

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA  
CALIDAD TOTAL EN SEMILLAS HÍBRIDAS DE MAÍZ EN POSTCOSECHA

Tesis

Que presenta ADRIANA DEL CARMEN HERNÁNDEZ MATEO  
como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA  
CALIDAD TOTAL EN SEMILLAS HÍBRIDAS DE MAÍZ EN POSTCOSECHA

Tesis

Que presenta ADRIANA DEL CARMEN HERNÁNDEZ MATEO  
como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

Dra. María Alejandra Torres Tapia

Director

Dra. Adriana Natividad Avendaño López

Co-Director

Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Posgrado UAAAN

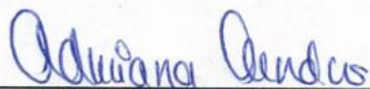
IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD TOTAL EN SEMILLAS HÍBRIDAS DE MAÍZ EN POSTCOSECHA

Tesis

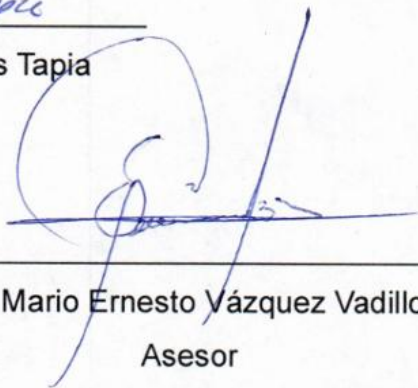
Elaborada por ADRIANA DEL CARMEN HERNÁNDEZ MATEO como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Tecnología de Granos y Semillas con la supervisión y aprobación del comité de asesoría



Dra. María Alejandra Torres Tapia  
Director de tesis



Dra. Adriana Natividad Avendaño López  
Asesor



Dr. Mario Ernesto Vázquez Vadillo  
Asesor



Dr. Arturo Mancera Rico  
Asesor



M.C. Aidee González Ruíz  
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Posgrado UAAAN

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) y al Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) por abrirme las puertas para la realización de este posgrado y por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional y personal.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada para el desarrollo de este proyecto de investigación y la culminación de mis estudios de posgrado.

A la empresa NOVASEM, por permitirme conocer y participar en el proceso de postcosecha dentro de sus instalaciones, experiencia que fortaleció mi comprensión práctica y técnica sobre la calidad de semillas.

Y, de manera muy especial, a mis asesores, por su tiempo, paciencia, dedicación y por compartir su conocimiento durante el desarrollo de este proyecto, contribuyendo de manera invaluable a mi crecimiento académico y profesional.

## DEDICATORIA

A Dios, por darme la sabiduría, la paciencia y guiar mis pasos a lo largo de este camino, gracias por permitirme rodearme siempre de las personas correctas.

A mi esposo, por su amor, paciencia y por nunca dejarme rendirme; gracias por alimentar mis sueños, amor gracias por motivarme cada día a seguir adelante y demostrarme que puedo lograr todo lo que me proponga.

A mis padres y a mi hermana, por su apoyo incondicional y por inspirarme a avanzar siempre más lejos de lo que alguna vez imaginé. Mi familia amada, gracias por acompañarme en cada paso de este camino que hoy culmina en este logro compartido.

Esta tesis es también para todos los que vemos el mundo de forma distinta y nos toca amoldarnos al sistema; para quienes cada letra, cada idea y cada paso han significado un esfuerzo silencioso y constante. Que este logro sea una prueba de que la diferencia también es una fortaleza.

## INDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>ABSTRACT</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>OBJETIVOS</b> .....	2
<b>Objetivo general</b> .....	<b>2</b>
<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>2</b>
<b>Hipótesis</b> .....	<b>2</b>
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
<b>Programa de producción industrial de semillas híbridas de maíz</b> .....	<b>3</b>
<b>Producción en campo</b> .....	<b>3</b>
<b>Proceso de postcosecha</b> .....	<b>4</b>
<b>Cosecha</b> .....	4
<b>Acondicionamiento</b> .....	4
<b>Recepción</b> .....	4
<b>Secado</b> .....	5
<b>Desgrane</b> .....	6
<b>Limpieza y Clasificación</b> .....	7
<b>Almacenamiento</b> .....	8
<b>Tratamiento químico</b> .....	8
<b>Envasado y almacén</b> .....	10
<b>Programa de aseguramiento de calidad</b> .....	<b>11</b>
<b>Puntos de control de calidad establecidos en la agroindustria</b> .....	11
<b>Control de calidad</b> .....	12
<b>Componentes de calidad</b> .....	13
<b>Calidad física</b> .....	13
<b>Calidad genética</b> .....	15
<b>Calidad sanitaria</b> .....	16

<b>Atributos de calidad y organismos reguladores .....</b>	<b>17</b>
<b>Experiencia de la agroindustria semillera. ....</b>	<b>19</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES.....</b>	<b>22</b>
<b>Diseño experimental.....</b>	<b>22</b>
<b>VARIABLES EVALUADAS.....</b>	<b>23</b>
<b>Calidad física .....</b>	<b>23</b>
<b>Calidad fisiológica .....</b>	<b>25</b>
<b>Calidad Sanitaria .....</b>	<b>26</b>
<b>Análisis estadístico .....</b>	<b>29</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>Primer estudio: Evaluación de la calidad en los diferentes procesos de HIB1 y HIB2 en la etapa de postcosecha .....</b>	<b>30</b>
<b>Calidad física .....</b>	<b>30</b>
<b>Calidad fisiológica .....</b>	<b>37</b>
<b>Calidad sanitaria .....</b>	<b>50</b>
<b>Segundo estudio. Evaluación de la calidad de HIB3 y HIB4 en los procesos de la etapa de postcosecha. ....</b>	<b>61</b>
<b>Calidad física .....</b>	<b>61</b>
<b>Calidad fisiológica .....</b>	<b>67</b>
<b>Calidad sanitaria .....</b>	<b>84</b>
<b>Identificación morfológica preliminar de hongos asociados a semilla.....</b>	<b>92</b>
<b>Identificación molecular del principal patógeno detectado en semilla híbrida de maíz .....</b>	<b>94</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Cebadores empleados en la amplificación por PCR de especies de <i>Fusarium</i> asociadas al cultivo de maíz. ....	28
<b>Cuadro 2.</b> Resultados de las variables del análisis de pureza física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de la etapa de postcosecha, en el primer estudio. ....	31
<b>Cuadro 3.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de calidad física de semillas de maíz de los híbridos HIB1 y HIB2 evaluadas en el proceso de secado, desgrane, almacenamiento y tratamiento en el primer estudio. ....	33
<b>Cuadro 4.</b> Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de calidad física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. ....	36
<b>Cuadro 5.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de germinación estándar y vigor de las semillas híbridas de maíz del HIB1 y HIB2 evaluadas en el proceso de secado, desgrane, almacenamiento y tratamiento, en el primer estudio. ....	38
<b>Cuadro 6.</b> Comparación de medias mediante prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para calidad fisiológica en las variables de germinación estándar y vigor de las semillas HIB1 y HIB2 de maíz en los diferentes procesos de la etapa postcosecha. ....	40
<b>Cuadro 7.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento de semilla híbrida de maíz evaluados en los diferentes procesos de postcosecha, del primer estudio. ....	41
<b>Cuadro 8.</b> Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento acelerado de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. ....	43
<b>Cuadro 9.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de remojo de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. ....	45

**Cuadro 10.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de vigor mediante la prueba de remojo de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. .... 46

**Cuadro 11.** Cuadrados medios del análisis de varianza y medias por Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en las variables de vigor mediante prueba fría de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. .... 48

**Cuadro 12.** Cuadrados medios del análisis de varianza y de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en las variables de Blotter test de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. .... 51

**Cuadro 13.** Cuadrados medios del análisis de varianza y de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) de las variables sanitarias de la prueba Blotter test en los procesos e híbridos HIB1 y HIB2 evaluados en el primer estudio. .... 54

**Cuadro 14.** Promedio aritmético de incidencia fúngica mediante Blotter test de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. .... 56

**Cuadro 15.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Papa Dextrosa Agar (PDA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. .... 57

**Cuadro 16.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Malta Sal Agar (MSA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. .... 57

**Cuadro 17.** Variables del análisis de pureza física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de la etapa de postcosecha, en el segundo estudio. .... 62

**Cuadro 18.** Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de calidad física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio. .... 64

<b>Cuadro 19.</b> Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de calidad física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio. ....	65
<b>Cuadro 20 .</b> Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de germinación estándar y vigor de las semillas híbridas de maíz evaluadas en los diferentes procesos de postcosecha, en el segundo estudio.....	69
<b>Cuadro 21.</b> Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de germinación estándar y vigor de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.....	70
<b>Cuadro 22.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento acelerado de semilla híbrida de maíz en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.....	73
<b>Cuadro 23.</b> Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento acelerado de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio. ....	74
<b>Cuadro 24.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de remojo de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio. ....	78
<b>Cuadro 25.</b> Comparación de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables fisiológicas de la prueba de remojo de semilla híbrida de maíz de la interacción de los HIB3 e HIB4 en cada etapa de postcosecha. ....	79
<b>Cuadro 26</b> Cuadrados medios del análisis de varianza y medias por Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en las variables de vigor mediante prueba fría de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.....	81
<b>Cuadro 27.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza (ANOVA) y de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) de las variables sanitarias de la prueba Blotter test, evaluados en el segundo estudio.....	85
<b>Cuadro 28.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza y de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) de las variables sanitarias de la prueba de siembra	

en placas PDA y MSA de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio..... 87

**Cuadro 29.** Promedio aritmético de incidencia fúngica mediante Blotter test de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio..... 89

**Cuadro 30.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Papa Dextrosa Agar (PDA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio. .... 90

**Cuadro 31.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Malta Sal Agar (MSA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio. .... 91

**Cuadro 32.** Especies de Fusarium identificadas molecularmente en semillas híbridas de maíz de diferentes etapas del proceso de postcosecha..... 97

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Comparación de medias en la variable daño mecánico de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. Dónde: DML= daño mecánico leve y sin daño; DMM= daño mecánico moderado; DMS= daño mecánico severo; SEC= secado; DES= desgrane; TRA= tratamiento; ALM= almacenamiento. Barras del mismo color con la misma letra no difieren estadísticamente..... 35
- Figura 2.** Respuesta de las plántulas normales mediante las pruebas de germinación y vigor en los procesos de postcosecha. Donde: GE= Germinación Estándar; EVA= Envejecimiento acelerado; RM= Prueba de remojo; PF= Prueba fría; SEC= Secado; DES= Desgrane; TRA= Tratamiento; y ALM= Almacenamiento. Barras del mismo color con la misma letra no difieren significativamente. .... 49
- Figura 3.** Respuesta de plántulas normales mediante las pruebas de germinación y vigor en los procesos de postcosecha de los híbridos del segundo estudio, en la cual se aprecia el declive de plántulas normales en la etapa de tratamiento del HIB4. En dónde GE= germinación estándar, EVA= envejecimiento acelerado, RM= prueba de remojo, SEC= secado, DES= desgrane, TRA= tratamiento y ALM= almacén. Barras del mismo color con la misma letra no difieren significativamente..... 83
- Figura 4.** Hongos asociados a semilla híbrida de maíz aislados de los procesos de postcosecha. Aislamientos puros en Papa Dextrosa Agar (PDA) y estructuras microscópicas características de *Fusarium spp.*, *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* (aumento 400–1000x). .... 93
- Figura 5.** Gel de agarosa al 1% correspondiente a la extracción de ADN de aislados de *Fusarium spp.* provenientes de semillas híbridas de maíz. Se observan bandas genómicas íntegras y sin degradación visible, aptas para amplificación mediante PCR..... 95
- Figura 6.** Electroforesis de productos PCR para identificación molecular de *Fusarium spp.* en semilla híbrida de maíz provenientes de distintas etapas de

postcosecha. Marcador molecular 1 Kb (BioBasic®). Carriles 1–6: amplificación específica de *F. oxysporum* (~340 pb). Carriles 7–9: *F. verticillioides* (~578 pb) y carril 10: *F. graminearum* (~400 pb). Se observa un patrón de bandas nítidas que confirma la identidad de los aislados. .... 95

**Figura 7.** Amplificación mediante PCR en gel de agarosa (1%) de especies del género *Fusarium* spp. en semillas híbridas de maíz provenientes de distintas etapas de postcosecha. Marcador molecular 1 Kb (BioBasic®). Carriles 1-3: muestras positivas para el género *Fusarium* mostraron bandas correspondientes a la región ITS (~400 pb). .... 96

## RESUMEN

IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD TOTAL EN SEMILLAS HÍBRIDAS DE MAÍZ EN POSTCOSECHA

POR

ADRIANA DEL CARMEN HERNANDEZ MATEO  
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DRA. MARÍA ALEJANDRA TORRES TAPIA

Saltillo, Coahuila

Noviembre 202

## RESUMEN

La calidad física, fisiológica y sanitaria de la semilla híbrida de maíz es determinante para lograr altos rendimientos. Sin embargo, durante la postcosecha ocurren deterioros que comprometen su desempeño. El objetivo de este estudio fue identificar los puntos de control crítico (PCC) en los procesos de postcosecha que influyen en la calidad total del maíz híbrido. Para ello se realizaron dos estudios dos ciclos de producción (HIB1-2 y HIB3-4) mediante muestreo en distintas etapas del proceso industrial. Se determinaron parámetros físicos (pureza, peso de mil semillas, daño mecánico), fisiológicos (germinación, vigor) y sanitarios (Blotter test, aislamiento en PDA/MSA e identificación molecular).

Los resultados mostraron diferencias significativas entre híbridos y procesos ( $p \leq 0.01$ ). En el primer ciclo, el almacenamiento de materia prima se identificó como PCC debido a la disminución del vigor y aumento del daño mecánico. En el segundo ciclo, la semilla llegó con deterioro fisiológico desde la reciba y el daño se acentuó con la clasificación y el tratamiento. El tratamiento químico se confirmó como PCC sanitario, disminuyendo la infección fúngica a niveles compatibles con los requisitos del SNICS. La caracterización morfológica y molecular identificó la presencia de *Fusarium oxysporum*, *F. verticillioides* y *F. graminearum*, lo que refuerza la relación entre daño mecánico, infección y pérdida de vigor.

La integración de las evaluaciones permitió identificar los procesos más sensibles y proporcionar criterios para mejorar la gestión del proceso. Estos resultados contribuyen al aseguramiento de la calidad total de la semilla híbrida de maíz en postcosecha.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., parámetros de calidad, patógenos, sistema postcosecha.

**ABSTRACT**

IDENTIFICATION OF CRITICAL POINTS FOR TOTAL QUALITY ASSURANCE  
IN POST-HARVEST HYBRID MAIZE SEEDS

BY

ADRIANA DEL CARMEN HERNANDEZ MATEO  
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DRA. MARÍA ALEJANDRA TORRES TAPIA

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

## ABSTRACT

Seed quality is essential to ensure rapid establishment and optimal productivity in maize crops. However, postharvest operations can cause physical, physiological, and sanitary deterioration that compromises performance. The objective of this study was to identify the critical control points (CCP) within the postharvest process that influence the total quality of hybrid maize seed. To this end, two studies were carried out.

in two production cycles through sequential sampling of key postharvest stages. Physical parameters (purity, thousand-seed weight, mechanical damage), physiological traits (standard germination, vigor tests: accelerated aging, soaking, and cold test), and sanitary conditions (Blotter test, PDA/MSA media isolation) were analyzed. Molecular identification of seedborne pathogens was performed using ITS and species-specific primers.

Significant differences were found among hybrids and postharvest stages ( $p \leq 0.01$ ). In the first production cycle, the storage of raw seed was identified as the main CCP due to increased mechanical damage and reduced vigor. In the second cycle, physiological deterioration was already evident at reception and intensified during classification and chemical treatment. Sanitary assessments showed that chemical treatment served as a decisive CCP by reducing fungal infection to certification standards. Molecular assays confirmed the presence of *Fusarium oxysporum*, *F. verticillioides*, and *F. graminearum*, reinforcing their association with reduced vigor and mechanical damage.

The integration of physical, physiological, and sanitary analyses allowed the identification of the most vulnerable stages within the process. These findings support decision-making for maintaining total seed quality and ensuring high-performance hybrid maize production.

**Keywords:** *Zea mays* L., seed quality, mechanical damage, vigor, *Fusarium* spp., critical control poin

## INTRODUCCIÓN

La calidad física, fisiológica y sanitaria de la semilla híbrida de maíz es fundamental para asegurar un rendimiento óptimo en los cultivos. Sin embargo, esta calidad puede verse comprometida durante el proceso de postcosecha.

El proceso de postcosecha abarca todas las operaciones necesarias desde que la semilla es cosechada en campo hasta que llega al mercado o es procesada. Estas operaciones incluyen recolección, transporte, limpieza, secado, almacenamiento y envasado. La eficiencia en los procesos es clave para la conservación tanto de la cantidad como de la calidad de la semilla. Las pérdidas postcosecha, que pueden superar el 30% en algunos contextos agrícolas, no solo afectan la disponibilidad de la semilla, sino también su viabilidad fisiológica y sanitaria (Tefera, 2012). La correcta identificación y manejo de los puntos críticos de control puede reducir significativamente estas pérdidas.

Estudios recientes sobre la postcosecha de maíz señalan que uno de los principales desafíos es la prevención de pérdidas por factores como plagas, daños físicos y la aparición de toxinas como las micotoxinas. La implementación de tecnologías postcosecha mejoradas, como secadores eficaces y almacenamiento hermético, ha mostrado una disminución considerable en las pérdidas de calidad (Chikez *et al.*, 2023). Además, la mecanización en procesos como el desgrane y el uso de técnicas de manejo más eficientes durante el almacenamiento se ha correlacionado con una mejora en la conservación de la semilla, impactando positivamente en la productividad agrícola (Hodges *et al.*, 2023).

Por tanto, garantizar una correcta gestión de los puntos de control crítico durante la postcosecha es esencial para asegurar que la semilla híbrida de maíz mantenga su calidad hasta su siembra, permitiendo maximizar el rendimiento de los cultivos y la rentabilidad para los productores, por lo que el objetivo de este proyecto fue identificar los puntos de control críticos a lo largo del proceso de postcosecha, con el fin de minimizar pérdidas y asegurar la calidad de la semilla híbrida de maíz.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Identificar los puntos de control crítico mediante pruebas de calidad en los diferentes procesos del programa de producción industrial de semillas híbridas de maíz.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar las muestras obtenidas de las semillas híbridas de maíz mediante pruebas de calidad física en los diferentes procesos en la etapa de postcosecha en dos ciclos de producción.
- Evaluar las muestras obtenidas de las semillas híbridas de maíz mediante pruebas de calidad fisiológica en los diferentes procesos en la etapa de postcosecha en dos ciclos de producción.
- Evaluar las muestras obtenidas de las semillas híbridas de maíz mediante pruebas de calidad sanitaria en los diferentes procesos en la etapa de postcosecha en dos ciclos de producción.
- Identificar la asociación la calidad fisiológica vs. Sanitaria en semillas híbridas de maíz en los diferentes procesos de la etapa de postcosecha en dos ciclos de producción.
- Determinar los puntos de control crítico en los diferentes procesos de postcosecha para el aseguramiento de la calidad de semilla híbrida de maíz.

### **Hipótesis**

Existe al menos un punto de control crítico en el proceso de postcosecha del programa de producción industrial de semilla híbrida de maíz, cuya gestión fortalece el aseguramiento de la calidad total de la semilla híbrida de maíz.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Programa de producción industrial de semillas híbridas de maíz**

El éxito de un programa industrial de producción de semilla híbrida de maíz depende de la integración de factores genéticos, agronómicos, tecnológicos y de gestión que garanticen la pureza, viabilidad y vigor del material. Este proceso incluye la selección de parentales genéticamente estables, la planeación de la multiplicación con adecuada sincronía floral y aislamiento, el manejo agronómico y sanitario del cultivo, y la cosecha oportuna en madurez fisiológica. Posteriormente, el acondicionamiento postcosecha (que comprende la recepción, secado, desgrane, limpieza, clasificación, tratamiento, envasado y almacenamiento) debe realizarse bajo parámetros controlados para preservar la calidad física y fisiológica. La aplicación de sistemas de aseguramiento de la calidad total y la trazabilidad en cada proceso, junto con la certificación de organismos nacionales e internacionales, aseguran que la semilla resultante cumpla con los estándares exigidos para su comercialización y uso agrícola (Ávila & González, 2017).

### **Producción en campo**

La producción de semilla híbrida de maíz en campo constituye la primera fase del programa industrial de multiplicación, siendo un proceso crítico para garantizar la pureza genética, el vigor y la viabilidad de la semilla. Su éxito depende del cumplimiento estricto de prácticas agronómicas, aislamiento, manejo reproductivo y control de polinización (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2022).

Durante la multiplicación en campo, se realizan actividades clave como el despanojado, cuyo propósito es eliminar la inflorescencia masculina en el parental hembra antes de liberar polen, asegurando la pureza genética del híbrido (García-Lara & Bergvinson, 2021). Además, se lleva a cabo el aislamiento espacial y temporal (200–400 m de distancia o 30 días de diferencia en floración) para evitar contaminación genética proveniente de otros cultivos de maíz.

El manejo agronómico incluye fertilización balanceada, control de malezas, riego y sanidad preventiva. Un exceso o deficiencia de nitrógeno puede modificar el desarrollo de las inflorescencias, afectando la sincronía floral y la calidad fisiológica de la semilla (Noriega González *et al.*, 2011).

### **Proceso de postcosecha**

Los objetivos de la postcosecha son mantener la integridad física y calidad de los productos, preservar los productos por tiempos prolongados para evitar daños en la calidad nutritiva y su valor comercial (Yousaf *et al.*, 2016)

El desarrollo adecuado del manejo de postcosecha es clave para asegurar semillas viables, vigorosas y libres de contaminantes, lo cual es clave para mantener la cadena de suministro agrícola, siendo un eslabón en la seguridad alimentaria y económica (FAO, 1993; CIMMYT, 2022).

### **Cosecha**

En el caso de la semilla de maíz esta debe cosecharse cuando alcanza una madurez fisiológica, la cual generalmente ocurre cuando presenta una humedad entre el 28 al 35%, y la semilla ha formado la “capa negra” en la base del embrión, lo cual indica el máximo punto de madurez fisiológica, cosechar en este momento maximiza la viabilidad y vigor (CIMMYT, 2022).

### **Acondicionamiento**

Un correcto manejo del sistema de postcosecha incluye procesos de acondicionamiento tales como recepción, secado, limpieza, clasificación, tratamiento químico, almacenamiento, envasado y transporte; las cuales se efectúan desde su recolección en campo hasta la comercialización (Ariiong *et al.*, 2023).

### **Recepción**

Al llegar las mazorcas provenientes del campo, se realiza la recepción de materia prima en el área de prelimpieza o “pre-limpia”, proceso esencial para preparar el material antes del secado.

En este proceso, las mazorcas son inspeccionadas visualmente y seleccionadas eliminando aquellas con presencia de daños por insectos (principalmente *Sitophilus zeamais* o *Helicoverpa zea*), hongos visibles, malformaciones, mazorcas mal llenadas o con humedad excesiva que puedan comprometer la calidad fisiológica o sanitaria de la semilla (Obregón & Gómez, 2023).

Posteriormente, se realiza el deshoje o despajillado, que consiste en retirar manual o mecánicamente las hojas que cubren la mazorca, facilitando la circulación del aire durante el secado. En agroindustrias, este proceso se efectúa con deshojadoras mecánicas rotativas provistas de rodillos de hule, que separan las hojas sin dañar la semilla. En casos donde se requiere mayor precisión, por ejemplo, en lotes de semilla básica o parentales, el deshoje se efectúa manualmente, para preservar la integridad física de las mazorcas.

Durante la recepción, las mazorcas son pesadas, registradas y etiquetadas con códigos de trazabilidad que indican el número de lote, híbrido, campo de origen, fecha de cosecha y humedad inicial. Este control inicial es esencial para el seguimiento del proceso de acondicionamiento y certificación.

### **Secado**

Es el método de la eliminación del agua en la semilla hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire del ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad (SADER, 2024b). Se recomienda iniciarlo posteriormente a una pre-limpia, la cual consta en retirar todo el material no deseado como las hojas, estigmas o cualquier impureza que impida la circulación del aire, al mismo tiempo retrasa la aparición de insectos, hongos y producción de micotoxinas.

El secado es un proceso crítico del manejo postcosecha de semillas, ya que permite reducir el contenido de humedad a niveles seguros (10-12%) para su almacenamiento sin comprometer su viabilidad y vigor (Estrada-Urbina *et al.*, 2023); por otra parte, evita la proliferación de microorganismos como hongos, bacterias e incluso insectos que suelen desarrollarse en ambientes húmedos.

Este proceso puede llevarse a cabo de forma natural (al aire libre, bajo sombra o en campo colgado en mazorcas) o artificial con secadoras mecánicas que controlan la temperatura y flujo de aire.

En el secado artificial es esencial controlar la temperatura del aire de secado, siendo esta inferior a los 40 °C para semilla, ya que temperaturas mayores pueden dañar las estructuras celulares y embrionarias. Así mismo la humedad relativa debe estar entre el 40 y 70 % ya que las semillas al ser higroscópicas ganan o pierden humedad del aire (FAO, 2001).

Un secado inadecuado puede tener consecuencias severas para la calidad de la semilla, un secado rápido o a altas temperaturas puede causar fisuras, pérdida de viabilidad, vigor o muerte al embrión; mientras que un secado insuficiente o lento propicia la susceptibilidad a patógenos como hongos, lo cual aumenta el riesgo de producción de micotoxinas, así como la pudrición de la semilla. Por otra parte, una pérdida desigual de humedad genera un desequilibrio higroscópico, lo que produce semillas inestables en el almacenamiento (Norton & IICA, 1950, SADER, 2024c).

### **Desgrane**

El desgrane consiste en la separación de la semilla de la mazorca, proceso clave para obtener semilla con mínima pérdida física y sin daño mecánico. Este proceso puede realizarse de manera manual o mecánica, dependiendo del tipo de semilla y la escala industrial. En la industria semillera moderna, se utilizan desgranadoras de rotor axial o de cilindros helicoidales, diseñadas con superficies de contacto de goma o teflón que reducen el impacto directo sobre la semilla (Abadía & Bartosik, 2013).

El contenido de humedad óptimo para desgrane debe situarse entre 13 y 15%, ya que valores superiores favorecen el daño por abrasión o desprendimiento del embrión. Por debajo de 12% de humedad, aumenta la fragilidad del grano y la probabilidad de fisuras internas (Obregón & Gómez, 2023).

