



Efecto de la humedad, la temperatura y el empaque sobre la longevidad y calidad de semillas de soya*

Effect of seed moisture, temperature, and packaging on soybean seed longevity and quality

José Israel López-Rodríguez^{1*}, Andrés Antonio Monge-Vargas¹, Andrés Hernández-Pridybailo¹,
Luis Orlando Barboza-Barquero¹

* Recepción: 17 de julio, 2025. Aceptación: 16 de enero, 2026. Este trabajo formó parte de los estudios de doctorado del primer autor en el Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. También es parte del proyecto de investigación 734-C2-609 de la Vicerrectoría de Investigación “Desarrollo y promoción de nuevas variedades y semilla de alta calidad de soya costarricense”.

¹ Universidad de Costa Rica, Centro para Investigaciones en Granos y Semillas. San Pedro, Montes de Oca, San José, Costa Rica. joseisrael.lopez@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0009-0003-9636-4975>); andresantonio.monge@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-4596-5637>); andres.hernandezpridybailo@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-7703-8953>); luisorlando.barboza@ucr.ac.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-4140-6598>).

Resumen

Introducción. La calidad de las semillas es clave para un óptimo rendimiento del cultivo de la soya, y puede ser afectada por el contenido de humedad, la temperatura de almacenamiento y el proceso de empaque. **Objetivo.** Evaluar el efecto de los factores temperatura, contenido de humedad y empaque sobre la longevidad y calidad fisiológica de las semillas de soya variedad CIGRAS-06. **Materiales y métodos.** Este trabajo fue realizado en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica durante 2022 y 2023. Se trabajó con dos lotes de semillas provenientes de Guanacaste y de Pérez Zeledón, de la variedad CIGRAS-06. Las semillas se acondicionaron y se secaron al 6 % y al 12 % de contenido de humedad y se almacenaron, durante 12 meses, a temperatura fría (6 °C) y ambiente (23 °C), en tres tipos de empaque (bolsa de polietileno, saco de polipropileno y bolsa al vacío). Posteriormente, se procedió con pruebas de germinación y de vigor de las semillas. **Resultados.** Se presentó una interacción entre los factores estudiados, donde la temperatura de almacenamiento y el sitio de origen fueron significativos. Las semillas de Pérez Zeledón almacenadas a 23 °C mostraron mayor deterioro, mientras que el almacenamiento en frío (6 °C) y con menor humedad (6 %) redujo la pérdida germinativa, especialmente en el lote de Guanacaste. Las condiciones ambientales de 23 °C aceleraron el deterioro y disminuyeron el vigor, cuantificado por medio de la conductividad eléctrica. **Conclusiones.** Las mejores condiciones de almacenamiento para la variedad de soya CIGRAS-06 se lograron a 6 °C y con un 6 % de humedad en la semilla. El origen de la semilla debe ser considerado, ya que también influye en la respuesta observada en los distintos tratamientos.

Palabras clave: vigor de semillas, zeolita, almacenamiento de semillas, *Glycine max*.



Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Abstract

Introduction. Seed quality is a key component for maintaining soybean crop yield; however, it can be affected by seed moisture content, temperature, and packaging management during storage. **Objective.** To evaluate the effect of temperature, seed moisture content, and packaging factors on the longevity and physiological quality of soybean seeds of the CIGRAS-06 variety. **Materials and methods.** This work was carried out at the Center for Research in Grains and Seeds (CIGRAS), University of Costa Rica, during 2022 and 2023. Seed lots from Guanacaste and Pérez Zeledón were used. Seeds were conditioned and dried to 6 % and 12 % moisture content and stored for 12 months under cold (6 °C) and room temperature (23 °C) conditions in three types of packaging (polyethylene bag, polypropylene sack, and vacuum bag). Germination and seed vigor tests were conducted. **Results.** An interaction among the studied factors was observed, with storage temperature and site of origin being significant. Seeds from Pérez Zeledón stored at 23 °C showed greater deterioration, whereas cold storage (6 °C) and lower moisture content (6 %) reduced germination loss, particularly in the Guanacaste seed lot. Environmental conditions at 23 °C accelerated seed deterioration and decreased seed vigor, as quantified by electrical conductivity. **Conclusions.** Storage of the CIGRAS-06 soybean variety was favored under conditions of 6 °C and a seed moisture content of 6 %. The origin of the seed must be considered, as it also influences the response observed in the different treatments.

Keywords: seed vigor, zeolite, seed storage, *Glycine max*.

Introducción

Los lotes de semillas de soya con vigor, alta germinación, sanidad y pureza física y genética son esenciales para obtener una óptima densidad de siembra en el campo y potenciar el rendimiento. Al enfocarse el mejoramiento genético de la soya en el rendimiento, la calidad de su semilla ha disminuido en las últimas décadas (Stupar et al., 2024). Sumado a lo anterior, en el caso de este cultivo, el embrión se encuentra expuesto, lo que lo hace más susceptible a daños por agentes externos y, por lo tanto, a una reducción en su calidad fisiológica (Acosta Jaques et al., 2022). Se reporta que la vida de las semillas de soya en el trópico es corta (menor a 8 meses) (Rao et al., 2023).

Controlar el contenido de humedad de las semillas y la temperatura de almacenamiento es vital para lograr una alta viabilidad de las semillas ortodoxas, como lo es la soya. De forma general, se establece que cada disminución en 5 °C en la temperatura de almacenamiento duplica aproximadamente la vida de las semillas. Lo mismo sucede si disminuye en un 1 % el contenido de humedad (Bradford et al., 2018; Harrington, 1972).

