

Germinación de semillas de espárrago con ácido giberélico y métodos físicos

Seed germination of asparagus with gibberellic acid and physical methods

Adela Guadalupe Rosas-Rosas¹✉, Juan Guillermo Cruz-Castillo^{2*}✉, Diana Guerra-Ramírez¹✉ y Ana María Castillo-González¹✉

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México.

² Centro Académico Regional Oriente, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 6 Carretera Huatusco – Xalapa, Huatusco, México.

RESUMEN

En algunas zonas productoras de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) en México, la germinación lenta y poco uniforme dificulta la propagación sexual. Para atender esta problemática, se han propuesto tratamientos pregerminativos orientados a romper la dormancia seminal y favorecer el desarrollo inicial. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de tres tratamientos pregerminativos —escarificación química con hipoclorito de sodio, imbibición en agua y aplicación de ácido giberélico (AG₃)— sobre la emergencia y el crecimiento inicial de plántulas obtenidas de semillas recolectadas de plantas de la variedad UC157 F1. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 × 2 × 8, que incluyó escarificación e imbibición (con/sin) y ocho concentraciones de AG₃ (0–600 ppm). Se evaluó la emergencia 25 días después de la siembra, y la altura, longitud de raíz primaria y número de raíces a los 34 días. La escarificación e imbibición incrementaron significativamente la emergencia (87.36 % y 75.12 %, respectivamente) y el crecimiento de las plántulas. El tratamiento con 500 ppm de AG₃ promovió la mayor emergencia y desarrollo vegetativo. Las interacciones entre factores mostraron un efecto sinérgico al aplicar los tres tratamientos de manera conjunta.

Palabras clave: *Asparagus officinalis* L., escarificación, imbibición, hipoclorito de sodio.

ABSTRACT

In some asparagus (*Asparagus officinalis* L.) producing regions of Mexico, slow and uneven germination hinders sexual propagation. To address this limitation, pregerminative treatments have been proposed to break seed dormancy and stimulate early development. The objective of this study was to evaluate the effect of three pregerminative treatments—chemical scarification with sodium hypochlorite, water imbibition, and gibberellic acid (GA₃) application—on the emergence and early growth of seedlings obtained from seeds collected from plants of the UC157 F1 variety. A completely randomized 2 × 2 × 8 factorial design was used, combining scarification and imbibition (with/without), and eight GA₃ concentrations (0–600 ppm). Emergence at 25

days after sowing and seedling height, primary root length, and root number at 34 days were evaluated. Scarification and imbibition significantly increased emergence (87.36 % and 75.12 %, respectively) and seedling growth. The 500 ppm GA₃ treatment promoted the highest emergence and vegetative development. Significant interactions among factors revealed a synergistic effect when all three treatments were applied simultaneously.

Keywords: *Asparagus officinalis* L., scarification, imbibition, sodium hypochlorite.

INTRODUCCIÓN

México ocupa el tercer lugar mundial en la producción de espárrago (*Asparagus officinalis* L.), con 347,291 t y un rendimiento de 9.3 t·ha⁻¹ (SIAP, 2024; FAOSTAT, 2024). A nivel nacional, los principales estados productores son Sonora, Guanajuato y Baja California Sur (200,820.3, 44,906.9 y 43,983 t en el año 2023; con rendimientos de 10.3 t·ha⁻¹, 9.8 t·ha⁻¹ y 7.8 t·ha⁻¹, respectivamente) (SIACON, 2023). En contraste, el Estado de México, específicamente en el municipio de Texcoco se reportó una producción de apenas 33.6 toneladas, con un rendimiento de 2.8 t·ha⁻¹, lo que representa un 70 % por debajo del promedio nacional (SIACON, 2023).

Una de las principales limitantes para incrementar la productividad del cultivo en Texcoco es la adquisición de semillas de bajo costo que, además, presenten alta velocidad y uniformidad en la emergencia. Aunque es posible propagar el espárrago de forma vegetativa mediante división del sistema rizomatoso, en los sistemas de producción comercial se prefiere la propagación sexual por semilla (Gupta *et al.*, 2002). No obstante, este proceso puede tardar de cuatro a seis semanas, según la temperatura y disponibilidad de agua en el suelo (Bittencourt *et al.*, 2005). Para mejorar la eficiencia de la germinación y emergencia de este cultivo, es fundamental romper la dormancia que es común en semillas de especies pertenecientes a la familia Liliaceae (Dhoran y Gudadhe, 2012; Yamaguchi y Maeda, 2015).

