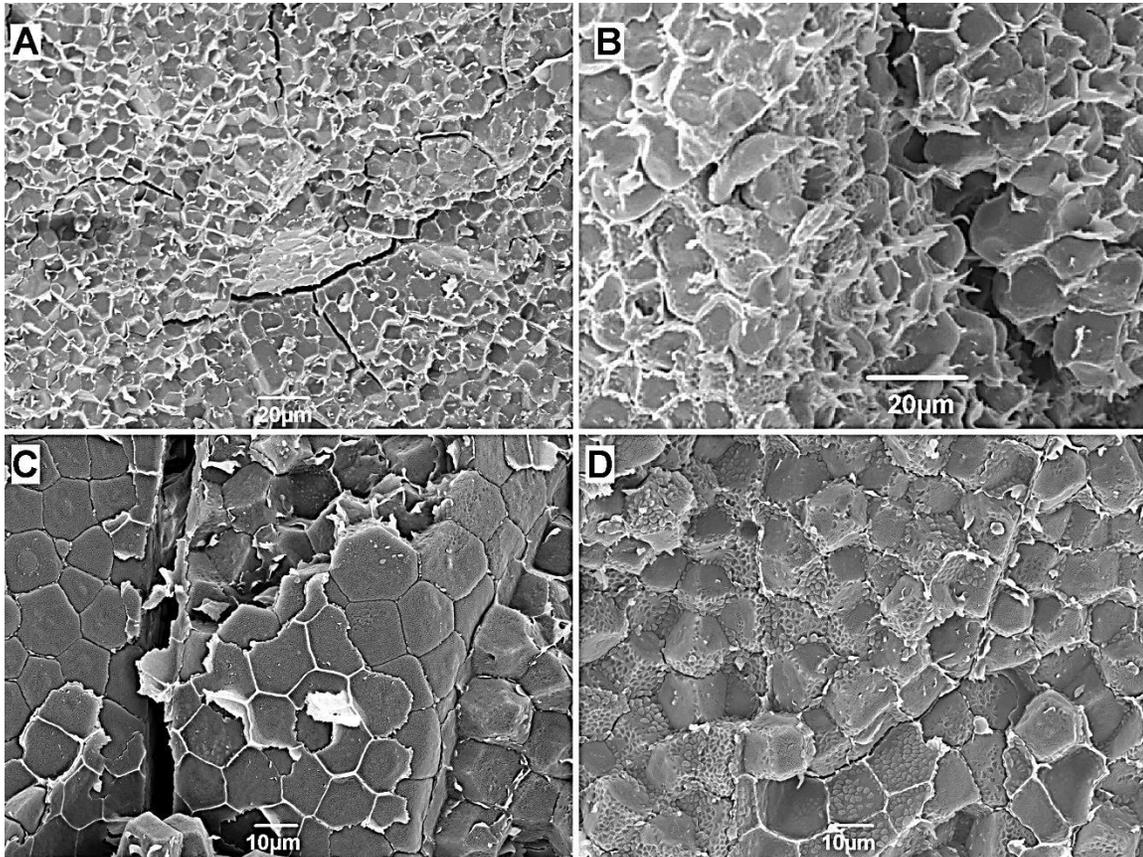


Figura 3.6. Micrografías Electrónicas de Barrido de fracturas internas en una semilla de maíz cristalino (Palomero) con 12 (A y B) y una con 20 % (C y D) de humedad sometidas a compresión: **A.** Recuadro “c” en la Figura 3.5 B, **B.** Recuadro “d” en la Figura 3.5 B, nótese la estructura que rodea a los granos de almidón correspondiente a la matriz proteica que le da al endospermo la apariencia compacta típica del endospermo cristalino; **C.** Células con restos de pared celular y granos de almidón con restos de la matriz de proteína; **D.** Granos de almidón rodeados de una densa matriz proteica.

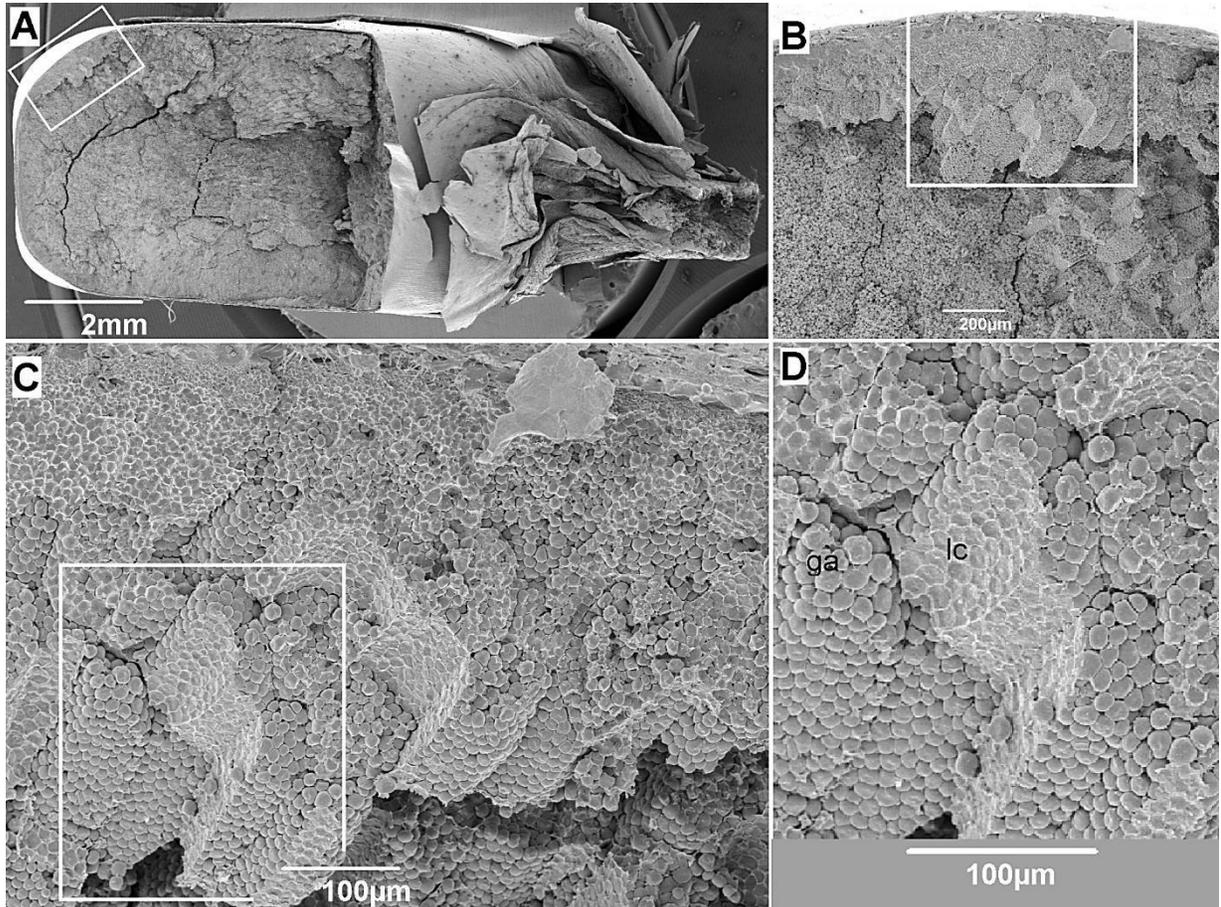


Figura 3.7. Micrografías Electrónicas de Barrido donde se observa el detalle de la superficie de fractura en la zona cercana al pericarpio en una semilla de maíz harinoso (Cacahuacintle) con 12 % de humedad sometida a compresión: **A.** En la posición mostrada, el embrión se ubica en la parte superior, el recuadro muestra el área de fractura provocada durante el ensayo de compresión, el resto se fracturó al separar la semilla utilizando unas pinzas; **B.** Aumento del recuadro en A; **C.** Aumento de B; **D.** Aumento de C, donde se observan superficies de límites celulares “lc” o pared celular, y de granos de almidón “ga”.

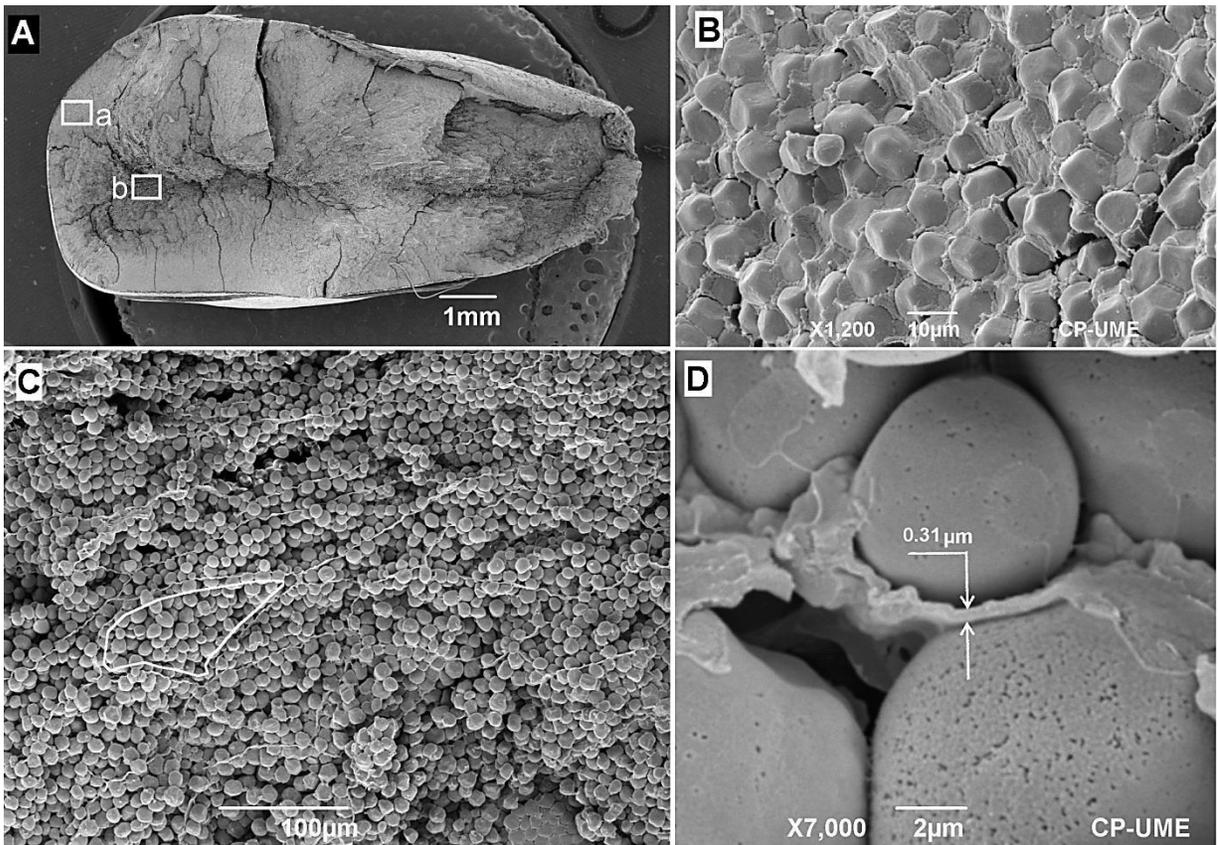


Figura 3.8. Micrografías Electrónicas de Barrido de fracturas internas en una semilla de maíz semi-dentado (HS-2) con 12 % de humedad sometida a compresión: **A.** Vista panorámica; **B.** Recuadro “a” en A, mostrando endospermo duro con granos de almidón rodeados de una densa matriz proteica; **C.** Recuadro “b” en A, mostrando endospermo suave, se observan los límites celulares, los granos de almidón y la ausencia de pared celular sobre esta superficie; **D.** Endospermo suave mostrando paredes celulares al centro y tres granos de almidón de la célula superior y dos de la inferior.