El almacenamiento de las semillas en condiciones óptimas, con temperaturas de 10 °C y una humedad relativa inferior al 40 %, puede preservar su calidad y vigor durante el almacenamiento (Mbofung et al., 2013). Lo más usual en la preservación de semillas es usar equipos de refrigeración. Por otro lado, para bajar el contenido de humedad se suelen utilizar equipos con aire caliente (no mayor a 40 °C en el caso de la soya) (Acosta Jaques et al., 2022) o también se recurre a materiales que absorben la humedad como la zeolita (Hay et al., 2012).

El máximo potencial fisiológico de las semillas se obtiene en el campo, pero los procesos de cosecha y poscosecha pueden afectar la calidad (De Jesus et al., 2021). La selección de empaques apropiados es importante para el almacenamiento de las semillas, ya que permite preservar su calidad fisiológica (Carvalho et al., 2016). Las características de los empaques pueden reducir u obstruir los intercambios de vapor de agua entre las semillas y el ambiente externo, lo que mantiene el contenido de agua inicial (Arief et al., 2022). Por lo tanto, estos deben ser capaces de proteger las semillas de los factores ambientales dañinos para su calidad, como la alta humedad y la temperatura (Carvalho et al., 2016).

Por lo anterior, es necesario realizar investigaciones que busquen prolongar el tiempo de almacenamiento de las semillas de soya en variedades locales sin que se pierdan sus atributos de calidad fisiológica. Las condiciones tropicales de la región centroamericana aceleran el deterioro de semillas como la soya. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de los factores temperatura, contenido de humedad y empaque sobre la longevidad y calidad fisiológica de las semillas de soya variedad CIGRAS-06.

Materiales y métodos

Localización del estudio y preparación inicial de semillas

Esta investigación se realizó desde junio de 2022 hasta agosto de 2023 en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica. Se utilizaron dos lotes de semillas procedentes de localidades de Guanacaste (10°23'00.0"N, 85°11'13.0"O) y Pérez Zeledón (9°18'05.6"N, 83°38'11.0"O).

El lote de Guanacaste fue cosechado en febrero de 2021. Este estuvo almacenado en cuarto frío a una temperatura de 6 °C, presentó una germinación del 95 % y un contenido de humedad (CH) del 10,2 % antes de iniciar los ensayos. El lote de Pérez Zeledón fue cosechado en febrero de 2022; tras la cosecha, se le realizó una prueba de germinación, cuyo resultado fue del 94 % con un CH del 12 % antes de iniciar las pruebas.

El CH se estabilizó al 6 % y al 12 % en ambos lotes. Para ello, se utilizaron perlas de zeolita activada (Bradford et al., 2018; Hay et al., 2012) con una capacidad de absorción del 16 % de su peso inicial y un tamaño promedio de 6 mm. Las semillas y las perlas de zeolita se mezclaron en una proporción de 0,2 kg de perlas por cada kilogramo de semilla, y se depositaron en una caja hermética con dimensiones de 25 cm × 20 cm × 20 cm. La humedad relativa se estabilizó entre el 50 % y el 60 % en un periodo de tres días, a temperatura ambiente en condiciones de laboratorio (23 °C).

Se monitoreó el CH cada 24 h a través de un determinador de humedad por capacitancia. Cuando el CH alcanzó el 6 % y el 12 %, se empacaron 100 semillas (aproximadamente 16 g) en los siguientes tipos de empaques: saco de polipropileno (S-PP), bolsa de polietileno hermética (B-PE) y bolsa de polietileno al vacío (V-PE). Luego, estos empaques fueron almacenados bajo dos condiciones: (1) temperatura ambiente, con un promedio de $23 \pm 1,75$ °C y una humedad relativa (HR) del $84 \pm 9,77$ %, la cual fue monitoreada cada 30 min durante el experimento con un sensor y registrador de datos; y (2) cámara fría regulada a $6 \pm 2,00$ °C y una HR del $65 \pm 5,00$ %.

Determinación de la germinación de las semillas

Las pruebas de germinación se realizaron en sustrato orgánico tipo turba, de acuerdo con el *International Seed Testing Association* (ISTA, 2022), con pH de 6,0, tamaño de partículas de 0-10 mm y conductividad eléctrica de 40 mS m⁻¹. Para ello, se utilizaron cajas plásticas de 30 × 20 × 20 cm; se depositó 1 kg de turba humedecida al 70 % con agua destilada. Posteriormente, se sembraron 50 semillas de manera manual por repetición para cada tratamiento sobre una primera capa de turba; después se cubrieron con otra capa de turba (de 200 g) y se humedecieron con agua destilada.

Las semillas se colocaron en una cámara de germinación durante ocho días, a una temperatura constante de 30 °C, una HR del 75 % y un fotoperiodo de 12 h de luz. Se realizaron dos conteos de semillas germinadas, el primero a los cinco días y el segundo a los ocho días después de la siembra (DDS). Finalmente, se calculó el porcentaje de germinación utilizando los resultados del segundo conteo de plántulas normales y se registró el número de plántulas anormales y de semillas muertas y duras, según los criterios estandarizados por el ISTA (2022), específicamente para soya.