Durante el desgrane, los equipos industriales cuentan con ajustes de velocidad y separación entre rotor y criba, calibrados según el tamaño de mazorca y tipo de híbrido. En algunas agroindustrias, se emplean desgranadoras con control electrónico de velocidad y sistemas de aspiración que separan impurezas livianas. El producto obtenido pasa por un cribado preliminar que elimina fragmentos de olote, puntas de mazorca o semillas quebradas, antes de ingresar al sistema de limpieza y clasificación final.

### **Limpieza y Clasificación**

Dentro del sistema de postcosecha la limpieza y clasificación representan procesos cruciales para asegurar que el lote final cumpla con los estándares físicos y sanitarios requeridos para su certificación y uso agrícola. Estas actividades se realizan inmediatamente después del desgrane, el cual consiste en la separación de la semilla de la mazorca, ya sea de forma manual o mecánica.

El principal objetivo de la limpieza y clasificación es eliminar las impurezas físicas, tales como fragmentos de hojas, tierra, polvo...etc., así como separar semillas dañadas, inmaduras o mal formadas (FAO & Africa seeds, 2019). También se busca clasificar las semillas según su tamaño, peso y densidad, lo cual permite lograr la uniformidad del lote.

Los equipos utilizados para llevar a cabo la limpieza y clasificación pueden variar según la escala de producción, generalmente incluyen:

- Zarandas o cribas vibratorias, las cuales separan los materiales según su tamaño y forma
- Aspiradores o ciclones, que eliminan impurezas ligeras, como polvo y materiales livianos.
- Mesas de gravedad, las cuales permiten separar las semillas según su densidad específica, seleccionando aquellas de mayor peso. El uso de estas mesas mejora el porcentaje de emergencia en campo a comparación de lotes sin clasificar (Reis *et al.*, 2022).

- Separadores ópticos, los cuales emplean sensores para detectar y eliminar semillas con defectos visuales.

El uso de estos debe ser cuidadoso para evitar daños mecánicos, además es necesario calibrarlos según el tamaño y características del híbrido de maíz, mejorando así la calidad física, eliminando cuerpos extraños y semillas de variedades o especies diferentes aumentando la uniformidad del lote.

### **Almacenamiento**

En las plantas industriales de beneficio de semilla híbrida de maíz, algunas agroindustrias optan por un almacenamiento temporal previo al tratamiento final, especialmente cuando los volúmenes de producción son elevados o las condiciones climáticas limitan la capacidad de secado y envasado inmediato.

Este almacenamiento intermedio permite regular el flujo de producción y mantener un equilibrio operativo entre los procesos de secado, clasificación y tratamiento. Generalmente, se realiza en silos metálicos o celdas de almacenamiento ventiladas, donde la semilla se conserva a humedades del 11–12% y con ventilación forzada o aireación controlada (Suleiman *et al.*, 2013; CIMMYT, 2022).

Los silos empleados en esta fase cuentan con sensores de temperatura y humedad relativa, los cuales permiten monitorear el comportamiento de la semilla y prevenir el desarrollo de hongos o insectos. Además, se aplican estrategias de rotación de lotes (FIFO) y fumigación preventiva con productos autorizados.

Este tipo de almacenamiento no debe confundirse con la bodega final de producto terminado, ya que su función principal es servir como buffer operativo dentro del proceso de acondicionamiento. En plantas como Syngenta y Bayer, esta práctica ha demostrado reducir los cuellos de botella en temporadas pico, asegurando una continuidad de procesamiento sin afectar la calidad del lote.

### **Tratamiento químico**

El tratamiento consiste en aplicar los productos adecuados a las semillas con el fin de protegerlas tanto en almacén como en la etapa de plántulas en el campo.

Este contribuye significativamente a mantener la sanidad y calidad fisiológica del lote; su aplicación debe ser aplicar con precisión, productos aprobados, dosis correctas y equipos adecuados.

Para prevenir el ataque de insectos y hongos en almacén, estos deben ser tratados con un insecticida o protector de las semillas. Los protectores son insecticidas cuando se aplican al inicio de las infestaciones, pero no son adecuados para controlar infestaciones mayores, en ese caso deben ser tratados con fumigantes.

Para que un tratamiento de semillas sea efectivo, debe cumplir con varios criterios esenciales. En primer lugar, no debe afectar negativamente la viabilidad ni la capacidad germinativa de la semilla, protegiendo especialmente el embrión. Los ingredientes activos utilizados deben ser compatibles entre sí; es posible combinar fungicidas, insecticidas y bioestimulantes, siempre que no generen interacciones sinérgicas negativas que comprometan la calidad de la semilla. Además, el tratamiento debe mantener su eficacia durante el almacenamiento hasta el momento de la siembra (FAO, 2001). También debe ser eficaz contra una amplia gama de plagas a dosis económicamente viables, seguro para los operarios que lo manipulan y no dejar residuos tóxicos. Finalmente, debe cumplir con las regulaciones del comercio internacional, lo que implica que no debe ser explosivo, corrosivo ni representar un riesgo para la salud humana o ambiental (Nyarko *et al.*, 2021).

Existen múltiples insecticidas y fungicidas en el mercado. Los fungicidas comunes incluyen azoxistrobina, metalaxil y fungicidas triazólicos. Los insecticidas, como Imidacloprid y Thiametoxam, se utilizan para proteger contra plagas (Brauer *et al.*, 2019). Sin embargo, no solo son tratamientos químicos, también hay biológicos como son el uso de *Trichoderma* spp. y *Bacillus subtilis* (Hernández-Castillo *et al.*, 2020), entre otros. El uso de *Trichoderma* como agente de biocontrol es de interés creciente, ofreciendo una alternativa a los químicos debido a problemas como la resistencia de los patógenos y los efectos negativos en el medio ambiente (Cortés Hernández *et al.*, 2023) sobredosificación o

tratamiento mal aplicado puede dañar el embrión, reducir la germinación, causar toxicidad en el suelo o afectar la biodiversidad microbiana benéfico (FAO, 2019).

### **Envasado y almacén**

Un correcto almacenamiento es clave en el manejo postcosecha, este contribuye a la preservación de la calidad y vida útil de las semillas desde el final del acondicionamiento hasta el momento de la siembra. Este proceso debe desarrollarse bajo condiciones controladas, puesto que cualquier alteración en los factores ambientales o de manejo puede acelerar el proceso de deterioro de las semillas y comprometer su viabilidad (Obregón & Gutiérrez, 2023).

Los principales objetivos del almacenamiento son preservar la viabilidad y vigor de la semilla, mantener la integridad del lote y prolongar la vida útil de las semillas. Un almacenamiento eficaz presupone buenas instalaciones, condiciones de higiene y vigilancia. Un buen almacén debe cumplir con las características técnicas que aseguren su funcionalidad y control, tales como construcción elevada, con piso impermeable y ventilado, muros y techos con aislamiento térmico; sistemas de ventilación natural o forzada, protección contra ingreso de agua, polvo, insectos y roedores; equipado con instrumentos de monitoreo de temperatura y humedad (CIMYT, 2022).

En las estructuras cerradas (graneros, almacenes y contenedores herméticos), conviene controlar ante todo la limpieza, la temperatura y la humedad, siendo los parámetros críticos en el cual la humedad de la semilla debe ser menor o igual al 12%, la humedad relativa entre el 50-60% y la temperatura menor o igual a 15 °C y en climas cálidos no exceder los 20 °C. Puesto que estos parámetros afectan la calidad de la semilla durante el almacenamiento, ya que temperaturas elevadas aceleran la respiración de la semilla, acelerando el metabolismo y disminuyendo el vigor (Obregon *et al.*, 2023), incluso podrían causar una germinación anticipada.

Altas humedades y/o temperatura de la semilla o del ambiente favorecen el desarrollo de hongos, tales como *Aspergillus* y *Penicillium*, los cuales son perjudiciales para la viabilidad de la semilla, la calidad física de la semilla, además

de la producción de aflatoxinas perjudiciales para la salud humana y animal. También propician al incremento de la presencia de insectos como *Sitophilus zeamais* y *Tribolium castaneum*, que perforan la semilla causando daños físicos y fisiológicos a la semilla (SADER, 2024b; Becerra-Sánchez & Taylor, 2021).

Una correcta y controlada aireación previene los efectos negativos causados por la humedad y temperatura (SADER, 2024b). Permitiendo la estabilización y reducción de temperatura, previene la condensación de humedad, así de esta manera la proliferación de hongos e insectos.

El almacenamiento de semillas debe considerarse como un proceso crítico de conservación del potencial productivo de semilla, no solo como una fase logística. Requiere una gestión técnica integral, basada en el monitoreo de parámetros ambientales, el control fitosanitario y condiciones óptimas de almacén (Suleiman *et al.*, 2013). Una falla en este puede comprometer el esfuerzo de producción, acondicionamiento y la certificación de semillas.

## **Programa de aseguramiento de calidad**

### **Puntos de control de calidad establecidos en la agroindustria**

La calidad de la semilla es un factor determinante en la productividad agrícola, esta se define como el conjunto de atributos físicos, fisiológicos, genéticos y sanitarios que aseguran una germinación uniforme, un desarrollo vigoroso y la expresión del potencial genético (Copeland & McDonald, 2001).

Según las normas de la International Seed Testing Association (ISTA) y el Sistema Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), una semilla de alta calidad debe cumplir parámetros específicos de germinación, pureza física, humedad, vigor y sanidad (ISTA, 2024; SNICS, 2021). Estas normas estandarizan los métodos de evaluación para asegurar que el material de siembra cumpla con los requisitos nacionales e internacionales, promoviendo la confianza en los mercados.

Para mantener la calidad a lo largo del proceso de postcosecha se llevan a cabo estrategias de aseguramiento de la calidad total (TQM, por sus siglas en inglés),

las cuales tienen un enfoque en la mejora continua, la estandarización de procesos, la prevención de errores en todas las etapas productivas (Gryna, *et al.*, 2007; Oakland, 2014); en el proceso de postcosecha la implementación de TQM además de cumplir con las especificaciones técnicas, es necesario identificar los puntos de control crítico (PCC).

Los PPC son etapas específicas dentro del proceso de postcosecha en donde puedan ocurrir cambios significativos que comprometan la calidad de la semilla. La identificación y control efectivo permiten la implementación de acciones correctivas inmediatas, reduciendo pérdidas y asegurando que el producto final cumpla con los estándares del mercado y los organismos reguladores.

El aseguramiento de la calidad total, aplicado en la cadena de producción de semillas es una herramienta de competitividad, necesidad técnica y económica que impacta directamente en la eficiencia del sistema productivo, la satisfacción del cliente y la sostenibilidad agrícola.

#### Trazabilidad de procesos

La trazabilidad garantiza el seguimiento del lote desde el campo hasta el cliente, enlazando ID de parcela, híbrido, fecha y humedad de cosecha, código de recepción y cada transformación (secado, desgrane, limpieza, clasificación, tratamiento y envasado). La planta registra parámetros críticos (T°, HR, contenido de humedad, daño mecánico, rendimientos de limpieza/clasificación, dosis de tratamiento) y vincula evidencia documental y de laboratorio (germinación, vigor, sanidad, pureza genética). Este sistema permite auditar PCC, activar acciones correctivas, sostener la certificación y resolver reclamaciones con soporte objetivo.

#### **Control de calidad**

Estos atributos se encuentran regulados por organizaciones nacionales e internacionales, tal es el caso de la International Seed Testing (ISTA) y el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), que establecen protocolos y normas para asegurar la calidad integral de las semillas.

## **Componentes de calidad**

### **Calidad física**

La calidad física hace referencia a las características observables y medibles directamente relacionadas con su estructura e integridad.

Los aspectos claves en la calidad física se encuentra la pureza física, la cual determina el porcentaje de semillas puras en una muestra, esta es la porción de semillas deseadas frente otras semillas de diferentes especies, malezas o materia inerte o semillas dañadas; lo cual es un factor esencial para el establecimiento de un cultivo homogéneo (Guillen-de laCruz *et al.*, 2018).

Otro aspecto crítico de la calidad física es el contenido de humedad, el cual es la cantidad de agua contenida libremente en la semilla, la semilla al ser higroscópica tiende a ganar o perder humedad con el aire que la rodea, por lo que niveles óptimos garantizan una conservación adecuada, los niveles inapropiados pueden favorecer el desarrollo de microorganismos patógenos y afectar negativamente la viabilidad.

La semilla se ve sometida a diversos procesos físicos y mecánicos desde la cosecha hasta el acondicionamiento, durante los cuales puede sufrir daños que no siempre son visibles a simple vista, por lo que la evaluación de daño mecánico permite identificar las semillas rotas, fisuradas o lesionadas, las cuales impactan negativamente en la capacidad germinativa y vigor (Finch-Savage & Bassel, 2016).

El peso de mil semillas es otro indicador relevante que refleja la uniformidad y el tamaño de las semillas, lo que influye directamente en el manejo agrícola y el vigor inicial del cultivo. Así mismo el peso volumétrico es un parámetro adicional que mide la masa por unidad de volumen, siendo un factor determinante en la evaluación general de la calidad física, eficiencia de almacenamiento y potencial del cultivo.

## **Calidad fisiológica**

La calidad fisiológica de la semilla evalúa su capacidad de germinar y desarrollar plántulas normales en condiciones óptimas y adversas (Bewley *et al.*, 2012). Este atributo refleja el vigor y la viabilidad de un lote, y esta influenciado por factores genéticos de la semilla como por factores bióticos y abióticos que pueden dañar durante la maduración y el proceso de postcosecha.

La viabilidad se refiere a la proporción de semillas vivas, metabólicamente activas y capaces de iniciar el proceso de germinación (Copeland & Mcdonald, 2001). A través de pruebas de germinación se mide el porcentaje de semilla pura que produce plántulas normales bajo condiciones óptimas de agua, luz, aire y temperatura, indicando así el potencial de un lote para establecerse en campo en condiciones óptimas, siendo este un parámetro regulado por la International Seed Testing Association (ISTA) y el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), por lo que las plántulas se clasifican en tres grupos, las plántulas normales, anormales y semillas sin germinar.

Las plántulas normales son aquellas que desarrollan adecuadamente sus estructuras esenciales. En maíz presentan raíz primaria y raíces secundarias bien formadas, coleóptilo integro y una hoja verde (plúmula) emergiendo del mismo. Estas pueden exhibir daño superficial limitado o contaminación por hongos o bacterias siempre que no provenga de la semilla y no comprometa la estructura fundamental.

Las plántulas anormales son aquellas que presentan alguna deficiencia en desarrollo de sus estructuras esenciales o deformidades graves como raíces torcidas, plúmulas poco desarrolladas o sin desarrollar. Así mismo son plántulas anormales aquellas en las que sus estructuras esenciales están deterioradas por hongos o bacterias donde dicha infección provenga de la semilla.

Además de la viabilidad el vigor es esencial para predecir el desempeño de la semilla en condiciones reales de campo. Mientras que una semilla viable germina en el laboratorio, una semilla vigorosa tiene la capacidad de tolerar estrés

ambiental (frío, sequía, salinidad) y emerger de manera rápida y uniforme. Según ISTA, el vigor es el conjunto de propiedades que determinan el nivel de actividad y capacidad de germinación y de emergencia de plántula; la Association of Official Seed Analysts (AOSA) lo define como aquellas características que describen el potencial para una emergencia rápida y uniforme y el desarrollo de plántulas normales bajo un amplio rango de condiciones de campo.

Para evaluar el vigor se emplean pruebas complementarias al ensayo de germinación tales como pruebas de emergencia en campo, envejecimiento acelerado, conductividad eléctrica y resistencia a condiciones subóptimas de frío, lo cual proporciona una estimación de la capacidad de la semilla para superar condiciones de estrés ambiental.

Otros aspectos del comportamiento que muestran variaciones asociadas con diferencias en el vigor de la semilla incluyen procesos bioquímicos, relaciones enzimáticas y respiratorias durante la germinación, velocidad y uniformidad de la germinación y crecimiento de plántula, emergencia y crecimiento en campo y la capacidad de emergencia en condiciones desfavorables (Bewley *et al.*, 2012).

El comportamiento de la semilla en todas estas pruebas también está condicionado por la constitución genética, el estado de madurez al momento de la cosecha, la nutrición de la planta madre, el tamaño y peso de las semillas, la integridad mecánica, el grado de deterioro o envejecimiento y la presencia de patógenos (Copeland & McDonald, 2001). El control de estos factores resulta crucial para garantizar lotes de alta calidad fisiológica capaces de establecerse con éxito en el campo.

### **Calidad genética**

La calidad genética de la semilla asegura que el material sembrado corresponda fielmente a la variedad o híbrido registrado, manteniendo su identidad y pureza varietal (SNICS, 2021). Este atributo se basa en el cumplimiento de los estándares de pureza genética, estabilidad y uniformidad definidos por organismos nacionales e internacionales como International Seed Testing

Association (ISTA) y el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS).

En la producción de híbridos, la calidad genética depende de una adecuada selección de parentales, del control de polinización en campo y de la prevención de contaminación cruzada. Durante el proceso industrial, esta calidad se garantiza mediante ensayos de campo de prueba de control varietal (Grow Out Test, GOT), análisis morfológicos DUS (Distinguibilidad, Uniformidad y Estabilidad) y, más recientemente, mediante técnicas moleculares como marcadores SSR, SNP y AFLP, que permiten confirmar la identidad genética de los híbridos y detectar mezclas varietales (Mammadov *et al.*, 2013).

Un bajo nivel de pureza genética puede tener consecuencias agronómicas y económicas significativas, reduciendo el rendimiento potencial, la uniformidad fenotípica y la respuesta del cultivo a factores bióticos y abióticos. Por ello, el aseguramiento de la calidad genética no solo constituye un requisito normativo, sino una estrategia competitiva dentro del mercado global de semillas certificadas (MacRobert *et al.*, 2014).

### **Calidad sanitaria**

La calidad sanitaria de la semilla determina su capacidad de producir un cultivo sano y está directamente relacionada con la ausencia de plagas, insectos y de patógenos transmitidos por la semilla, cuya presencia puede comprometer la germinación, el establecimiento del cultivo y, en casos severos, provocar pérdidas significativas de rendimiento (Dadlani & Yadava, 2023).

La evaluación implica identificar y cuantificar el nivel de patógenos o plagas presentes en las semillas, con el fin de detectar oportunamente aquellos agentes que afectan negativamente el desarrollo del cultivo. La importancia de este atributo radica en que una semilla infectada no solo reduce la capacidad de germinación y vigor, sino que también puede constituir una fuente de inóculo primaria para el campo, ocasionando epidemias que ponen en riesgo la seguridad alimentaria (Martín *et al.*, 2022). Asimismo, el estado sanitario influye

en la capacidad de almacenamiento, dado que la presencia de microorganismos favorece procesos de deterioro y pérdida de viabilidad.

Los organismos causales de enfermedades transmitidos de una generación a otra impactan el hábito de crecimiento, reducen la eficiencia reproductiva y ocasionan pérdidas drásticas en la productividad. Por ello, es esencial la implementación de pruebas precisas para detectar la presencia y carga de patógenos en semillas, cumpliendo con los límites establecidos por organismos reguladores. Estas pruebas incluyen la identificación de hongos, bacterias, virus y nematodos mediante metodologías estandarizadas por la ISTA, SNICS y el Centro Internacional de Maíz y Trigo (CIMMYT), siendo el Blotter test una de las técnicas más utilizadas para la detección de hongos patógenos (Copeland & McDonald, 2001).

Entre los patógenos fúngicos más frecuentes se encuentran *Phomopsis* spp., *Colletotrichum truncatum*, *Cercospora kikuchii*, *Fusarium* spp. y *Aspergillus* spp., los cuales se asocian con un deterioro considerable en la calidad de la semilla (Sundareswaran *et al.*, 2023). Además de la detección, es fundamental aplicar medidas de manejo integrado durante la producción y el almacenamiento, con el objetivo de prevenir y reducir la incidencia de organismos dañinos y garantizar la sanidad del lote de semillas.

### **Atributos de calidad y organismos reguladores**

Los atributos de calidad de la semilla están determinados por un conjunto de características físicas, fisiológicas, genéticas y sanitarias que definen su aptitud para establecer cultivos vigorosos y productivos. Estos atributos no solo dependen del manejo agronómico o del proceso de acondicionamiento, sino también de la observancia de las normas establecidas por organismos nacionales e internacionales dedicados a la regulación y certificación de la calidad de semillas.

Para valorar la calidad de semilla comercial, los parámetros de calidad se establecen bajo normas y reglamentos de orden internacional y nacional, a través de asociaciones, instancias gubernamentales y/o de centros de investigación

internacional como son la International Seed Testing Association (ISTA, 2018), el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de semillas (SNICS, 2024) y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMyT).

La ISTA, con sede en Suiza, tiene como principal objetivo uniformar los métodos de ensayo de semillas en todo el mundo. Establece protocolos estandarizados para evaluar parámetros como la pureza física, la germinación, el vigor, la humedad y la sanidad de las semillas, garantizando así la comparabilidad de los resultados entre laboratorios acreditados. Su impacto en la industria semillera es trascendental, pues permite la certificación internacional de lotes, fortaleciendo la confianza entre productores, distribuidores y consumidores, además de facilitar el comercio global de semillas bajo criterios de trazabilidad y calidad verificable.

Por su parte, la AOSA, con base en Estados Unidos, complementa las normas de la ISTA mediante el desarrollo de métodos oficiales de análisis, especialmente en pruebas de vigor como el envejecimiento acelerado, la prueba fría y la conductividad eléctrica. Estas metodologías se aplican en los laboratorios oficiales y privados de control de calidad en Norteamérica, y representan una referencia técnica para las industrias semilleras que buscan garantizar el desempeño fisiológico de sus lotes bajo condiciones adversas. La incorporación de los criterios de la AOSA dentro del control de calidad interno de las plantas industriales permite predecir el comportamiento de la semilla en campo, evitando pérdidas en la fase de establecimiento.

En el contexto nacional, el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), organismo descentralizado de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), es el ente regulador responsable de supervisar la producción, certificación, registro y comercio de semillas en México. Su función es asegurar que los lotes de semilla cumplan con los estándares de pureza varietal, identidad genética, germinación y sanidad establecidos en las normas oficiales mexicanas. A través de la certificación, el SNICS garantiza que la semilla producida y distribuida en el país sea confiable, de origen conocido y con atributos de calidad comprobada, lo que contribuye a la competitividad del sector

semillero y al fortalecimiento del sistema nacional de producción de semillas. Además, el organismo clasifica la semilla en categorías (Básica, Registrada y Certificada) según el nivel de control y trazabilidad del material, asegurando que cada etapa del proceso cumpla con los estándares requeridos.

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) desempeña un papel estratégico como organismo técnico-científico. Su labor se enfoca en el desarrollo, evaluación y disseminación de germoplasma mejorado, así como en la generación de metodologías para la evaluación de parámetros de calidad como madurez fisiológica, vigor, contenido de humedad y resistencia a enfermedades. A través de sus programas de capacitación y colaboración con el sector productivo, el CIMMYT ha promovido la adopción de tecnologías modernas de manejo poscosecha, secado, tratamiento y almacenamiento de semilla, fortaleciendo las capacidades técnicas de las agroindustrias mexicanas.

El impacto conjunto de estas instituciones ha permitido consolidar un marco técnico y regulatorio que sustenta la producción industrial de semillas híbridas de maíz. Gracias a la armonización de sus normas, los programas de producción han incorporado sistemas de aseguramiento de la calidad total (TQM), que contemplan la trazabilidad de procesos, la identificación de puntos críticos de control y la estandarización de los parámetros de evaluación. De esta manera, la interacción entre los organismos internacionales (ISTA y AOSA), el marco regulatorio nacional (SNICS) y la innovación científica impulsada por el CIMMYT garantiza la calidad integral de la semilla, favoreciendo la competitividad de la industria semillera mexicana y su integración en los mercados globales bajo principios de sustentabilidad, confiabilidad y excelencia técnica.

### **Experiencia de la agroindustria semillera.**

El sector semillero mexicano ha adoptado tecnologías avanzadas y sistemas de gestión integral para mejorar la calidad y trazabilidad de la semilla híbrida de maíz. Empresas líderes como Bayer Crop Science, Syngenta Seeds y Novasem implementan programas industriales de producción bajo estándares

internacionales de certificación, garantizando la integridad del producto desde la cosecha hasta la comercialización.

Bayer ha integrado un modelo de producción inteligente (Smart Seed Production) que combina la agricultura digital con el aseguramiento de calidad total. Utiliza plataformas digitales como FieldView™ para el monitoreo agronómico y sincronización de floración, así como sensores de humedad en tiempo real durante el secado. Además, incorpora clasificadores ópticos de última generación con visión multiespectral para eliminar impurezas y semillas defectuosas (Bayer, 2023). En sus plantas de beneficio, cada lote se rastrea mediante un sistema de trazabilidad interna por código de barras, asegurando la correspondencia entre la semilla procesada y el lote de campo.

Syngenta aplica un sistema de calidad integrada (Seed Quality Management) basado en la norma ISO 9001 y en protocolos de la ISTA. Su infraestructura cuenta con secadores automatizados con control digital de flujo de aire y temperatura, cámaras de germinación para pruebas aceleradas de vigor y plataformas Data-Driven Seed Analytics, que permiten correlacionar datos de campo, laboratorio y almacenamiento. Además, promueve la sustitución progresiva de tratamientos químicos por biológicos, integrando cepas comerciales de *Trichoderma harzianum* y *Bacillus amyloliquefaciens* en el tratamiento de semillas (Syngenta, 2024).

Novasem, empresa mexicana especializada en híbridos adaptados al trópico y altiplano, ha fortalecido sus procesos de acondicionamiento y control de calidad mediante la implementación de laboratorios de diagnóstico molecular y sistemas de trazabilidad basados en lotes genéticos. Además, ha incorporado sistemas de clasificación por gravedad y ópticos de alta resolución, optimizando la uniformidad física y la eliminación de semillas dañadas. Su enfoque en calidad total incluye el uso de software de monitoreo ambiental para controlar temperatura, humedad y flujo de aire en silos y almacenes, reduciendo las pérdidas por deterioro fisiológico (Novasem, 2024).

En conjunto, las agroindustrias avanzan hacia la automatización, biotecnología y digitalización, mejorando la eficiencia, trazabilidad y sostenibilidad, y fortaleciendo la competitividad del sistema semillero mexicano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en una agroindustria productora de semilla híbrida de maíz en el Occidente de México.

Se realizaron dos estudios en las diferentes etapas de postcosecha dentro de la planta de beneficio o acondicionamiento, aplicando la técnica de muestreo estratificado en cada proceso, para obtener la muestra representativa de cada material genético evaluado.

### **Variables independientes**

En el primer estudio, se evaluaron dos materiales genéticos, por confidencialidad de la empresa se nombraron como HIB1 y HIB2, ambos del ciclo de producción 2023, llevando a cabo el muestreo en los procesos de: secado (SEC), desgrane (DES), almacén (ALM) y tratamiento (TRA), de la etapa de postcosecha del sistema de producción de semilla comercial en la agroindustria.