Aleurona y pericarpio, embrión y escutelo

A nivel microestructural, las fracturas de la aleurona y endospermo presentaron principalmente ruptura celular y en menor proporción, separación celular (Cuadro 3.8). Sobre la superficie de la fractura de semillas del híbrido HS-2 y del Palomero, en células de la capa de aleurona, se observó la presencia de unas fibrillas que corresponden a cristales de carbonato de calcio (Figura 3.9 A, flecha f). No se determinó la proporción de ruptura y separación celular para el pericarpio, pues las observaciones se centraron en endospermo, aleurona y embrión.

A pesar de que el grosor de la pared celular en células de la capa de aleurona fue superior al grosor de pared celular de otras células de endospermo, la ruptura celular superó a la separación celular. Es probable que las sustancias cementantes confieran una mayor resistencia a la proporcionada por la pared celular, ocasionando que en la ruptura de tejido ocurriera mayor proporción de ruptura que de separación celular. Similar a lo que ocurre durante la molienda, donde la ruptura celular en las células de la capa de aleurona es común (Watson, 2003).

La compresión aplicada no ocasionó fractura en tejido embrionario (embrión y escutelo), y aunque la semilla se fracturó artificialmente a partir de la fractura ocasionada sobre tejido de endospermo, no se apreció daño o fractura a nivel tisular ni celular en el tejido embrionario y escutelo (Figura 3.9 C y D), por lo que no se determinó la proporción de ruptura y separación celular para estos tejidos. Uno de los factores que permite al embrión librarse de las fracturas propagadas desde el endospermo, es la capacidad de deformación, que permite disipar la energía que ocasiona la fractura, lo cual se atribuye en gran parte a que su humedad es mayor que la del endospermo (Tipler y Mosca, 2005; Callister, 1995; Ashby y Jones, 2009).

Cuadro 3.8. Cuadrados medios y comparación de medias entre proporción de área con ruptura celular y proporción de área con separación celular en células de la capa de aleurona.

Fuente de variación	Grados de libertad	Área (%)
Clasificación	1	57,002.50 **
Error	38	295.99
C.V. (%)		34.41
R ²		0.84
<i>Comparación de medias</i>		
<i>Clase de daño</i>		
Ruptura celular		87.75 a
Separación celular		12.25 b
DMS 0.05		11.01

** , significativo con $\alpha = 0.01$. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey).

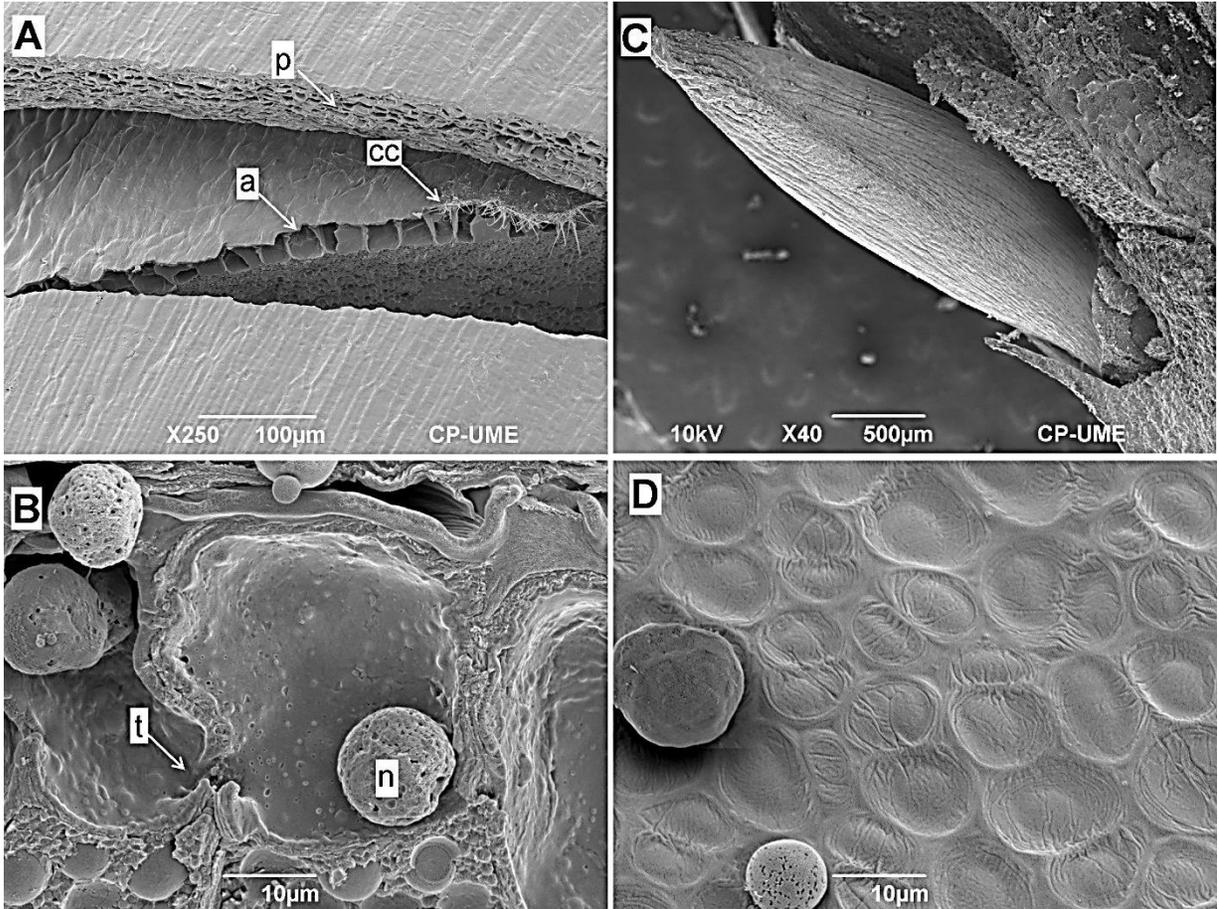


Figura 3.9. Micrografías Electrónicas de Barrido de fractura en células de una semilla de maíz semi-dentado (HS-2) a 12 % de humedad (A y C) y harinoso (Cacahuacintle) a 20 % de humedad (B y D): **A.** Pericarpio “p” y capa de aleurona “a”, se muestran cristales de carbonato de calcio “cc” (EDS); **B.** Célula de aleurona que muestra una posible punteadura “t” entre dos células y el núcleo “n”; **C.** Eje embrionario, sin presentar daño y **D.** Superficie del escutelo, mostrando células redondas sin presentar daño.

3.3.6. Evaluación de la calidad fisiológica

Conductividad eléctrica

El análisis de varianza mostró que el Genotipo, el Contenido de humedad y el Nivel de compresión, tuvieron efecto significativo ($P \leq 0.01$) sobre la conductividad eléctrica (Cuadro 3.9). El genotipo cristalino (Palomero) obtuvo el mayor valor de CE, mientras que no hubo diferencia significativa entre los genotipos semi-dentado (HS-2) y harinoso (Cacahuacintle), lo que indica que Palomero tenía un mayor grado de deterioro. La CE fue inferior a humedad de 20 %; lo cual puede deberse a una pérdida inicial de solutos durante la hidratación previa en semillas comprimidas a 20 % (Bewley y Black, 1994), si bien todas las evaluaciones se realizaron a la misma humedad después de un periodo de reposo de aproximadamente 45 días. El valor de CE fue casi el doble en semillas comprimidas, comparadas con aquellas sin comprimir, se cree que esas semillas comprimidas son un mayor atractivo a los patógenos y/o exhiban un desarrollo pobre de la plántula (Bewley y Black, 1994).

Cuadro 3.9. Cuadrados medios de Genotipo, Humedad y Compresión, sobre conductividad eléctrica.

Fuente de variación	Grados de libertad	CE ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)	
Genotipo (G)	2	92.96	**
Humedad (H)	1	140.90	**
Compresión (K)	1	951.52	**
G*H	2	0.46	NS
G*K	2	18.80	*
H*K	1	2.28	NS
G*H*K	2	8.19	NS
Error	24	5.23	
C.V. (%)		14.03	
R ²		0.91	
<i>Efectos principales</i>			
<i>Genotipo</i>			
Cristalino		19.45	a
Semi-dentado		15.27	b
Harinoso		14.17	b
DMS 0.05		2.33	
<i>Humedad (%)</i>			
12		18.27	a
20		14.32	b
DMS 0.05		1.57	
<i>Compresión</i>			
Ruptura		21.44	a
Sin comprimir		11.15	b
DMS 0.05		1.57	

* y **, significativo con $\alpha = 0.05$ y 0.01 . NS, no significativo. Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero).

Plántulas normales, velocidad de germinación y materia seca en la prueba de Germinación estándar

Los análisis de varianza mostraron que el Genotipo, el Contenido de humedad y el Nivel de compresión, tuvieron efecto significativo sobre la germinación estándar, materia seca de la plántula (peso y porcentaje), biomasa seca de plúmula (%) y velocidad de emergencia; el porcentaje de biomasa seca de la radícula fue afectado solamente por el genotipo y por el nivel de compresión (Cuadro 3.10). La mayor calidad fisiológica de la semilla, evaluada mediante la germinación estándar y porcentaje de biomasa seca de plántula, de plúmula y de radícula, se obtuvo en el genotipo semi-dentado (HS-2), seguido del harinoso (Cacahuacintle), los cuales no fueron estadísticamente diferentes; la mayor biomasa seca de plántula y la mayor velocidad de emergencia de la radícula se obtuvieron en Cacahuacintle y HS-2 (Cuadro 3.10). Una mayor velocidad de emergencia radicular en Cacahuacintle podría atribuirse a la mayor degradación y disponibilidad del almidón en el endospermo suave, el cual se encuentra en mayor proporción en este genotipo, y en general, a una menor resistencia mecánica de la protrusión radicular, con respecto al endospermo cristalino de los otros dos genotipos. En las semillas con humedad de 20 % se observó una mayor velocidad de emergencia de la radícula, lo que puede atribuirse al osmoacondicionamiento brindado por esa hidratación previa (Marín *et al.*, 2007). Las semillas sometidas a ruptura por su parte, también ocasionaron una mayor velocidad en la emisión radicular (Cuadro 3.10).

Los valores de velocidad de emisión radicular no estuvieron estadísticamente correlacionados con la germinación ($\rho = 0.16$, p-valor = 0.35), y su inclusión como indicador de calidad fisiológica puede resultar en una interpretación ambigua en este caso particular.