Determinación del vigor de las semillas

Para determinar el vigor de las semillas se utilizó la prueba de conductividad eléctrica (CE). Se utilizaron cuatro repeticiones de 20 semillas por tratamiento, se pesaron por repetición y se colocaron en vasos plásticos con capacidad de 400 ml. Posteriormente, se agregaron 250 ml de agua desionizada y se dejaron imbibir durante 24 h a temperatura ambiente de 20 °C (± 1 °C). Después de este período, la CE de la solución se midió mediante un conductímetro y los valores se registraron en $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ (Milivojević et al., 2018).

Tratamientos

Se evaluaron cuatro factores distribuidos en un total de 24 tratamientos, correspondientes a dos localidades de producción de las semillas (Pérez Zeledón y Guanacaste), dos porcentajes de humedad de las semillas (6 y 12 %), tres tipos de empaques (S-PP, B-PE y V-PE) y dos temperaturas de almacenamiento (~ 23 °C y 6 °C).

Diseño experimental

El trabajo se desarrolló bajo un diseño completamente al azar en un esquema factorial, con cuatro repeticiones de 50 semillas cada una y cuatro momentos de evaluación (3, 6, 9 y 12 meses) por tratamiento, para un total de 384 unidades experimentales. Cada unidad experimental presentó su respectivo empaque y se utilizó una única vez para las pruebas destructivas de análisis de calidad (germinación y vigor) en el momento de evaluación correspondiente.

Análisis de datos

El análisis de datos consideró el diseño experimental planteado. A partir de los datos de plántulas normales a los ocho días después del ensayo, de acuerdo con ISTA (2022), se calcularon los porcentajes de germinación. Para cada unidad experimental, los valores de germinación determinados a los 0, 3, 6, 9 y 12 meses de almacenamiento se utilizaron para realizar análisis de regresión con el fin de determinar el modelo de mejor ajuste. Tanto el porcentaje de germinación (plántulas normales) como las variables evaluadas se ajustaron a un modelo de regresión lineal; se consideraron valores del coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0,8 como criterio mínimo de validez del modelo.

Dado que el interés principal fue cuantificar la magnitud de la pérdida de germinación durante el almacenamiento, se estimó la pendiente de cambio ($\% \text{ mes}^{-1}$), la cual se utilizó como variable de respuesta. En el caso de la conductividad eléctrica, se aplicó una metodología análoga; sin embargo, las regresiones se realizaron a partir de mediciones efectuadas a los 3, 6, 9 y 12 meses de almacenamiento. El valor absoluto de la pendiente del modelo ajustado para cada unidad experimental se estimó como el cambio en la CE ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ mes}^{-1}$).

Con las variables de respuesta obtenidas, se realizó inicialmente un análisis global mediante un modelo factorial que incluyó los factores temperatura de almacenamiento, humedad inicial, tipo de empaque y origen del lote, así como todas sus interacciones. Los modelos se ajustaron mediante modelos lineales mixtos, con la repetición como efecto aleatorio cuando correspondió, utilizando el paquete “lmerTest” del entorno R (v.4.5.1.). La evaluación de los efectos principales y de las interacciones se llevó a cabo mediante pruebas de tipo III con método de Satterthwaite para modelos factoriales con múltiples interacciones, empleando los paquetes “lmerTest” y “car”.

Debido a la presencia de interacciones significativas que involucraron el factor origen, los análisis posteriores se realizaron por sitio de procedencia de forma independiente. Para cada origen (Pérez Zeledón y Guanacaste), se ajustó un modelo factorial que incluyó las variables temperatura, humedad y empaque, así como sus interacciones.

A partir de estos modelos, se calcularon las medias marginales estimadas para cada nivel de los factores mediante el paquete “emmeans”. Las diferencias entre niveles dentro de cada factor se evaluaron mediante comparaciones múltiples con ajuste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), con los datos de las variables relacionadas con la prueba de germinación (plántulas normales y anormales, semillas muertas y duras), y la de conductividad eléctrica, evaluadas a los 12 meses en cada muestra. Se utilizó el paquete “FactoMineR” en R para explorar las relaciones entre variables y muestras. El agrupamiento de las variables se organizó con base en el sitio de origen del lote y la temperatura de almacenamiento.

Resultados

La pérdida de germinación, expresada como la pendiente absoluta del modelo de regresión lineal (% mes⁻¹), estuvo influenciada por las condiciones de almacenamiento y el origen del lote, observándose patrones contrastantes entre localidades. Al evaluar el efecto de los tratamientos, se detectó una interacción significativa entre los cuatro factores estudiados (temperatura × humedad × empaque × origen, ANDEVA $F = 8,9$; $p < 0,05$), por lo que se procedió a evaluar el efecto de la temperatura, la humedad inicial y el empaque de almacenamiento en cada lote según el sitio de origen.

En el caso del lote de semillas de soya proveniente de Guanacaste, los tres factores presentaron un efecto significativo sobre la pérdida de germinación; sin embargo, la temperatura de almacenamiento y la humedad inicial fueron los factores que más aportaron a la variabilidad del modelo (Cuadro 1). En cuanto al tipo de empaque, se encontró una mayor pérdida de germinación en unidades almacenadas en bolsas de polietileno al vacío, en contraste con las contenidas en saco de polipropileno, las cuales presentaron valores más bajos. Asimismo, el lote proveniente de Pérez Zeledón presentó una pérdida de germinación más elevada que el de Guanacaste (Cuadro 1). En contraste con este último, el efecto del tipo de empaque fue más pronunciado; se destacaron las bolsas de polietileno y polietileno al vacío como los tratamientos con mayor pérdida de germinación, mientras que el saco de polipropileno presentó una menor tasa de deterioro.