Para romper esta dormancia y mejorar la germinación de las semillas, existen algunas técnicas físicas como diferentes temperaturas y lijado (Condori y Martínez, 2020), químicas

*Autor para correspondencia: Juan Guillermo Cruz-Castillo

Correo-e: jcruc@chapingo.mx

Recibido: 20 de mayo de 2025

Aceptado: 29 de diciembre de 2025

Publicado: 25 de febrero de 2026

como el remojo en alcohol, vinagre, ácido clorhídrico, hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico y tratamientos osmóticos (Sánchez *et al.*, 2001; Merino-Valdéz *et al.*, 2018; Díaz-Vázquez *et al.*, 2019; Brondo-Ricárdez *et al.*, 2020), y hormonales como la aplicación de ácido giberélico (AG₃) y ácido abscísico (ABA) (Li y Wolyn, 1996; Dhoran y Gudadhe, 2012). Estos tratamientos dependen de la especie y la dureza de la testa.

En especies del género *Asparagus* L., diversos estudios han documentado técnicas pregerminativas efectivas como la combinación de escarificación y estratificación, que han permitido incrementar la germinación de *A. acutifolius* L. del 7 % hasta un 75.3 % (Katsenios *et al.*, 2019). Además, se ha observado que la aplicación de AG₃ (50 ppm) combinada con escarificación, puede potenciar este efecto en *A. racemosus* L., donde se logró más del 70 % de germinación respecto al tratamiento control (Prabha *et al.*, 2018). Otro método eficaz es la imbibición, ya que, mediante la absorción de agua se reactivan procesos metabólicos latentes, se rehidratan las estructuras celulares y se inicia la actividad enzimática esencial para la germinación (Conversa y Elia, 2009; Bhatla y Lal, 2023; Upretee *et al.*, 2024).

En espárrago comercial (*A. officinalis* L.), se han reportado porcentajes de germinación entre 19 - 82 % en el cultivar UC-157 cuando se aplicaron tratamientos pregerminativos como bacterias ácido lácticas y nitrato de potasio, a semillas F₂ (Dávila *et al.*, 2025). En 'Mary Washington' se observó emergencia de plántulas a partir de los 9.36 días con el uso de tratamientos de acondicionamiento osmótico (polietilenglicol), alcanzando un 92.5 % de germinación a los 28 días del tratamiento (Bittencourt *et al.*, 2005). Estos antecedentes demuestran que, si bien la respuesta varía según el genotipo y el tratamiento, los estímulos pregerminativos representan estrategias agronómicas eficaces para mejorar la cantidad y calidad de plantas obtenidas.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de tratamientos pregerminativos, específicamente escarificación química con hipoclorito de sodio, imbibición e inducción hormonal con AG₃, sobre la emergencia y el crecimiento inicial de plántulas de espárrago comercial, con el fin de identificar la técnica más eficiente para incrementar la velocidad de emergencia y uniformidad en el crecimiento de plántulas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se realizó en invierno del 15 diciembre de 2023 al 18 de enero del 2024, en un invernadero de 60 x 30 m, con una cubierta de plástico blanco lechoso con 25 % de sombra, ubicado en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (19° 29' 29.531" latitud N, 98° 54' 23.898" longitud O; altitud: 2,250 msnm), México.

Material vegetal, condiciones de germinación y diseño experimental

Las semillas utilizadas provinieron de frutos maduros obteni-

dos en una plantación establecida a partir de individuos de la variedad UC 157 F1, recolectados el 7 de septiembre de 2023 en el estado de Veracruz (19°11'12.48 latitud N, 97°11'13.75" longitud O; altitud: 1,750 msnm). Los frutos fueron sometidos a maceración manual para extraer las semillas, las cuales se lavaron con agua corriente para eliminar los residuos de pericarpio y mucílago. Posteriormente, se secaron a la sombra durante 24 h y se almacenaron en un recipiente hermético a temperatura ambiente.

La siembra se realizó el 15 de diciembre de 2023 en contenedores transparentes de poliestireno expandido con tapa (12 x 12 x 5 cm), llenados con 250 mL de sustrato que consistió en una mezcla de turba y perlita (Multiperl®, Coarse) en proporción 1:1 (v/v).

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2 x 2 x 8, correspondiente a los factores: a) escarificación química (con/sin), b) imbibición (con/sin) y c) diferentes concentraciones de ácido giberélico (AG₃; 0-600 ppm) para un total de 32 tratamientos distintos (Tabla 1).

Cada unidad experimental consistió en un contenedor con 20 semillas sembradas sistemáticamente en 5 hileras a 1.5 cm de profundidad. El diseño incluyó tres repeticiones independientes, totalizando 60 semillas evaluadas por cada tratamiento.