La calidad fisiológica, evaluada mediante germinación estándar, fue mayor en semillas con 12 % de humedad y sin sufrir compresión (Cuadro 3.10). Aunque el peso seco de la plántula difirió entre los tres genotipos, el porcentaje correspondiente no tuvo diferencia significativa entre Cacahuacintle y HS-2 (Cuadro 3.10); la discrepancia entre el peso seco y el porcentaje de peso seco de la plántula se debe a la diferencia en peso total de la semilla, la cual es mayor en Cacahuacintle (Datos no mostrados, aunque se pueden inferir a partir del Cuadro A.13).

Cuadro 3.10. Cuadros medios y efectos principales de Genotipo, Humedad y Compresión, sobre variables de calidad fisiológica.

Fuente de variación	Grados de libertad	Germinación (%)	Peso seco de plántula (g)	Peso seco de plántula (%)	Peso seco de plúmula (%)	Peso seco de radícula (%)	Velocidad de emergencia de radícula
Genotipo	2	3867.15 **	6.3698 **	1842.68 **	754.30 **	244.52 **	54.88 **
Humedad	1	517.18 **	0.3516 **	37.54 *	19.60 *	2.89 NS	31.30 **
Compresión	1	8206.85 **	10.3593 **	2749.95 **	986.80 **	442.12 **	3.57 **
G*H	2	208.64 **	0.1438 **	2.94 NS	1.44 NS	0.32 NS	4.51 **
G*K	2	168.85 *	1.5827 **	218.83 **	82.71 **	32.83 **	22.06 **
H*K	1	1005.21 **	0.3364 **	139.08 **	41.90 **	28.30 **	47.46 **
G*H*K	2	168.19 *	0.0615 **	23.27 NS	11.95 NS	1.93 NS	0.70 NS
Error	24	31.47	0.0072	8.32	4.57	1.14	0.40
C.V. (%)		8.00	7.65	10.03	11.36	10.73	8.34
R ²		0.96	0.99	0.97	0.96	0.97	0.96
<i>Efectos principales de factores</i>							
<i>Genotipo</i>							
Harinoso		78.91 a	1.6918 a	35.34 a	22.46 a	12.88 a	9.20 a
Semi-dentado		81.95 a	1.3433 b	36.48 a	24.26 a	12.22 a	8.48 b
Cristalino		49.44 b	0.2922 c	14.47 b	9.72 b	4.75 b	5.18 c
DMS 0.05		5.72	0.0865	2.94	2.18	1.09	0.65
<i>Humedad (%)</i>							
12		73.89 a	1.2079 a	29.78 a	19.55 a	10.23 a	6.69 b
20		66.31 b	1.0103 b	27.74 b	18.07 b	9.67 a	8.55 a
DMS 0.05		3.86	0.0584	1.99	1.47	0.74	0.44
<i>Compresión</i>							
0		85.20 a	1.6455 a	37.50 a	24.05 a	13.45 a	7.30 b
Ruptura		55.00 b	0.5727 b	20.02 b	13.56 b	6.45 a	7.93 a
DMS 0.05		3.86	0.0584	1.99	1.47	0.74	0.44

* y ** significativo con $\alpha = 0.05$ y 0.01 , respectivamente; NS, no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey). Los genotipos son: harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero).

El índice de daño se propuso con la finalidad de estimar la pérdida de calidad fisiológica de las semillas, ya que este índice consideró la ubicación y gravedad de la fractura; de este modo, el genotipo que sufriría mayor pérdida de calidad fisiológica sería el HS-2, pues este presentó el mayor índice de daño (Cuadro 3.4) y la mayor frecuencia de fracturas (Cuadro 3.3), mientras que el genotipo con menor pérdida sería el Palomero, pues este genotipo obtuvo los menores valores de índice de daño y frecuencia de fracturas; sin embargo, la mayor pérdida se obtuvo en Palomero a 20 % y 12 % de humedad, seguidas de las obtenidas en los otros dos genotipos a 20 % de humedad, y las menores en HS-2 y Cacahuacintle a 12 % de humedad (Cuadro 3.11).

El híbrido HS-2 sufrió la menor pérdida en germinación debido al vigor híbrido, o bien, el índice de daño no fue el mejor predictor de daño fisiológico, y quizá sea conveniente considerar la técnica recomendada por Cicero *et al.* (1998), aunque el primer argumento parece más adecuado para este estudio, ya que, en efecto, al vigor de dicho híbrido es superior dentro de los tres genotipos estudiados, mientras que la semilla de Palomero, al haberse adquirido en una casa comercial, no tuvo el cuidado adecuado para mantener su calidad fisiológica, pese a que inicialmente (al momento de la compra, correspondiente a la fecha de cosecha de los otros dos genotipos) su germinación estándar fue superior a 90 %.

En semillas comprimidas a ruptura, la proporción de área con ruptura celular fue por mucho superior al área con separación celular en las semillas sometidas a ruptura; y se asume que las células con ruptura sufrieron desnaturalización en sus compuestos metabólicos y de reserva (Smith y Berjak, 1995; Schwember y Bradford, 2011), aunado a la reducción de la capacidad de translocación de nutrientes e interrupción de señalización para la secreción de enzimas (Jones, 1995; Cicero *et al.*, 1998; Moreira de Carvahlo *et al.*, 1998; Desai *et al.*, 1997; Ziegler, 1995); y pudieron existir otros factores, como una mayor invasión de patógenos (Mycock y Berjak, 1995; Tuite *et al.*, 1985; Desai *et al.*, 1997), resultando en germinación anormal o pérdida de viabilidad. De acuerdo a los resultados obtenidos, el embrión no sufrió daño directo ocasionado por la compresión, pero su desarrollo posterior en una plántula pudo verse afectado por los anteriores factores.

Cuadro 3.11. Reducción de germinación en semillas comprimidas a ruptura en comparación con los tratamientos testigo.

Humedad	Variedad	Germinación promedio de testigos (%)	Germinación en ruptura (%)			Reducción de germinación (%)	
			R1	R2	R3		
12 %	Cacahuacintle	93.33	70.00	86.67	83.33	14.28	b
	HS-2	91.11	80.00	83.33	80.00	10.98	b
	Palomero	66.67	26.67	30.00	36.67	53.34	a
20 %	Cacahuacintle	94.52	40.00	43.33	60.00	49.45	a
	HS-2	95.56	56.67	56.67	66.67	37.21	a
	Palomero	70.00	33.33	33.33	23.33	57.14	a

Medias con letra distinta difieren estadísticamente (Tukey, 0.05).

Plántulas normales, su longitud, peso seco e índice de vigor en la prueba de Frío

Los análisis de varianza mostraron que el Genotipo, el Contenido de humedad y el Nivel de compresión, tuvieron efecto significativo ($P \leq 0.07$) sobre el porcentaje de germinación y longitud total, y altamente significativo ($P \leq 0.01$) sobre la materia seca de la plántula (peso y porcentaje), biomasa seca de plúmula y radícula (%) e índice de vigor en base al peso y la germinación IVMS; en cuanto a el índice de vigor en base a la longitud de la plántula y el porcentaje de germinación IVL, sólo se tuvo variación significativa ocasionada por los niveles de genotipo y de compresión (Cuadro 3.12).

La germinación más alta se obtuvo en el genotipo semi-dentado (HS-2), mientras que el genotipo cristalino (Palomero), obtuvo la menor germinación; a 20 % de humedad se obtuvo la mayor germinación, lo que contrasta con el resultado obtenido en la evaluación de germinación estándar; la germinación en ruptura fue inferior a la de los testigos.

El genotipo semi-dentado (HS-2) obtuvo los valores más altos de longitud y porcentaje de peso seco de plántula, entre otros indicadores de vigor; aunque la germinación fue mayor a humedad de 20 %, a 12 % se obtuvieron los valores más altos en todos los indicadores de vigor (longitud y peso seco de plántula, y porcentaje del peso seco de plántula, plúmula y radícula, y los dos índices de vigor basados en la germinación, longitud y materia seca, IVL e IVMS). Todos los indicadores de vigor fueron significativamente inferiores en las semillas sometidas a ruptura.

Considerando la evaluación de calidad fisiológica en la prueba de germinación estándar y en la prueba de frío, cabe destacar que aunque a humedad de 12 % la mayoría de las variables indicadoras de vigor fueron superiores (a excepción de velocidad de germinación y germinación en la prueba de frío), a humedad de 20 % la energía aplicada fue casi el triple (148 vs 50 mJ, Cuadro 3.2).

Considerando únicamente los porcentajes de germinación en la prueba de Germinación estándar y Frío, dado que la germinación no tuvo una tendencia uniforme respecto a la Humedad en ambas pruebas, se especula que el manejo poscosecha a una humedad mayor o menor no afectará de manera decisiva su calidad fisiológica, y se pueden realizar incluso a humedad de 22 % como lo mencionan Brooker *et al.* (1974), y quizá a humedades mayores, debiéndose tener cuidado únicamente en el aspecto concerniente a la resistencia mecánica y al periodo de tiempo en que la semilla puede mantenerse a una humedad alta.

Cuadro 3.12. Cuadrados medios y efectos principales de Genotipo, Humedad y Compresión, sobre la calidad fisiológica (prueba de frío).

Fuente de variación	Grados de libertad	Germinación (%)	Longitud de plántula (cm)	Peso seco de plántula (g)	Peso seco de plántula (%)	Peso seco de plúmula (%)	Peso seco de radícula (%)	IVL	IVMS
Genotipo	2	10451.99 **	165.09 **	5.2704 **	1378.62 **	204.31 **	529.47 **	1097.53 **	4.7680 **
Humedad	1	364.94 SIG	16.52 SIG	0.3975 **	1095.17 **	89.33 **	558.93 **	2.11 NS	0.4066 **
Compresión	1	2704.69 **	356.27 **	6.4794 **	2051.79 **	434.93 **	597.40 **	643.13 **	6.3060 **
G*H	2	133.77 NS	26.67 **	0.1272 **	137.59 **	21.89 **	50.85 **	38.08 *	0.1371 *
G*K	2	191.05 NS	40.99 **	1.5040 **	288.34 **	76.85 **	71.38 **	87.97 **	1.6226 **
H*K	1	1096.93 **	253.82 **	0.8476 **	424.64 **	103.87 **	108.47 **	330.76 **	0.9863 **
G*H*K	2	84.62 NS	30.98 **	0.1102 **	21.46 *	9.40 **	2.48 NS	48.05 **	0.1980 **
Error	24	101.03	4.18	0.0126	5.76	1.04	3.13	7.39	0.0299
C.V. (%)		15.97	8.00	11.79	8.17	10.13	9.18	15.72	21.89
R ²		0.91	0.92	0.99	0.98	0.98	0.97	0.95	0.97

Efectos principales de factores

<i>Genotipo</i>											
Harinoso		76.36 a	25.96 b	1.3611 a	32.04 b	11.67 b	20.37 b	20.98 b	1.17 a		
Semidentado		83.33 a	29.02 a	1.3117 a	38.48 a	13.16 a	25.31 a	24.47 a	1.14 a		
Cristalino		29.09 b	21.64 c	0.1893 b	17.55 c	5.39 c	12.16 c	6.44 c	0.06 b		
DMS 0.05		10.25	2.09	0.1146	2.45	1.04	1.80	2.77	0.18		

<i>Humedad (%)</i>											
12		59.74 b	26.22 a	1.0591 a	34.87 a	11.65 a	23.22 a	17.54 a	0.90 a		
20		66.11 a	24.87 b	0.8489 b	23.84 b	8.50 b	15.34 b	17.06 a	0.68 b		
DMS 0.05		---	---	0.0773	1.65	0.70	1.22	1.87	0.1189		
DMS 0.07		6.35	1.30	---	---	---	---	---	---		

<i>Compresión</i>											
0		71.60 a	28.68 a	1.3783 a	36.91 a	13.55 a	23.36 a	21.53 a	1.21 a		
Ruptura		54.26 b	22.40 b	0.5298 b	21.81 b	6.60 b	15.21 b	13.07 b	0.37 b		
DMS 0.05		6.92	1.41	0.0773	1.65	0.70	1.22	1.87	0.1189		

**, * y SIG significativo con $\alpha = 0.01, 0.05$ y 0.07 , respectivamente; NS, no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey). IVL e IVMS, índice de vigor obtenido correspondiente al producto de Germinación con longitud de plántula y peso seco de plántula, respectivamente. Los genotipos son harinoso (Cacahuacintle), semi-dentado (HS-2) y cristalino (Palomero).