Cabe destacar que, en ambos sitios, se detectó una interacción significativa entre temperatura, humedad y tipo de empaque, lo que indica que el efecto de cada factor sobre la pérdida de germinación dependió de la combinación específica de condiciones de almacenamiento. Esto refuerza la necesidad de analizar y reportar los resultados por sitio de origen y de considerar integralmente las condiciones de almacenamiento al evaluar la conservación de la calidad fisiológica de las semillas.

Al calcular las medias marginales por factor dentro de cada sitio de origen del lote, las semillas almacenadas a temperatura ambiente (~ 23 °C) mostraron un mayor deterioro, reflejado en la mayor pérdida mensual del potencial germinativo, con un efecto más pronunciado en el lote proveniente de Pérez Zeledón (Cuadro 1). En este caso, la pérdida de germinación bajo temperatura ambiente fue aproximadamente el doble que en frío (6,1 vs. 3,2 % mes⁻¹).

En Guanacaste, el efecto de la temperatura fue aún más marcado en términos relativos, donde la pérdida bajo almacenamiento a temperatura ambiente fue aproximadamente tres veces mayor que en frío (3,2 vs. 1,1 % mes⁻¹). En ambos orígenes, las semillas almacenadas con 12 % de humedad presentaron pérdidas de germinación mayores que aquellas con 6 %; sin embargo, en el lote de Guanacaste la pérdida fue más contrastante (2,3 veces menor a 6 % vs. 12 % de humedad).

En el lote de Pérez Zeledón, el uso de bolsas de polietileno (con o sin vacío) incrementó la pérdida de germinación en aproximadamente 30-40 % respecto al saco de polipropileno. En contraste, en Guanacaste el efecto del empaque fue más moderado, con diferencias del orden de 20 % entre el mejor y el peor tratamiento. Además, se detectó una interacción significativa entre temperatura, humedad y empaque dentro de cada localidad, lo que indica que el efecto de cada factor dependió de la combinación específica de las condiciones de almacenamiento.

Cuadro 1. Efecto de la temperatura de almacenamiento, el contenido de humedad inicial de la semilla, el tipo de empaque y el sitio de origen del lote sobre la pérdida del porcentaje de germinación en semillas de soya (*Glycine max*) cv. CIGRAS-06. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), Costa Rica. 2022-2023.

Table 1. Effect of storage temperature, initial seed moisture content, packaging type, and site of origin of the seed lot on the loss of germination percentage in soybean seeds (*Glycine max*) cv. CIGRAS-06. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS). Costa Rica, 2022-2023.

Factor (por origen del lote)	Nivel	Pérdida en la germinación (media marginal, % mes ⁻¹)
Guanacaste		
Temperatura $F = 257,54; p < 0,001$	Ambiente (~23 °C)	3,2 ± 0,1 a
	Frío (6 °C)	1,1 ± 0,1 b
Humedad $F = 437,28; p < 0,001$	12 %	2,97 ± 0,1 a
	6 %	1,32 ± 0,1 b
Empaque $F = 5,38; p = 0,009$	Saco polipropileno	1,96 ± 0,1 b
	Bolsa polietileno hermética	2,11 ± 0,1 ab
	Bolsa polietileno al vacío	2,37 ± 0,1 a
$Temperatura * humedad * empaque: F = 25,6; p < 0,001$		
Pérez Zeledón		
Temperatura $F = 17,30; p < 0,001$	Ambiente (~23 °C)	6,1 ± 0,1 a
	Frío (6 °C)	3,2 ± 0,1 b
Humedad $F = 76,21; p < 0,001$	12 %	4,9 ± 0,1 a
	6 %	4,5 ± 0,1 b
Empaque $F = 913,04; p < 0,001$	Saco de polipropileno	3,8 ± 0,1 b
	Bolsa de polietileno hermética	4,9 ± 0,1 a
	Bolsa de polietileno al vacío	5,2 ± 0,1 a
$Temperatura * humedad * empaque: F = 7,44; p = 0,002$		

La pérdida de germinación se expresó como el valor absoluto de la pendiente del modelo de regresión lineal ajustado a los datos de germinación durante el almacenamiento (0, 3, 6, 9 y 12 meses). Se presentan medias marginales estimadas ± error estándar por factor y localidad de origen. Letras iguales dentro de cada factor indican ausencia de diferencias significativas (prueba de Tukey, $p < 0,05$, $n = 4$). / Germination loss was expressed as the absolute value of the slope of the linear regression model fitted to germination data during storage (0, 3, 6, 9 and 12 months). Estimated marginal means ± standard error are presented for each factor and site of origin. Identical letters within each factor indicate the absence of significant differences (Tukey's test, $p < 0,05$, $n = 4$).

Por otro lado, el aumento en la conductividad eléctrica, calculado como la pendiente del modelo de regresión lineal ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ mes}^{-1}$) y utilizado como estimación del deterioro de las membranas celulares de las semillas, también mostró respuestas contrastantes según el origen del lote, donde este factor contribuyó con mayor variabilidad (ANDEVA, $F = 231,9; p < 0,05$), pero sin interacción significativa entre los cuatro factores (ANDEVA, $F = 0,8492; p = 0,43$). De igual modo que con la pérdida en el potencial de germinación, los resultados obtenidos de CE se analizaron por localidad (Cuadro 2).