En el segundo estudio se evaluaron los híbridos HIB3 y HIB4, en el ciclo de producción 2024; llevando a cabo el muestreo en HIB3 en los procesos de recepción (REC), clasificación (CLA) y tratamiento (TRA); y en HIB4 se consideraron los procesos de recepción (REC) y tratamiento (TRA), todos en la etapa de postcosecha del sistema de producción de semilla comercial en la agroindustria.

A todas las muestras representativas obtenidas en ambos estudios se determinaron mediante los parámetros de calidad de física, fisiológica y sanitaria.

### **Diseño experimental**

Se utilizó un diseño parcelas divididas en arreglo completamente al azar, considerando como variables independientes los puntos de muestreo realizados (en diferente tiempo) como parcela grande y los genotipos como parcela chica como lo describe el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + E_{ij}(a) + v_k + (PV)_{ik} + E_{ijk}$$

Dónde:

$Y_{ijk}$  es la observación en el genotipo  $k$ , repetición  $j$ , en el proceso  $i$ .

$\mu$  = es la media verdadera general.

$P_i$  = efecto de los  $i$  proceso

$E_{ij}(a)$  = error de parcela grande

$v_k$  = efecto de los  $k$  genotipos

$PV_{ik}$  = interacción del proceso ( $i$ ) con los genotipos ( $k$ )

$E_{ijk}$  = error experimental

## **Variables evaluadas**

### **Calidad física**

Para la evaluación de la calidad física de las muestras representativas de cada estudio y proceso de postcosecha se determinó mediante las variables; Contenido de humedad, Pureza física, Peso volumétrico, Peso de mil semillas y Daño Mecánico, descritos a continuación:

El contenido de humedad se determinó por medio del medidor de humedad indirecto JohnDeere® Modelo SW08120, realizando tres repeticiones por muestra y registrando el resultado en porcentaje.

La muestra representativa de cada proceso y material genético se le determinó la pureza física con la ayuda de una lupa de mesa con luz y pinzas, separando los diferentes componentes: semilla pura, dañada, quebrada, manchada y materia inerte (restos de materia vegetal o basura); posteriormente se registró el peso de cada componente y se calculó el porcentaje de cada componente.

Por otra parte, se determinó el peso volumétrico por método directo, a través de una balanza volumétrica modelo EP213 Ohaus, realizando tres repeticiones por muestra, realizando la respectiva conversión a kg/hL.

El análisis de peso de mil semillas, se llevó a cabo en contabilizando ocho repeticiones de cien semillas de cada muestra representativa por proceso y material genético; pesando cada repetición a través de una balanza analítica de 0.001 g de precisión, los datos se registraron y posteriormente se determinó la varianza ( $s^2$ ), desviación estándar y el coeficiente de variación, este último debe ser menor al 3% para considerarse un lote homogéneo en la etapa de postcosecha en la agroindustria, calculado mediante las siguientes fórmulas:

$$s^2 = \frac{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}{n(n-1)} \quad \delta = \sqrt{s^2} \quad cv = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

En donde:

X= peso en gramos de cada repetición

n= número de repeticiones

$\sum$ = Sumatoria de X

$\bar{x}$ = media del peso de 100 semillas

Para determinar el daño mecánico se realizó la prueba de verde rápido (*Fast green*), la cual consistió en revelar la extensión del daño del pericarpio por contacto de la maquinaria agroindustrial; evaluando tres repeticiones de 100 semillas por muestra representativa de los procesos de cada material genético, depositada en vasos precipitados, añadiendo una solución de oxalato verde malaquita al 0.1% hasta cubrir las semillas; posteriormente se agitaron por 30 segundos y se dejaron reposar por 1 minuto; se separó la semilla con ayuda de un cedazo, se enjuagó con agua corriente, se colocaron sobre papel absorbente, y se procedió a evaluar el resultado de retención de tinción en las semillas, clasificando en daño leve, medio y severo, determinando el número y porcentaje del tipo de daño.

## **Calidad fisiológica**

Para evaluar la calidad fisiológica de las semillas en cada proceso de postcosecha se llevó a cabo una prueba de germinación estándar y pruebas de vigor.

En la prueba de germinación estándar, se realizaron cuatro repeticiones de 100 semillas por muestra representativa, las cuales fueron sembradas entre papel anchor y se incubaron en una cámara de germinación modelo 844 Hoffman Manufacturing® a  $25 \pm 1$  °C con ciclos de 8 h luz y 16 h de oscuridad. Se realizó un último conteo a los 7 días, registrando el porcentaje de Plántulas Normales (PN), Plántulas Anormales (PA) y Semillas Sin Germinar (SSG). Asimismo, se consideraron de las plántulas normales resultantes para evaluar las variables de vigor, Longitud Media de Plúmula (LMP) y Longitud Media de Radícula (LMR) con la ayuda de un escalímetro, registrado en centímetros por plántula (cm/pl); así como la tasa de crecimiento de plántula conocida como Peso Seco de las plántulas (PS), llevando las plántulas normales a una estufa de secado modelo FX14-2 Sheldon Manufacturing ® de 65 a 70 °C por 24 horas, anotando el resultado en miligramos por plántula (mg/pl).

Así mismo, se determinaron otras pruebas de vigor bajo estrés como el envejecimiento acelerado, prueba de remojo y la prueba fría.

La prueba de envejecimiento acelerado, se colocaron 100 semillas de cada muestra representativa de los procesos por cada material genético en cámaras internas con 100 mL de agua destilada, y se llevaron a una cámara de envejecimiento acelerado modelo 3025 Sheldon Manufacturing ® a  $42 \pm 1$  °C y 90% de humedad durante 96 horas. Transcurrido el tiempo indicado, las semillas envejecidas se sembraron cuatro repeticiones de 25 semillas entre papel anchor húmedo e incubando bajo las mismas condiciones que una prueba de germinación estándar; a los siete días después de la siembra se evaluaron las variables: PN, PA, SSG, LMP, LMR y PS, descritas anteriormente.

Para la prueba de remojo, se utilizaron 100 semillas de cada muestra representativa, se colocaron dentro de un vaso de precipitado agregando 100 mL

de agua destilada, remojando durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se sembraron entre papel anchor y se llevaron a una condición de  $25 \pm 1$  °C con ciclos de 8 h luz/ 16 h oscuridad en una cámara de germinación. A los siete días después de la siembra, se contabilizó y determinó el porcentaje de PN, PA y SSG. Asimismo, se determinó la Longitud Media de Plúmula y Radícula (LMP y LMR), ya descritas.

En la prueba fría, se evaluaron tres repeticiones por muestra de los diferentes procesos de cada material genético, sembrando en charolas plásticas 15 semillas por repetición sobre 2 cm de sustrato (mezcla de suelo-arena 1:1) y cubiertas en otros 2 cm de sustrato, humedeciendo a obtener a un 70 % de su capacidad. Las charolas se sellaron y llevaron a 10 °C (refrigeración) por siete días, luego se transfirieron a una cámara germinadora a  $25 \pm 2$  °C por cuatro días y se evaluaron las plántulas normales como vigorosas aquellas cuya longitud de plúmula superó los 2 cm por encima del sustrato, registrado en porcentaje.

### **Calidad Sanitaria**

La calidad sanitaria de las semillas en los procesos de postcosecha se determinó mediante tres métodos complementarios, siembra en placas de medio de cultivo, sobre papel secante (*Blotter Test*) e identificación a través de marcadores moleculares.

En el método de siembra en placas de medio de cultivo, primeramente se desinfectaron 20 semillas por repetición de cada muestra representativa, proceso y material genético, sumergiéndolas en hipoclorito de sodio al 2% (v/v) durante 3 min con agitación suave, en seguida se llevaron a un triple lavado con agua destilada estéril, después del último enjuague, las semillas se secaron sobre papel secante estéril durante 30 min, o al tiempo equivalente a estar completamente secas en una condición estéril a temperatura ambiente.

Una vez secas, se sembraron 20 semillas en cajas Petri contenido unas Papa Dextrosa Agar (PDA) y otras Malta Sal Agar (MSA), teniendo tres repeticiones por medio, por muestra y proceso de cada material genético; una vez dada la

siembra, se incubaron a  $25 \pm 1$  °C durante siete días, al finalizar se anotó el porcentaje de semillas infectadas por la presencia de colonias fúngicas.

En el método de papel secante o *Blotter test*, se llevó a cabo la desinfección de 20 semillas por repetición de cada muestra, proceso y material genético. Tras el triple lavado y secado, las semillas se sembraron en charolas sobre papel humedecido con agua, todo bajo condiciones de esterilidad. Las charolas se sellaron con *klin plastic* y llevadas a  $-18^{\circ}\text{C}$  por 24 h; posteriormente se llevaron a una incubadora a  $24 \pm 1$  °C por siete días. Finalizado el periodo de incubación, se determinó el porcentaje de semillas infectadas por presencia de colonias fúngicas.

A partir de este método (*Blotter test*), se llevó a cabo la identificación de las colonias fúngicas (patógenos), realizando un aislamiento de los diferentes tipos de colonias a través de una siembra en medio de cultivo PDA, incubando a  $24 \pm 1$  °C por siete días, una vez obtenido el crecimiento del microorganismo, la identificación de las características morfológicas se realizó mediante observación al microscopio compuesto, utilizando como referencia a un manual de identificación de hongos fitopatógenos (Ormeño Villajos, 2024).

De los aislamientos obtenidos de cada proceso de los materiales genéticos, se seleccionaron aquellos con características morfológicas de las especies de *Fusarium*, para los cuales se efectuaron aislamientos monospóricos (técnica de siembra de una sola espora germinada) para asegurar la pureza del cultivo. Los aislamientos monospóricos se cultivaron en medio PDA líquido a  $24 \pm 1$  °C por siete días. Para la identificación de los géneros se utilizaron las claves de géneros imperfectos de Barnett y Hunter (1998).

A partir del micelio cosechado, se realizó la extracción de DNA siguiendo el protocolo de Doyle & Doyle (1990). La calidad de DNA obtenidos se verificó en un gel de agarosa al 1% el cual se corrió a 85 V por 45 min en una cámara de electroforesis horizontal.

Para la amplificación por la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) se emplearon cebadores específicos para las especies de *Fusarium* (Cuadro 1) más frecuentes en el cultivo de maíz. Así mismo, los cebadores generales los cuales fueron ITS1 e ITS4. Los productos de PCR se corrieron en gel de agarosa al 1% en cámara de electroforesis horizontal a 85 V por 1 h 30 min y se visualizó con a través de un trans iluminador con luz ultravioleta (UV).

**Cuadro 1.** Cebadores empleados en la amplificación por PCR de especies de *Fusarium* asociadas al cultivo de maíz.

Especies	pb	Primer s	Secuencia	Condiciones
<i>Fusarium</i> <i>Oxysporum</i>	340 pb	FOF FOR	ACATACCACTTGT TGCCTCG CGCCAATCAATTT GAGGAACG	1 ciclo, 5 min a 95°C; 30 ciclos: 1 min a 95°C, 1 min a 53 °C, 1 min a 72 °C; 1 ciclo, 10 min a 72 °C. (Velarde Felix <i>et al.</i> , 2018)
<i>Fusarium</i> <i>Verticiloides</i>	578 pb	VER1 VER2	CTTCCTGCGATGT TTCTCC AATTGGCCATTGG TATTATATATCTA	1 ciclo, 5 min a 95°C; 30 ciclos: 1 min a 95°C, 1 min a 56 °C, 1 min a 72 °C; 1 ciclo, 10 min a 72 °C. (Faria <i>et al.</i> , 2012)
<i>Fusarium</i> <i>Graminearum</i>	400 pb	FGF FGR	CTCCGGATATGTT GCGTCAA GGTAGGTATCCGA CATGGCAA	1 ciclo, 30 s a 98°C; 30 ciclos: 10 s a 95°C, 15 s a 52 °C, 20 s a 72 °C; 1 ciclo, 5 min a 72 °C. (Hafez <i>et al.</i> , 2020)

### **Análisis estadístico**

Se realizó un Análisis de Varianza para lo cual se empleó un modelo lineal general (GML) tipo III, con el fin de identificar los efectos significativos ( $p \leq 0.05$ ) de los factores principales y sus interacciones sobre las variables evaluadas. Posteriormente se realizó una Prueba de medias.

Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ). Además, se calcularon los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de variación (CV%) para evaluar la precisión y ajuste del modelo. Todos los análisis se realizaron utilizando el programa SAS ®.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Primer estudio: Evaluación de la calidad en los diferentes procesos de HIB1 y HIB2 en la etapa de postcosecha**

#### **Calidad física**

##### Prueba de pureza física

Los resultados del análisis de pureza física indicaron variaciones entre los procesos e híbridos (Cuadro 2); destacando el HIB1 con un máximo valor del porcentaje de semilla en condición en el proceso de tratamiento (TRA) con 98%, lo cual es una evidencia en la efectividad del proceso de selección y clasificación previos a la aplicación del tratamiento.

Sin embargo, en el proceso de almacenamiento (ALM) de semilla se registró el menor valor de pureza con 42%, acompañada de un incremento de semilla dañada de 56%; lo que indica que durante este proceso ocurre un deterioro físico significativo en este material genético. Un comportamiento similar se observó en el material HIB2, con alta pureza en el tratamiento (TRA) de 99%, pero sufrió una caída drástica en el proceso de almacenamiento (ALM) hasta 47% de semilla en condición y 48% dañada.

En el proceso de secado (SEC) y desgrane (DES) reflejaron un gran daño mecánico en las semillas desde 32 a 39% en HIB1 y de 29 a 36% en HIB2, señalados en el Cuadro 2, lo cual se debe a que durante estas operaciones la manipulación mecánica puede ocasionar fracturas visibles o micro fisuras en el pericarpio (Mancera *et al.* 2019), provocando que la semilla se fraccione hasta perder más del 50% de su estructura o bien permitiendo así la entrada de patógenos oportunistas.

Los resultados sugieren que, si bien el proceso de tratamiento (TRA) permite obtener lotes con elevada calidad física; sin embargo, el proceso de almacenamiento (ALM) constituye un punto de control crítico en la etapa de

postcosecha dentro de la agroindustria, al concentrar el mayor riesgo de deterioro de la semilla de estos materiales genéticos.

En cambio, el proceso de tratamiento (TRA) resulto ser un proceso correctivo, elevando el porcentaje de semilla en condición en ambos híbridos (>98%), y derivado de los procesos de clasificación mecánica (CLA) y eliminación de impurezas (limpieza) con el uso de equipo especializado, resultan ser de vital importancia en la planta acondicionadora de los lotes comerciales de alta calidad dentro de la agroindustria (FAO & Africa seed, 2019).

**Cuadro 2.** Resultados de las variables del análisis de pureza física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de la etapa de postcosecha, en el primer estudio.

Híbrido	Proceso	Semilla en condición (%)	Dañado (%)	Materia inerte	
				Pequeño (%)	Basura (%)
HIB1	SEC	57	39	2	2
	DES	64	32	2	2
	ALM	42	56	2	0
	TRA	98	0	2	0
HIB2	SEC	57	36	5	2
	DES	67	29	2	2
	ALM	47	48	1	4
	TRA	99	1	0	0

En donde: SEC= secado, DES = desgrane, TRA = tratamiento, ALM = Almacén, Dañado = semillas manchadas y/o fisuradas.

La reducción drástica en el almacenamiento (ALM) resalta la importancia de condiciones adecuadas de humedad y temperatura. El incremento de semilla dañada en este proceso en la etapa de postcosecha podría asociarse a problemas de inadecuado control ambiental, control del almacén o la presencia de semillas infectadas (CIMMYT, 2018), cabe resaltar que el mal manejo en el almacén puede revertir la calidad alcanzada en procesos previos dentro de un programa de producción de semillas en la agroindustria.

### Peso de mil semillas, peso volumétrico y contenido de humedad

El análisis de varianza para las variables Peso de Mil Semillas (PMS), Peso Volumétrico (PV) y Contenido de Humedad (CH) mostraron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) tanto entre los procesos de postcosecha como entre híbridos, así como en algunas de sus interacciones (Cuadro 3), lo que confirma el efecto del manejo postcosecha sobre estas variables.

En el caso de la variable PMS se encontraron diferencias significativas entre los procesos de la etapa de postcosecha, teniendo el tratamiento (TRA) y el almacenamiento (ALM) valores significativamente superiores con respecto a los procesos de secado y desgrane (Cuadro 4), lo cual se atribuye que el tratamiento es un proceso posterior a los procesos de selección y clasificación mecánica, eliminando las semillas que se encuentren fuera de los estándares, manteniendo una uniformidad y masa en los lotes de producción.

La variable peso volumétrico en el proceso de almacén (ALM) mostró un máximo valor de 90.4 kg/HL, reflejando una mayor uniformidad y densidad aparente de los lotes. Esta característica está directamente relacionada con la capacidad de llenado y viabilidad de la semilla (Bajus *et al.* 2019).

En contraste, durante el proceso de desgrane (DES) se observó una reducción del PV hasta de 29.6 Kg/HL, lo que sugiere pérdida de integridad estructural y mayor deterioro físico de las semillas.

En cuanto al contenido de humedad se reflejaron diferencias significativas entre el primer proceso de secado (SEC) y el resto de ellos; pues una vez llevado a cabo el secado de la semilla hay una reducción del contenido de humedad de 11.6%, siendo muy eficiente el proceso.

**Cuadro 3.** Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de calidad física de semillas de maíz de los híbridos HIB1 y HIB2 evaluadas en el proceso de secado, desgrane, almacenamiento y tratamiento en el primer estudio.

Fuente de variación	gL	Peso de mil semillas (g)	gL	Peso volumétrico (Kg/HL)	Contenido de humedad (%)	Daño leve (%)	Daño moderado (%)	Daño severo (%)
<b>Pro</b>	3	27317.7026 **	3	4946.140 **	8.8337 **	2485.1527 **	860.9444 **	525.7083 **
<b>Rep (Pro)</b>	28	23.8611	8	5.8757 **	0.2379	12.8750	12.0833	1.6666 **
<b>HIB</b>	1	817.3881 **	1	15.0638 **	7.8204 **	22.0416 *	541.5000 **	345.0416 **
<b>HIB * Pro</b>	3	2771.4452 **	3	11.4323 **	0.12042	1374.0416 **	246.9444 **	913.4861 **
<b>Error Exp.</b>	28	33.1068	8	2.2783	0.2529	17.2916	19.0833	0.5
<b>Media</b>		271.5263		72.4624	11.5708	53.9583	33.2500	12.7916
<b>DE</b>		±5.7538		± 1.5094	± 0.5029	±4.1583	± 4.3684	± 0.7071
<b>R<sup>2</sup></b>		0.9899		0.9987	0.9476	0.9883	0.9628	0.9991
<b>%CV</b>		2.1190		2.0830	4.3463	7.7065	13.1381	5.5278

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso; HIB = híbrido; Error Exp. = Error experimental; DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Porcentaje de Coeficiente de Variación. Niveles de significancia: \*p ≤ 0.05; \*\*p ≤ 0.01.

Sin embargo, durante el proceso del tratamiento (TRA), se redujo aún más hasta 9.8%, y se encontró que en el proceso de almacenamiento (ALM) nuevamente se incrementó la humedad en los materiales genéticos (12%); posiblemente esta respuesta se debió a la absorción de humedad ambiental. Esta respuesta es considerada como una condición crítica en la etapa de postcosecha, ya que niveles de humedad favorecen el deterioro fisiológico y el desarrollo de hongos (Sampietro *et al.*, 2009).

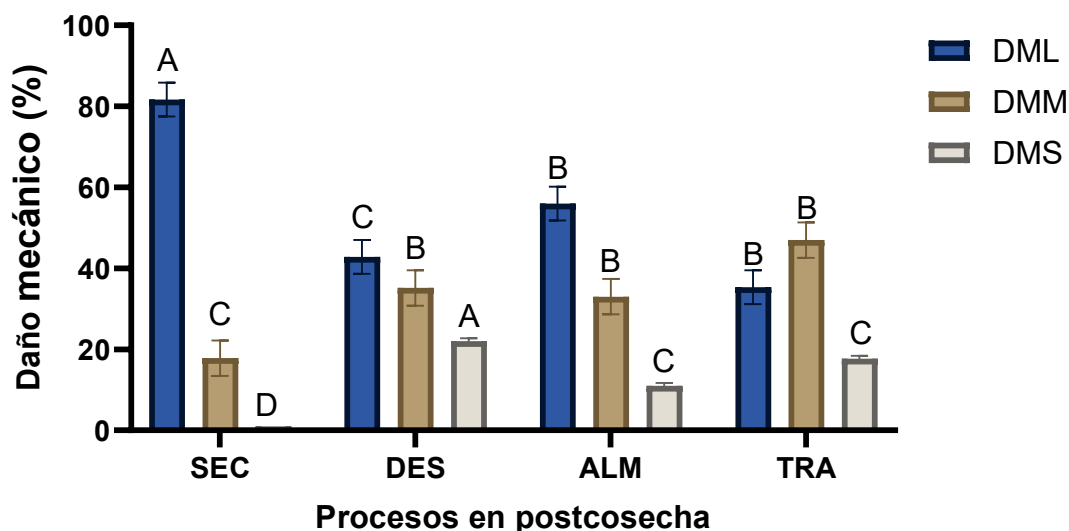
El control de humedad es determinante para mantener los valores de peso volumétrico y la calidad de los lotes de semilla (Copeland & McDonald, 2001; Suleiman *et al.* 2013).

#### Prueba de daño mecánico

En los resultados del análisis de varianza para la variable daño mecánico, se encontraron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre los procesos y la interacción procesos por híbridos en la etapa de postcosecha (Cuadro 3).

Indicando en la prueba Tukey, que la comparación de medias entre los procesos, en el tratamiento (TRA) obtuvo diferencias significativas con mayor incidencia de daño mecánico moderado de 47% (Cuadro 4), seguido por los procesos de desgrane (DES) y almacenamiento (ALM) con 34 y 33%, respectivamente. Sin embargo, el proceso DES fue el que presentó mayor daño mecánico severo con 22%, comparado con el TRA y ALM (Figura 1).

Cabe señalar que el proceso DES se ha identificado como un punto crítico en mantener la calidad de la semilla de los materiales genéticos estudiados, ya que se presentaron valores significativamente altos de daño severo, lo cual implica que la trilla mecánica es un riesgo para la integridad del pericarpio (Hasmeda, 1991).



**Figura 1.** Comparación de medias en la variable daño mecánico de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio. Dónde: DML= daño mecánico leve y sin daño; DMM= daño mecánico moderado; DMS= daño mecánico severo; SEC= secado; DES= desgrane; TRA= tratamiento; ALM= almacenamiento. Barras del mismo color con la misma letra no difieren estadísticamente.

Así mismo, en la prueba de comparación de medias encontró que existieron diferencias entre los híbridos estudiados, donde HIB1 resultó con un mayor porcentaje de daño moderado (Cuadro 4), indicando que se debe tener cuidado, ya que, en un siguiente proceso, como es el almacenamiento (ALM) podría convertirse en un daño severo.

En HIB2 resultó con un valor muy elevado de daño severo, siendo este material genético mucho más susceptible al daño mecánico y podría agravarse aún más en los siguientes procesos.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de un control más estricto en el proceso DES, por ejemplo, tener una limpieza frecuente, después de cada uso, para eliminar los restos de semillas, olotes, y paja, evitando la acumulación de suciedad y, posibles obstrucciones o corrosión; una inspección periódica, revisando regularmente todas las piezas, mangueras y conexiones para detectar

signos de desgaste, daños o desalineación de la maquinaria, así mismo una correcta lubricación, asegurando que todas las piezas móviles, como engranajes, cojines y sistemas de transmisión (correas y poleas), estén correctamente lubricadas para reducir la fricción y desgaste (FAO, 2012).

Algunos componentes críticos de este proceso son el mecanismo de desgranado, el cilindro/rotor y las barras, las cuales se debe verificar que los dientes o barras no estén excesivamente desgastados o dañados. El espacio de trilla debe ajustarse según el tamaño y tipo de mazorca para un desgranado limpio y sin daño mecánico (Devnani & Ojha, 2016), ayudando a minimizar el daño mecánico para no afectar los procesos siguientes del sistema de postcosecha (Arévalos *et al.*, 2021).

**Cuadro 4.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de calidad física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

	PMS (g)	PV (Kg/HL)	CH (%)	Prueba de daño mecánico		
				DL (%)	DM (%)	DS (%)
<b>Proceso</b>						
<b>SEC</b>	233.089 <b>D</b>	86.651 <b>B</b>	11.633 <b>B</b>	81.667 <b>A</b>	17.833 <b>C</b>	0.5 <b>D</b>
<b>DES</b>	243.273 <b>C</b>	29.631 <b>D</b>	12.733 <b>A</b>	42.833 <b>C</b>	35.167 <b>B</b>	22 <b>A</b>
<b>ALM</b>	322.515 <b>A</b>	90.463 <b>A</b>	12.033 <b>AB</b>	56 <b>B</b>	33 <b>B</b>	11 <b>C</b>
<b>TRA</b>	287.228 <b>B</b>	83.102 <b>C</b>	9.883 <b>C</b>	35.333 <b>C</b>	47 <b>A</b>	17.6 <b>B</b>
<b>Híbrido</b>						
<b>HIB1</b>	275.1 <b>A</b>	73.254 <b>A</b>	12.141 <b>A</b>	53 <b>A</b>	38 <b>A</b>	9 <b>B</b>
<b>HIB2</b>	267.925 <b>B</b>	71.670 <b>B</b>	11 <b>B</b>	54.917 <b>A</b>	28.5 <b>B</b>	16.583 <b>A</b>

En donde: PMS=Peso de mil semillas; PV= Peso Volumétrico; CH= Contenido de Humedad; DL= Daño mecánico leve (y) sin daño; DM = Daño mecánico moderado; DS= Daño mecánico severo; SEC= Secado; DES = Desgrane; TRA = Tratamiento; ALM = Almacenamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Así mismo, en el proceso de ALM es necesario mantener las condiciones adecuadas de humedad relativa, ya que tiene una relación directa con el contenido de humedad de la semilla (Nyarko *et al.*, 2021), siendo considerado como un punto crítico en el manejo de almacén de los diferentes materiales debido a las características y diferencias genéticas que puede llegar a determinar las respuestas diferenciadas en su calidad y tolerancia al deterioro (Dadlani & Yadava, 2023), cuando no se tienen las condiciones adecuadas.