3.4. CONCLUSIONES

En las semillas comprimidas hasta el punto de ruptura, la frecuencia de fractura en la superficie sobre el embrión fue menor a la observada en la superficie sobre el endospermo, siendo la zona de la corona la que mayor frecuencia de fractura presentó.

Ni la frecuencia de fractura sobre la superficie externa de la semilla, ni el índice de daño estuvieron totalmente relacionados a la proporción de endospermo duro, aunque hubo diferencias significativas entre genotipos.

La frecuencia de fractura fue superior en semillas con mayor humedad, aunque ni el índice de daño, ni la proporción de área fracturada difirió significativamente entre las dos humedades estudiadas (12 y 20 %).

En la microestructura del endospermo y del pericarpio se observó tanto ruptura como separación celular; donde la proporción de área con ruptura celular fue significativamente superior a la correspondiente a separación celular.

No se observó fractura ni separación celular en tejido embrionario debido a que la compresión aplicada no ocasionó daño sobre este tejido.

No hubo diferencia significativa de ruptura celular entre genotipos (o tipo de endospermo), pero sí entre humedades ($\alpha = 0.08$), donde la proporción del área con ruptura celular fue superior a baja humedad (12 %).

La proporción de endospermo duro no tuvo influencia sobre la calidad fisiológica de las semillas sometidas a compresión de ruptura.

La calidad fisiológica, evaluada mediante germinación estándar, fue superior en semillas con baja humedad (12 %); en la prueba de frío, la germinación fue superior a humedad alta (20 %), aunque el porcentaje de peso seco de plántula fue menor.

3.5. LITERATURA CITADA

- Abdul-Baki, A A and Anderson D, J. 1973.** Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. *Crop Science* (USA), **13 (6)**: 630-633.
- Ashby F, M y Jones H, D R. 2009.** Materiales para ingeniería Vol. 2, introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño. Editorial Reverté. Traducido de *Engineering materials 2, An introduction to microstructures, processing and design* (Inglés) por Juan Bacelga Llidó. Barcelona, España. Pp. 349-350.
- Association of Official Seed Analyst (AOSA). 1983.** Seed Vigor Testing Handbook. Association of Official Seed Analysts (Contribution, 32), 88 p.
- Becraft W, P. 2007.** Aleurone cell development. *Plant cell monographs*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York, USA, **8**: 45-56
- Bewley J, D and Black, M. 1978.** Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination, Vol. 1 Development, Germination and Growth. Springer-Verlag. Heidelberg, Germany. Pp. 17, 24-26, 28-30, 34-37.
- Bewley, D and Black, M. 1994.** Seeds: Physiology of Development and Germination. pp. 153-155. Second edition. Plenum Press. New York, United States of America. Pp. 147-153.
- Brooker B, D; Bakker-Arkema W, F and Hall W, C. 1974.** Drying cereal grains. The AVI Publishing Company, Inc. Connecticut, USA. Pp. 51.
- Callister D, W. 1995.** Ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté. Traducido de *Materials Science and Engineering, An Introduction, Third Edition* (Inglés) por Molera S, P y Anglada G, M J. Barcelona, España. Pp. 132.

- Cicero M, S; Van der Heijden M, G W A; Van der Burg J, W and Bino J, R. 1998.** Evaluation of mechanical damage in seeds of maize (*Zea mays* L.) by X-ray and digital imaging. *Seed Science and Technology* (Bassersdorf, CH-Switzerland), **26 (3)**: 603-612.
- Desai B, B; Kotecha M, P and Salunkhe K, D. 1997.** Seeds handbook: biology, production, processing, and storage. Marcel Dekker, N. Y., USA. Pp. 55-56, 77-78.
- Engleman E, M y Espinosa-Osornio, G. 1998.** Breve recopilación de anatomía de semillas. Colegio de Postgraduados. México. Pp. 28.
- García-Lara, S; Bergvinson J, D; Burt J, A; Ramputh I, A; Díaz-Pontones, D M and Arnason T, J. 2004.** The role of pericarp cell wall components in maize weevil resistance. *Crop Science* (USA), **44 (5)**: 1546-1552.
- Gaytán-Martínez, M; Figueroa-Cárdenas, J D; Reyes-Vega, M L; Rincón-Sánchez F y Morales-Sánchez, E. 2006.** Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnia Mexicana* (México), **29 (Núm. Especial 2)**: 135-139.
- George L, D; Gupta L, M; Tay, D and Parwata A, I G M. 2003.** Influence of planting date, method of handling and seed size on supersweet sweet corn seed quality. *Seed Science and Technology* (Bassersdorf, CH-Switzerland), **31**: 351-366.
- INSTRON (R). 2006.** INSTRON BlueHill referencia de cálculos. Manual de referencia de software. Revisión A (Help V 2.3). INSTRON Corporation.
- International Seed Testing Association (ISTA) 2005.** International Rules for Seed Testing. Edition 2005. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Jones L, R. 1995.** Intracellular transport and secretion of seed proteins, *IN: Seed development and germination, edited by Kigel, J and Galili, G.* Marcel Dekker Inc. NY, USA. Pp. 425-428.

- Little M, T and Hills J, F. 1972.** Statistical Methods in Agricultural Research. The University of California's Agricultural Extension. California, United States of America. Pp. 103-120.
- Lucas W, P; Turner M, I; Dominy J, N and Yamashita, N. 2000.** Mechanical defences to herbivory. *Annals of Botany* (England, UK), **86**: 913-920.
- Maguire D, J. 1962.** Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science* (USA), **2**: 176-177.
- Marchi L, J and Cicero M, S. 2003.** Influence of chemical treatment of maize seeds with different levels of mechanical damage on electrical conductivity values. *Seed Science and Technology* (Bassersdorf, CH-Switzerland), **31**: 481-486.
- Mohsenin N, N. 1986.** Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers. Second Edition. United States of America. Pp. 465, 481, 489-491, 555-556, 598, 586.
- Moreira-De Carvalho, M L; van Aelst C, A; van Eck W, J and Hoekstra A, F. 1999.** Pre-harvest stress cracks in maize (*Zea mays* L.) kernels as characterized by visual, X-ray and low temperature scanning electron microscopical analysis: effect on kernel quality. *Seed Science Research* (United States of America), **9 (3)**: 227-236.
- Mycock J, D and Berjak, P. 1995.** The implications of seed associated mycoflora during storage, *IN: Seed development and germination, edited by Kigel, J and Galili, G.* Marcel Dekker Inc. NY, USA. Pp. 747-766.
- Narváez G, E D; Figueroa C, J D y Suketoshi T. 2007.** Aspectos microestructurales y posibles usos del maíz de acuerdo con su origen geográfico. *Revista Fitotecnia Mexicana* (México), **30 (3)**: 321-352.

- Narváez G, E D; Figueroa C, J D; Suketoshi T, Castaño T, E y Martínez P, R A. 2007b.** Efecto del tamaño del gránulo de almidón de maíz en sus propiedades térmicas y de plastificado. *Revista Fitotecnia Mexicana* (México), **30 (3):** 269-277.
- Nonogaki, H; Chen, F and Bradford J, K. 2007.** Mechanisms and genes involved in germination *sensu stricto*, *IN: Seed Development, Dormancy and Germination, Edited by Bradford, K and Nonogaki, H.* Blackwell Publishing, Ames, Iowa, USA. Pp. 264-304.
- Ritchie, S; Swanson J, S and Gilroy, S. 2000.** Physiology of the aleurone layer and starchy endosperm during grain development and early seedling growth: new insights from cell and molecular biology. *Seed Science Research* (United States of America), **10 (3):** 193-212.
- Schneider A, C; Rasband S, W and Eliceiri W, K. 2012.** “NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis”, *Nature Methods* (USA). Pp. 671.
- Schwember R, A and Bradford J, K. 2011.** Oxygen interacts with priming, moisture content and temperature to affect the longevity of lettuce and onion seeds. *Seed Science Research* (United States of America), **21 (3):** 175-185.
- Smith T, M and Berjak, P. 1995.** Deteriorative changes associated with the loss of viability of stored desiccation-tolerant and desiccation-sensitive seeds, *IN: Seed development and germination, edited by Kigel, J and Galili, G.* Marcel Dekker Inc. NY, USA. Pp. 701-746.
- Tuite, J; Koh-Knox, C; Stroshine, R; Cantone A, F and Bauman F, L. 1985.** Effect of physical damage to corn kernels on the development of *Penicillium* species and *Aspergillus glaucus* in storage. *Phytopathology* (United States of America), **75:** 1137-1140.

Watson A, S. 2003. Description, development, structure, and composition of the corn kernel, *IN: Corn Chemistry and Technology*, edited by White J, P and Johnson A, L. American Association of Cereal Chemists, Inc. Minnesota, USA. Pp. 88-92.

Ziegler, P. 1995. Carbohydrate degradation during germination, *IN: Seed development and germination*, edited by Kigel, J and Galili, G. Marcel Dekker Inc. NY, USA. Pp. 447-474.

CAPÍTULO CUARTO

4. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES GENERALES

Se obtuvieron modelos empíricos que permiten relacionar el contenido de humedad con el desplazamiento, la fuerza y la energía a ruptura en semillas de maíz con diferente tipo de endospermo: harinoso, semi-dentado, dentado, semi-cristalino y cristalino. Conforme se incrementó el contenido de humedad de la semilla, la fuerza a ruptura fue mayor para el genotipo harinoso y menor para los genotipos cristalinos.

Se observó que la ruptura celular en endospermo y aleurona se presentó con mayor frecuencia que la separación celular. En semillas comprimidas a ruptura no hubo fractura en los tejidos de embrión ni en escutelo, sin embargo, la diferencia en calidad fisiológica fue significativamente diferente entre semillas sin comprimir y las comprimidas hasta ruptura.

RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este estudio presentaron comportamientos particulares para cada uno de los genotipos, por lo que en su aplicación, es necesario determinar los componentes de la semilla, donde será importante que dichos valores se encuentren dentro o muy cercanos a los rangos de componentes obtenidos por los genotipos de este estudio.

Un estudio que podría complementar los resultados correspondientes a la diferencia entre en el tejido de endospermo y del embrión, donde en el segundo caso no se observó fractura, podría considerar evaluar la resistencia (fuerza, desplazamiento y energía) en embriones disectados.

De acuerdo a la literatura y a los resultados obtenidos en este estudio, la fuerza es uno de los valores más importantes para la resistencia de semillas sujetas a cargas de compresión, en la mayoría de los casos. Para cargas de impacto, sin embargo, será necesario considerar la energía, desplazamiento y fuerza en la determinación de los valores más seguros, y será recomendable realizar un estudio que permita comparar la resistencia a compresión e impacto en los mismos niveles de genotipo y humedad presentados en este trabajo.

En los estudios revisados, así como en el realizado, la humedad estudiada se obtuvo de manera artificial humedeciendo las semillas en la mayoría de los tratamientos. Sin embargo, podrían estudiarse niveles de humedad obtenidos naturalmente, durante el secado de la semilla después de madurez fisiológica, para lo cual será necesario programar las fechas de cosecha y de siembra de acuerdo a los tiempos estimados en realizar los tratamientos de compresión o impacto, si fuese el caso; y para evitar el efecto del desarrollo, específicamente la nutrición diferencial del cultivo, sería necesario considerar la producción del material experimental bajo condiciones controladas de humedad, temperatura y radiación luminosa.

ANEXOS

A. DATOS DE RESULTADOS

Datos del Capítulo 3

Cuadro A.1. Peso volumétrico en semillas de tres variedades a seis humedades.

Variedad	Humedad (%)	R	Peso (g)	Volumen (mL)	Pvol (g/mL)
Cacahuacintle	8	1	27.647	25.0	1.1059
Cacahuacintle	8	2	28.063	25.0	1.1225
Cacahuacintle	8	3	26.853	23.0	1.1675
Cacahuacintle	10	1	28.265	26.0	1.0871
Cacahuacintle	10	2	28.603	25.0	1.1441
Cacahuacintle	10	3	27.439	23.5	1.1676
Cacahuacintle	12	1	28.920	26.5	1.0913
Cacahuacintle	12	2	29.340	26.5	1.1072
Cacahuacintle	12	3	28.086	25.0	1.1234
Cacahuacintle	14	1	29.496	27.0	1.0924
Cacahuacintle	14	2	29.810	27.0	1.1041
Cacahuacintle	14	3	28.697	26.0	1.1037
Cacahuacintle	16	1	30.252	26.6	1.1373
Cacahuacintle	16	2	30.641	31.8	0.9636
Cacahuacintle	16	3	29.427	31.8	0.9254
Cacahuacintle	20	1	31.747	42.3	0.7505
Cacahuacintle	20	2	32.286	23.0	1.4037
Cacahuacintle	20	3	30.836	24.0	1.2848
Cacahuacintle	24	1	33.446	25.0	1.3378
Cacahuacintle	24	2	33.899	31.0	1.0935
Cacahuacintle	24	3	32.449	30.0	1.0816
Cacahuacintle	28	1	35.265	28.0	1.2595
Cacahuacintle	28	2	35.858	33.0	1.0866
Cacahuacintle	28	3	34.266	31.0	1.1054
Cacahuacintle	32	1	37.347	33.5	1.1148
Cacahuacintle	32	2	37.340	33.7	1.1080
Cacahuacintle	32	3	36.261	33.0	1.0988

Cuadro A.1 (Continuación)

Variedad	Humedad (%)	R	Peso (g)	Volumen (mL)	Pvol (g/mL)
CPV20	8	1	31.693	25.0	1.2677
CPV20	8	2	32.575	27.0	1.2065
CPV20	8	3	32.496	27.0	1.2036
CPV20	10	1	32.378	26.0	1.2453
CPV20	10	2	33.332	27.5	1.2121
CPV20	10	3	33.228	27.5	1.2083
CPV20	12	1	33.122	27.0	1.2267
CPV20	12	2	34.010	26.5	1.2834
CPV20	12	3	33.947	27.5	1.2344
CPV20	14	1	33.974	29.0	1.1715
CPV20	14	2	34.812	28.5	1.2215
CPV20	14	3	34.747	23.5	1.4786
CPV20	16	1	34.663	29.0	1.1953
CPV20	16	2	35.649	29.5	1.2084
CPV20	16	3	35.540	29.0	1.2255
CPV20	20	1	36.397	30.0	1.2132
CPV20	20	2	37.994	31.5	1.2062
CPV20	20	3	37.347	30.0	1.2449
CPV20	24	1	38.325	31.5	1.2167
CPV20	24	2	39.378	32.5	1.2116
CPV20	24	3	39.265	32.0	1.2270
CPV20	28	1	40.384	32.0	1.2620
CPV20	28	2	41.505	33.0	1.2577
CPV20	28	3	41.423	34.0	1.2183
CPV20	32	1	41.712	34.0	1.2268
CPV20	32	2	44.051	36.5	1.2069
CPV20	32	3	43.939	37.5	1.1717

Cuadro A.1 (Continuación)

Variedad	Humedad (%)	R	Peso (g)	Volumen (mL)	Pvol (g/mL)
Palomero	8	1	35.320	27.0	1.3081
Palomero	8	2	35.383	27.0	1.3105
Palomero	8	3	35.383	27.5	1.2867
Palomero	10	1	36.099	28.0	1.2893
Palomero	10	2	36.150	28.0	1.2911
Palomero	10	3	36.184	27.5	1.3158
Palomero	12	1	36.961	29.5	1.2529
Palomero	12	2	37.037	29.5	1.2555
Palomero	12	3	37.054	29.0	1.2777
Palomero	14	1	37.831	30.5	1.2404
Palomero	14	2	37.858	30.0	1.2619
Palomero	14	3	37.851	31.0	1.2210
Palomero	16	1	38.686	30.5	1.2684
Palomero	16	2	38.744	30.5	1.2703
Palomero	16	3	38.761	31.0	1.2504
Palomero	20	1	40.405	32.0	1.2627
Palomero	20	2	40.095	31.5	1.2729
Palomero	20	3	40.713	32.0	1.2723
Palomero	24	1	42.747	33.0	1.2954
Palomero	24	2	42.827	32.5	1.3178
Palomero	24	3	42.886	33.0	1.2996
Palomero	28	1	45.073	34.5	1.3065
Palomero	28	2	45.167	34.5	1.3092
Palomero	28	3	45.244	36.0	1.2568
Palomero	32	1	51.882	39.0	1.3303
Palomero	32	2	51.087	39.0	1.3099
Palomero	32	3	51.398	39.5	1.3012

Cuadro A.2. Peso volumétrico en semillas de cinco variedades a humedad de equilibrio.

Variedad	R	Peso (g)	Volumen (mL)	Peso volumétrico (g/mL)	Humedad (%)
Cacahuacintle	1	26.013	23	1.131	
Cacahuacintle	2	26.743	24	1.114	
Cacahuacintle	3	25.916	23	1.127	7.93
HS-2	1	34.160	27	1.265	
HS-2	2	33.066	25	1.323	
HS-2	3	33.461	25	1.338	9.20
CPV20	1	32.707	25	1.308	
CPV20	2	31.172	25	1.247	
CPV20	3	30.294	23	1.317	8.31
Toluqueño	1	34.416	25	1.377	
Toluqueño	2	34.325	25	1.373	
Toluqueño	3	34.508	25	1.380	7.33
Palomero	1	38.536	29	1.329	
Palomero	2	37.535	28	1.341	
Palomero	3	38.351	28	1.370	9.00

Cuadro A.3. Densidad aparente de semillas de maíz a humedad de equilibrio determinado con un contenedor de latón de 115 mL.

Variedad	R	Peso (g)	Densidad aparente (g/mL)	Humedad (%)
Cacahuacintle	1	66.330	0.57678	
Cacahuacintle	2	66.494	0.57821	
Cacahuacintle	3	64.549	0.56130	7.93
HS-2	1	80.495	0.69996	
HS-2	2	80.956	0.70397	
HS-2	3	81.703	0.71046	9.20
CPV20	1	79.078	0.68763	
CPV20	2	76.802	0.66784	
CPV20	3	76.710	0.66704	8.31
Toluqueño	1	81.210	0.70617	
Toluqueño	2	82.726	0.71936	
Toluqueño	3	72.980	0.63461	7.33
Palomero	1	92.066	0.80057	
Palomero	2	92.564	0.80490	
Palomero	3	92.869	0.80756	9.00

Cuadro A.4. Peso seco de los componentes de semilla de maíz (g).

Variedad	R	Pico	Pericarpio	Embrión	End. Suave	End. Duro	Total
Cacahuacintle	1	0.068	0.099	0.259	1.684	0.185	2.295
Cacahuacintle	2	0.064	0.118	0.338	2.179	0.119	2.818
Cacahuacintle	3	0.060	0.116	0.268	1.859	0.083	2.386
CPV-20	1	0.055	0.127	0.254	0.676	1.193	2.305
CPV-20	2	0.053	0.112	0.267	0.595	1.106	2.133
CPV-20	3	0.052	0.116	0.271	0.672	1.079	2.190
HS-2	1	0.042	0.099	0.205	0.657	0.947	1.950
HS-2	2	0.037	0.086	0.194	0.573	0.901	1.791
HS-2	3	0.039	0.090	0.202	0.656	0.908	1.895
Toluqueño	1	0.030	0.083	0.178	0.347	0.732	1.370
Toluqueño	2	0.033	0.081	0.196	0.284	0.834	1.428
Toluqueño	3	0.031	0.098	0.191	0.390	0.838	1.548
Palomero	1	0.030	0.141	0.122	0.198	1.005	1.496
Palomero	2	0.026	0.137	0.123	0.230	0.965	1.481
Palomero	3	0.025	0.144	0.137	0.265	0.984	1.555

Cuadro A.5. Fuerza y desplazamiento a ruptura en semillas de maíz, promedio por muestra de 30 semillas.