En general, el lote de semillas provenientes de Guanacaste mostró un menor deterioro bajo todas las condiciones de almacenamiento, en comparación con el lote proveniente de Pérez Zeledón. Independientemente del tratamiento de almacenamiento, el aumento de la CE en semillas provenientes de Pérez Zeledón fue entre 2,5 y 3 veces mayor que en Guanacaste, lo que indica un deterioro más acelerado de la integridad de las membranas celulares en este origen.

Cuadro 2. Efecto de la temperatura de almacenamiento, el contenido de humedad inicial de la semilla, el tipo de empaque y el sitio de origen del lote sobre el aumento de la conductividad eléctrica (CE) de la solución de imbibición en semillas de soya (*Glycine max*) cv. CIGRAS-06. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), Costa Rica. 2022-2023.

Table 2. Effect of storage temperature, initial seed moisture content, packaging type, and site of origin of the seed lot on the increase in electrical conductivity (CE) of the imbibition solution in soybeans (*Glycine max*) cv. CIGRAS-06. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), Costa Rica. 2022-2023.

Factor (por origen del lote)	Nivel	Aumento en la CE (media marginal, $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ mes}^{-1}$)
Guanacaste		
Temperatura $F = 0,68; p = 0,416$	Ambiente ($\sim 23^\circ\text{C}$)	$0,63 \pm 0,07 \text{ a}$
	Frío (6°C)	$0,68 \pm 0,07 \text{ a}$
Humedad $F = 8,43; p = 0,007$	12 %	$0,56 \pm 0,07 \text{ b}$
	6 %	$0,74 \pm 0,07 \text{ a}$
Empaque $F = 10,02; p = <0,001$	Saco de polipropileno	$0,73 \pm 0,08 \text{ a}$
	Bolsa de polietileno hermética	$0,46 \pm 0,08 \text{ b}$
	Bolsa de polietileno al vacío	$0,77 \pm 0,08 \text{ a}$
<i>Temperatura * humedad * empaque: $F = 9,79; p = 0,001$</i>		
Pérez Zeledón		
Temperatura $F = 2,25; p = 0,142$	Ambiente ($\sim 23^\circ\text{C}$)	$1,85 \pm 0,11 \text{ a}$
	Frío (6°C)	$2,09 \pm 0,11 \text{ a}$
Humedad $F = 0,43; p = 0,516$	12 %	$2,02 \pm 0,11 \text{ a}$
	6 %	$1,92 \pm 0,11 \text{ a}$
Empaque $F = 7,41; p = 0,002$	Saco de polipropileno	$1,61 \pm 0,14 \text{ b}$
	Bolsa de polietileno hermética	$1,96 \pm 0,14 \text{ ab}$
	Bolsa de polietileno al vacío	$2,35 \pm 0,14 \text{ a}$
<i>Temperatura * humedad * empaque: $F = 0,63; p = 0,536$</i>		

El aumento de la conductividad eléctrica se expresó como la pendiente del modelo de regresión lineal ajustado a los datos obtenidos durante el almacenamiento (3, 6, 9 y 12 meses). Se presentan las medias marginales estimadas $\pm$ error estándar por factor y localidad de origen. Letras iguales dentro de cada factor indican ausencia de diferencias significativas (prueba de Tukey, $p < 0,05$, $n = 4$). / The increase in electrical conductivity was expressed as the slope of the linear regression model fitted to measurements obtained during storage (0, 3, 6, 9 and 12 months). Estimated marginal means $\pm$ standard error is presented for each factor and site of origin. Identical letters within each factor indicate the absence of significant differences (Tukey's test, $p < 0.05$, $n = 4$).

La temperatura de almacenamiento no tuvo un efecto significativo sobre el aumento de la conductividad eléctrica en ninguna de las dos localidades (Cuadro 2). En contraste, el lote de Guanacaste aumentó significativamente su deterioro mensual durante el almacenamiento a una humedad inicial de 6 % de la semilla con respecto al almacenamiento a 12 %, lo que sugiere una mayor susceptibilidad al daño de membranas bajo condiciones de menor contenido de agua en este lote. En el caso del lote de Pérez Zeledón, la humedad inicial de almacenamiento no influyó en el deterioro mensual.

El tipo de empaque también tuvo un efecto significativo en los lotes provenientes de ambas localidades, presentando una reducción del deterioro dependiendo del sitio de origen del lote. En Pérez Zeledón, las semillas almacenadas en bolsa de polietileno al vacío presentaron un aumento mensual del deterioro de la CE aproximadamente 45 % mayor que aquellas almacenadas en saco de polipropileno ($2,35$ vs. $1,61 \mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ mes}^{-1}$). En Guanacaste, el efecto relativo del empaque fue aún más pronunciado, ya que el incremento de la CE en bolsa de polietileno al vacío fue cercano a 65 % mayor que en bolsa de polietileno hermética. Además, se detectó una

interacción significativa entre temperatura, humedad y empaque, lo que indica que el efecto de cada factor dependió de la combinación específica de las condiciones de almacenamiento.