### **Calidad fisiológica**

#### Prueba de germinación estándar

En el análisis de varianza en la calidad fisiológica de los materiales genéticos en los procesos en postcosecha, para las variables de germinación estándar y de vigor en, longitud media de plúmula y peso seco de plántula mostró diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ), con respecto a los procesos, los híbridos HIB1 y HIB2, así como en la interacción (Cuadro 5), a excepción de la longitud media de radícula, que no tuvo diferencias significativas en los híbridos e interacción híbridos por procesos.

Así mismo, en prueba de comparación de medias por análisis de Tukey, se identificó que las diferencias significativas entre los procesos evidenciaron que en el proceso de ALM ocurre un deterioro significativo de los atributos fisiológicos (Cuadro 6). Mientras que, en procesos iniciales como SEC, DES y TRA se mantuvieron con porcentajes por arriba del 80%, en el proceso de ALM el valor descendió hasta 66.37%, teniendo por consecuencia mayor porcentaje de plántulas anormales con 29.5% y un valor de 4.13% de semillas sin germinar, indicando una gran pérdida de viabilidad.

Estos resultados negativos tal vez se debieron a las condiciones de almacenamiento, donde la integridad de la semilla pudo verse afectada, ya que existe una asociación entre las condiciones fluctuantes de la humedad relativa del almacén y la velocidad del deterioro fisiológico que tiene la semilla de manera natural (Bajus *et al.*, 2019).

**Cuadro 5.** Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de germinación estándar y vigor de las semillas híbridas de maíz del HIB1 y HIB2 evaluadas en el proceso de secado, desgrane, almacenamiento y tratamiento, en el primer estudio.

Fuente de variación	gL	Plántulas normales (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas sin germinar (%)	Longitud media de plúmula (cm/pl)	Longitud media de radícula (cm/pl)	Peso seco de plántula (mg/pl)
<b>Pro</b>	3	647.7812 **	412.5000 **	30.5312 **	11.6247 **	1.0822 *	260.2013 **
<b>Rep (Pro)</b>	12	62.4479 **	42.41666 **	8.7812 **	0.9971 *	0.5438	29.5140 *
<b>HIB</b>	1	603.7812 **	684.5000 **	2.5312 *	2.8740 **	0.2964	71.0044 **
<b>HIB * Pro</b>	3	764.4479 **	828.5000 **	13.8645 **	36.3302 **	0.6678	77.8154 **
<b>Error Exp.</b>	12	18.1145	20.4166	3.7812	0.9301	0.8748	21.5106
<b>Media</b>		79.3437	19.3750	1.2812	5.4746	15.7950	47.1465
<b>DE</b>		± 4.2561	± 4.5184	± 1.9445	± 0.9644	± 0.9353	± 4.6379
<b>R<sup>2</sup></b>		0.9625	0.9525	0.8416	0.9342	0.5348	0.8479
<b>%CV</b>		5.3641	23.3211	151.7693	17.6159	5.9217	9.8373

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Procesos; HIB = híbrido; Error Exp= Error experimental; DE= Desviación estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Porcentaje de Coeficiente de Variación; longitud media de plúmula (cm/plántula); longitud media de radícula (cm/plántula); peso seco (mg/plántula). Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ .

### Pruebas de vigor: Longitud media de plúmula, radícula y peso seco

Por otro lado, en las variables de vigor se observó que la longitud media de plúmula (LMP) resultó con mayor valor (11 cm/plántula) en el proceso de DES y llegó a reducirse en el proceso de ALM hasta 4.8 cm/plántula, lo que sugiere que la plúmula es sensible al deterioro progresivo y refleja pérdida de capacidad de emergencia vigorosa (Finch-Savage & Bassel, 2016).

En el caso de la longitud media de radícula (LMR) se mostró menor variación en los procesos teniendo valores desde 15 a 16 cm/plántula, indicando que existe mayor estabilidad de la raíz en las primeras fases del deterioro.

En cuanto a la variable peso seco, el proceso de TRA registró los valores más altos de 55.18 mg/plántula; siendo que, en este proceso, la semilla conserva un mejor estado fisiológico y mayor acumulación de reservas, esto posiblemente al tratamiento aplicado a la semilla (Dadlani & Yadava, 2023).

En contraste, durante el proceso de ALM la variable de peso seco presentó una reducción considerable de 43.3 mg/plántula, confirmando el progresivo deterioro y debilitamiento de la semilla.

En cuanto a la comparación entre los materiales genéticos, el HIB2 destacó con un 83.68 % de plántulas normales a diferencia del 75% de HIB1 (Cuadro 6). Esto indica que la variabilidad genética influye en la capacidad de mantener la germinación y por ende el vigor durante la etapa de postcosecha.

Además, la incidencia de plántulas anormales fue mayor en HIB1 con 24%, comparada con HIB2 que resultó con menor porcentaje de anomalías (14.75%), lo que sugiere que este híbrido tiene una mayor estabilidad fisiológica y tolerancia al deterioro, ya que la respuesta de los híbridos depende de los atributos genéticos que influyen en la conservación de la calidad (Dadlani & Yadava, 2023).

**Cuadro 6.** Comparación de medias mediante prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para calidad fisiológica en las variables de germinación estándar y vigor de las semillas HIB1 y HIB2 de maíz en los diferentes procesos de la etapa postcosecha.

	PN (%)		PA (%)		SSG (%)		LMP (cm/pl)		LMR (cm/pl)		PS (mg/pl)	
<b>Proceso</b>												
<b>SEC</b>	81	<b>A</b>	19	<b>B</b>	0	<b>B</b>	4.35	<b>B</b>	15.97	<b>A</b>	42.882	<b>B</b>
<b>DES</b>	87	<b>A</b>	13	<b>B</b>	0	<b>B</b>	7.11	<b>A</b>	16.08	<b>A</b>	47.218	<b>B</b>
<b>ALM</b>	66.37	<b>B</b>	29.50	<b>A</b>	4.12	<b>A</b>	4.88	<b>B</b>	15.26	<b>A</b>	43.302	<b>B</b>
<b>TRA</b>	83	<b>A</b>	16	<b>B</b>	1	<b>B</b>	5.60	<b>B</b>	15.86	<b>A</b>	55.184	<b>A</b>
<b>Híbridos</b>												
<b>HIB1</b>	75	<b>B</b>	24	<b>A</b>	1	<b>A</b>	5.17	<b>A</b>	15.69	<b>A</b>	45.657	<b>A</b>
<b>HIB2</b>	83.688	<b>A</b>	14.75	<b>B</b>	1.562	<b>A</b>	5.77	<b>A</b>	15.89	<b>A</b>	48.636	<b>A</b>

En donde: PN = Plántulas normales; PA = Plántulas anormales; SSG = semillas sin germinar; LMP = longitud media de plúmula (cm/plántula); LMR = longitud media de radícula (cm/plántula); PS = Peso seco (mg/plántula); SEC = secado, DES = desgrane, TRA = tratamiento, ALM = Almacenamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

#### Prueba de envejecimiento acelerado

El análisis de varianza para las variables de la prueba de vigor de envejecimiento acelerado mostró diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en los procesos de postcosecha, en híbridos estudiados y en su interacción (Cuadrado 7), lo que confirma que tanto el manejo postcosecha como la base genética de los materiales estudiados influyen en la calidad fisiológica de la semilla.

En el mismo Cuadro 7, se destacó un alto valor en plántulas normales con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.92$  y en peso seco de  $R^2 = 0.91$ , evidenciando nuevamente que la semilla de tuvo una sensibilidad al deterioro; mientras que, las variables de longitud de plúmula y radícula después de un deterioro de la semilla también respondieron significativamente, con coeficientes de determinación superiores a 0.77.

**Cuadro 7.** Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento de semilla híbrida de maíz evaluados en los diferentes procesos de postcosecha, del primer estudio.

Fuente de variación	gL	Plántulas normales	Plántulas anormales	Semillas sin germinar	Longitud media de plúmula	Longitud media de radícula	Peso seco de plántula
<b>Pro</b>	3	1437.5312 **	192.7500 **	771.7812 **	28.0331 **	4.3020 **	1208.4933 **
<b>Rep (Pro)</b>	12	50.6145	36.6041	10.9062	2.6058*	0.9656 *	23.1213
<b>HIB</b>	1	1237.5312 **	242.0000 **	385.0312 **	13.4810**	6.5341 **	6256.8611 **
<b>HIB * Pro</b>	3	846.8645 **	194.2500 **	563.1979 **	11.7878 **	1.8273 *	2650.2574 **
<b>Error Exp.</b>	12	58.4479	56.4375	24.7395	2.0837	0.8926	144.6008
<b>Media</b>		82.7812	9.6250	7.5937	7.5171	16.2337	64.8077
<b>DE</b>		± 7.6451	± 7.5124	± 4.9738	± 1.4435	± 0.9448	± 12.0250
<b>R<sup>2</sup></b>		0.9253	0.7311	0.9383	0.8678	0.7731	0.9125
<b>%CV</b>		9.2353	78.0071	65.4997	19.2029	5.8201	18.5548

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso (Secado, Desgrane, Almacenamiento, Tratamiento); HIB = híbrido (HIB1, HIB2); DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Coeficiente de Variación; Plántulas normales (%); Plántulas anormales (%); Semillas sin germinar (%), Longitud media de plúmula (cm/plántula); Longitud media de radícula (cm/plántula); Peso seco de plántula (mg/plántula). Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ .

Estos resultados muestran que es muy útil una determinación de vigor ante un estrés como el envejecimiento acelerado, para diferenciar los diferentes atributos que puede tener el vigor de un material genético e identificar la tolerancia que puede aportar este material por su genética, por ello la Asociación Internacional de Análisis de Semillas (ISTA, 2025) reconoce a la prueba como válida para detectar el deterioro de la semilla, dentro de un sistema de control de calidad dentro de la agroindustria de semillas.

En cuanto a la prueba de comparación con Tukey en la prueba de envejecimiento acelerado, mostró una misma tendencia a la que se ha venido presentando, como en el proceso de ALM donde se registraron los menores valores de plántulas normales con 64.5%, un aumento en el porcentaje de semillas sin germinar y plántulas anormales con 22.13 y 13.37%, respectivamente (Cuadro 8); confirmando a este proceso como uno de los principales puntos críticos donde sufre deterioro la semilla en la etapa de postcosecha dentro de la agroindustria de producción de semilla comercial.

Por otro lado, los procesos de SEC y DES mostraron mejor desempeño, al obtener hasta 95 y 90.12%, de plántulas normales respectivamente.

Con respecto a la variable longitud media de plúmula, en el proceso de DES, se encontró la mayor longitud de 9 cm/plántula, seguido del proceso de TRA con 7.8 cm/plántula. Por el contrario, en el proceso de ALM se presentó una disminución drástica de longitud de plúmula de 5.4 cm/plántula; mientras que de longitud media de radícula mostró menos variación de 15-16 cm/plántula; revelando que la plúmula de los materiales genéticos es más sensible al ser sometida a altas humedades relativas y temperaturas, generando un rápido deterioro; en cambio, la radícula resulta ser menos afectada en las fases iniciales de deterioro por su mayor reserva de tejidos meristemáticos (Bewley *et al.* 2012).

En la variable de peso seco después de un envejecimiento acelerado, en proceso de TRA resultó con el mayor valor de 76.21 mg/plántula, seguido el DES con 72.85 mg/plántula (Cuadro 8). No obstante, en el proceso de ALM se presentó un descenso hasta de 49.21 mg/plántula, lo cual indica una pérdida considerable de

reservas metabólicas y energía disponible para el crecimiento, lo cual refleja el agotamiento de metabolitos esenciales durante un estrés como lo establece la prueba de envejecimiento (Dadlani & Yadava, 2023).

**Cuadro 8.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento acelerado de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

	PN	PA	SSG	LMP	LMR	PS						
<b>Proceso</b>												
<b>SEC</b>	95	A	4.5	A	0.5	B	6.95	BC	16.70	A	60.943	AB
<b>DES</b>	90.12	AB	6.37	A	3.5	B	9.89	A	16.46	AB	72.858	A
<b>ALM</b>	64.5	C	13.37	A	22.12	A	5.40	C	15.14	B	49.212	B
<b>TRA</b>	81.5	B	14.25	A	4.25	B	7.82	AB	16.61	A	76.219	A
<b>Híbridos</b>												
<b>HIB1</b>	89	A	6.87	A	4.12	B	8.16	A	16.68	A	78.791	A
<b>HIB2</b>	76.56	B	12.37	A	11.06	A	6.86	B	15.78	B	50.825	B

En donde: PN= Plántulas normales (%); PA =Plántulas anormales (%); SSG= semillas sin germinar (%); LMP= longitud media de plúmula (cm/plántula); Longitud media de radícula (cm/plántula); Peso seco (mg/plántula); SEC= Secado; DES = Desgrane; TRA = Tratamiento; ALM= Almacenamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Por otra parte, en la prueba de comparación entre los materiales genéticos en las variables derivadas del envejecimiento acelerado, se encontró que HIB1 resultó con mayor tolerancia al presentar hasta 89% de plántulas normales, una menor proporción de semillas sin germinar de 4.12% y un mayor valor de peso seco de plántula con 78.94 mg/ plántula; mientras que HIB2 obtuvo un 76.6% de plántulas normales y menor de peso seco con 50.83 mg/plántula.

Estos resultados indican que, aunque HIB2 mostró mejor germinación en condiciones óptimas, su desempeño bajo condiciones de estrés fue inferior, revelando que el HIB1 tiene vigor fisiológico ante estas condiciones de estrés, revelando que la variabilidad genética influye en la resistencia.

Según los resultados anteriores de las variables fisiológicas en la prueba de envejecimiento acelerado, el proceso ALM se identificó como punto de control crítico, ya que es donde ocurren las mayores pérdidas de calidad fisiológica, al haber un declive del 95 al 64.5% plántulas normales, esto debido a las condiciones que posiblemente se presentan en el almacenamiento.

### Prueba de remojo

En el análisis de varianza para la prueba de remojo, mostró diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en los procesos, híbridos y su interacción en todas las variables evaluadas (Cuadro 9), confirmando que estas pruebas son una herramienta sensible para evaluar el vigor de la semilla bajo condiciones controladas y de estrés.

Este comportamiento evidencia y es útil en el aseguramiento de la calidad de la semilla, tanto en el control del manejo de postcosecha como identificar la característica genética de tolerancia al estrés en los materiales genéticos, de tal forma que esta prueba permite detectar los factores que influyen en la calidad fisiológica de la semilla y los procesos mecánicos y de acondicionamiento al tener un impacto directo en la expresión del vigor (Arévalos *et al.* 2021).

Al realizar la prueba de Tukey, se encontró que los procesos de SEC y DES presentaron los mayores porcentajes de normales de 95.5 y 96.5%, respectivamente (Cuadro 10), así como bajas porciones de semillas sin germinar; en cambio, el proceso de ALM, como era de esperarse se evidenció nuevamente su vulnerabilidad a las condiciones, presentando un 88.1% de plántulas normales y un 9.3% de semillas sin germinar.

En el caso de la variable longitud de plúmula después del remojo, se encontró que el proceso DES obtuvo 10.62 cm/plántula, aunque no hubo diferencia significativa en ALM. En longitud media de radícula se presentó una estabilidad relativa en los procesos, donde TRA destacó con 17.2 cm/plántula, posiblemente por la adición de tratamiento químico a la semilla.

**Cuadro 9.** Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de remojo de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

Fuente de variación	gL	Plántulas normales	Plántulas anormales	Semillas sin germinar	Longitud media de plúmula	Longitud media de radícula	Peso seco de plántula
<b>Pro</b>	3	127.7083 **	10.3645 *	141.4479**	15.7146 **	3.2768**	135.1147 **
<b>Rep (Pro)</b>	12	44.4791 *	21.0312 *	12.0729 *	1.9779 **	0.4570 *	20.0439 *
<b>HIB</b>	1	253.1250 **	5.2812	185.2812 **	10.2265 **	0.5125 *	89.7565 **
<b>HIB * Pro</b>	3	73.3750 *	5.6145	46.1145 **	6.9595 **	2.5754 **	234.0404 **
<b>Error Exp.</b>	12	29.6458	11.3645	12.0729	0.4898	0.2496	14.0332
<b>Media</b>		93.0625	3.531	3.4062	9.3903	16.3146	59.0374
<b>DE</b>		± 5.4447	± 3.3711	±3.4746	± 0.6999	± 0.4996	±3.7460
<b>R<sup>2</sup></b>		0.7962	0.6914	0.8603	0.9454	0.8871	0.8951
<b>% CV</b>		5.8506	95.4659	102.0069	7.4536	3.0625	6.3452

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso (Secado, Desgrane, Almacenamiento, Tratamiento); HIB = híbrido (HIB1, HIB2); DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Coeficiente de Variación; Plántulas normales (%), Plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%), longitud media de plúmula (cm/plántula); Longitud media de radícula (cm/plántula); Peso seco (mg/plántula). Niveles de significancia: \*p ≤ 0.05; \*\*p ≤ 0.01.

**Cuadro 10.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de vigor mediante la prueba de remojo de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

	PN	PA	SSG	LMP	LMR	PS						
<b>Proceso</b>												
<b>SEC</b>	95.5	AB	3.5	A	1	B	7.41	C	15.8788	B	54.433	C
<b>DES</b>	97	A	3	A	0	B	10.6263	A	16.2375	B	56.85	BC
<b>ALM</b>	88.125	B	2.5	A	9.375	A	10.0513	AB	15.9	B	63.335	A
<b>TRA</b>	91.625	AB	5.125	A	3.25	B	9.4738	B	17.2425	A	61.532	AB
<b>Híbridos</b>												
<b>HIB1</b>	95.875	A	3.125	A	1	B	8.825	B	16.4413	A	60.712	A
<b>HIB2</b>	90.25	B	3.938	A	5.813	A	9.9556	A	16.1881	A	57.363	B

En donde: PN= Plántulas normales (%); PA =Plántulas anormales (%); SSG= semillas sin germinar (%); LMP= longitud media de plúmula (cm/plántula); Longitud media de radícula (cm/plántula); Peso seco (mg/plántula); SEC= Secado; DES = Desgrane; TRA = Tratamiento; ALM = Almacenamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Estos datos confirman la resistencia diferencial de estructuras embrionarias frente al deterioro fisiológico (Martín *et al.*, 2022).

En la variable de peso seco de plántula en la prueba de remojo se alcanzó el mayor valor en el proceso de ALM con 63.33 mg/plántula, debido posiblemente a una mayor acumulación de biomasa en plántulas más cortas y menos vigorosas (Bajus *et al.*, 2019), confirmando que existe una relación del efecto de la humedad y el secado sobre la densidad y reservas de los granos o semillas.

En la comparación de medias entre los materiales genéticos en esta prueba de remojo, se encontró que HIB1 superó a HIB2 en el porcentaje de plántulas normales de 95.8% contra 90.2 %; mientras que en el peso seco fue de 60.7mg/plántula contra 57.4 mg/plántula, llegando a confirmar que la tolerancia

al deterioro esta influenciada por las características genéticas de los materiales estudiados (Sundareswaran *et al.*, 2023).

### Prueba fría

En el análisis de varianza de la prueba fría, se reflejaron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en los procesos, híbridos y en la interacción sobre variables de PN, PA y SSG después de una condición de frío (Cuadro 11), confirmando que tanto el manejo de la postcosecha como genética de los materiales influyen en la respuesta al estrés de bajas temperaturas.

Al comparar los procesos, se encontró que SEC resultó con el valor más alto de vigor con 73.25% de plántulas normales, seguido ALM con 67 %; mientras que los procesos de DES y ALM tan solo obtuvieron 42.5 y 40.88 % de vigor; se observaron variaciones muy marcadas entre los procesos, lo que puede indicar que una prueba como es la fría, puede ser utilizada para detectar un punto crítico de los procesos; ya que valores de vigor tan bajos como resultaron, evidencian los efectos de estos procesos, al no tener un buen control de manejo como es en el desgrane o un buen mantenimiento de las condiciones de almacén.

Uno de los efectos es evidenciar los valores tan altos que se presentan en las plántulas anormales (PA) y en las semillas sin germinar (SSG); ya que aumentaron significativamente en el proceso de DES y TRA de 46 y 49%; respectivamente, así como de SSG hasta un 11%, reflejando definitivamente la pérdida de la integridad fisiológica de las semillas y por ende una mayor susceptibilidad al daño, ya que el incremento de humedad y manipulación intensiva incrementan la vulnerabilidad de las semillas durante la etapa de postcosecha (Ziegler *et al.* 2021).

En la prueba de comparación entre híbridos, se logró observar que HIB1 resultó con el mayor valor de vigor con 66% de plántulas normales después de someter siete días de frío (Cuadro 11), este material posiblemente presente mayor tolerancia a esta condición de estrés, por lo que puede ser más tolerante a los procesos agroindustriales de la etapa de postcosecha. A diferencia de HIB2 que presentó resultados desfavorables con un 45 % de plántulas normales,

evidenciando una menor resistencia al estrés térmico de frío, confirmando que las diferencias genéticas determinan la resistencia al deterioro y es posiblemente más susceptible a cambios durante los procesos agroindustriales (Martín *et al.*, 2022).

**Cuadro 11.** Cuadrados medios del análisis de varianza y medias por Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en las variables de vigor mediante prueba fría de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

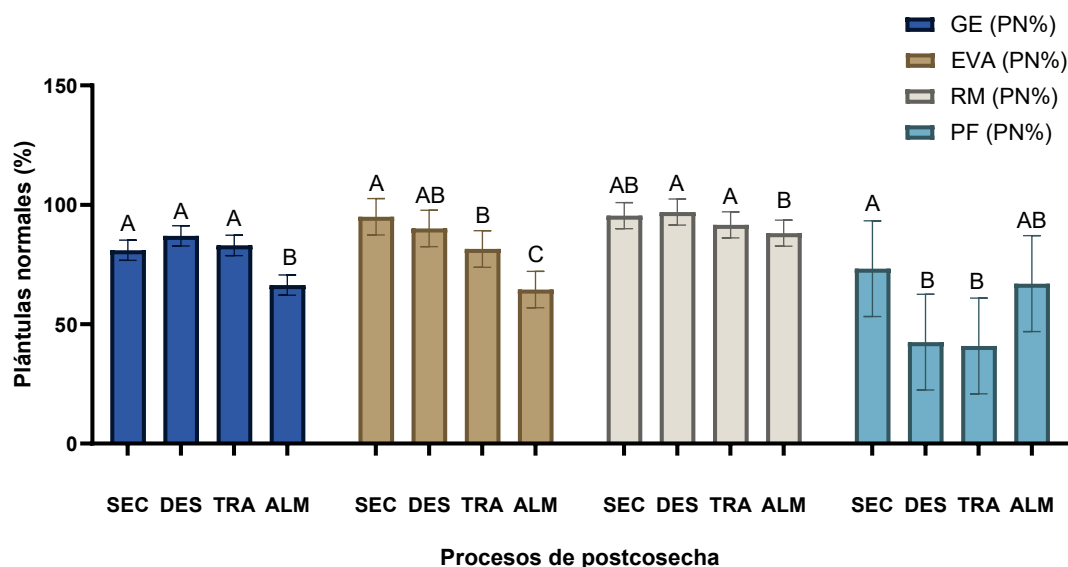
Fuente de variación	gL	Plántulas Normales	Plántulas anormales	Semillas sin germinar
Proceso	3	2212.1145 **	1490.3750 **	146.6145 *
Rep (Pro)	12	813.7395 *	633.1458 **	129.0312 *
HIB	1	3260.2812 **	2628.1250 **	34.0312
HIB * Pro	3	1832.6145 **	2238.0416 **	98.6979 *
Error Exp	12	401.9479	242.4791	93.1979
Media (%)		55.9062	36.1875	7.9062
DE		±20.0486	± 15.5717	± 9.6539
R <sup>2</sup>		0.8391	0.8803	0.6745
%CV		35.8611	43.0307	122.1048

	Plántulas normales (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas sin germinar (%)
<b>Proceso</b>			
SEC	73.25	A	25.125
DES	42.5	B	46.25
ALM	67	AB	23.75
TRA	40.88	B	49.625
<b>Híbridos</b>			
HIB1	66	A	27.125
HIB2	45.813	B	45.25

Donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso; HIB = híbrido; DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Coeficiente de Variación; SEC= Secado; DES = Desgrane; TRA = Tratamiento; ALM = Almacenamiento. Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En la Figura 2 se muestra la integración de los resultados de las diferentes pruebas fisiológicas, lo que señala que, aunque el proceso de SEC y DES permitieron conservar los altos porcentajes de plántulas normales en la mayoría de las pruebas, el proceso ALM se consolidó como el punto crítico dentro del sistema del control de calidad en la agroindustria debido a que puede ser afectada la calidad de la semilla por sufrir una mayor velocidad de deterioro.



**Figura 2.** Respuesta de las plántulas normales mediante las pruebas de germinación y vigor en los procesos de postcosecha. Donde: GE= Germinación Estándar; EVA= Envejecimiento acelerado; RM= Prueba de remojo; PF= Prueba fría; SEC= Secado; DES= Desgrane; TRA= Tratamiento; y ALM= Almacenamiento. Barras del mismo color con la misma letra no difieren significativamente.

En este proceso de ALM, la germinación estándar (GE) y en la prueba de remojo (RM), registraron reducciones significativas por debajo del 70 %, mientras que en envejecimiento acelerado (EVA) y prueba fría (PF), aunque los valores fueron ligeramente más altos, también se evidenció una tendencia descendente respecto a los procesos previos. Este comportamiento refuerza la importancia de considerar el proceso ALM como un punto crítico de control en la postcosecha de semillas híbridas de maíz.

La comparación entre pruebas demuestra, además, la complementariedad de los métodos de evaluación. Mientras la germinación estándar reflejó la viabilidad general, las pruebas de vigor (remojo, envejecimiento y frío) fueron más sensibles para detectar el deterioro fisiológico, especialmente asociado a daños en membranas, reducción de reservas y menor capacidad de germinar en condiciones adversas. En este sentido, los resultados concuerdan con lo señalado por la ISTA y con estudios recientes que destacan la necesidad de

combinar pruebas estándar y de vigor para un diagnóstico más confiable de la calidad de semilla (Sundareswaran *et al.*, 2023).

## **Calidad sanitaria**

### Prueba *Blotter test*

En la prueba de papel secante (*Blotter test*) se identificó la presencia de hongos fitopatógenos en las semillas híbridas estudiadas de maíz, mostrando el análisis de varianza diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre los procesos e híbridos (Cuadro 12); tanto en el porcentaje de semillas sanas (SS), como en las semillas infectadas (SI), teniendo un coeficiente de determinación de 0.82 ( $R^2 = 0.82$ ), con un buen ajuste del modelo; mientras el Coeficiente de Variación (CV) resultó bajo de 16.23 % en semillas sanas (SS), lo que refleja consistencia en las mediciones sanitarias.