Variedad	Humedad	Repetición	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
Cacahuacintle	8	1	13.250	9.910	4.579	0.276	234.578
Cacahuacintle	8	2	12.579	9.314	4.620	0.238	243.198
Cacahuacintle	8	3	12.761	9.414	4.634	0.218	210.006
Cacahuacintle	12	1	12.541	9.306	4.606	0.371	229.781
Cacahuacintle	12	2	13.419	9.718	4.830	0.415	291.476
Cacahuacintle	12	3	12.686	9.792	5.066	0.413	215.265
Cacahuacintle	12	4	12.889	9.800	4.784	0.492	244.016
Cacahuacintle	16	1	13.049	9.713	4.675	0.545	307.421
Cacahuacintle	16	2	12.389	9.696	4.718	0.698	256.184
Cacahuacintle	16	3	12.653	9.460	4.828	0.596	302.424
Cacahuacintle	20	1	11.447	9.307	5.095	0.607	270.147
Cacahuacintle	20	2	11.931	9.160	5.258	1.010	313.118
Cacahuacintle	20	3	12.490	9.215	5.303	0.812	360.504
Cacahuacintle	20	4	12.366	9.183	5.560	0.476	245.603
Cacahuacintle	24	1	13.305	10.315	5.213	1.116	330.264
Cacahuacintle	24	2	12.953	10.023	5.168	0.837	219.868
Cacahuacintle	24	3	12.861	10.242	4.897	1.087	351.378
Cacahuacintle	24	4	12.843	9.468	4.791	1.106	408.455
Cacahuacintle	28	1	13.190	9.856	4.726	1.267	341.381
Cacahuacintle	28	2	13.164	10.170	5.010	1.353	349.217
Cacahuacintle	28	3	13.132	9.812	4.894	1.247	296.829
Cacahuacintle	28	4	13.044	9.970	4.594	1.602	388.188
Cacahuacintle	32	1	14.522	10.950	5.543	1.780	375.025
Cacahuacintle	32	2	14.300	10.360	5.166	1.699	394.633
Cacahuacintle	32	3	14.352	10.848	5.347	1.490	359.865
Cacahuacintle	32	4	13.563	10.287	5.022	1.592	343.661

Cuadro A.5 (Continuación)

Variedad	Humedad	Repetición	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
HS-2	8	1	11.026	7.449	4.262	0.185	279.532
HS-2	8	2	10.884	7.397	4.326	0.209	286.231
HS-2	8	3	10.696	7.224	4.383	0.207	311.519
HS-2	8	4	10.925	7.236	4.304	0.176	296.236
HS-2	12	1	11.246	7.408	4.447	0.261	296.792
HS-2	12	2	11.013	7.495	4.447	0.265	296.696
HS-2	12	3	11.231	7.419	4.367	0.278	349.703
HS-2	12	4	11.136	7.518	4.543	0.248	276.711
HS-2	16	1	10.911	7.592	4.388	0.525	335.519
HS-2	16	2	11.355	7.565	4.380	0.542	386.627
HS-2	16	3	11.053	7.556	4.347	0.532	359.994
HS-2	16	4	11.017	7.529	4.434	0.427	271.179
HS-2	20	1	11.346	7.660	4.580	0.676	328.935
HS-2	20	2	11.017	7.751	4.612	0.692	315.246
HS-2	20	3	11.301	7.684	4.577	0.670	347.399
HS-2	20	4	11.381	7.603	4.609	0.674	280.874
HS-2	24	1	11.462	7.796	4.734	0.961	299.219
HS-2	24	2	11.218	7.830	4.604	0.969	315.968
HS-2	24	3	10.752	7.719	4.713	0.948	248.873
HS-2	24	4	10.971	7.635	4.246	0.975	346.442
HS-2	28	1	11.725	7.798	4.793	1.088	244.155
HS-2	28	2	11.358	7.974	4.656	0.970	250.729
HS-2	28	3	11.290	7.848	4.728	0.982	253.263
HS-2	28	4	11.171	7.774	4.585	0.989	232.421
HS-2	32	1	11.951	8.015	4.837	1.104	201.870
HS-2	32	2	11.872	7.948	4.802	1.174	213.242
HS-2	32	3	11.622	8.116	4.765	1.114	236.316
HS-2	32	4	11.376	8.037	4.671	1.125	209.278

Cuadro A.5 (Continuación)

Variedad	Humedad	Repetición	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
CPV20	8	1	12.889	7.027	4.053	0.293	289.651
CPV20	8	2	12.748	7.383	4.092	0.283	286.356
CPV20	8	3	13.007	7.403	4.132	0.316	368.754
CPV20	12	1	13.316	7.597	4.145	0.505	354.460
CPV20	12	2	13.091	7.584	4.301	0.449	337.215
CPV20	12	3	13.218	7.649	4.213	0.454	364.675
CPV20	12	4	12.961	7.432	4.040	0.426	319.968
CPV20	16	1	13.453	7.560	4.476	0.589	350.287
CPV20	16	2	13.742	7.788	4.317	0.629	389.474
CPV20	16	3	13.562	7.824	4.351	0.636	409.146
CPV20	16	4	13.226	7.417	4.138	0.548	350.384
CPV20	20	1	13.392	7.607	4.436	0.779	380.453
CPV20	20	2	13.375	7.925	4.445	0.723	381.640
CPV20	20	3	13.396	7.974	4.414	0.853	460.151
CPV20	20	4	13.160	7.424	4.113	0.903	491.401
CPV20	24	1	13.138	7.624	4.414	0.973	356.824
CPV20	24	2	12.851	7.759	4.368	0.948	383.851
CPV20	24	3	13.582	7.842	4.460	1.147	435.897
CPV20	24	4	13.113	7.455	4.095	0.963	400.051
CPV20	28	1	13.620	7.873	4.414	0.953	297.353
CPV20	28	2	13.294	8.032	4.568	1.125	306.224
CPV20	28	3	13.205	7.783	4.332	1.139	373.238
CPV20	28	4	13.051	7.506	4.231	1.096	334.171
CPV20	32	1	13.815	8.167	4.588	1.259	299.072
CPV20	32	2	13.719	8.056	4.587	1.170	266.202
CPV20	32	3	13.541	7.980	4.484	1.230	290.198
CPV20	32	4	14.002	7.821	4.415	1.100	253.745

Cuadro A.5 (Continuación)

Variedad	Humedad	Repetición	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
Toluqueño	8	1	11.738	6.004	3.543	0.398	323.199
Toluqueño	8	2	11.798	5.826	3.688	0.427	331.480
Toluqueño	8	3	11.647	5.719	3.608	0.333	308.904
Toluqueño	8	4	11.621	5.877	3.510	0.410	286.089
Toluqueño	12	1	11.717	5.833	3.850	0.523	312.175
Toluqueño	12	2	11.469	5.885	3.911	0.456	262.810
Toluqueño	12	3	11.759	5.779	3.738	0.444	280.043
Toluqueño	12	4	11.583	5.801	3.747	0.341	295.949
Toluqueño	16	1	11.677	6.186	3.823	0.637	350.654
Toluqueño	16	2	11.653	6.107	3.843	0.472	284.037
Toluqueño	16	3	11.369	5.985	3.845	0.495	251.395
Toluqueño	16	4	11.719	5.970	3.810	0.493	257.487
Toluqueño	20	1	11.832	6.282	3.914	0.597	232.761
Toluqueño	20	2	11.996	6.325	3.883	0.637	247.924
Toluqueño	20	3	12.041	6.236	3.763	0.606	242.336
Toluqueño	20	4	11.830	6.058	3.753	0.587	266.449
Toluqueño	24	1	11.991	6.495	3.924	0.645	210.590
Toluqueño	24	2	12.064	6.351	3.817	0.835	237.259
Toluqueño	24	3	12.054	6.246	3.883	0.747	201.475
Toluqueño	24	4	12.180	6.342	3.891	0.725	211.512
Toluqueño	28	1	12.246	6.470	4.036	0.863	230.876
Toluqueño	28	2	11.977	6.408	4.141	0.885	196.946
Toluqueño	28	3	11.925	6.510	3.979	0.811	211.028
Toluqueño	28	4	12.436	6.519	3.942	0.895	265.584
Toluqueño	32	1	12.528	6.563	4.200	0.770	152.992
Toluqueño	32	2	12.465	6.481	4.221	0.995	194.662
Toluqueño	32	3	12.515	6.606	4.252	0.873	173.744
Toluqueño	32	4	12.395	6.346	4.125	0.907	191.201

Cuadro A.5 (Continuación)

Variedad	Humedad	Repetición	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
Palomero	8	1	8.754	6.114	4.197	0.255	431.742
Palomero	8	2	8.754	6.103	4.314	0.246	420.264
Palomero	8	3	9.053	6.186	4.254	0.229	439.213
Palomero	8	4	8.945	6.320	4.165	0.237	469.754
Palomero	12	1	9.018	6.242	4.268	0.261	381.053
Palomero	12	2	8.868	6.264	4.445	0.339	396.186
Palomero	12	3	8.801	6.328	4.274	0.327	425.849
Palomero	12	4	8.874	6.007	4.140	0.255	400.650
Palomero	16	1	9.066	6.298	4.388	0.391	376.300
Palomero	16	2	8.978	6.423	4.452	0.359	385.443
Palomero	16	3	8.943	6.403	4.395	0.359	347.597
Palomero	16	4	8.954	6.278	4.334	0.326	348.789
Palomero	16	5	8.829	6.183	4.496	0.382	323.998
Palomero	20	1	9.190	6.630	4.576	0.566	303.491
Palomero	20	2	9.039	6.625	4.501	0.502	304.820
Palomero	20	3	8.902	6.415	4.391	0.461	375.497
Palomero	20	4	9.138	6.606	4.677	0.592	333.938
Palomero	24	1	9.218	6.619	4.487	0.585	306.884
Palomero	24	2	9.286	6.663	4.585	0.687	289.497
Palomero	24	3	9.232	6.637	4.445	0.602	303.662
Palomero	24	4	9.306	6.486	4.560	0.696	287.597
Palomero	28	1	9.132	6.755	4.717	0.814	191.384
Palomero	28	2	9.284	6.661	4.775	0.878	178.238
Palomero	28	3	9.362	6.673	4.635	0.863	214.086
Palomero	28	4	9.220	6.752	4.580	0.847	194.173
Palomero	32	1	9.107	6.468	4.894	0.945	150.149
Palomero	32	2	9.365	6.677	4.874	0.931	158.547
Palomero	32	3	9.188	6.481	5.020	0.961	146.443
Palomero	32	4	9.353	6.358	4.851	0.942	152.313

Datos del Capítulo 4

Cuadro A.6. Fuerza y desplazamiento a ruptura en tres variedades de maíz, promedio de muestras de 60 semillas.

Humedad (%)	Variedad	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Energía (mJ)
12	Cacahuacintle	0.41350	224.27	46.37
		0.40989	259.12	53.11
		0.40540	285.47	57.86
	HS2	0.29570	284.51	42.06
		0.26051	298.79	38.92
		0.29336	320.17	46.96
	Palomero	0.30604	300.35	45.96
		0.30832	410.01	63.21
		0.30359	372.51	56.55
20	Cacahuacintle	0.28250	369.99	52.26
		1.32372	322.77	213.63
		1.27402	277.08	176.50
	HS2	1.13186	279.56	158.21
		0.93782	341.65	160.20
		0.86513	308.73	133.55
	Palomero	0.89042	309.3	137.70
		0.69228	323.61	112.01
		0.77038	353.45	136.15
		0.68246	308.15	105.15

Cuadro A.7. Frecuencias porcentuales de la localización de fractura en semillas de maíz sometidas a compresión de ruptura con 12 y 20% de humedad.