Por último, al analizar la germinación después de 12 meses de almacenamiento por medio de un PCA, el primer componente separó las muestras según el sitio de origen del lote (Figura 1). Además, las semillas provenientes de Pérez Zeledón mostraron una separación en el segundo componente, influenciada por la temperatura de almacenamiento. En cuanto a las relaciones entre las variables, aquellas que estiman el potencial germinativo se asociaron con el número de semillas muertas, mientras que las variables relacionadas con el vigor mostraron una mayor relación con el número de plántulas anormales. El número de semillas muertas presentó los valores más altos de correlación entre la tasa de pérdida de germinación y el porcentaje de germinación a los 12 meses de almacenamiento ($r = 0,93$ y $-0,91$, respectivamente).

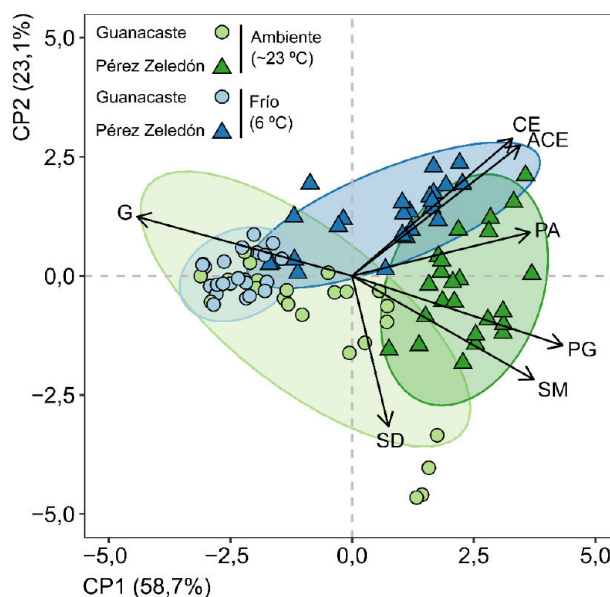


Figura 1. Análisis de componentes principales de la relación entre el porcentaje de germinación (G), plántulas anormales (PA), semillas muertas (SM), semillas duras (SD) y conductividad eléctrica (CE) a los 12 meses de almacenamiento, la tasa de pérdida del porcentaje de germinación (PG) y la tasa de aumento en la conductividad eléctrica (ACE) en semillas de soya (*Glycine max*) cv. CIGRAS-06, según el sitio de origen del lote y la temperatura de almacenamiento. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), Costa Rica. 2022-2023.

Las elipses indican intervalos de confianza del 95 %. CP: Componente principal.

Figure 1. Principal component analysis of the relationship between germination percentage (G), abnormal seedlings (PA), dead seeds (SM), hard seeds (SD), and electrical conductivity (CE) at 12 months of storage, the loss rate of germination percentage (PG), and the rate of increase in electrical conductivity (ACE) in soybean (*Glycine max*) cv. CIGRAS-06, according to the site of origin of the seed lot and storage temperature. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), Costa Rica, 2022-2023.

Ellipses indicate 95 % confidence intervals. CP: Principal component.

Discusión

El almacenamiento en frío de las semillas de soya de la variedad CIGRAS-06 resultó en un mayor porcentaje de germinación a lo largo de los 12 meses de evaluación. Lo anterior es consistente con lo reportado en literatura

científica, donde se describe el uso del frío para preservar la viabilidad de estas (Koskosidis et al., 2022; Mbofung et al., 2013). Las bajas temperaturas favorecen el estado “vítreo” (conocido en la literatura en inglés como glassy state) de las semillas, un estado de alta viscosidad que alcanzan cuando se almacenan con bajo contenido de humedad, lo que contribuye a mantener su viabilidad (Bernal-Lugo & Leopold, 1998).

Estudios previos han evaluado el efecto del frío en el almacenamiento de las semillas de soya. Ferreira et al. (2017) estudiaron el efecto de enfriarlas a distintas temperaturas y observaron que el enfriamiento a 13 °C logró mantener la viabilidad y vigor por más tiempo en comparación con el tratamiento a 20 °C. Los resultados de dicho estudio demostraron que las semillas almacenadas en frío conservaron su capacidad de germinación durante periodos prolongados de almacenamiento, lo que refuerza la importancia de esta estrategia.

Es conocido que un bajo contenido de humedad influye favorablemente en la viabilidad durante el almacenamiento de semillas ortodoxas (Rao et al., 2023). La reducción de CH puede realizarse mediante la exposición de las semillas al sol, equipos de secado o el uso de desecantes. En este último caso, el uso de la zeolita se ha identificado como un material con alto potencial para la conservación (Guzzon et al., 2024). En la presente investigación, el CH al 6 % fue favorable, particularmente en la semilla originaria de Guanacaste almacenada a temperatura ambiente. Esto tiene una implicación relevante en la preservación, sobre todo en comunidades semilleras donde no se tenga acceso a sistemas de refrigeración.

La viabilidad prolongada de las semillas, como se observó en este estudio, está influenciada por la calidad inicial, el contenido de humedad y la temperatura de almacenamiento. Adicionalmente, en el presente caso, los sacos de polipropileno proporcionaron una mejor germinación. En otros estudios se ha señalado que combinar distintos tipos de empaque puede mejorar los resultados, como el uso de bolsas de polietileno dentro de sacos plásticos (Arief et al., 2022).