En contraste, en SI el CV fue alto (68.95 %), lo que sugiere heterogeneidad en la incidencia de infección entre los procesos o repeticiones, lo cual es común en pruebas de sanidad ya que la infección fúngica no se distribuye de manera uniforme, dependiendo del microambiente y del origen del lote (Hernández-Delgado *et al.*, 2007).

Cabe señalar que, los porcentajes de semillas sanas e infectadas presentados en el Cuadro 12, corresponden a medias ajustadas derivadas del modelo lineal general (GLM) utilizado en el análisis de varianza, el cual considera los efectos del proceso, híbrido e interacción (híbrido x proceso), así como el error experimental. Estas medidas ajustadas reflejan las tendencias estadísticas globales del experimento y fueron las empleadas para realizar las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Por lo que los datos provenientes del análisis estadístico proporcionaron una evaluación cuantitativa del nivel general de infección; mientras que los resultados descriptivos complementaron la interpretación desde una perspectiva biológica y

fitopatológica, permitiendo identificar los géneros dominantes de los fitopatógenos.

**Cuadro 12.** Cuadrados medios del análisis de varianza y de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en las variables de *Blotter test* de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

Fuente de variación	gl	Semilla sana	Semilla infectada
Pro	3	1386.2083 **	1386.2083 **
Rep (Pro)	12	349.8541 *	349.8541 *
HIB	1	1128.1250 **	1128.1250 **
HIB * Pro	3	81.2083	81.2083
Error Exp.	12	172.7708	172.7708
Media		80.9375	19.0625
DE		$\pm 13.1442$	$\pm 13.1442$
R <sup>2</sup>		0.8243	0.8243
% CV		16.2399	68.9533

	Semillas sanas (%)		Semillas infectadas (%)	
<b>Proceso</b>				
SEC	78.375	AB	21.625	AB
DES	84.5	A	15.5	B
ALM	64.625	B	35.375	A
TRA	96.25	A	3.75	B
<b>Híbridos</b>				
HIB1	75	B	25	A
HIB2	86.875	A	13.125	B

En donde: Pro= procesos; gL= Grados de libertad; SEC= secado; DES = desgrane; TRA = tratamiento; ALM = Almacenamiento. Nivel de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En el proceso de ALM se presentó diferencias significativas (por Tukey,  $p \leq 0.05$ ), con respecto al resto de procesos, con mayor porcentaje de SI (35.37 %) y menor de SS (64.63 %), señalado en el Cuadro 12, detectando que durante este proceso ocurre un incremento en la incidencia de patógenos en las semillas.

Es pertinente resaltar que las semillas que se encontraron infectadas se expresaron en porcentaje promedio de incidencia por proceso, donde en algunos casos, una misma semilla presentaba una colonización simultánea por más de un agente fúngico, como lo fueron los géneros *Fusarium* y *Penicillium*.

Dichos géneros se encuentran estrechamente asociados a la semilla, ya sea de forma externa (superficial) o interna (embrión o endospermo), y se consideran patógenos transmitibles por semillas, capaces de diseminarse durante la siembra o almacenamiento y de reducir la viabilidad y vigor de las semillas (Agrios, 2005; CIMMYT, 2019).

Estos resultados de alta infección encontrada en las semillas durante el proceso de ALM del estudio, posiblemente se dio por las condiciones desfavorables de temperatura y humedad relativa alta, las cuales favorecen la proliferación de hongos de los géneros: *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium* (Christensen & Kaufmann, 1974; Peske *et al.*, 2012); además si la humedad residual del grano o semilla es alta y deficiente el intercambio gaseoso y la acumulación de CO<sub>2</sub> en silos o costales, pueden deteriorar la integridad del tegumento y facilitar la colonización fúngica (Agrios, 2005).

En cambio, en el proceso de TRA se presentó el mayor porcentaje de semillas sanas de 96.25 % y menor de infectadas SI con 3.75 %, evidenciando la efectividad de los tratamientos químicos aplicados (Abadía & Bartosik, 2013).

En la comparación entre los híbridos estudiados, HIB2 obtuvo mayor proporción de SS (86.88 %), a diferencia de HIB1 que resultó con 75%, lo que podría asociarse con las diferencias genéticas de estos materiales en la dureza del pericarpio y en la resistencia inherente a la penetración de hongos (Machado *et al.*, 2019). Los híbridos que presentan pericarpios más compactos suelen mostrar menor incidencia de infección, ya que el espesor de la capa cuticular actúa como barrera física y química frente a la invasión de micelios (Munkvold, 2003).

### Placas de medio de cultivo papa dextrosa agar y malta sal agar

El análisis de varianza del método de siembra en placas de cultivo reflejó diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre los procesos e híbridos para las variables de semillas sanas (SS) e infectadas (SI), tanto en el medio papa dextrosa agar (PDA), como malta sal agar (MSA) (Cuadro 13), logrando visualizar una respuesta diferenciada de la sanidad según la etapa de postcosecha y el híbrido. En ambos cultivos se encontró un coeficiente de determinación de 0.80–0.89 cada uno, indicando que el modelo explica entre el 80% y 89% de la variación total observada, lo que respalda la confiabilidad de los resultados. Los coeficientes de variación (Cuadro 13) fueron bajos en la variable de semillas sanas (SS), en PDA fue de 27.89 % y en MSA de 9.43 %, lo que sugiere uniformidad y estabilidad en las observaciones de esta variable. En cambio, en las semillas infectadas (SI), los coeficientes de variación fueron altos en PDA de 45.68 % y en MSA de 77.68 %, lo que reflejó una alta heterogeneidad en la infección fúngica, esto se atribuye a la naturaleza aleatoria y dependiente del microambiente de los patógenos, así como a las diferencias en el manejo o procedencia de los lotes (Copeland & McDonald, 2001).

En cuanto a la prueba de comparación de medias, los resultados para el cultivo de PDA mostraron que el proceso de ALM registró el mayor porcentaje de semillas infectadas con 55%, con un 24.04% de presencia *Fusarium spp.*, 23.38% de *Penicillium spp.* y 9.75% de *Aspergillus spp.*

En algunas investigaciones han demostrado que la variación de las condiciones de humedad y temperatura en el almacenamiento, pueden favorecer el desarrollo y proliferación de hongos (Ariong *et al.* 2023); lo cual existe la posibilidad que en este estudio, el proceso ALM hayan contribuido en el desarrollo de hongos de almacén como *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.*, y *Fusarium spp.*, los cuales son capaces de crecer a bajas actividades de agua y temperaturas moderadas (Christensen & Kaufmann, 1974; Peske *et al.*, 2012). Los hongos de almacén pueden permanecer latentes y reactivarse cuando las condiciones de humedad superan el 13%, deteriorando la cubierta seminal y reduciendo la viabilidad del embrión (Agrios, 2005; CIMMYT, 2019).

En el caso de los procesos de DES y SEC, mostraron menor incidencia general con 40 y 46.67 %, respectivamente, quizá fueron las condiciones más favorables en la conservación e integridad de las semillas. Sin embargo, los porcentajes fueron un poco menor que el ALM, lo que puede indicar que la semilla ya traía los fitopatógenos desde campo.

En contraste, el proceso de TRA mostró el mayor porcentaje de semillas sanas con 90% y la menor incidencia de infección de 10%. Era de esperarse, debido a la eficacia de los tratamientos químicos aplicados a la semilla

**Cuadro 13.** Cuadrados medios del análisis de varianza y de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) de las variables sanitarias de la prueba *Blotter test* en los procesos e híbridos HIB1 y HIB2 evaluados en el primer estudio.

Fuente de variación	gL	PDA Semillas sanas	PDA Semillas infectadas	MSA Semillas sanas	MSA Semillas infectadas
Proceso	3	2304.1666 **	2304.1666 **	550 **	551 **
Rep (Pro)	8	141.6666	141.6666	304.1666 **	304.1666 **
HIB	1	1204.1666 **	1204.1666 **	416.6666 **	416.6666 **
HIB * Pro	3	115.2777	115.2777	105.5555*	105.5555*
Error Exp	8	300	300	70.8333	70.8333
Media		62.0833	37.9166	89.1666	10.8333
DE		± 17.3205	± 17.3205	± 8.41625	±8.4162
R <sup>2</sup>		0.7999	0.7999	0.8947	0.8947
%CV		27.8988	45.6804	9.4387	77.6885

	PDA SS (%)	PDA SI (%)	MSA SS (%)	MSA SI (%)
<b>Proceso</b>				
SEC	53.33	B	46.67	A
DES	60	AB	40	AB
ALM	45	B	55	A
TRA	90	A	10	B
<b>Híbridos</b>				
HIB1	69.167	A	30.833	A
HIB2	55	A	45	A

En donde: Pro = proceso; gL= Grados de libertad, PDA= agar papa dextrosa, MSA=malta sal agar, SS= semillas sanas, SI= semillas infectadas, Pro= proceso, SEC= secado, DES = desgrane, TRA = tratamiento, ALM = Almacenamiento. Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En cuanto el medio de cultivo MSA, se encontró un comportamiento similar al cultivo de PDA (Cuadro 13), pero en menor incidencia de patógenos, por ser un medio selectivo. Los resultados con mayor infección se presentaron en el proceso de DES con 23.3%, seguido el de SEC y ALM con 10%; mientras que en el proceso de TRA prácticamente se eliminó (0%) de la presencia fúngica (Cuadro 13). Esto confirma el mayor espectro de microorganismos que se encuentran en la semilla con el medio PDA, favoreciendo el desarrollo de hongos fitopatógenos como *Fusarium* y *Rhizopus*; en cambio, el medio de cultivo MSA, por la presencia de sal (NaCl), restringe el crecimiento de algunos hongos que requieren humedades relativas altas para su desarrollo, siendo más selectivo en el desarrollo de las especies de *Aspergillus* y *Penicillium* (Machado *et al.*, 2019), siendo un gran problema su presencia en la semilla sobre todo en el proceso de conservación o almacenamiento dentro de la postcosecha.

Por otra parte, la prueba de comparación de medias entre los híbridos de este estudio, reflejó que HIB1 resultó con un mayor valor de sanidad, al encontrar 69.17% de semillas sanas y un 83.3% en medio MSA; teniendo una respuesta contraria el HIB2, quien registró la mayor incidencia de patógenos (Cuadro 13).

El híbrido HIB1 presentó mayor incidencia de *Fusarium spp.* (17.67 %), mientras que HIB2 tuvo un 8.15% de *Fusarium spp.* y 10.5 % de *Penicillium spp.* (Cuadro 14); existiendo la posibilidad de que los materiales estudiados tienen diferentes características a la resistencia genética del pericarpio (García *et al.*, 2003, Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020), o al grado de lignificación de las capas protectoras en las semillas de cada híbrido, las cuales determinan la capacidad de las mismas en resistir la penetración de micelios o esporas de microorganismos patógenos (Munkvold, 2003); ya que en materiales mejorados llegan a contener pericarpios más compactos o cerosos impidiendo la entrada de patógenos y por ende presentar menor incidencia, al dificultar la colonización de estructuras infectivas (García *et al.*, 2003; Martínez-Fraca *et al.*, 2022).

**Cuadro 14.** Promedio aritmético de incidencia fúngica mediante *Blotter test* de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

	<i>Fusarium</i> <i>spp.</i> (%)	<i>Penicillium</i> <i>spp.</i> (%)	<i>Aspergillus</i> <i>spp.</i> (%)	<i>Rhizopus</i> <i>spp.</i> (%)
<b>Proceso</b>				
<b>SEC</b>	14.8	9.62	4.62	2.96
<b>DES</b>	11	8	3.75	0.83
<b>ALM</b>	24.04	23.38	9.75	2.08
<b>TRA</b>	2.47	1	1	0
<b>Híbridos</b>				
<b>HIB 1</b>	17.67	10.5	5.06	1.69
<b>HIB 2</b>	8.15	10.5	4.25	1.25

SEC= secado, DES= desgrane, AMP= almacenamiento, TRA= tratamiento.

En cuanto a la técnica de diagnóstico con el medio de cultivo de PDA, en el proceso de ALM, se detectó nuevamente a los géneros predominantes como *Fusarium spp.* con 46.67 % y *Penicillium spp.* con 36.67 % (Cuadro 15), siendo este medio favorecedor en el crecimiento de hongos fitopatógenos por su alto contenido de carbohidratos. Así mismo, en los procesos de SEC y DES, se obtuvieron valores de infección de 26.67 y 20%, respectivamente.

Esta técnica de PDA puede ser considerada una buena opción como protocolo de rutina en los procesos de SEC, DES y ALM, para detectar un punto crítico y corregir a tiempo, asegurando la calidad sanitaria de los lotes dentro de la agroindustria. Es una técnica con mayor sensibilidad y de amplio espectro, al permitir detectar patógenos provenientes de campo y a los que se manifiestan en postcosecha; aún en baja frecuencia como se detectó en este estudio, *Aspergillus spp.* (5%), donde las condiciones de humedad y temperatura que probablemente se presentaron en el proceso de ALM, permitieron su proliferación del patógeno.

**Cuadro 15.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Papa Dextrosa Agar (PDA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

	<i>Fusarium</i> <i>spp.</i> (%)	<i>Penicillium</i> <i>spp.</i> (%)	<i>Aspergillus</i> <i>spp.</i> (%)
<b>Proceso</b>			
<b>SEC</b>	46.67	26.67	0
<b>DES</b>	40	20	0
<b>ALM</b>	46.67	36.67	5
<b>TRA</b>	10	8.33	0
<b>Híbridos</b>			
<b>HIB1</b>	33.33	20	3.33
<b>HIB2</b>	37.33	24.67	0

SEC= Secado; DES= Desgrane; AML= Almacenamiento; TRA= Tratamiento.

Con respecto a la técnica de diagnóstico utilizando el medio MSA, resultó con una menor incidencia de patógenos en los procesos de postcosecha, en comparación a las técnicas anteriores, predominando el género *Fusarium spp.* con 23.33% en el proceso de DES, (Cuadro 16); y así mismo, el género *Penicillium spp.* con 10% tanto en el proceso de DES y ALM.

**Cuadro 16.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Malta Sal Agar (MSA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el primer estudio.

<b>Proceso</b>	<i>Fusarium spp.</i> (%)	<i>Penicillium spp.</i> (%)
<b>SEC</b>	10	3.33
<b>DES</b>	23.33	10
<b>ALM</b>	10	5
<b>TRA</b>	0	0
<b>Híbridos</b>		
<b>HIB 1</b>	6.67	2.5
<b>HIB 2</b>	15	6.67

SEC= secado, DES= desgrane, AMP= almacenamiento, TRA= tratamiento.

Al integrar los resultados de las tres metodologías implementadas (Cuadro 13-15), se identificó que en el proceso de ALM constituye el punto crítico con mayor incidencia de hongos, particularmente, *Fusarium spp.* y *Penicillium spp.*, que pueden coexistir en una misma semilla. La frecuencia de estas asociaciones refleja que es muy probable que en los sistemas de producción de semillas exista una contaminación inicial en la etapa de campo y continua en la siguiente etapa de postcosecha, teniendo una persistencia de inóculos latentes hasta el proceso de almacenamiento.

La presencia del género *Fusarium spp.* en los híbridos estudiados detectado en las diferentes pruebas aplicadas, confirma su importancia de este género por su patogenicidad y la facilidad de transmitirse por semilla; mientras que los géneros *Penicillium spp.* y *Aspeguillus spp.* actúan como indicadores de un almacenamiento inadecuado o de las deficiencias en el proceso de secado inicial.

Las técnicas que este estudio realizó para la evaluación sanitaria de semilla híbrida de maíz como fue la prueba de papel secante (*Blotter test*) y los medios de cultivo PDA y MSA, permitieron identificar diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre los procesos de postcosecha de los híbridos HIB1 y HIB2, lo que confirma que la incidencia de hongos fitopatógenos están directamente relacionados con el manejo de postcosecha y características genéticas de los materiales, teniendo un valores de  $R^2$  elevados de 0.80-0.89 y porcentajes en los Coeficientes de Variación bajos (Cuadro 13), indicando que los resultados fueron consistentes en las variables evaluadas en la calidad sanitaria y confiables por el modelo estadístico utilizado.

En general, las tres técnicas de identificación de patógenos coincidieron en señalar que el proceso de ALM es el punto crítico en el aseguramiento de la calidad en la etapa de postcosecha en el sistema de producción de semillas híbridas como HIB1 y HIB2, al presentar los mayores porcentajes de semillas infectadas, en *Blotter test* (35.37%), en PDA (55%) y en MSA (10%).

Este patrón de respuesta indica que, una vez concluido el proceso de DES y el tiempo que se tenga en el proceso de ALM, la semilla estará expuesta a un

ambiente donde las condiciones de humedad relativa y temperatura favorecerán el desarrollo de hongos como *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.*, y *Fusarium spp.* (Ariong *et al.*, 2023); ya que estos fitopatógenos pueden sobrevivir y entrar en un estado latente, cuando la condición no es propicia para ellos, y llegan a reactivarse cuando el contenido de humedad la semilla supera los 12-13%, desencadenando un deterioro en el pericarpio y comprometiendo la viabilidad del embrión (Sampietro *et al.*, 2009).

No obstante, el proceso de TRA logra corregir estos efectos y disminución de infección en las semillas, al encontrar en las técnicas utilizadas del estudio, un aumento considerable en el porcentaje de semillas sanas, evidenciando la eficacia del control químico y físico aplicado después de un almacenamiento provisional. Sin embargo, es necesario considerar el tipo de tratamiento que se aplica en los lotes de semillas comerciales dentro de la agroindustria.

Los diferentes resultados encontrados en los medios de cultivo utilizados también aportan una información relevante sobre todo en la naturaleza de los patógenos presentes en la semilla. El medio PDA resultó más sensible, revelando un mayor espectro de patógenos en la semilla, debido a la composición rica en carbohidratos (dextrosa e infusión de papa) favoreciendo el desarrollo de hongos fitopatógenos como *Fusarium*, *Rhizopus* y *Alternaria*. En cambio, el medio MSA es más selectivo al presentar menor espectro de patógenos; sin embargo, las especies que se logran identificar son más agresivas en su control, ya que son contaminantes predominantes en condiciones de almacén, y están mejor adaptados a los ambientes con menor disponibilidad de nutrientes y presencia de sales, como son los géneros de *Aspergillus* y *Penicillium*.

La prueba de *Blotter test* es un método práctico y herramienta complementaria con alta sensibilidad para detectar la presencia general de hongos en el interior de la semilla, sin ser limitados por los componentes de un medio de cultivo. Por ello, es una prueba recomendada para la detección de un amplio espectro de fitopatógenos, particularmente cuando se busca determinar la incidencia global antes de caracterizar los aislamientos específicos.

Finalmente, en los materiales genéticos evaluados, HIB1 coincidió en los diferentes métodos de identificación el tener una mayor proporción de semillas sanas, repuesta contraria en HIB2, indicando que posiblemente estas técnicas logran asociarse con diferencias genéticas de los híbridos en la estructura del pericarpio, que confieren mayor resistencia mecánica y química frente a la penetración de micelios de fitopatógenos en la semillas (Guillen-de la cruz *et al.*, 2018; Martínez-Fraca *et al.*, 2022).

Es importante destacar que los porcentajes de incidencia por especie fúngica obtenidos de las diferentes técnicas de diagnóstico (*Blotter test*, PDA y MSA), se presentan de forma descriptiva, y fueron calculados aritméticamente de las repeticiones en cada proceso evaluado; los cuales no fueron sometidos a un análisis estadístico formal, debido a que la identificación de colonias se realizó con fines de diagnóstico comparativo, enfocado en determinar o identificar los agentes fúngicos predominantes en los diferentes procesos de postcosecha, con el fin de elegir el predominante para la realización de las pruebas moleculares sucesivas.

Por lo que los datos provenientes del análisis estadístico proporcionaron una evaluación cuantitativa del nivel general de infección; mientras que los resultados descriptivos complementaron la interpretación desde una perspectiva biológica y fitopatológica, permitiendo identificar los géneros dominantes de los fitopatógenos.

## **Segundo estudio. Evaluación de la calidad de HIB3 y HIB4 en los procesos de la etapa de postcosecha.**

### **Calidad física**

#### Prueba de pureza física

El análisis de pureza física mostró diferencias en los diferentes procesos estudiados en estudio, demostrando un efecto de la calidad de la semilla antes y una vez clasificados, posiblemente por un proceso de limpieza, como se muestra en el Cuadro 17.

Lo anterior, se debió a que en el proceso de reciba (REC) ambos híbridos presentaron un valor bajo de semilla pura de 90%, lo que indicaba que los materiales genéticos contenían una cierta cantidad de impurezas, como son la materia inerte y semillas dañadas, siendo muy común en los primeros pasos de los procesos de la etapa de postcosecha (Ariong *et al.*, 2023).

Más aún en el proceso de clasificación (CLA), los híbridos llegaron a presentar un 99% de pureza física al ser eliminada la totalidad de la materia inerte; siendo una mejora notable en la calidad física, ya que las fracciones de semillas dañadas, pequeñas o impurezas se redujeron por debajo del 1%; reflejando una eficacia en el proceso de separación y calibrado de la maquinaria.

Donde finalmente, el proceso de TRA lograron alcanzar del 100 al 99% de semillas pura en HIB3 y HIB4 respectivamente, evidenciando que en este proceso es una de las actividades donde el material genético está completamente limpio y seleccionado, cumpliendo con los estándares de calidad exigidos por los programas de certificación (SNICS, 2021; ISTA, 2023).

**Cuadro 17.** Variables del análisis de pureza física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de la etapa de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbrido	Proceso	Semilla pura (%)	Materia inerte		
			Dañado (%)	Pequeño (%)	Basura (%)
HIB3	REC	90	3	4	3
	CLA	99	1	0	0
	TRA	100	0	0	0
HIB4	REC	90	5	2	3
	TRA	99	0	0	1

En donde: REC= reciba, CLA = clasificación, TRA = tratamiento.

La reducción progresiva del porcentaje de materia inerte y semillas dañadas desde la REC al TRA confirma la efectividad del flujo de postcosecha, siendo la pureza física una prueba de rutina el control de calidad y reflejar la eficiencia del proceso de limpieza, siendo un indicador confiable del aseguramiento de la calidad en semillas certificadas (Garcilazo, 2024).

#### Peso de mil semillas, peso volumétrico y contenido de humedad

El análisis de varianza para la variable de peso de mil semillas (PMS) mostró diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), mientras que para Peso Volumétrico (PV), Contenido de Humedad (CH) y en la prueba de daño mecánico (DL, DM, DS) se encontraron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ), así como en la interacción de los híbridos por los procesos de postcosecha (Cuadro 18); teniendo Coeficientes de determinación de 0.96 en CH, 0.84 en DL y 0.85 en DM, lo cual demuestra el alto poder explicativo del modelo; mientras que en PV resultó una  $R^2=0.73$ , y en DS de 0.64, lo cual es lo que se espera por la naturaleza de los eventos de daño mecánico.

Así mismo, los Coeficientes de Variación oscilaron entre 2.26 y 13.66%, indicando la prescripción adecuada; no obstante, el CV relativamente alto en la variable peso de mil semillas (15.3%), se atribuye a la variabilidad genética y morfológica

entre los híbridos, por la diferencia de tamaño y densidad de la semilla (Copeland & McDonald, 2001; Dadlani & Yadava, 2023). A diferencia del error instrumental, el CV estimado en el modelo GLM incluye la variabilidad biológica y experimental total, lo cual explica el incremento respecto al 3 % reportado para pruebas manuales repetitivas.

Con respecto a la variable Peso de Mil Semillas (PMS), en la prueba de comparación de medias, no existieron diferencias significativas entre los procesos y los híbridos (Cuadro 19); donde en el proceso de REC, el HIB3 presentó 325.91 g; en CLA fue de 308.85 g y en el TRA resultó de 359.46 g, logrando reflejar el aumento de la uniformidad del material genético conforme avanzó en los diferentes procesos de postcosecha; mientras que en el proceso de REC, el HIB4 resultó con 359.46 g y en el TRA disminuyó a 306.36 g el PMS.

Esta disminución se asoció posiblemente a que en el proceso de REC todavía se tenían diferentes tamaños de semillas y en los siguientes procesos existió la eliminación de fracciones pequeñas, lo cual incrementó la homogeneidad del lote sin modificar la masa promedio, pero si un poco el PMS (Abadía & Bartosik, 2013; Guiraldo *et al.*, 2000).

**Cuadro 18.** Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de calidad física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Fuente de variación	gL	Peso de mil semillas (g)	gL	Peso volumétrico (Kg/HL)	Contenido de humedad (%)	Daño leve (%)	Daño medio (%)	Daño severo (%)
<b>HIB * Pro</b>	<b>4</b>	3608.6883 *	<b>4</b>	26.0940 **	17.0906 **	288.6000 **	286.5666 **	2.4000 **
<b>Error Exp</b>	<b>34</b>	2463.9857	<b>10</b>	3.8651	0.2893	21.9333	20.6666	0.5333
<b>Media</b>		324.5260		86.7044	11.7400	64.4666	33.2666	2.2666
<b>DE</b>		±49.6385		± 1.9660	± 0.5378	± 4.6833	± 4.5460	± 0.7302
<b>R<sup>2</sup></b>		0.14338		0.7297	0.9593	0.8403	0.8472	0.6428
<b>%CV</b>		15.2957		2.2674	4.5817	7.2646	13.6655	32.2189

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso (Reciba, clasificación, Tratamiento); HIB = híbrido (HIB1, HIB2); Error Exp. = Error experimental; DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Porcentaje de Coeficiente de Variación. Niveles de significancia: \*p ≤ 0.05; \*\*p ≤ 0.01.

**Cuadro 19.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de calidad física de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbridos	Proceso	PMS (g)	PV (kg/HL)	CH (%)	Prueba de daño mecánico					
					DL (%)	DM (%)	DS (%)			
HIB3	REC	325.91 A	87.359 AB	14.53 A	76.67 A	21 B	2.33 AB			
	CLA	308.85 A	90.534 A	12.46 B	54 B	44.67 A	1.33 B			
	TRA	322.06 A	85.080 B	10.20 C	73 A	25.33 B	1.67 B			
HIB4	REC	359.46 A	87.822 AB	13 B	58.67 B	37.67 A	3.67 A			
	TRA	306.36 A	82.728 B	8.5 D	60 B	37.67 A	2.33 AB			

En donde: PMS=Peso de mil semillas; PV= Peso Volumétrico; CH= Contenido de Humedad; DL= Daño mecánico leve o sin daño; DM = Daño mecánico moderado; DS= Daño mecánico severo; REC= Recepción; CLA = Clasificación; TRA = Tratamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

El incremento de PV en la etapa de clasificación confirma la eficiencia del proceso de calibrado, que elimina materiales quebrados y ligeros, manejando la fluidez del lote, lo cual es un indicador indirecto de densidad y sanidad, lo cual es clave en la determinación del rendimiento industrial (Bourne, 2014).