Compresión	Humedad (%)	Variedad	R	Sin Fractura SF (%)	Fractura Severa FS (%)	Ubicación de la fractura			
						Base B (%)	Parte media M (%)	Corona C (%)	Embrión y escutelo EE (%)
Testigo	12	Cac	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		HS-2	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Pal	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	Cac	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		HS-2	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Pal	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Grado de severidad:				0	3	2	2	1	3

Cuadro A.7 (Continuación)

Compresión	Humedad (%)	Variedad	R	Sin Fractura SF (%)	Fractura Severa FS (%)	Ubicación de la fractura			
						Base B (%)	Parte media M (%)	Corona C (%)	Embrión y escutelo EE (%)
Ruptura	12	Cac	1	13.33	0.00	20.00	26.67	73.33	40.00
			2	6.67	13.33	20.00	33.33	80.00	26.67
			3	13.33	0.00	13.33	33.33	66.67	20.00
		HS-2	1	0.00	6.67	53.33	33.33	93.33	26.67
			2	6.67	0.00	26.67	20.00	86.67	26.67
			3	0.00	0.00	33.33	33.33	93.33	46.67
		Pal	1	20.00	0.00	6.67	33.33	73.33	6.67
			2	13.33	0.00	0.00	33.33	60.00	13.33
			3	6.67	0.00	20.00	20.00	80.00	26.67
	20	Cac	1	0.00	6.67	26.67	40.00	73.33	6.67
			2	0.00	6.67	33.33	66.67	86.67	13.33
			3	0.00	6.67	26.67	33.33	93.33	6.67
		HS-2	1	0.00	0.00	26.67	33.33	80.00	20.00
			2	0.00	0.00	53.33	73.33	86.67	26.67
			3	0.00	0.00	33.33	60.00	86.67	6.67
		Pal	1	6.67	0.00	20.00	40.00	93.33	6.67
			2	6.67	6.67	6.67	26.67	86.67	13.33
			3	13.33	0.00	6.67	66.67	86.67	20.00
Grado de severidad:				0	3	2	2	1	3

Cuadro A.8. Área de la muestra, de fractura y proporción del área fracturada en la muestra (15 semillas).

Tratamiento	Variedad	Repetición	Cara	Área de la muestra (mm ²)	Área de fractura en la muestra (mm ²)	Área fracturada (%)
Testigo a 12 % de humedad	Cacahuacintle	1	Dorsal	1250.878	0.000	0.0000
		2	Dorsal	1256.472	0.000	0.0000
		3	Dorsal	1240.345	0.000	0.0000
	HS-2	1	Dorsal	906.556	0.000	0.0000
		2	Dorsal	927.258	0.000	0.0000
		3	Dorsal	895.820	0.000	0.0000
	Palomero	1	Dorsal	603.241	0.000	0.0000
		2	Dorsal	616.947	0.000	0.0000
		3	Dorsal	611.810	0.000	0.0000
Testigo a 20 % de humedad	Cacahuacintle	1	Dorsal	1184.708	0.000	0.0000
		2	Dorsal	1268.097	0.000	0.0000
		3	Dorsal	1219.235	0.000	0.0000
	HS-2	1	Dorsal	912.849	0.000	0.0000
		2	Dorsal	916.727	0.000	0.0000
		3	Dorsal	883.589	0.000	0.0000
	Palomero	1	Dorsal	626.771	0.000	0.0000
		2	Dorsal	616.347	0.000	0.0000
		3	Dorsal	627.805	0.000	0.0000

Cuadro A.8 (Continuación)

Tratamiento	Variedad	Repetición	Cara	Área de la muestra (mm ²)	Área de fractura en la muestra (mm ²)	Área fracturada (%)
Ruptura a 12 % de humedad	Cacahuacintle	1	Dorsal	1282.693	6.087	0.4745
			Ventral	1281.698	12.841	1.0019
		2	Dorsal	1357.819	26.482	1.9503
			Ventral	1348.177	23.878	1.7711
		3	Dorsal	1360.328	10.249	0.7534
			Ventral	1361.613	13.525	0.9933
	HS-2	1	Dorsal	865.292	4.110	0.4750
			Ventral	856.345	7.245	0.8460
		2	Dorsal	957.331	4.551	0.4754
			Ventral	945.474	4.855	0.5135
		3	Dorsal	901.637	3.617	0.4012
			Ventral	894.315	4.703	0.5259
Palomero	1	Dorsal	612.452	3.327	0.5432	
		Ventral	610.538	3.304	0.5412	
	2	Dorsal	644.488	4.428	0.6871	
		Ventral	637.963	2.619	0.4105	
	3	Dorsal	592.875	2.154	0.3633	
		Ventral	592.940	2.938	0.4955	

Cuadro A.8 (Continuación)

Tratamiento	Variedad	Repetición	Cara	Área de la muestra (mm²)	Área de fractura en la muestra (mm²)	Área fracturada (%)
Ruptura a 20 % de humedad	Cacahuacintle	1	Dorsal	1319.857	16.982	1.2866
			Ventral	1317.948	7.562	0.5738
		2	Dorsal	1449.237	17.508	1.2081
			Ventral	1440.378	19.624	1.3624
		3	Dorsal	1360.199	17.676	1.2995
			Ventral	1355.889	19.663	1.4502
	HS-2	1	Dorsal	1008.633	4.523	0.4484
			Ventral	988.095	9.350	0.9462
		2	Dorsal	1032.911	1.641	0.1589
			Ventral	1018.253	16.450	1.6155
		3	Dorsal	1044.683	3.063	0.2932
			Ventral	1042.803	18.257	1.7508
Palomero	1	Dorsal	655.410	1.457	0.2222	
		Ventral	652.530	2.766	0.4240	
	2	Dorsal	672.833	2.352	0.3496	
		Ventral	668.628	13.144	1.9658	
	3	Dorsal	671.883	2.857	0.4253	
		Ventral	672.208	5.123	0.7622	

Cuadro A.9. Proporción de área de endospermo con pared celular expuesta.

Compresión	Humedad (%)	Variedad	R1	R2	R3	R4	R5	Proporción de área con pared celular expuesta (%)
Testigo	12	HS-2	1.80	0.00	0.90	0.90	1.60	1.04
		PROMEDIO						1.04
	20	Cacahuac intle	0.80	0.00	2.20	1.20	0.90	1.02
		HS-2	0.35	0.37	0.00	1.10	0.90	0.54
	PROMEDIO						0.78	
Ruptura	12	Cacahuac intle	0.00	19.36	0.86	30.67	15.76	13.33
		HS-2	19.16	4.29	6.49	22.29	0.00	10.45
		Palomero	94.73	0.00	0.00	--	38.46	33.30
		PROMEDIO						19.02
	20	Cacahuac intle	15.26	0.00	0.55	0.55	0.50	3.37
		HS-2	12.54	3.06	14.87	2.62	5.25	7.67
		Palomero	3.98	9.01	2.27	4.37	10.96	6.12
PROMEDIO							5.72	

Cuadro A.10. Proporción de área de aleurona sin pared celular expuesta sobre el plano de observación.

No.	No de Foto	Tratamiento	Área sin pared celular (%)
1	2	HS-2 12 % RR	80
2	5	HS-2 12 % RR	80
3	6	HS-2 12 % RR	80
4	17	HS-2 12 % RR	90
5	33	HS-2 12 % RR	95
6	48	Pal 12 % RR	100
7	60	Cac 12 % RR	100
8	77	Cac 12 % RR	40
9	79	Cac 12 % RR	60
11	169	HS-2 12 % RR	100
12	174	HS-2 12 % RR	100
13	230	Cac 20 % RR	100
14	231	Cac 20 % RR	100
15	237	Cac 20 % RR	100
16	247	Cac 20 % RR	80
17	258	Cac 20 % RR	60
18	284	Cac 20 % RR	100
19	286	Cac 20 % RR	90
20	307	HS2 20 % RR	100
21	311	HS2 20 % RR	100
		Promedio	87.75

Cuadro A.11. Conductividad eléctrica de semillas con 12 y 20 % de humedad sin comprimir y comprimidas hasta ruptura.

Compresión	Humedad (%)	Variedad	Repetición	Peso (g)	Lectura corregida ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)
Testigo	12	Cacahuacintle	1	8.525	95.93	11.25
			2	8.303	79.43	9.57
			3	8.328	86.43	10.38
		HS-2	1	6.773	67.23	9.93
			2	7.004	118.33	16.89
			3	7.006	78.73	11.24
		Palomero	1	5.102	83.93	16.45
			2	5.266	70.43	13.38
			3	5.571	93.73	16.83
	20	Cacahuacintle	1	8.550	39.53	4.62
			2	8.720	42.23	4.84
			3	9.171	45.73	4.99
		HS-2	1	6.820	64.23	9.42
			2	6.647	60.13	9.05
			3	6.597	64.63	9.80
Palomero		1	4.916	44.23	9.00	
		2	4.969	71.13	14.31	
		3	5.075	95.43	18.81	
Ruptura	12	Cacahuacintle	1	8.452	190.23	22.51
			2	8.349	183.93	22.03
			3	8.166	183.33	22.45
		HS-2	1	6.953	139.73	20.10
			2	6.463	141.03	21.82
			3	6.828	158.53	23.22
		Palomero	1	4.892	121.73	24.89
			2	4.907	154.43	31.47
			3	4.796	117.53	24.50

Cuadro A.11 (Continuación)

Compresión	Humedad (%)	Variedad	Repetición	Peso (g)	Lectura corregida ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)
Ruptura	20	Cacahuacintle	1	8.278	166.97	20.17
			2	8.207	156.17	19.03
			3	8.359	152.37	18.23
		HS-2	1	6.881	119.47	17.36
			2	6.790	118.47	17.45
			3	6.851	115.77	16.90
		Palomero	1	4.930	99.37	20.16
			2	4.955	112.07	22.62
			3	5.025	105.17	20.93

NOTA: La conductividad del agua testigo para corregir lectura en las muestras varió de 1.53 a 1.84 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Estas lecturas se restaron de las lecturas correspondientes a las obtenidas en las muestras.

Cuadro A.12. Diferencia entre conductividad a Ruptura (y_{ijk}) y el promedio correspondiente al Testigo (\bar{x}_{ij}); donde: i = nivel de humedad, j = nivel de variedad, k = repetición.

Humedad	Variedad	($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)
12 %	Cacahuacintle	12.110
		11.630
		12.050
	HS-2	7.413
		9.133
		10.533
	Palomero	9.337
		15.917
		8.947
20 %	Cacahuacintle	15.353
		14.213
		13.413
	HS-2	7.937
		8.027
		7.477
	Palomero	6.120
		8.580
		6.890

Cuadro A.13. Plántulas normales, materia seca de plántulas normales y velocidad de germinación en la prueba de Germinación estándar de semillas con 12 y 20 % de humedad sin comprimir y comprimidas hasta ruptura.