En el presente estudio, las bolsas al vacío resultaron en la menor germinación. Sin embargo, Meena et al. (2017) evaluaron distintos tipos de empaque, entre los cuales se incluía las bolsas al vacío, y reportaron este como el mejor tratamiento para almacenar las semillas de soya tanto en frío como a temperatura ambiente. Por lo tanto, se apoya la idea de que el efecto del genotipo es crucial en la respuesta a los tratamientos, así como lo han reportado otros estudios (Arief et al., 2022). La variedad CIGRAS-06 podría ser sensible a este tratamiento, lo cual deberá evaluarse en futuras investigaciones. Asimismo, existen otros empaques reportados con buenos resultados en soya que pueden servir para estudios futuros, como el caso de bolsas de aluminio (Vaghasiya et al., 2025) y atmósfera de empaque laminado (Lari Padia et al., 2023).

Las semillas producidas en Pérez Zeledón perdieron más rápido su viabilidad en ambas condiciones de almacenamiento en comparación con las de Guanacaste. Esto puede atribuirse a las diferentes condiciones ambientales, al manejo agronómico y al momento de cosecha. La viabilidad de las semillas por periodos prolongados está relacionada con su calidad inicial (Surki et al., 2012). En pre y poscosecha es importante considerar el contenido de humedad de las semillas para lograr un almacenamiento óptimo, particularmente si este supera el 12 % (Hartmann Filho et al., 2016). El lote de Pérez Zeledón tenía un CH mayor al de Guanacaste, lo cual pudo influir en la respuesta a los tratamientos.

Los resultados de conductividad eléctrica mostraron incrementos conforme transcurrió el tiempo de almacenamiento. La conductividad eléctrica de las semillas aumenta con el tiempo de almacenamiento, independientemente de la condición de almacenamiento y del empaque utilizado (Kandil et al., 2013). Valores por debajo de 70 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ son indicadores de vigor muy alto de las semillas de soya (Do Prado et al., 2019). A los 12 meses, los valores de CE fueron menores a 20 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ en la semilla que provenía de Guanacaste, lo que indica un alto vigor, mientras que en el caso de las de Pérez Zeledón fueron mayores, lo que indica la reducción en el vigor.

El análisis de componentes principales permitió observar que el origen de las semillas es un factor clave en la diferenciación de muestras. Esto concuerda con Klupczyńska & Pawłowski (2021), quienes destacan que el entorno materno influye de manera prolongada en las semillas de la progenie, lo que afecta la germinación, las

características y el crecimiento de las plántulas. El entorno materno y la temperatura son factores críticos que influyen en la germinación y las características de las semillas (Li et al., 2017; Penfield & MacGregor, 2017). La agrupación de semillas provenientes de ciertas localidades, observada en el análisis, respalda la idea de que las condiciones ambientales específicas de cada área son determinantes.

Conclusiones

El almacenamiento a temperatura fría (6 °C), con empaques en saco, bolsa hermética o bolsa al vacío, y un contenido de humedad del 6 % favoreció la calidad de la semilla de la variedad CIGRAS-06. Es importante contemplar que el origen de la semilla puede afectar la respuesta a las condiciones de almacenamiento. El almacenamiento en condiciones ambientales (23 °C y 84 % de humedad relativa) no es recomendable, ya que las semillas están expuestas a un envejecimiento más acelerado. Disminuir el contenido de humedad puede favorecer el almacenamiento bajo estas condiciones.

Agradecimientos

Se agradece al Servicio Alemán de Intercambio Académico por la beca otorgada para que José Israel López realizara sus estudios de doctorado. Se agradece al Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, así como a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, por el apoyo brindado para la ejecución de esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Acosta Jaques, L. B., Carteri Coradi, P., Eguilhor Rodrigues, H., Padilha Dubal, Í. T., Lari Padia, C., Lima, R. E., & Coelho de Souza, G. A. (2022). Post-harvesting of soybean seeds – engineering, processes technologies, and seed quality: a review. *International Agrophysics*, 36(2), 59-81. <https://doi.org/10.31545/intagr/147422>
- Arief, R. W., Asnawi, R., Tambunan, R. D., Wardani, N., Mustikawati, D. R., & Mejaya, M. J. (2022). Packaging types as influencing seed quality in some soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] varieties during storage period. *Czech Journal of Food Sciences*, 40(3), 229-239. <https://doi.org/10.17221/119/2021-CJFS>
- Bernal-Lugo, I., & Leopold, A. C. (1998). The dynamics of seed mortality. *Journal of Experimental Botany*, 49(326), 1455-1461. <https://doi.org/10.1093/jxb/49.326.1455>
- Bradford, K. J., Dahal, P., Van Asbrouck, J., Kunusoth, K., Bello, P., Thompson, J., & Wu, F. (2018). The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.002>