La disminución del peso volumétrico en la etapa de tratamiento se puede deber al manejo físico y la aplicación de recubrimientos químicos, los cuales modifican la textura superficial y reducen la densidad aparente de la semilla sin comprometer su integridad (Baldini *et al.*, 2018; Bajus *et al.*, 2019). Además de pequeñas diferencias en el contenido de humedad que también se reflejan en la masa por volumen (Bajus *et al.*, 2019; FAO, 2001).

En cuanto el contenido de humedad (CH), este presentó diferencias significativas entre etapas ( $p \leq 0.01$ ), con tendencia a descender conforme avanza el proceso de postcosecha (Cuadro 19). En el HIB3 el CH disminuyó de 14.53% en reciba a 10.2% en tratamiento, y en HIB4 de 13% en reciba a 8.5% en tratamiento. Este descenso refleja la efectividad del secado y acondicionamiento, alcanzando

niveles óptimos y reduciendo el riesgo de deterioro fisiológico y proliferación fúngica (Ziegler *et al.*, 2021).

Las diferencias entre híbridos sugieren variaciones estructurales en el pericarpio y permeabilidad de la semilla, factores genéticos que determinan la velocidad de deshidratación (Estrada-Urbina *et al.*, 2023). La pérdida de humedad observada en el HIB4 puede deberse a un menor espesor en el pericarpio o una mayor proporción de endospermo harinoso, lo cual acelera el intercambio gaseoso y pérdida de agua (Bewley *et al.*, 2012).

### Prueba de daño mecánico

En la prueba de daño mecánico, el análisis de varianza indicó diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en los híbridos y los procesos de postcosecha (Cuadro 18). Donde el daño leve (DL) resultó con mayor porcentaje en todos los procesos evaluados en este segundo estudio (Cuadro 19), teniendo los mayores valores HIB3 con 76.67% en el proceso de REC y disminuyó al siguiente proceso de CLA, reflejando por ende un aumento en el DM hasta 44.467% y volviendo a recuperarse un poco en el TRA; en cambio HIB4 no tuvo diferencias en los porcentajes de DL tanto en REC como en TRA, así como en DM, pero en los porcentajes de DS, si hubo una ligera diferencia en el proceso de REC al llegar al TRA. Estas diferencias en el daño mecánico sobre todo en la clasificación se pueden deber a la sensibilidad del material a la configuración de los equipos y diferencia de humedad (Bajus *et al.*, 2019; Hasmeda, 1991). Y si existe una reducción del daño durante el acondicionamiento, puede indicar que se tuvieron buenas prácticas en el manejo como: el control de alturas de caída, velocidades, acolchonamiento y sincronización (FAO, 1993; Arévalos *et al.*, 2021).

Desde la perspectiva del aseguramiento de calidad, la disminución o limitación de daño mecánico moderado y severo es esencial para preservar el vigor y emergencia, reduciendo así microfracturas, entradas de humedad y por tanto de patógenos (Mancera Rico *et al.*, 2007; Becerra-Sánchez & Taylor, 2021; Martín

*et al.*, 2022). La literatura coincide que la relación de humedad-temperatura-tiempo e intensidad determina el deterioro postcosecha (Suleiman *et al.*, 2013; Hodges *et al.*, 2011; Ziegler *et al.*, 2021).

Los resultados anteriores demuestran que la respuesta de la calidad física, está ligada al genotipo, destacando HIB3 en su PV, mientras que HIB4 en obtener bajo CH y DS en el proceso de TRA. Operativamente el proceso de CLA se confirma como un punto de control crítico para mejorar la uniformidad y el PV; mientras que en el TRA es un proceso clave para consolidar la calidad de fina; sin embargo, debe supervisarse el recubrimiento y el flujo de equipos para no incrementar el daño (Oakland, 2014; Garcilazo, 2024).

En ambos casos, aunque los materiales no atraviesan el flujo completo de postcosecha, la gestión de los procesos intermedios es necesaria para conservar la calidad física de la semilla, asegurando los estándares del SNICS e ISTA, además de la operación de las buenas prácticas en postcosecha (FAO & AfricaSeeds, 2019; Secretaría de Agricultura, 2024).

## **Calidad fisiológica**

### Pruebas de germinación estándar y vigor

El análisis de varianza para las pruebas de calidad fisiológica en el segundo estudio mostró diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en la interacción de híbrido por proceso para las variables de Plántulas Normales (PN), Longitud Media de Radícula (LMR), y Peso Seco (PS); mientras para Plántulas Anormales (PA), Semillas Sin Germinar (SSG) y Longitud Media de Plúmula (LMP) resultaron con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), como lo muestra el Cuadro 20. Estas diferencias fisiológicas confirman que los híbridos estudiados no solo dependen de sus características genéticas, sino que también están relacionadas al manejo. En el Cuadro 20, los Coeficientes de Variación (CV) en las variables PN, LMR y PS se reportaron con porcentaje por debajo del 20 %; mientras que en PA, LMP y SSG fueron con valores mayores; así mismo, los valores de  $R^2$  oscilaron entre

0.23 y 0.65 en las variables, lo que sugiere que el modelo estadístico explica la variabilidad fisiológica esperada bajo condiciones controladas.

En la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en la comparación de medias, reflejó que HIB3 presentó mayor porcentaje de PN con un 82% en el proceso de CLA y 76% en el de REC (Cuadro 21); en cambio HIB4 presentó 67% de PN en el proceso de REC y disminuyó hasta 66% en el TRA.

Estas respuestas en los materiales genéticos reflejan una fluctuante estabilidad fisiológica, asociada a la manipulación a la que fueron sometidos en el proceso de secado, a una exposición térmica (por el sol) ya que el proceso de secado fue de manera natural en campo, o mecánica al momento de cosecha, una vez obtenido el punto óptimo, y en los siguientes procesos como CLA y TRA, se reduce el tiempo de manipulación y por ende hay menos estrés en la fisiología de las semillas (Abadía & Bartosik, 2013).

En el caso de HIB4, del proceso de REC a TRA mostró una ligera disminución en PN de 66% y un aumento en PA de 29%; es más común encontrar estos comportamientos en materiales genéticos que son susceptibles al estrés mecánico y fisiológico durante el acondicionamiento; confirmado este efecto por los resultados encontrados en la prueba de daño mecánico de este segundo estudio (Cuadro 19), ya que las lesiones internas en las semillas, afectan la integridad del embrión y con ello el establecimiento de plántulas normales (Mancera *et al.*, 2007; Hasmeda, 1991). A pesar de tener un porcentaje desde 73 a 66% de PN en el proceso de TRA, estos materiales no cumplen con el porcentaje establecido para una comercialización dictaminado por el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS, 2021).

**Cuadro 20 .** Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de germinación estándar y vigor de las semillas híbridas de maíz evaluadas en los diferentes procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Fuente de variación	gL	Plántulas normales (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas sin germinar (%)	Longitud media de plúmula (cm/plántula)	Longitud media de radícula (cm/plántula)	Peso seco (mg/plántula)
<b>HIB * Pro</b>	4	174.8 **	156.95 *	25.05 *	5.34812 *	6.1710425 **	843.569505 **
<b>Error Exp.</b>	15	61.333333	75.783333	21.25	3.55098667	1.36049667	122.854279
<b>Media</b>		72.8	22.65	4.55	8.296	17.107	67.564
<b>DE</b>		± 7.831560	± 8.705362	± 4.609772	± 1.884406	± 1.166403	± 11.08396
<b>R<sup>2</sup></b>		0.431818	0.355785	0.239169	0.286542	0.547423	0.646774
<b>%CV</b>		10.75764	38.43427	101.3137	22.71464	6.818281	16.40513

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Procesos (Reciba, Clasificación, Tratamiento); HIB = híbrido (HIB3, HIB4); Error Exp. = Error experimental; DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Porcentaje de Coeficiente de Variación. Niveles de significancia: \*p ≤ 0.05; \*\*p ≤ 0.01.

**Cuadro 21.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de germinación estándar y vigor de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbridos	Procesos	PN (%)	PA (%)	SSG (%)	LMP (cm/pl)	LMR (cm/pl)	PS (mg/pl)
HIB3	REC	76 A	16 A	8 A	8.92 A	18.4 A	85.77 A
	CLA	82 A	17 A	1 A	8.99 A	15.22 B	55.04 BC
	TRA	73 A	22.25 A	4.75 A	9.46 A	17.2 AB	77.81 AB
HIB4	REC	67 A	29 A	4 A	6.91 A	17.99 A	51.75 C
	TRA	66 A	29 A	5 A	7.2 A	16.71 AB	67.45 ABC

En donde: PN = Plántulas normales; PA = Plántulas anormales; SSG = semillas sin germinar; LMP = longitud media de plúmula (cm/plántula); LMR = longitud media de radícula (cm/plántula); PS = Peso seco (mg/plántula); SEC= secado, DES = desgrane, TRA = tratamiento, ALM = Almacenamiento, HIB = híbrido. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Para la variable de Semillas Sin Germinar (SSG) ambos híbridos y procesos evaluados, no tuvieron diferencias significativas. Sin embargo, se tuvo un ligero aumento en HIB3, el cual podría estar asociado a la heterogeneidad en la humedad inicial o en la frecuencia de semillas inmaduras en las condiciones presentadas en un secado en campo (Bajus *et al.*, 2019; Bewley *et al.*, 2012). La reducción de SSG en los procesos de CLA y TRA, reflejan el beneficio que le dan a los lotes en estos procesos, mejorando la uniformidad del lote (Guiraldo *et al.*, 2000; FAO & AfricaSeeds, 2019).

Para las variables Longitud de plúmula y radícula (LMP y LMR), se encontraron diferencias significativas (Cuadro 20); donde HIB3 presentó LMP desde 8.9 hasta 9.5 cm/plántula; así como LMR de 15.2 a 18.4 cm/plántula. En cambio, HIB4 resultó con valores inferiores de 6.9 a 7.2 cm/plántula en LMP y 16.7 a 18 cm/plántula en LMR. La mayor elongación en HIB3 indica que este híbrido contenía una mejor integridad estructural y menor daño al embrión (Becerra-Sánchez & Taylor, 2021; Bewley *et al.*, 2012).

Y en el caso de HIB4 al tener una LMR menor en el proceso de TRA, posiblemente se debió al contacto constante de las semillas con la maquinaria, con el tipo de tratamiento y a una clasificación secundaria, donde las fricciones superficiales o micro fisuras en el pericarpio pueden comprometer la capacidad de imbibición, la transpiración y el balance hídrico del embrión, limitando la expansión celular durante la germinación (Arévalos *et al.*, 2021; FAO, 2001).

Por otra parte, en la variable de peso seco de plántula (PS), se encontró una diferencia significativa ( $p \leq 0.01$ ), en los híbridos y en los procesos; donde HIB3 en el proceso de REC presentó el mayor valor de 85.77 mg/plántula, seguido el TRA con 77.81 mg/plántula (Cuadro 21), lo cual muestra una alta eficiencia fisiológica y metabólica, presentando mayor PN y LMR. En cambio, HIB4 reportó una menor biomasa en el proceso de REC, indicando que este material ya venía de campo con bajo vigor y aunado a ello, por el impacto mecánico y la pérdida de reservas en el eje embrionario dado por los procesos anteriores como secado y cosecha a los que fue sometido el lote en campo (Ariong *et al.*, 2023).

Una reducción de PS es un indicador temprano de daño subletal en semillas de maíz, al afectar la respiración y la movilización de reservas durante los primeros días de germinación, al afectar la respiración y movilización de reservas durante los primeros días de germinación (Sundareswaran *et al.*, 2023).

Los resultados confirman que el proceso de REC, representa un punto crítico del resultado de los procesos que se tuvieron en campo, y es el punto de partida para el aseguramiento de la calidad en la etapa de postcosecha; siendo el proceso de TRA otro punto de control crítico en mantener la calidad fisiológica de la semilla, debido que los mecanismos físicos y químicos de la misma pueden alterar la integridad embrionaria, al no controlarse adecuadamente los niveles de humedad, temperatura y tiempo de exposición (Abadía & Bartosik, 2013; FAO & AfricaSeeds, 2019; Secretaría de Agricultura, 2024).

Los procesos de postcosecha en especial CLA y TRA determinan la calidad fisiológica final de la semilla híbrida, siendo los procesos determinantes en identificar los puntos críticos con mayor vigilancia en el aseguramiento de calidad

en el sistema de producción de semillas en la agroindustria (SNICS, 2021; Garcilazo, 2024).

### Prueba de envejecimiento acelerado

En la prueba de envejecimiento acelerado, los resultados del análisis de varianza mostraron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ), en la interacción híbridos por procesos en las variables de PN, SSG, LMR y PS, indicando que la respuesta fisiológica después de un estrés como envejecimiento acelerado depende del material genético como el mecanismo de los procesos en la postcosecha (Cuadro 22). Teniendo un CV inferior al 20 % en las variables evaluadas, teniendo una precisión experimental y válida del modelo lineal general utilizado (Resende & Alves, 2022).

La prueba de comparación de medias entre los híbridos indicó que HIB3 presentó los valores más altos de PN desde 67 a 68% en los procesos de postcosecha del segundo estudio; no obstante, es necesario aclarar que estos porcentajes indican un bajo vigor de los materiales genéticos. Más aún, HIB4 presentó un notable descenso en el TRA con 21.75% (Cuadro 23). Esto representa una reducción de 60% respecto al valor inicial en el proceso de REC que fue de 54.25%, lo que advierte que HIB4 es más susceptible al deterioro, al ser expuesto a temperaturas y humedades relativas altas, como fue la prueba de envejecimiento acelerado.

En la variable de SSG en el proceso de TRA, se encontró que HIB4 tuvo un mayor porcentaje de 68%, reflejando un gran deterioro fisiológico por el estrés, teniendo daño en las membranas y pérdida de integridad celular (Zhang *et al.*, 2024), de tal manera que es un material genético de bajo vigor. Mientras que HIB3 mostró valores desde 14 a 20% en los procesos, siendo también valores que indican bajo vigor al presentar muerte en las semillas.

**Cuadro 22.** Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento acelerado de semilla híbrida de maíz en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Fuente de variación	gL	Plántulas normales	Plántulas anormales	Semillas sin germinar	Longitud media de plúmula	Longitud media de radícula	Peso seco de plántula
<b>HIB * Pro</b>	4	1584.925 **	43.0500	1996.25 **	29.9577	2.7516 **	658.1112 **
<b>Error Exp.</b>	15	101.9666	57.9166	47.1166	6.9413	0.4427	83.0905
<b>Media</b>		55.8000	14.4500	29.7500	6.9020	15.8672	56.3782
<b>DE</b>		± 10.0978	± 7.6103	± 6.8641	± 2.6346	± 0.6654	± 9.1154
<b>R<sup>2</sup></b>		0.8056	0.1654	0.9186	0.5350	0.6236	0.6786
<b>%CV</b>		18.0965	52.6664	23.0728	38.1721	4.1937	16.1683

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso (Reciba, Clasificación, Tratamiento); HIB = híbrido (HIB3, HIB4); DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Coeficiente de Variación; Plántulas normales (%), Plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%), longitud media de plúmula (cm/plántula); Longitud media de radícula (cm/plántula); Peso seco (mg/plántula). Niveles de significancia: \*p ≤ 0.05; \*\*p ≤ 0.01.

Estos resultados confirman que los procesos postcosecha intensivos, como la CLA y TRA, pueden inducir estrés oxidativo adicional que reduce la capacidad de germinación bajo condiciones adversas (Garcilazo, 2024).

**Cuadro 23.** Comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de vigor mediante la prueba de envejecimiento acelerado de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbridos	Proceso	PN (%)	PA (%)	SSG (%)	LMP (cm/pl)	LMR (cm/pl)	PS (mg/pl)						
HIB3	REC	67	A	17	A	16	BC	7.91	AB	16.20	AB	74.05	A
	CLA	68	A	18	A	14	C	6.16	AB	15.01	B	54.49	ABC
	TRA	68	A	12	A	20	BC	9.04	A	15.93	AB	51.68	BC
HIB4	REC	54.25	A	15	A	30.75	B	8.93	A	17.04	A	62.20	AB
	TRA	21.75	B	10.25	A	68	A	2.47	B	15.14	B	39.46	C

En donde: PN = Plántulas normales; PA = Plántulas anormales; SSG = semillas sin germinar; LMP = longitud media de plúmula (cm/plántula); LMR = longitud media de radícula (cm/plántula); PS = Peso seco (mg/plántula); SEC= secado, DES = desgrane, TRA = tratamiento, ALM = Almacenamiento, HIB = híbrido. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

La menor LMP en HIB4 en TRA, marca debilitamiento en el crecimiento embrionario, probablemente asociado a un daño subletal acumulado durante este proceso y al someterse a un estrés de temperatura y humedad relativa alta, afectando la síntesis de proteínas y el metabolismo energético (Baldini *et al.*, 2018; Marcos-Filho, 2015). Las semillas sometidas a envejecimiento acelerado experimentan pérdida de integridad de membranas, aumento de peroxidación lipídica y acumulación de radicales libres, lo que repercute directamente en la elongación radicular (Satya Srii & Nagarajappa, 2024).

La radícula, al ser el primer órgano en emerger, es más sensible al deterioro, por lo que su reducción es un indicador temprano de pérdida de vigor (Maguire, 1962; Finch-Savage & Bassel, 2016).

El peso seco fue directamente afectado por el envejecimiento, donde HIB3 resultó con valores desde 51.6 a 74 mg/plántula, a diferencia de HIB4 que mostró una disminución en TRA de 39.4 mg/plántula, marcando que este híbrido tiene menor capacidad de síntesis y translocación de reservas, consecuencia del deterioro estructural en mitocondrias y organelos del eje embrionario (Marcos-Filho, 2015; Kumar *et al.*, 2020).

El peso seco es un parámetro sensible para estimar la resistencia metabólica al envejecimiento, ya que semillas con alto vigor retienen una mayor capacidad de crecimiento y conversión de reservas bajo estrés. En este estudio, HIB3 mostró en REC y CLA, mayor estabilidad fisiológica inicial y menor grado de deterioro, comparado con HIB4, que obtuvo bajos valores de PS en TRA, confirmando la pérdida irreversible del vigor.

Los resultados muestran que el proceso de TRA constituye nuevamente un punto de control crítico, al presentar mayor pérdida de vigor y aumento de deterioro en ambos híbridos, con mayor impacto en HIB4. Las operaciones del TRA implican fricción mecánica, exposición a productos químicos y humedad temporal elevada, condiciones que aceleran la desorganización de membranas y reducen la capacidad germinativa posterior (Abadía & Bartosik, 2013; Dadlani & Yadava, 2023).

Así mismo, en el proceso de REC, reflejó una resistencia al envejecimiento, donde HIB3 presentó mayor vigor inicial, toleró las condiciones de estrés térmico, mientras HIB4 mostró un deterioro rápido. Esto respalda la teoría de que la calidad inicial es el principal determinante de la longevidad y capacidad de almacenamiento de la semilla (Copeland & McDonald, 2001; Marcos-Filho, 2015; FAO & AfricaSeeds, 2019).

La prueba de envejecimiento acelerado demostró diferencias significativas en la resistencia fisiológica en los híbridos y procesos, detectando que TRA es un punto crítico en la conservación del vigor de la semilla, donde HIB3 mantiene mayor potencial fisiológico y longevidad, mientras HIB4 requiere mayor cuidado en el manejo durante el acondicionamiento final.

Estos hallazgos acentúan la implementación de pruebas de rutina como el envejecimiento para evaluar el vigor, estimación de longevidad y conservación de la calidad de los lotes durante el ALM, garantizando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos por SNICS (2021) e ISTA (2025), que recomiendan conservar semillas con vigor superior al 70 % para asegurar su desempeño en campo y su aptitud para certificación.

### Prueba de remojo

El análisis de varianza de la prueba de remojo mostró diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en la interacción híbrido por proceso en las variables PN, PA, SSG y PS; y diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en LMP y LMR, con porcentajes de CV en rangos aceptables (Cuadro 24).

Así mismos, en la prueba de comparación de medias, HIB3 tuvo los valores más altos de PN en el proceso de CLA con 86% y en TRA de 71.7%; mientras que HIB4 presentó porcentajes bajos en el proceso TRA de 54%, esto reflejó la poca capacidad de recuperación metabólica después de un ahogamiento excesivo de agua, asociada a un deterioro estructural de membranas y pérdida de selectividad osmótica, (Olasoji & Ogunniyan, 2020 y Rashid *et al.*, 2021) en híbridos de maíz con envejecimiento fisiológico avanzado.

En el proceso de CLA, HIB3 mostró mejor desempeño, posiblemente al coincidir con un contenido de humedad óptimo (11–12 %) y menor exposición al estrés mecánico. En cambio, el TRA se incrementó el valor de SSG hasta 25 % y una disminución de PS, confirmando los efectos abrasivos del recubrimiento y la manipulación mecánica sobre el embrión (Baldini *et al.*, 2018; Gutiérrez Hernández *et al.*, 2020).

En la variable de LMP después del remojo en agua, HIB3 presentó 7.23 y 10.4 cm/plántula en el proceso de CLA, y en LMR varió entre 16.5 y 18.1 cm/plántula. Aunque las diferencias entre híbridos no fueron significativas, la ligera reducción observada en el tratamiento del HIB4 sugiere un menor vigor y menor capacidad

de elongación radicular, efecto relacionado con daños subcelulares acumulados en la zona meristemática (Estrada-Urbina *et al.*, 2023). El mayor desarrollo de plúmula en HIB3 indica una mejor conservación del potencial fisiológico, coherente con su comportamiento superior en germinación estándar y envejecimiento acelerado.

En el PS después de la prueba de remojo, HIB3 obtuvo 93.52 mg/plántula en REC, y HIB4 de 65.91 mg/plántula en TRA, la reducción en la acumulación de biomasa y eficiencia respiratoria se atribuye a la oxidación de proteínas y lípidos de reserva en las semillas (Marcos-Filho, 2015; Bewley *et al.*, 2012).

La prueba de remojo evidenció que el tratamiento químico constituye un punto de control crítico de la etapa de postcosecha, al asociarse con la disminución de vigor y por ende en el peso seco. Asimismo, la calidad fisiológica inicial en REC determina la tolerancia al estrés hídrico, como fue HIB3 al obtener un mayor vigor inicial y mantener su integridad; mientras HIB4 mostró efectos acumulativos de deterioro.

**Cuadro 24.** Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de vigor mediante la prueba de remojo de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Fuente de variación	gL	Plántulas normales	Plántulas anormales	Semillas sin germinar	Longitud media de plúmula	Longitud media de radícula	Peso seco de plántula
<b>HIB * Pro</b>	<b>4</b>	522.0500 **	249.2000 **	271.5500 **	10.6727 *	1.6749 *	415.1605 **
<b>Error Exp.</b>	<b>15</b>	63.5166	42.9333	32.0500	5.4855	1.0051	33.1300
<b>Media</b>		69.5500	15.4000	15.0500	8.1375	17.3535	81.0356
<b>DE</b>		± 7.9697	± 6.5523	± 5.6612	± 2.3421	± 1.0025	± 5.7558
<b>R<sup>2</sup></b>		0.6866	0.6075	0.6931	0.3415	0.3076	7.1028
<b>%CV</b>		11.4590	42.5477	37.6164	28.7819	5.7773	0.7696

En donde: gL= Grados de libertad; Pro= Proceso (Reciba, Clasificación, Tratamiento); HIB = híbrido (HIB3, HIB4); DE= Desviación Estándar; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación; %CV= Coeficiente de Variación; Plántulas normales (%), Plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%), longitud media de plúmula (cm/plántula); Longitud media de radícula (cm/plántula); Peso seco (mg/plántula). Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ .

**Cuadro 25.** Comparación de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para las variables fisiológicas de la prueba de remojo de semilla híbrida de maíz de la interacción de los HIB3 e HIB4 en cada etapa de postcosecha.

Híbrido	Proceso	PN (%)	PA (%)	SSG (%)	LMP (cm/pl)	LMR (cm/pl)	PS (mg/pl)
HIB3	REC	68 BC	13 BA	19 AB	7.84 A	18.12 A	93.52 A
	CLA	86 A	7 B	7 BC	10.4 A	16.55 A	84.77 AB
	TRA	71.75 AB	10 B	18.25 ABC	9.04 A	16.93 A	83.33 AB
HIB4	REC	68 BC	26 A	6 C	7.23 A	17.86 A	77.64 BC
	TRA	54 C	21 AB	25 A	6.18 A	17.31 A	65.92 C

En donde: PN = Plántulas normales; PA = Plántulas anormales; SSG = semillas sin germinar; LMP = longitud media de plúmula (cm/plántula); LMR = longitud media de radícula (cm/plántula); PS = Peso seco (mg/plántula); SEC= secado, DES = desgrane, TRA = tratamiento, ALM = Almacenamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

La prueba de remojo demostró ser es un método rápido y sensible para estimar el vigor fisiológico, la capacidad de las semillas para controlar la absorción y redistribución de agua refleja el estado funcional de sus membranas plasmáticas.

Las semillas deterioradas o con daño mecánico pierden la selectividad de membrana, ocasionando fugas de electrolitos y metabolitos que se traducen en baja germinación y vigor reducido (McDonald, 1999; Marcos-Filho, 2015). Esta prueba también permite detectar efectos residuales de daño mecánico o térmico sufridos en los procesos como secado, clasificación o tratamiento químico, los cuales alteran el metabolismo respiratorio y reducen la capacidad de imbibición controlada (Abadía & Bartosik, 2013). De acuerdo con los resultados obtenidos, el comportamiento fisiológico de los híbridos sugiere que estas alteraciones son más evidentes en el proceso de tratamiento, confirmando su papel como punto crítico fisiológico de control.

### Prueba fría

En el análisis de varianza para la prueba fría en el segundo estudio, reveló diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) para la interacción híbridos por proceso en las variables de PN, PA y SSG (Cuadro 26); existiendo un efecto negativo ante el estrés en frío de los materiales genéticos, ya que no hubo presencia de PN, indicando que los híbridos de este estudio no son tolerantes a condiciones de frío.

Aunque en la prueba de Tukey mostró una marcada diferenciación entre híbridos, HIB3 presentó un 83.75 % de SSG en el proceso de REC, y disminuyó de manera relativa en el TRA con 27.5 % (Cuadro 26); pero sin poder alcanzar porcentajes de PN; lo que indica que las semillas iniciaron su fase de imbibición, pero no hubo activación enzimática y por ende no hubo elongación de tejido, probablemente por daños subcelulares irreversibles en tejidos embrionarios. Por lo que se refiere al HIB4, los porcentajes de SSG se mantuvieron muy altos en los procesos evaluados de postcosecha con 96.25 % de SSG, confirmando una pérdida total de capacidad germinativa atribuible a las bajas temperaturas de esta prueba de vigor, lo que demuestra que los híbridos del estudio no son aptos para climas de temperatura baja.