Compresión	Humedad	Variedad	Rep.	Plántulas normales (%)	Materia Seca Total (g)	Materia seca en plúmula (g)	Materia seca en radícula (g)	Materia seca en remanente de semilla (g)	Materia seca en plúmula (%)	Materia seca en radícula (%)	Materia seca en remanente de semilla (%)	Velocidad de protrusión radicular
Testigo	12%	Cacahuacintle	1	96.67	6.0226	1.8211	0.9951	3.2064	30.24	16.52	53.24	7.0000
			2	90.00	5.9120	1.6280	0.9654	3.3186	27.54	16.33	56.13	7.6667
			3	93.33	5.9934	1.5776	1.0178	3.3980	26.32	16.98	56.70	7.5000
		HS-2	1	86.67	3.6156	1.2175	0.5766	1.8215	33.67	15.95	50.38	9.0000
			2	93.33	4.2415	1.2148	0.7036	2.3231	28.64	16.59	54.77	8.5000
			3	93.33	3.9649	1.1861	0.6075	2.1713	29.92	15.32	54.76	7.5000
		Palomero	1	63.33	2.3457	0.2917	0.1453	1.9087	12.44	6.19	81.37	7.0000
			2	70.00	2.4914	0.3162	0.1498	2.0254	12.69	6.01	81.30	6.3333
			3	66.67	2.3506	0.2795	0.1356	1.9355	11.89	5.77	82.34	7.1667
	20%	Cacahuacintle	1	93.33	5.1577	1.4708	0.9579	2.7290	28.52	18.57	52.91	8.0000
			2	93.55	5.0251	1.5339	0.9007	2.5905	30.52	17.92	51.55	7.6667
			3	96.67	5.3347	1.6628	0.9840	2.6879	31.17	18.45	50.39	7.8333
		HS-2	1	93.33	3.9985	1.2096	0.7242	2.0647	30.25	18.11	51.64	7.3333
			2	96.67	3.9923	1.2874	0.7153	1.9896	32.25	17.92	49.84	7.1667
			3	96.67	3.9878	1.2859	0.6145	2.0874	32.25	15.41	52.34	8.5000
		Palomero	1	76.67	2.9852	0.3211	0.2037	2.4604	10.76	6.82	82.42	6.3333
			2	63.33	2.4057	0.3024	0.1714	1.9319	12.57	7.12	80.31	5.1667
			3	70.00	2.5553	0.2861	0.1585	2.1107	11.20	6.20	82.60	5.7833

Cuadro A.13 (Continuación)

Compresión	Humedad	Variedad	Rep.	Plántulas normales (%)	Materia Seca Total (g)	Materia seca en plúmula (g)	Materia seca en radícula (g)	Materia seca en remanente de semilla (g)	Materia seca en plúmula (%)	Materia seca en radícula (%)	Materia seca en remanente de semilla (%)	Velocidad de protrusión radicular
Ruptura	12%	Cacahuacintle	1	70.00	3.0639	0.7277	0.3576	1.9786	23.75	11.67	64.58	7.5000
			2	86.67	4.6042	0.7628	0.4553	3.3861	16.57	9.89	73.54	8.5000
			3	83.33	4.7461	0.7201	0.3950	3.6310	15.17	8.32	76.50	7.1667
		HS-2	1	80.00	3.3277	0.665	0.3148	2.3479	19.98	9.46	70.56	8.0000
			2	83.33	3.3359	0.7130	0.3220	2.3009	21.37	9.65	68.97	7.3333
			3	80.00	4.0598	0.7410	0.3417	2.9771	18.25	8.42	73.33	6.8333
		Palomero	1	26.67	1.0802	0.1057	0.0582	0.9163	9.79	5.39	84.83	2.6667
			2	30.00	1.1069	0.0744	0.0278	1.0047	6.72	2.51	90.77	2.5000
			3	36.67	1.2929	0.0896	0.0417	1.1616	6.93	3.23	89.84	2.1667
	20%	Cacahuacintle	1	40.00	1.8798	0.2675	0.1454	1.4669	14.23	7.73	78.03	14.5000
			2	43.33	2.0574	0.2594	0.1330	1.6650	12.61	6.46	80.93	14.5000
			3	60.00	3.0288	0.3886	0.1736	2.4666	12.83	5.73	81.44	12.5000
		HS-2	1	56.67	2.5356	0.3133	0.1486	2.0737	12.36	5.86	81.78	10.0000
			2	56.67	2.4601	0.3488	0.1257	1.9856	14.18	5.11	80.71	11.0333
			3	66.67	2.7681	0.4988	0.2439	2.0254	18.02	8.81	73.17	10.5000
		Palomero	1	33.33	1.2892	0.0881	0.0312	1.1699	6.83	2.42	90.75	4.8333
			2	33.33	1.2989	0.1214	0.0398	1.1377	9.35	3.06	87.59	6.0833
			3	23.33	0.8726	0.0473	0.0201	0.8052	5.42	2.30	92.28	6.1667

Cuadro A.14. Plántulas normales, su longitud y peso seco en la prueba de Frío de semillas con 12 y 20 % de humedad sin comprimir y comprimidas hasta ruptura.

Compresión	CH (%)	Variación	Rep	Plántulas normales (%)	Longitud de la plúmula (cm)	Longitud de la radícula (cm)	Longitud de la plántula (cm)	Índice de Vigor (PN x L _{PN})
Testigo	12	Cac	1	100.00	15.63	19.71	35.34	35.34
			2	89.66	14.15	19.82	33.97	30.46
			3	86.67	14.73	21.08	35.82	31.04
		HS2	1	100.00	15.36	19.99	35.36	35.36
			2	86.67	16.90	19.69	36.59	31.71
			3	100.00	14.67	18.10	32.77	32.77
		Pal	1	40.00	12.00	14.32	26.32	10.53
			2	36.67	11.13	12.71	23.84	8.74
			3	25.71	13.28	14.90	28.18	7.25
	20	Cac	1	90.00	10.47	15.91	26.38	23.74
			2	90.00	10.13	17.93	28.06	25.25
			3	80.00	11.00	16.88	27.88	22.31
		HS2	1	80.00	11.62	14.93	26.55	21.24
			2	90.00	11.54	17.83	29.37	26.43
			3	90.00	10.55	15.38	25.93	23.34
Pal		1	33.33	8.80	12.80	21.60	7.20	
		2	36.67	8.14	10.76	18.90	6.93	
		3	33.33	9.63	13.90	23.53	7.84	
Ruptura	12	Cac	1	53.33	10.56	7.14	17.71	9.44
			2	70.00	8.88	6.16	15.04	10.53
			3	23.33	7.64	6.07	13.71	3.20
		HS2	1	86.67	18.84	12.31	31.15	26.99
			2	66.67	13.51	13.16	26.67	17.78
			3	63.33	13.28	11.90	25.18	15.95
		Pal	1	13.33	11.55	10.43	21.98	2.93
			2	6.67	7.85	6.55	14.40	0.96
			3	26.67	9.34	8.59	17.93	4.78
	20	Cac	1	66.67	10.96	14.13	25.09	16.72
			2	80.00	10.96	15.53	26.49	21.19
			3	86.67	11.47	14.59	26.05	22.58
		HS2	1	73.33	12.03	14.10	26.13	19.16
			2	80.00	12.23	13.95	26.18	20.95
			3	83.33	12.88	13.53	26.41	22.01
Pal	1	36.67	8.76	11.32	20.08	7.36		
	2	26.67	9.09	13.69	22.78	6.07		
			3	33.33	9.08	11.08	20.16	6.72

Cuadro A.14 (Continuación)

Peso seco total (g)	Peso seco de plúmula (g)	Peso seco remanente de semilla (g)	Peso seco de radícula (g)	Peso seco de plántula (g)	Peso seco de plúmula (%)	Peso seco de radícula (%)	Peso seco Remanente de semilla (%)	Índice de Vigor (PN x W _{PN} x 100)
5.0878	1.6747	2.4297	0.9834	2.6581	19.33	32.92	47.76	2.6581
4.3227	1.4923	1.9713	0.8591	2.3514	19.87	34.52	45.60	2.1083
4.3304	1.4079	1.9318	0.9907	2.3986	22.88	32.51	44.61	2.0789
3.6019	1.406	1.3293	0.8666	2.2726	24.06	39.03	36.91	2.2726
3.3053	1.2740	1.3095	0.7218	1.9958	21.84	38.54	39.62	1.7298
3.8498	1.2906	1.6925	0.8667	2.1573	22.51	33.52	43.96	2.1573
1.4014	0.2569	1.0304	0.1141	0.3710	8.14	18.33	73.53	0.1484
1.3769	0.1954	1.1045	0.0770	0.2724	5.59	14.19	80.22	0.0999
1.0188	0.1807	0.7649	0.0732	0.2539	7.18	17.74	75.08	0.0653
5.2133	1.1361	3.3687	0.7085	1.8446	13.59	21.79	64.62	1.6601
5.4446	1.1205	3.5665	0.7576	1.8781	13.91	20.58	65.51	1.6903
5.1351	0.9915	3.4607	0.6829	1.6744	13.30	19.31	67.39	1.3395
3.8775	0.8006	2.6300	0.4469	1.2475	11.53	20.65	67.83	0.9980
4.0911	0.8902	2.6948	0.5061	1.3963	12.37	21.76	65.87	1.2567
4.0472	0.8978	2.6406	0.5088	1.4066	12.57	22.18	65.25	1.2659
1.2624	0.1636	1.0268	0.0720	0.2356	5.70	12.96	81.34	0.0785
1.3816	0.1215	1.2037	0.0564	0.1779	4.08	8.79	87.12	0.0652
1.3107	0.1456	1.094	0.0711	0.2167	5.42	11.11	83.47	0.0722
2.1009	0.3631	1.6072	0.1306	0.4937	6.22	17.28	76.50	0.2633
3.2096	0.4974	2.5111	0.2011	0.6985	6.27	15.50	78.24	0.4890
1.0986	0.1753	0.8736	0.0497	0.2250	4.52	15.96	79.52	0.0525
3.2924	0.7255	2.3098	0.2571	0.9826	7.81	22.04	70.16	0.8516
2.3078	0.572	1.4858	0.2500	0.8220	10.83	24.79	64.38	0.5480
2.3005	0.6512	1.4271	0.2222	0.8734	9.66	28.31	62.03	0.5531
0.4249	0.0545	0.3505	0.0199	0.0744	4.68	12.83	82.49	0.0099
0.2041	0.0183	0.1778	0.0080	0.0263	3.92	8.97	87.11	0.0018
0.8888	0.0982	0.7519	0.0387	0.1369	4.35	11.05	84.60	0.0365
3.2872	0.3806	2.7002	0.2064	0.5870	6.28	11.58	82.14	0.3914
3.8201	0.4555	3.0768	0.2878	0.7433	7.53	11.92	80.54	0.5946
4.6072	0.4891	3.8268	0.2913	0.7804	6.32	10.62	83.06	0.6764
3.0606	0.5386	2.2667	0.2553	0.7939	8.34	17.60	74.06	0.5822
3.4264	0.602	2.5238	0.3006	0.9026	8.77	17.57	73.66	0.7221
3.4974	0.6215	2.6080	0.2679	0.8894	7.66	17.77	74.57	0.7412
1.2282	0.1193	1.0460	0.0629	0.1822	5.12	9.71	85.17	0.0668
0.9468	0.1035	0.7873	0.0560	0.1595	5.91	10.93	83.15	0.0425
1.186	0.1109	1.0211	0.0540	0.1649	4.55	9.35	86.10	0.0550

Página intencionalmente en blanco