- Carvalho, E. R., Oliveira, J. A., Mavaieie, D. P. da R., da Silva, H. W., & Moreira Lopes, C. G. (2016). Pre-packing cooling and types of packages in maintaining physiological quality of soybean seeds during storage. *Journal of Seed Science*, 38(2), 129-139. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v38n2158956>
- De Jesus, M. A., Amorim Reis, V. M., Ramos Sampaio, F., Leadro Posse, F., & Marani Barbosa, R. (2021). Quality control charts in the processing of soybean seeds. *Journal of Seed Science*, 43, Artículo e202143031. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v43n245104>
- Do Prado, J. P., Krzyzanowski, F. C., Martins, C. C., & Vieira, R. D. (2019). Physiological potential of soybean seeds and its relationship to electrical conductivity. *Journal of Seed Science*, 41(4), 407-415. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4214988>
- Ferreira, F. C., Villela, F. A., Meneghello, G. E., & Soares, V. N. (2017). Cooling of soybean seeds and physiological quality during storage. *Journal of Seed Science*, 39(4), 385-392. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v39n4177535>
- Guzzon, F., Costich, D. E., Afzal, I., Barquero Barquero, L., Monge Vargas, A. A., Vargas Ramírez, E., Bello, P., Dahal, P., Sánchez Cano, C., Zvala Esponiso, C., Imra, S., Patolo, S., Ngaloafe Tukia, T., Van Asbrouck, J., Nabubuniyaka-Young, E., Gianella, M., & Bradford, K. J. (2024). Applications of dry chain technology to maintain high seed viability in tropical climates. *PeerJ*, 12, Artículo e18146. <https://doi.org/10.7717/peerj.18146>
- Harrington, J. F. (1972). Seed storage and longevity. En T. T. Kozlowski (Ed.), *Seed biology. Volume III. Insects, and seed collection, storage, testing, and certification* (pp. 145-245). Academic Press.
- Hartmann Filho, C. P., Duarte Goneli, A. L., Masetto, T. E., Siqueira Martins, E. A., & Cardoso Oba, G. (2016). The effect of drying temperatures and storage of seeds on the growth of soybean seedlings. *Journal of Seed Science*, 38(04), 287-295. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v38n4161866>
- Hay, F. R., Thavong, P., Taridno, P., & Timple, S. (2012). Evaluation of zeolite seed ‘Drying Beads®’ for drying rice seeds to low moisture content prior to long-term storage. *Seed Science & Technology*, 40(3), 374-395. <https://doi.org/10.15258/sst.2012.40.3.09>
- International Seed Testing Association. (2022). *International rules for seed testing 2022*. <https://doi.org/10.15258/istarules.2022.I>
- Kandil, A. A., Sharief, A. E., & Sheteiwy, M. S. (2013). Effect of seed storage periods, conditions and materials on seed quality of some soybean cultivars. *International Journal of Agriculture Sciences*, 5(1), 339-346. <https://doi.org/10.9735/0975-3710.5.1.339-346>
- Kluczyńska, E. A., & Pawłowski, T. A. (2021). Regulation of seed dormancy and germination mechanisms in a changing environment. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), Artículo 1257. <https://doi.org/10.3390/ijms22031357>
- Koskosidis, A., Khah, E. M., Pavli, O. I., & Vlachostergios, D. N. (2022). Effect of storage conditions on seed quality of soybean (*Glycine max* L.) germplasm. *AIMS Agriculture & Food*, 7(2), 387-402. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2022025>
- Lari Padia, C., Carteri Coradi, P., Acosta Jaques, L. B., Coelho de Souza, G. A., Ibagué Steinhau, J., de Oliveira Carneiro, L., & Müller, A. (2023). Packaging of soybean seeds stored in different environments. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58, Artículo e03427. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03427>
- Li, R., Chen, L., Wu, Y., Zhang, R., Baskin, C. C., Baskin, J. M., & Hu, X. (2017). Effects of cultivar and maternal environment on seed quality in *Vicia sativa*. *Frontiers in Plant Science*, 8, Artículo 1411. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01411>

- Mbofung, G. C. Y., Goggi, A. S., Leandro, L. F. S., & Mullen, R. E. (2013). Effects of storage temperature and relative humidity on viability and vigor of treated soybean seeds. *Crop Science*, 53(3), 1086-1095. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.09.0530>
- Meena, M. K., Chetti, M. B., & Nawalagatti, C. M. (2017). Seed quality behavior of Soybean (*Glycine max*) as influenced by different packaging materials and storage conditions. *Legume Research*, 40(6), 1113-1118. <https://doi.org/10.18805/lr.v0i0.7598>
- Milivojević, M., Ripka, Z., & Petrović, T. (2018). ISTA rules changes in seed germination testing at the beginning of the 21st century. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 22(1), 40-45. <https://doi.org/10.5937/JPEA1801040M>
- Penfield, S., & MacGregor, D. R. (2017). Effects of environmental variation during seed production on seed dormancy and germination. *Journal of Experimental Botany*, 68(4), 819-825. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw436>
- Rao, P. J. M., Pallavi, M., Bharathi, Y., Priya, P. B., Sujatha, P., & Prabhavathi, K. (2023). Insights into mechanisms of seed longevity in soybean: a review. *Frontiers in Plant Science*, 14, Artículo 1206318. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206318>
- Stupar, R. M., Locke, A. M., Allen, D. K., Stacey, M. G., Ma, J., Weiss, J., Nelson, R. T., Hudson, M. E., Joshi, T., Li, Z., Song, Q., Jedlicka, J. R., MacIntosh, G. C., Grant, D., Parrott, W. A., Clemente, T. E., Stacey, G., Charles An, Y.-q., Aponte-Rivera, J., ... O'Rourke, J. A. (2024). Soybean genomics research community strategic plan: A vision for 2024-2028. *The Plant Genome*, 17(4), Artículo e20516. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20516>
- Surki, A. A., Sharifzadeh, F., & Afshari, R. T. (2012). Effect of drying conditions and harvest time on soybean seed viability and deterioration under different storage temperature. *African Journal of Agricultural Research*, 7(36), 5118-5127. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.060>
- Vaghasiya, K. P., Patel, J. B., & Sondarva, J. R. (2025). Effect of pre-storage seed treatments on the storage potential in soybean seed [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Legume Research*, 48(8), 1415-1420. <https://doi.org/10.18805/LR-5061>