La prueba fría al ser altamente sensible a la integridad de las membranas y sistemas enzimáticos involucrados en la respiración inicial. La ausencia de PN refleja una falla metabólica completa durante la imbibición en frío, donde la actividad de deshidrogenasas y la síntesis de proteínas de reparación son insuficientes para mantener la viabilidad (Bewley *et al.*, 2012; Finch-Savage & Bassel, 2016).

Los procesos agroindustriales de CLA y TRA son especialmente vulnerables, pues exponen las semillas a fricción, impacto y fluctuaciones de temperatura o humedad que comprometen la estructura de membranas y provocan fugas de electrolitos (Abadía & Bartosik, 2013; Arévalos *et al.*, 2021).

**Cuadro 26** Cuadrados medios del análisis de varianza y medias por Tukey ( $p \leq 0.05$ ) en las variables de vigor mediante prueba fría de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

<b>Fuente de variación</b>	<b>gL</b>	<b>Plántulas anormales (%)</b>	<b>Semillas sin germinar (%)</b>
<b>HIB * Pro</b>	4	3376.875 **	3376.875 **
<b>Error Exp.</b>	15	113.75	113.75
<b>Media</b>		26.75	73.25
<b>DE</b>		$\pm 10.66536$	$\pm 10.66536$
<b>R<sup>2</sup></b>		0.887848	0.887848
<b>%CV</b>		39.87052	14.56022

<b>Híbridos</b>	<b>Proceso</b>	<b>Plántulas anormales (%)</b>	<b>Semillas sin germinar (%)</b>
	<b>REC</b>	16.25	<b>BC</b>
<b>HIB3</b>	<b>CLA</b>	37.5	<b>B</b>
	<b>TRA</b>	72.5	<b>A</b>
	<b>REC</b>	3.75	<b>C</b>
<b>HIB4</b>	<b>TRA</b>	3.75	<b>C</b>

En donde: gL= Grados de libertad; HIB = híbrido, Pro= Proceso; REC= Reciba; CLA = Clasificación; TRA = Tratamiento. Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En este estudio, la etapa de tratamiento se considera un punto de control crítico; si bien el HIB3 mostró una ligera recuperación en la imbibición, los daños acumulados limitaron completamente la germinación, mientras que el HIB4 evidenció un colapso fisiológico irreversible.

El daño puede explicarse por peroxidación lipídica y desnaturalización proteica inducidas por fricción mecánica y exposición a químicos durante el recubrimiento (Baldini *et al.*, 2018; Bajus *et al.*, 2019). Estudios recientes destacan que semillas

de maíz con integridad reducida pierden tolerancia al frío y presentan alteraciones mitocondriales que bloquean la respiración (Omar *et al.*, 2023; Sundareswaran *et al.*, 2023).

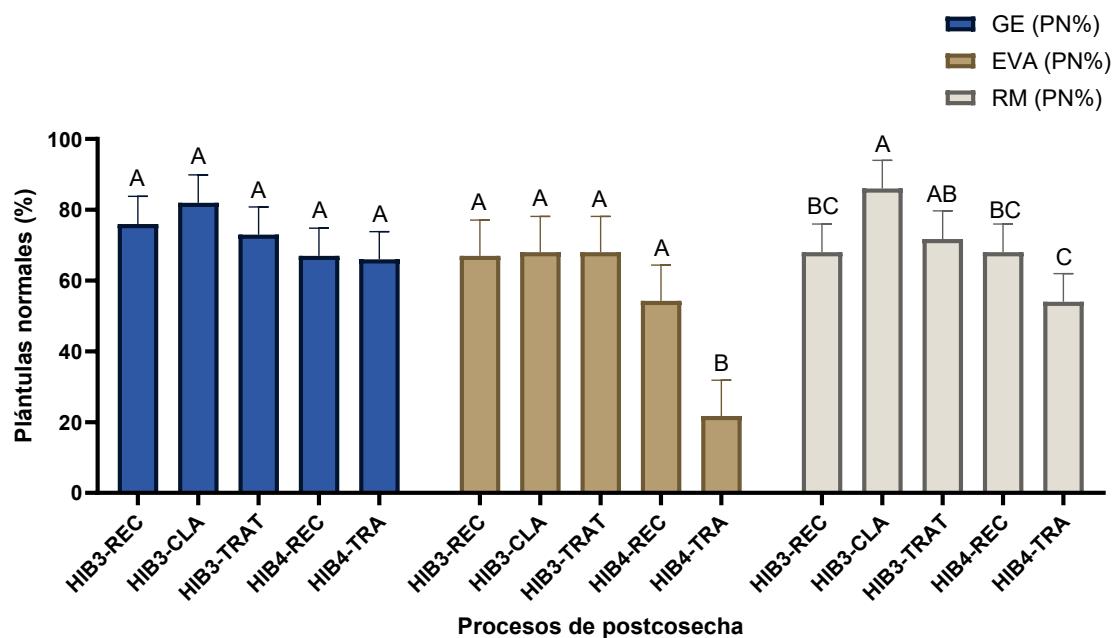
La ausencia total de plántulas normales indica que ambos híbridos superaron el umbral fisiológico de daño probablemente como consecuencia de procesos de secado no controlados y manipulación excesiva. La pérdida de integridad de membranas, sumada al agotamiento de reservas energéticas, limita la capacidad de reactivar el metabolismo enzimático bajo condiciones frías (Rajjou *et al.*, 2012; Finch-Savage & Bassel, 2016). Los resultados del presente estudio evidencian que, aunque los lotes pudieron haber cumplido el estándar de germinación, su vigor y tolerancia al estrés térmico fueron insuficientes para garantizar el establecimiento en campo, en estas condiciones.

La prueba fría discriminó la tolerancia al estrés de baja temperatura entre híbridos y mostró que el tratamiento es un punto de control crítico, ya que su impacto depende críticamente de la calidad fisiológica de reciba. El HIB3, pese a un leve indicio de reactivación metabólica, no alcanzó la regeneración de plántulas normales; el HIB4, en cambio, manifestó deterioro terminal, incompatible con una emergencia confiable en ambientes fríos. Por tanto, el tratamiento químico y la clasificación final deben considerarse etapas críticas de control en el proceso postcosecha, donde la integridad de membranas y la tolerancia al frío se ven más comprometidas.

El patrón observado en la prueba fría concuerda con la prueba de remojo y envejecimiento acelerado, donde la integridad de membranas y el estado fisiológico de partida explican la variación entre híbridos y etapas. La prueba fría, por su sensibilidad a estrés térmico en la de imbibición, refuerza el diagnóstico de vigor operativo en escenarios de siembra temprana/fría y complementa la lectura de envejecimiento acelerado y germinación estándar (Marcos-Filho, 2015; ISTA, 2025).

La integración de los resultados obtenidos de las pruebas de calidad fisiológica obtenidos mediante germinación estándar (GE), envejecimiento acelerado (EVA),

prueba de remojo (RM) y la prueba fría, permitieron identificar el estado real de deterioro y el comportamiento del vigor durante el proceso de postcosecha en los HIB3 y HIB4.



**Figura 3.** Respuesta de plántulas normales mediante las pruebas de germinación y vigor en los procesos de postcosecha de los híbridos del segundo estudio, en la cual se aprecia el declive de plántulas normales en la etapa de tratamiento del HIB4. En dónde GE= germinación estándar, EVA= envejecimiento acelerado, RM= prueba de remojo, SEC= secado, DES= desgrane, TRA= tratamiento y ALM= almacén. Barras del mismo color con la misma letra no difieren significativamente.

En la Figura 3 se muestra que los materiales genéticos en los procesos de postcosecha mantuvieron porcentajes de PN relativamente altos en germinación estándar (70–85 %) y en el vigor hubo una tendencia negativa conforme avanzaron los procesos en la etapa de postcosecha, particularmente en la prueba de remojo y envejecimiento acelerado, alcanzando deterioros evidentes en la prueba fría, al no presentar PN, siendo una evidencia contundente a la ausencia

de tolerancia al estrés térmico y daño irreversible en las membranas celulares (Lovato *et al.*, 2005; Marcos-Filho, 2015; ISTA, 2025).

Aunque la germinación estándar sugiere que el lote cumple requisitos mínimos para certificación, la fisiología real de las semillas fue una evidencia del deterioro acelerado en los procesos finales de postcosecha en el sistema de producción de semilla híbrida de maíz, lo que afecta su desempeño en condiciones adversas de campo. La interacción de los híbridos en los procesos de postcosecha confirma que la susceptibilidad al deterioro es dependiente del material genético y del manejo aplicado.

## **Calidad sanitaria**

### Prueba de *Blotter Test*

Los resultados del análisis de varianza de la prueba de *Blotter test*, mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre híbridos y procesos de postcosecha para las variables de semillas sanas (SS) y semillas infectadas (SI) (Cuadro 27), lo que confirma que el comportamiento sanitario depende tanto del manejo postcosecha como del material genético (Bourne, 2014; Martín *et al.*, 2022).

Los resultados de la prueba de Tukey indicaron que el proceso REC reflejó menos porcentaje de SS, en HIB3 de 53.75% y en HIB4 de 71.35% (Cuadro 27), característica común en semilla que aún no ha recibido protección fungicida y el daño físico reciente favorece el establecimiento de hongos oportunista (Zhang *et al.*, 2024). Así mismo, se detectó que en el TRA se redujo el porcentaje de infección y elevando la calidad sanitaria en ambos híbridos.

**Cuadro 27.** Cuadrados medios del análisis de varianza (ANOVA) y de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) de las variables sanitarias de la prueba *Blotter test*, evaluados en el segundo estudio.

<b>Fuente de variación</b>	<b>gl</b>	<b>Semillas sanas (%)</b>	<b>Semillas infectadas (%)</b>
<b>HIB * Pro</b>	4	1592.5 **	1592.5 **
<b>Error Exp.</b>	15	53.3333	53.3333
<b>Media</b>		72.0000	28.0000
<b>DE</b>		$\pm 7.3029$	$\pm 7.3029$
<b>R<sup>2</sup></b>		0.8884	0.8884
<b>%CV</b>		10.1430	26.0820

<b>Material genético</b>	<b>Proceso</b>	<b>SS (%)</b>		<b>SI (%)</b>	
<b>HIB3</b>	<b>REC</b>	53.75	<b>C</b>	46.25	<b>A</b>
	<b>CLA</b>	51.25	<b>C</b>	48.75	<b>A</b>
	<b>TRA</b>	87.5	<b>A</b>	12.5	<b>C</b>
<b>HIB4</b>	<b>REC</b>	71.25	<b>B</b>	28.75	<b>B</b>
	<b>TRA</b>	96.25	<b>A</b>	3.75	<b>C</b>

En donde: FV= Fuente de variación, gl= Grados de libertad, SS = semillas sanas, SI= semillas infectadas, HIB = híbrido, ET = etapa, REC= reciba, CLA = clasificación, TRA = tratamiento. Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

El incremento de semillas sanas en este proceso confirma que el tratamiento químico hace una función primordial en la reducción de patógenos semilla-hospedados (Brauer *et al.*, 2019; Baldini *et al.*, 2018).

Y como era de esperarse los resultados de SI, en HIB3 reflejó un porcentaje inverso con altos valores (83.75%) en REC y reducido hasta 27.5% en TRA;

mientras HIB4 tuvo una calidad sanitaria alta, logrando mantenerse durante toda la etapa de postcosecha, clasificado como un híbrido tolerante a patógenos.

La resistencia genética en materiales híbridos influye en la colonización de patógenos asociados a estrés postcosecha (Singh & Singh, 2025); además, de mencionar que una reducción notable de infección en el proceso de TRA contrasta el deterioro fisiológico de la semilla, comportamiento detectado anteriormente en este proceso, lo cual sugiere que el tratamiento químico mejora la sanidad, pero no revierte los daños físicos y metabólicos generados durante el manejo postcosecha (Baldini et al., 2018).

En el proceso de REC, demanda mayor cuidado en el aseguramiento de calidad, debido a que se tendrán mayores índices de infección debido al eslabón entre las condiciones de campo (contacto del suelo, restos de cultivo portadores de patógenos, cambios de humedad y presencia elevada esporas) y el manejo de postcosecha (Estrada-Urbina *et al.*, 2023). Mientras que, en el proceso de CLA, es en algunos casos, difícil de reducir la infección, más bien puede aumentarla, debido a los eventos de contacto de la semilla con la maquinaria de limpieza y separación por tamaño, causando daños en las paredes celulares, siendo aún más un punto crítico de suma vigilancia para evitar la infección de agentes patógenos oportunistas.

Aunque el proceso de TRA reduce la infección de manera significativa, no quiere decir que el vigor de la semilla pueda recuperarse y disminuir el deterioro sanitario, no siempre se traduce en una mejora fisiológica, ya que se observaron afectaciones en vigor en este proceso, especialmente en HIB4.

#### Placas de medio de cultivo papa dextrosa agar y malta sal agar

Los resultados obtenidos en los métodos con medios de cultivo PDA y MSA, mostraron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre híbridos y los procesos evaluados de postcosecha (Cuadro 28), lo cual confirma que el manejo

postcosecha influye directamente en el desarrollo fúngico en la semilla (Hernández-Delgado *et al.*, 2007; Arévalos *et al.*, 2021).

**Cuadro 28.** Cuadrados medios del análisis de varianza y de medias mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) de las variables sanitarias de la prueba de siembra en placas PDA y MSA de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

		PDA		MSA	
Fuente de variación	gL	Semillas sanas	Semillas infectadas	Semillas sanas	Semillas infectadas
HIB * Pro	4	2356.6667 **	2356.66667 **	2810 **	2811 **
Error Exp.	10	226.6667	226.66667	73.33333	74.33333
Media		67.33333	32.66667	65.33333	34.66667
DE		±15.05545	± 15.05545	± 8.563488	± 8.563489
R <sup>2</sup>		0.806157	0.806157	0.938753	0.938753
%CV		22.35958	46.08812	13.10738	24.70237

Híbrido	Proceso	PDA SS (%)	PDA SI (%)	MSA SS (%)	MSA SI (%)
HIB3	REC	36.67	B	63.33	A
	CLA	46.67	B	53.33	A
	TRA	96.67	A	3.33	B
HIB4	REC	60	AB	40	AB
	TRA	96.67	A	3.33	B

En donde: gL= Grados de libertad; PDA= Papa dextrosa agar; MSA= Malta sal agar; REC= Reciba; CLA = Clasificación; TRA = Tratamiento. Niveles de significancia: \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En la prueba de Tukey, en el medio de cultivo PDA se observó que HIB3 obtuvo tan solo el 36.67 % en REC y conforme se realizaban los siguientes procesos

llegó a aumentar hasta 96.67 % en TRA, siendo una eficiente reducción de infección fúngica a lo largo de la etapa de postcosecha. La infección en REC está asociada a hongos provenientes de campo y residuos vegetales en la mazorca (Munkvold, 2003; Estrada-Urbina *et al.*, 2023).

En cuanto a la evaluación en placas de MSA, siendo un medio de cultivo adecuado para aislar hongos como, *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* relacionados con almacenamiento (FAO, 2001; Ziegler *et al.*, 2021); HIB3 presentó un incremento de 43.33 % en REC a 96.67 % en TRA; mientras que HIB4 presentó relativamente alta sanidad en los procesos evaluados, por lo que se puede decir que HIB4 cuenta con mayor integridad física del pericarpio, lo cual reduce el ingreso de inóculos durante las operaciones mecánicas (Arévalos *et al.*, 2021).

En ambos medios de cultivo son una herramienta en el diagnóstico de la calidad sanitaria en los lotes de producción de semillas en los diferentes procesos, especialmente en TRA, que constituye un punto para asegurar la calidad, al eliminar hongos transmitibles por semilla y reducir los riesgos futuros de deterioro tales como micotoxinas en el almacenamiento, fallos en la germinación y vigor por infección embrionaria (Becerra-Sánchez & Taylor, 2021); además de llegar cumplir con los estándares de certificación establecidos por SNICS (2021) para semilla híbrida de maíz.

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de sanidad (*Blotter test*, PDA y MSA) permitió determinar la dinámica del deterioro sanitario a lo largo de la etapa de postcosecha, así como detectar la eficacia de las operaciones aplicadas dentro del control de calidad interno; encontrando mayormente los hongos clasificados como de campo, entre ellos, *Fusarium spp.* (Cuadro 29), que puede penetrar en la semilla durante la madurez hasta la cosecha, transmitirse por semilla y llegar a tener un impacto negativo en su vigor (Martín *et al.*, 2022).

**Cuadro 29.** Promedio aritmético de incidencia fúngica mediante Blotter test de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbrido	Proceso	<i>Fusarium</i> spp. (%)	<i>Penicillium</i> spp. (%)	<i>Aspergillus</i> spp. (%)	<i>Rhizopus</i> spp. (%)
	<b>REC</b>	35	13.75	5	1.2
<b>HIB3</b>	<b>CLA</b>	28.25	18.7	0	1.2
	<b>TRA</b>	6.25	5	2.5	0
<b>HIB4</b>	<b>REC</b>	18.75	13.75	3.75	0
	<b>TRA</b>	2.5	1.25	0	0

Donde: REC= Reciba; CLA = Clasificación; TRA= Tratamiento. El análisis permite identificar los géneros predominantes por etapa e híbrido

El híbrido HIB4 en REC, al detectarse mayor infección, también obtuvo los valores más bajos de vigor; lo que sugiere que la infección inicial afecta los mecanismos metabólicos de germinación y reduce la eficiencia de imbibición y respiración (Rajjou *et al.*, 2012; Marcos-Filho, 2015), ya que hongos patogénicos pueden alterar la membrana plasmática del embrión, ocasionando pérdida de solutos y disminución del vigor de la plántula (Satya Srii & Nagarajappa, 2024; Bewley *et al.*, 2012). Inclusive un patógeno transmitido por semilla, tiene la capacidad de colonizar el embrión y endospermo durante el desarrollo en campo y cosecha, afectando directamente el vigor y la germinación (Munkvold, 2003; Martín *et al.*, 2022).

El deterioro sanitario coincidió con mayores niveles de daño mecánico. Las fisuras del pericarpio actúan como puertas de entrada para hongos que pueden colonizar endospermo y embrión (Arévalos *et al.*, 2021), lo que explica la caída en la sanidad y el vigor observada en esa etapa.

El proceso de REC se reconoce como el primer punto crítico sanitario, debido a que la carga inicial de patógenos afecta negativamente el vigor y está fuertemente asociada al daño mecánico sufrido previo a la llegada a planta; y el

proceso de TRA es el punto crítico decisivo, pues garantiza la reducción de hongos a niveles compatibles con la certificación (SNICS, 2021), asegurando así la calidad sanitaria final del lote.

Durante la CLA del HIB3, la incidencia de *Fusarium spp.* no disminuyó, sino que mostró incrementos en PDA con un 50 % y MSA con un 47 % (Cuadro 30 y 31), lo cual se relaciona con el daño mecánico generado en esta etapa, que facilita la penetración fúngica (Martínez-Fraca *et al.*, 2022). En contraste, HIB4 no fue sometido a clasificación mecánica y mantiene valores más bajos, lo que evidencia que este proceso representa un riesgo sanitario mayor cuando no se acompaña de una evaluación de daño físico (Bajus *et al.*, 2019).

**Cuadro 30.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Papa Dextrosa Agar (PDA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbrido	Proceso	<i>Fusarium</i>	<i>Penicillium</i>	<i>Aspergillus</i>
		<i>spp.</i> (%)	<i>spp.</i> (%)	<i>spp.</i> (%)
HIB3	REC	43.3	20	20
	CLA	50	13	3.3
	TRA	3.3	0	0
HIB4	REC	26.6	13.3	6.8
	TRA	6.6	3.3	0

Donde: REC= Reciba; CLA = Clasificación; TRA= Tratamiento. El análisis permite identificar los géneros predominantes por etapa e híbrido.

Asimismo, *Penicillium spp.* y *Aspergillus spp.* fueron detectados principalmente en REC, con una reducción progresiva hacia el proceso de TRA. La presencia de estos hongos son indicadores de manejo y almacenamiento inadecuado, debido a su capacidad de crecer bajo actividad de agua y ambientes con residuos vegetales (FAO, 2001; (Hegde *et al.*, 2025). La mayor incidencia en HIB3 confirma su mayor susceptibilidad del pericarpio al deterioro, asociada también

con la reducción observada del vigor fisiológico en pruebas frías y de envejecimiento acelerado. Asimismo, se asociaron con condiciones de manejo y microambientes que favorecen su desarrollo, subrayando la importancia de mantener controles adecuados de humedad, ventilación y manipulación postcosecha (FAO, 2001; Obregón *et al.*, 2023).

**Cuadro 31.** Promedio aritmético del desarrollo morfológico observado de colonias fúngicas mediante el medio de Malta Sal Agar (MSA) de semillas híbridas de maíz evaluadas en los procesos de postcosecha, en el segundo estudio.

Híbrido	Proceso	<i>Fusarium</i> spp. (%)	<i>Penicillium</i> spp. (%)
HIB3	REC	33	30
	CLA	47	28
	TRA	6	0
HIB4	REC	26	13.3
	TRA	3.3	3.3

Donde: REC= Reciba; CLA = Clasificación; TRA= Tratamiento. El análisis permite identificar los géneros predominantes por etapa e híbrido.

Finalmente, en el TRA todos los hongos en ambos híbridos se redujeron a niveles inferiores al 6 %, al eliminar completamente a *Aspergillus spp.* y *Rhizopus spp.* (Cuadro 31); consolidándose como el segundo punto crítico de control sanitario, para asegurar niveles de infección compatibles con los estándares de certificación de semilla híbrida en México (SNICS, 2021; Brauer *et al.*, 2019).

Desde una perspectiva integradora, se puede afirmar que en REC es el proceso que constituye un mayor riesgo sanitario y fisiológico; mientras que en TRA se asegura la calidad final del lote, evidenciando que la infección inicial de patógenos y el daño físico previo determinan el deterioro sanitario, reforzando la importancia del control de humedad, impacto y limpieza desde campo hasta planta (Abadía & Bartosik, 2013; Kumar *et al.*, 2024).

## Identificación morfológica preliminar de hongos asociados a semilla

Se realizó la caracterización morfológica preliminar de los hongos aislados en ambos estudios, con el fin de reconocer los géneros fúngicos de mayor relevancia fitopatológica asociados a las semillas híbridas de maíz.

La variación observada en la morfología colonial y estructuras reproductivas, durante el proceso de aislados, confirma la coexistencia de hongos de campo principalmente *Fusarium spp.* y de almacén, como *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* (Ziegler *et al.*, 2021; Hernández-Delgado *et al.*, 2007).

El aislamiento en medio PDA permitió el desarrollo de colonias con características representativas, seguido de observación microscópica mediante estructuras conidiales y morfología de micelio, herramientas diagnósticas comúnmente utilizadas en fitopatología básica (Martín *et al.*, 2022). Las colonias obtenidas correspondieron a los géneros: *Fusarium spp.*, *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* (Figura 4), patógenos de alta importancia en maíz por su efecto en la germinación, vigor y la posible producción de micotoxinas durante almacén, tales como fumonisinas, aflatoxinas y ocratoxinas (Becerra-Sánchez & Taylor, 2021; Satya Srii & Nagarajappa, 2024).

La presencia dominante de *Fusarium spp.* resulta particularmente relevante, dado su papel como patógeno transmitido por semilla, su estrecha asociación con daños mecánicos en etapas tempranas de postcosecha y su capacidad de generar toxinas como zearalenona y fumonisinas (Munkvold, 2003; Martín *et al.*, 2022). No obstante, su identificación a nivel de especie únicamente mediante rasgos culturales y morfológicos presenta limitaciones debido a la alta plasticidad fenotípica del género, la variación en macroconidios y la existencia de especies crípticas morfológicamente similares (Leslie & Summerell, 2006; Hassan *et al.*, 2022).

Colonia en medio PDA	Observación microscopio (60x)	Genero identificado
		<p><b><i>Fusarium spp.</i></b></p> <p>Colonias algodonosas, con tonos salmón a durazno; producción de macroconidios falciformes, multiseptados, con célula basal en forma de pie distintiva.</p>
		<p><b><i>Penicillium spp.</i></b></p> <p>Micelios de color verde-azuladas; conidióforos ramificados en forma de pincel, con conidios lisos en cadenas (característica diagnóstica del género).</p>
		<p><b><i>Aspergillus spp.</i></b></p> <p>Micelio de color verde-olivo o amarillentas; cabezas conidiales radiales, con conidióforos hialinos y conidios ornamentados; se aislaron principalmente especies de <i>A. flavus</i> y <i>A. niger</i> asociadas a producción de aflatoxinas.</p>

**Figura 4.** Hongos asociados a semilla híbrida de maíz aislados de los procesos de postcosecha. Aislamientos puros en Papa Dextrosa Agar (PDA) y estructuras microscópicas características de *Fusarium spp.*, *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* (aumento 400–1000x).

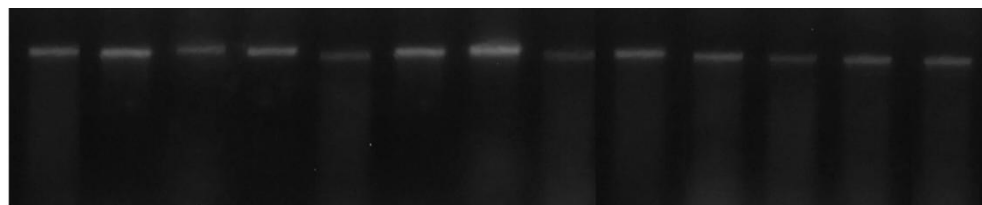
## **Identificación molecular del principal patógeno detectado en semilla híbrida de maíz**

Puesto que *Fusarium spp.* fue el género predominante en ambos estudios y su presencia representa un riesgo directo para la germinación, el vigor y la inocuidad de la semilla por la posible producción de micotoxinas, se consideró indispensable confirmar su identidad taxonómica mediante diagnóstico molecular. Además, aunque los dos estudios evaluaron híbridos y etapas de postcosecha diferentes, la coincidencia en la detección de hongos transmisibles por semilla justificó unificar el análisis molecular.

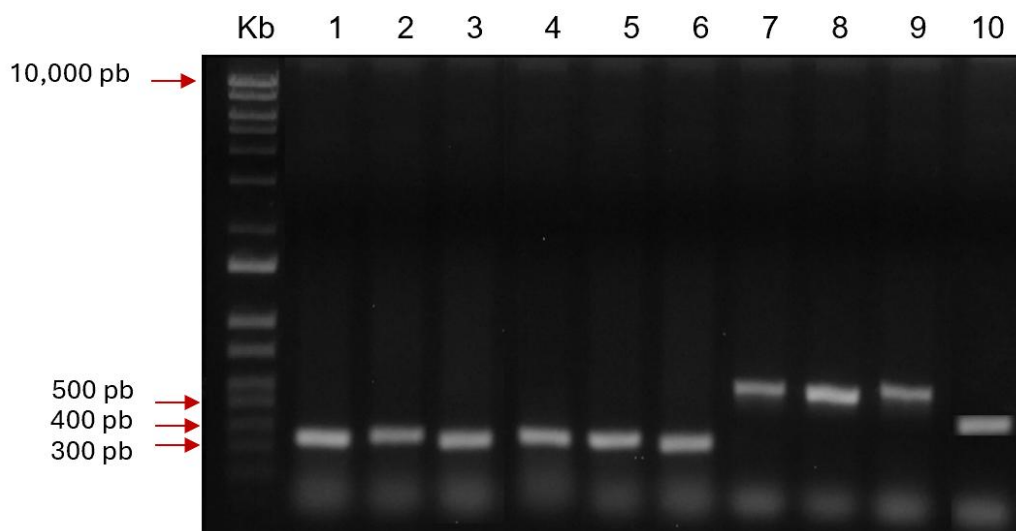
Se aislaron y purificaron 26 muestras provenientes de los dos estudios, con dos muestras por etapa para cada híbrido, a fin de validar molecularmente la identidad del género *Fusarium* previamente determinado por métodos morfológicos, de las cuales se realizó la extracción de ADN (Figura 5).

Los cuales se amplificaron con el marcador universal ITS, el cual confirmó la pertenencia al género *Fusarium* en el 100 % de los aislados evaluados, mostrando una banda nítida alrededor de 400 pb, lo cual respalda la confiabilidad taxonómica del diagnóstico preliminar (Leslie & Summerell, 2006; Hassan *et al.*, 2022).

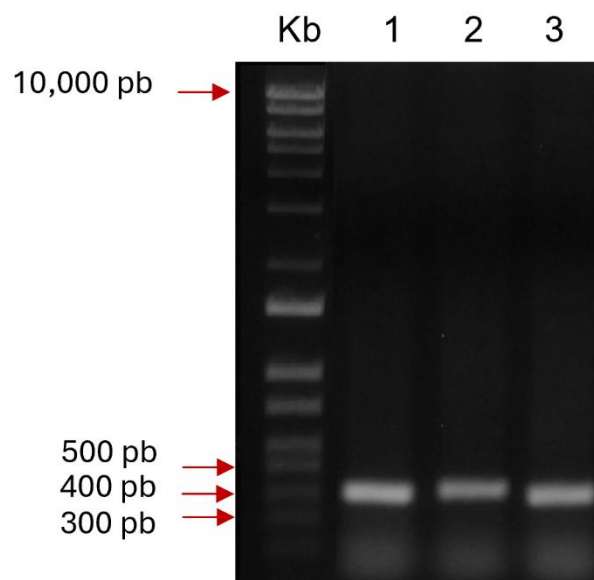
Posteriormente, se seleccionó un aislado representativo por etapa de cada híbrido para ser sometido a una PCR con marcadores específicos dirigidos a *Fusarium oxysporum*, *F. graminearum* y *F. verticillioides*, seis de las muestras presentaron amplificación específica correspondiente a *F. oxysporum* con un tamaño de banda esperado (aprox. 578 pb), lo que confirma que esta especie fue el principal patógeno transmisible por semilla en ambos estudios.



**Figura 5.** Gel de agarosa al 1% correspondiente a la extracción de ADN de aislados de *Fusarium spp.* provenientes de semillas híbridas de maíz. Se observan bandas genómicas íntegras y sin degradación visible, aptas para amplificación mediante PCR.



**Figura 6.** Electroforesis de productos PCR para identificación molecular de *Fusarium spp.* en semilla híbrida de maíz provenientes de distintas etapas de postcosecha. Marcador molecular 1 Kb (BioBasic®). Carriles 1–6: amplificación específica de *F. oxysporum* (~340 pb). Carriles 7–9: *F. verticillioides* (~578 pb) y carril 10: *F. graminearum* (~400 pb). Se observa un patrón de bandas nítidas que confirma la identidad de los aislados.



**Figura 7.** Amplificación mediante PCR en gel de agarosa (1%) de especies del género *Fusarium spp.* en semillas híbridas de maíz provenientes de distintas etapas de postcosecha. Marcador molecular 1 Kb (BioBasic®). Carriles 1-3: muestras positivas para el género *Fusarium* mostraron bandas correspondientes a la región ITS (~400 pb).

Los patrones de amplificación observados en la Figura 6 corroboran que *F. verticillioides* fue detectado principalmente en las etapas tempranas del proceso en reciba y clasificación del HIB3 y en reciba del HIB4 (Cuadro 32), lo cual coincide con su condición de hongo típico de campo y almacenamiento, así como su capacidad para penetrar semilla dañada mecánicamente (Bajus *et al.*, 2019; Ziegler *et al.*, 2021).

Por otra parte *F. oxysporum* predominó en la etapa de tratamiento en la mayoría de los híbridos, sugiriendo una mayor persistencia en tejidos internos o resistencia al fungicida utilizado (Brauer *et al.*, 2019; Omar *et al.*, 2023). Mientras que *F. graminearum* fue detectado únicamente en reciba de HIB2 (Cuadro 32), lo que refleja un origen estrictamente de campo y su posible asociación con humedad elevada durante cosecha (Munkvold, 2003; Estrada-Urbina *et al.*, 2023).

Tres aislados no amplificaron con los marcadores específicos (Cuadro 32); sin embargo, fueron confirmados como *Fusarium* spp. mediante ITS como se muestra en la Figura 7. Esto se puede atribuir a la variabilidad genética intraespecífica, la presencia de especies crípticas dentro del complejo *Fusarium* spp. o las limitaciones de afinidad de cebadores específicos (Singh & Singh, 2025).

**Cuadro 32.** Especies de *Fusarium* identificadas molecularmente en semillas híbridas de maíz de diferentes etapas del proceso de postcosecha.

Híbridos	Proceso	Especie identificada	Carril en gel
HIB1	SEC	<i>F. Oxysporum</i>	2
	DES	<i>F. Oxysporum</i>	3
	ALM	<i>Fusarium</i>	1 -ITS
	TRA	<i>F. Oxysporum</i>	4
HIB2	SEC	<i>F. graminearum</i>	10
	DES	<i>F. Oxysporum</i>	1
	ALM	<i>Fusarium</i>	2-ITS
	TRA	<i>Fusarium</i>	3-ITS
HIB3	REC	<i>F. verticillioides</i>	7
	CLA	<i>F. verticillioides</i>	8
	TRA	<i>F. Oxysporum</i>	5
HIB4	REC	<i>F. verticillioides</i>	9
	TRA	<i>F. Oxysporum</i>	6

Especies del género *Fusarium* identificadas mediante PCR en semillas híbridas de maíz. Los carriles corresponden a la ubicación de cada muestra en los geles de las Figuras 6 y 7. En los casos donde no se obtuvo amplificación con marcadores específicos, la identidad se confirmó mediante la región ITS (~400 pb). HIB = híbrido; SEC = secado; DES = desgrane; ALM = almacenamiento; TRA = tratamiento; REC = reciba; CLA = clasificación.

Los resultados demuestran coexistencia de especies dentro del mismo lote y etapa, lo que incrementa el riesgo de daño fisiológico en la semilla, pérdidas de vigor y emergencia, producción de micotoxinas como fumonisinas, tricotecenos y zearalenona (Becerra-Sánchez & Taylor, 2021). La presencia de *F. verticillioides*, *F. graminearum* y *F. oxysporum* confirma la necesidad de control sanitario desde reciba y validación del desempeño del tratamiento químico como punto de control crítico (FAO, 2001; Velarde Felix *et al.*, 2018).

## CONCLUSIONES

El estudio permitió identificar los puntos críticos del proceso de postcosecha de semilla híbrida de maíz. Los resultados demostraron que el deterioro de la semilla tiene relación con los procesos del sistema de postcosecha.

El proceso de secado mostró mejor desempeño en la calidad física, seguido de tratamiento. Mientras que desgrane reflejó el mayor daño físico. Entre los híbridos, HIB3 y HIB4 presentaron la mejor estabilidad física, mientras que HIB1 y HIB2 evidenciaron mayor susceptibilidad al daño mecánico.

Desde la perspectiva fisiológica, el secado fue nuevamente la etapa más favorable, manteniendo altos porcentajes de germinación estándar y vigor. Por el contrario, el almacenamiento y en el segundo ciclo el tratamiento químico, mostraron las mayores pérdidas fisiológicas. En el caso de los híbridos, el HIB2 mostró mejor desempeño fisiológico seguido del HIB3. El HIB1 destacó por su mayor vigor, mientras que el HIB4 resultó más sensible al estrés.

En cuanto a la calidad sanitaria, el tratamiento químico fue la etapa más eficiente al reducir significativamente la incidencia de hongos. El almacenamiento fue nuevamente el proceso más desfavorable, al presentar los mayores porcentajes de infección, principalmente por *Fusarium spp.*, *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* La identificación morfológica y molecular confirmó la presencia de *F. oxysporum*, *F. verticillioides* y *F. graminearum*. Los HIB2 y HIB4 fueron menos susceptibles a la infección por patógenos, sin embargo, los HIB1 y HIB3 mostraron mayor incidencia de infección por patógenos.

Se observó una relación directa entre la calidad fisiológica y la sanitaria. Las muestras con mayor incidencia fúngica mostraron disminución en germinación y vigor, lo que confirma el impacto del deterioro sanitario sobre la capacidad de establecimiento de las semillas. De igual forma, el daño mecánico previo favoreció la infección, reforzando la interacción entre integridad física, sanidad y vigor.

La integración de los resultados permitió identificar los puntos críticos de control dentro del proceso postcosecha. El secado fue el proceso más eficiente de toda la cadena, mientras que el almacenamiento y tratamiento, acompañados del desgrane y la recepción en algunos casos, fueron las etapas más sensibles y determinantes en la pérdida de calidad. En el primer ciclo, el almacenamiento fue el principal punto crítico, y en el segundo ciclo lo fueron la recepción y el tratamiento. El manejo adecuado de estos procesos resulta esencial para asegurar lotes de semilla con calidad física, fisiológica y sanitaria óptimas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abadía, B., & Bartosik, R. (2013). Manual de buenas prácticas en poscosecha de granos: Hacia el agregado de valor en origen de la producción primaria. *Ediciones INTA*.
- Arévalos, A., Redondo, E., & Insfrán, A. (2021). Daños mecánicos asociados al procesamiento de granos y semillas: una revisión de la literatura. *Latin American Journal of Applied Engineering*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.69681/lajae.v4i1.17>
- Ariong, R. M., Okello, D. M., Otim, M. H., & Paparu, P. (2023). The cost of inadequate postharvest management of pulse grain: Farmer losses due to handling and storage practices in Uganda. *Agriculture & Food Security*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00423-7>
- Avila, M., & González, A. (2017). *Aspectos básicos sobre sistemas y formulación de un plan de producción de semillas*.
- Bajus, P., Mraz, M., Rigo, I., Findura, P., Fürstenzeller, A., Kielbasa, P., & Malaga-Tobola, U. (2019). The influence of drying temperature and moisture of corn seeds planted on their damage. *Agricultural Engineering*, 23(1), 5–12. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0001>
- Baldini, M., Ferfuia, C., & Pasquini, S. (2018). Effects of some chemical treatments on standard germination, field emergence and vigour in hybrid maize seeds. *Seed science and technology*, 46(1), 41–51. <https://doi.org/10.15258/sst.2018.46.1.04>
- Becerra-Sanchez, F., & Taylor, G. (2021). Reducing post-harvest losses and improving quality in sweet corn (*Zea mays*L.): challenges and solutions for less food waste and improved food security. *Food and Energy Security*, 10(3). <https://doi.org/10.1002/fes3.277>
- Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2012). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy, 3rd edition* (3a ed.). Springer.
- Bourne, M. C. (2014). Food security: Postharvest losses. En *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 338–351). Elsevier.
- Brauer, V. S., Rezende, C. P., Pessoni, A. M., De Paula, R. G., Rangappa, K. S., Nayaka, S. C., Gupta, V. K., & Almeida, F. (2019). Antifungal agents in agriculture: Friends and foes of public health. *Biomolecules*, 9(10), 521. <https://doi.org/10.3390/biom9100521>
- Chikez, H., Maier, D., Olafsson, S., & Sonka, S. (2023). Identifying critical drivers of mango, tomato, and maize postharvest losses (PHL) in low-income countries and predicting their impact. *Agriculture*, 13(10), 1912. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101912>

- Copeland, L. O., & McDonald, M. B. (2001). *Principles of Seed Science and Technology*. Springer.
- Cortés Hernández, F. del C., Alvarado Castillo, G., & Sanchez Viveros, G. (2023). Trichoderma spp., una alternativa para la agricultura sostenible: una revisión. *Revista colombiana de biotecnología*, 25(2), 62–76. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.111384>
- Dadlani, M., & Yadava, D. K. (Eds.). (2023). *Seed science and technology: Biology, production, quality*. Springer.
- Ellis, R. H., Hong, T. D., & Roberts, E. H. (1985). Handbook of Seed Technology for Genebanks. *Compendium of Specific Germination Information and Test Recommendations*. IBPGR, II.
- Estrada-Urbina, J., Cantú-López, E., Molina-Moreno, J. C., & Estrada-Gómez, J. A. (2023). Madurez fisiológica en semillas de maíz (*Zea mays* L.) mediante marcadores morfológicos y el contenido de humedad. *Agronomía mesoamericana: organo divulgativo del PCCMCA, Programa Cooperativo Centroamericano de Mejoramiento de Cultivos y Animales*, 53269. <https://doi.org/10.15517/am.2023.53269>
- FAO. (2001). *El Maiz En Los Tropicos: Mejoramiento y Produccion (Coleccion FAO: Produccion y Proteccion Vegetal)*. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO, & AfricaSeeds. (2019). *Materiales para capacitación en semillas: Módulo 3: Procesamiento de semillas, equipo y prácticas*. Food & Agriculture Org.
- Faria, C. B., Abe, C. A. L., da Silva, C. N., Tessmann, D. J., & Barbosa-Tessmann, I. P. (2012). New PCR assays for the identification of *Fusarium verticillioides*, *Fusarium subglutinans*, and other species of the *Gibberella fujikuroi* complex. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(1), 115–132. <https://doi.org/10.3390/ijms13010115>
- Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Garcilazo, F. M. (2024, mayo 27). *Poscosecha, qué es y algunas recomendaciones iniciales*. CIMMYT. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/poscosecha-que-es-y-algunas-recomendaciones-iniciales/>
- Gryna, F. M., Chua, R. C. H., & De Feo, J. A. (2007). *Método Juran: análisis y planeación de la calidad*.
- Guillen-de laCruz, P., Velázquez-Morales, R., de la Cruz-Lázaro, E., Márquez-Quiroz, C., & Osorio-Osorio, R. (2018). Germinación y vigor DE semillas DE poblaciones DE maíz con diferente proporción DE endospermo vítreo.

*Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences : Ex Agro-Ciencia, ahead*, 0–0. <https://doi.org/10.4067/s0719-38902018005000304>

- Guiraldo, G., Mendez, M., & Franco, J. (2000). *Manual para el manejo pre y poscosecha de semillas producida de manera artesanal bajo los modelos de pequeñas empresas de semilla (PES)*. [https://www.google.com.mx/books/edition/Manual\\_Para\\_El\\_Manejo\\_Pre\\_Y\\_Poscosecha\\_d/2oNartmY6EMC?hl=es-419&gbpv=1&dq=etapas+de+postcosecha&pg=PA30&printsec=frontcover](https://www.google.com.mx/books/edition/Manual_Para_El_Manejo_Pre_Y_Poscosecha_d/2oNartmY6EMC?hl=es-419&gbpv=1&dq=etapas+de+postcosecha&pg=PA30&printsec=frontcover)
- Gutiérrez Hernández, G. F., Arellano Vázquez, J. L., Jiménez Durán, K., García Ramírez, E., & Flores Gómez, E. (2020). Relaciones genealógicas y morfometría del pericarpio en maíces con calidad de proteína. *Idesia*, 38(2), 87–93. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292020000200087>
- Hafez, M., Abdelmagid, A., Adam, L. R., & Daayf, F. (2020). Specific detection and identification of *Fusarium graminearum sensu stricto* using a PCR-RFLP tool and specific primers targeting the translational elongation factor 1 $\alpha$  gene. *Plant Disease*, 104(4), 1076–1086. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-19-0572-RE>
- Hasmeda, M. (1991). *Identification and evaluation of mechanical damage effects in hybrid corn (Zea mays L.)* [[Object Object], Mississippi State University]. <https://www.proquest.com/openview/d383187793252a70ed7914e7fa770ad3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Hegde, R. B., Kudva, V., Nayak, S., Sampathila, N., & Thalengala, A. (2025). Advanced techniques for seed quality assessment and germination monitoring. *Discover Applied Sciences*, 7(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07284-8>
- Hernández-Castillo, D., Castillo-Reyes, F., Tucuch-Pérez, A., & Arredondo-Valdes, R. (2020). Biological Efficacy of *Trichoderma* spp. and *Bacillus* spp. in the Management of Plant Diseases. En *Organic Agriculture*. IntechOpen.
- Hernández-Delgado, S., Reyes-López, M. A., García-Olivares, J. G., Mayek-Pérez, N., & Reyes-Méndez, C. A. (2007). Incidencia de Hongos Potencialmente Toxígenos en Maíz (*Zea mays* L.) Almacenado y Cultivado en el Norte de Tamaulipas, México. *Revista mexicana de fitopatología: la revista oficial de la Sociedad Mexicana de Fitopatología*, 25(2), 127–133. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-33092007000200006](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092007000200006)
- Hodges, R. J., Buzby, J. C., & Bennett, B. (2011). Postharvest losses and waste in developed and less developed countries: opportunities to improve resource use. *The Journal of Agricultural Science*, 149(S1), 37–45. <https://doi.org/10.1017/s0021859610000936>
- ISTA. (2025). *International Rules for Seed Testing 2025* . *International Seed Testing Association*.

- Kumar, P., Meena, Tanveer, N., Dhiman, S., Rajput, S., Rajput, M., Rajput, Y., & Pandey, N. (2024). A review on seed storage technology: Recent trends and advances in sustainable techniques for global food security. *AgroEnvironmental Sustainability*, 2(1), 34–50. <https://doi.org/10.59983/s2024020105>
- Lovato, A., Noli, E., & Lovato, A. F. S. (2005). The relationship between three cold test temperatures, accelerated ageing test and field emergence of maize seed. *Seed science and technology*, 33(1), 249–253. <https://doi.org/10.15258/sst.2005.33.1.26>
- MacRobert, J. F., Setimela, P., Gethi, J., & Regasa, M. W. (2014). *Maize hybrid seed production manual*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4791.6965>
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor<sup>1</sup>. *Crop Science*, 2(2), 176–177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183x000200020033x>
- Mammadov, J., Aggarwal, R., Buyyarapu, R., & Kumpatla, S. (2012). SNP markers and their impact on plant breeding. *International Journal of Plant Genomics*, 2012, 728398. <https://doi.org/10.1155/2012/728398>
- Mancera Rico, A., García de los Santos, G., Carballo Carballo, A., Villaseñor Perea, C. A., Martínez Garza, Á., & Estrada Trejo, V. (2007). Calidad fisiológica y daño físico en semilla de maíz sometida a impacto. *Agricultura técnica en México*, 33(2), 125–133. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0568-25172007000200002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172007000200002)
- Marcos Filho, J. (2015). Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia agricola*, 72(4), 363–374. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0007>
- Martín, I., Gálvez, L., Guasch, L., & Palmero, D. (2022). Fungal pathogens and seed storage in the dry state. *Plants*, 11(22), 3167. <https://doi.org/10.3390/plants11223167>
- Martínez-Fraca, J., de la Torre-Hernández, M. E., Meshoulam-Alamilla, M., & Plasencia, J. (2022). In search of resistance against Fusarium ear rot: Ferulic acid contents in maize pericarp are associated with antifungal activity and inhibition of fumonisin production. *Frontiers in Plant Science*, 13, 852257. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.852257>
- Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Cardoso-Galvão, J. C., & Vázquez-Carrillo, M. G. (2022). Rendimiento de híbridos de maíz en respuesta a la fertilización foliar con bioestimulantes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(2), 289–301. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2782>
- Mejía, D. (2003). *MAIZE: Post-Harvest Operation*. FAO.

- Munkvold, G. P. (2003). Epidemiology of Fusarium Diseases and their Mycotoxins in Maize Ears. *European Journal of Plant Pathology*, 109(7), 705–713. <https://doi.org/10.1023/a:1026078324268>
- Noriega González, L. A., Preciado Ortiz, R. E., Andrio Enríquez, E., Terrón Ibarra, A. D., & Covarrubias Prieto, J. (2011). Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(4), 489–500. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342011000400002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000400002)
- Norton, I., & IICA. (1950). *Manual de Secado y Almacenamiento de Granos*. <https://hdl.handle.net/11324/16154>
- Nyarko, S. K., Akyereko, Y. G., Akowuah, J. O., & Wireko-Manu, F. D. (2021). Comparative studies on grain quality and pesticide residues in maize stored in hermetic and polypropylene storage bags. *Agriculture*, 11(8), 772. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080772>
- Oakland, J. S. (2014). *Total Quality Management and Operational Excellence: Text with Cases*.
- Obregón, N. del C., & Gómez Gutiérrez, O. J. (2023). Tecnologías y prácticas que utilizan los productores en el manejo poscosecha de maíz y frijol en Estelí, Madriz y Nueva Segovia, Nicaragua. *La Calera*, 23(41). <https://doi.org/10.5377/calera.v23i41.16739>
- Obregón, N. del C., Gómez Gutiérrez, O. J., & Blandón Díaz, J. U. (2023). Tecnologías y prácticas alternativas para la conservación de maíz: resultado del manejo módulo poscosecha. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 13(2), 109–124. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v13i2.17382>
- Olasoji, J. O., & Ogunniyan, D. J. (2020). Genetic variability in physiological seed quality of maize genotypes of different maturity groups. *International Journal of Plant & Soil Science*, 1–10. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2020/v32i1730381>
- Omar, S., Abd Ghani, R., Khalid, N., Jolánkai, M., Tarnawa, Á., Percze, A., Mikó, P. P., & Kende, Z. (2023). Effects of seed quality and hybrid type on maize germination and yield in Hungary. *Agriculture*, 13(9), 1836. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091836>
- Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C., & Job, D. (2012). Seed germination and vigor. *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 507–533. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105550>
- Reis, V. U. V., Penido, A. C., Carvalho, E. R., Rocha, D. K., Reis, L. V., & Semolini, P. H. Z. (2022). Vigor of maize seeds and its effects on plant stand establishment, crop development and grain yield. *Journal of Seed Science*, 44. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44257527>

- Resende, M. D. V. de, & Alves, R. S. (2022). Statistical significance, selection accuracy, and experimental precision in plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 22(3). <https://doi.org/10.1590/1984-70332022v22n3a31>
- SADER. (2024a). *Guía de Buenas Prácticas en Centros de Almacenamiento de Granos*.
- SADER. (2024b). *Optimizando la poscosecha: Garantizando calidad desde el campo hasta tu mesa*. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/optimizando-la-poscosecha-garantizando-calidad-desde-el-campo-hasta-tu-mesa?idiom=es>
- SADER. (2024c 7). *Buenas Prácticas de Almacenamiento de Granos*. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/buenas-practicas-de-almacenamiento-de-granos>
- Sampietro, D. A., Vattuone, M. A., Presello, D. A., Fauguel, C. M., & Catalán, C. A. N. (2009). The pericarp and its surface wax layer in maize kernels as resistance factors to fumonisin accumulation by *Fusarium verticillioides*. *Crop Protection (Guildford, Surrey)*, 28(2), 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.09.010>
- Satya Srii, V., & Nagarajappa, N. (2024). Impact of accelerated aging on seed quality, seed coat physical structure and antioxidant enzyme activity of Maize (*Zea mays* L.). *PeerJ*, 12, e17988. <https://doi.org/10.7717/peerj.17988>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *¿Qué es la poscosecha y por qué es importante?* gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-es-la-poscosecha-y-por-que-es-importante>
- Singh, N., & Singh, M. K. (2025). Assessment of genetic variability, heritability and genetic advance in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 9(3), 653–656. <https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i3h.4015>
- SNICS. (2021). *Reglas para la calificación de semilla. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas*. gob.mx. <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/reglas-para-la-calificacion-de-semilla>
- Solórzano-Solórzano, J. A., Vélez Zambrano, S. M., & Vélez Olmedo, J. B. (2024). *Fusarium spp. in corn crops: Identification, geographic distribution, symptoms, mycotoxins, disease cycle, control, and current and future challenges*. *Scientia agropecuaria*, 15(4), 537–556. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.040>

- Suleiman, R. A., Rosentrater, K. A., & Bern, C. J. (2013). Effects of deterioration parameters on storage of maize. *2013 Kansas City, Missouri, July 21 - July 24, 2013*.
- Sundareswaran, S., Ray Choudhury, P., Vanitha, C., & Yadava, D. K. (2023). Seed quality: Variety development to planting—an overview. En *Seed Science and Technology* (pp. 1–16). Springer Nature Singapore.
- Tefera, T. (2012). Post-harvest losses in African maize in the face of increasing food shortage. *Food Security*, 4(2), 267–277. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0182-3>
- Velarde Felix, S., Valdez Rubio, N., Zamora Galván, F., López Molina, R., Melgoza Villagómez, C. M., & Garzón Tiznado, J. A. (2018). Identificación molecular de Fusarium spp. aislados de maíz en Sinaloa, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(8), 1675–1689. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.756>
- Villajos, S. O. (2024). *INTRODUCCIÓN A LOS HONGOSFITOPATÓGENOS*.
- Yousaf, Z., Saleh, N., Ramazan, A., & Aftab, A. (2016). Postharvesting techniques and maintenance of seed quality. En *New Challenges in Seed Biology - Basic and Translational Research Driving Seed Technology*. InTech.
- Zhang, J., Xing, Z., Gu, F., Wang, Y., Wang, T., & Chen, J. (2024). Changes in the microflora on the seed surface and seed vigor of maize (*Zea mays*) under different conditions. *PloS One*, 19(11), e0311258. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311258>
- Ziegler, V., Paraginski, R. T., & Ferreira, C. D. (2021). Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality - A review. *Journal of Stored Products Research*, 91(101770), 101770. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770>