Durante el periodo experimental, las condiciones ambientales en el invernadero permanecieron relativamente estables, considerando que no cuenta con un sistema de control de temperatura ni humedad. La temperatura promedio fue de 13.94 °C, con valores mínimos y máximos diarios que oscilaron entre 11.01 y 16.11 °C. La humedad relativa promedio fue de 78 %, con un rango de variación entre 61.44 y 93.02 %, estos datos fueron registrados con un data logger (TZ-TempU03 USB).

Evaluación de emergencia y variables de crecimiento

La emergencia se registró diariamente desde la siembra (día 0) hasta el día 34, se consideró como plántula emergida aquella cuyo cotiledón era visible sobre la superficie del sustrato. Los resultados se expresaron como porcentaje acumulado de emergencia por día (PAE, %). El análisis comparativo se realizó con los datos obtenidos al día 25 después de la siembra, donde en varias unidades experimentales se alcanzó el 80 % de emergencia.

Para evaluar los parámetros de crecimiento, el 18 de enero de 2024, se realizó un muestreo aleatorio seleccionando cinco plántulas por repetición y en cada una se midió la altura del tallo (AT, cm), tomada entre la superficie del sustrato y el ápice del meristemo, y la longitud de la raíz primaria (LRP, cm) desde la base del hipocótilo hasta el extremo radicular. Todas las mediciones se efectuaron con un vernier digital (Keatronic A150, ±0.01 cm).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando los valores promedio por unidad experimental mediante el procedimiento

Tabla 1. Descripción de los tratamientos pregerminativos aplicados a semillas de *Asparagus officinalis* L.**Table 1.** Description of the pre-germination treatments applied to *Asparagus officinalis* L. seeds.

Factor	Niveles	Descripción del tratamiento
Escarificación química	Sin escarificación	Semillas sin tratamiento previo
	Con escarificación	Inmersión de las semillas en 20 mL de hipoclorito de sodio de la marca Cloralex, el cual reporta una concentración del 5-6%, por 2.5 h, seguido de enjuague exhaustivo con agua destilada.
Imbibición	Sin imbibición	Semillas secas
	Con imbibición	Inmersión de las semillas en agua potable durante 24 horas
Ácido giberélico (AG ₃)	0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 ppm	Las semillas se remojaron en las soluciones de las diferentes concentraciones de AG ₃ (GIBE-T, 10 % ácido giberélico, 90 % ingredientes inertes) durante 2.5 horas.

GLM del software SAS® OnDemand for Academics, version 3.1.0 (SAS Institute Inc., 2021). Previo al análisis de varianza, el porcentaje de emergencia fue transformado con la función arcoseno de la raíz cuadrada del valor original (expresado en fracción decimal) con el fin de mejorar la normalidad de los datos y homogeneizar las varianzas, dado que se trata de una variable proporcional. La verificación de los supuestos del ANOVA se realizó mediante las pruebas de Shapiro-Wilk (normalidad de residuos) y Levene (homogeneidad de varianzas). Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), y los valores promedio fueron retransformados a sus unidades originales.

El modelo de análisis de varianza utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + E_i + I_j + G_k + (E \times I)_{ij} + (E \times G)_{ik} + (I \times G)_{jk} + (E \times I \times G)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = variable respuesta

μ = media general

E_i = efecto de la formulación escarificación (i = sin escarificación, escarificación con hipoclorito de sodio)

I_j = efecto de la imbibición (j = sin imbibición, con imbibición)

G_k = efecto de la concentración de ácido giberélico (k = 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 ppm)

ε_{ijk} = error experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza mostró efectos significativos de los tratamientos pregerminativos sobre la emergencia de plántulas y las variables de crecimiento evaluadas (Tabla 2). La variable emergencia presentó efectos significativos tanto de los factores principales como de algunas de sus interacciones. La escarificación química y la imbibición registraron efectos

altamente significativos ($p < 0.001$), lo que evidencia que ambos tratamientos físicos contribuyeron significativamente al incremento en la emergencia de plántulas. La aplicación de AG₃ también mostró un efecto significativo ($p < 0.05$), aunque con menor magnitud. Entre las interacciones, se observaron efectos significativos para escarificación $\times$ imbibición ($p < 0.01$) y para la interacción triple escarificación $\times$ imbibición $\times$ AG₃ ($p < 0.01$), lo que sugiere que la respuesta en emergencia no fue exclusivamente de los factores individuales, sino también de su combinación.

En cuanto a la altura de plántula, tanto la escarificación ($p < 0.001$) como la imbibición ($p < 0.001$) presentaron efectos altamente significativos como factores principales. El AG₃ también influyó significativamente ($p < 0.01$), aunque en menor medida. Se detectaron interacciones significativas entre escarificación $\times$ imbibición ($p < 0.001$), imbibición $\times$ concentración de AG₃ ($p < 0.01$), y la interacción triple entre todos los factores ($p < 0.01$).

En la longitud de raíz primaria, se observaron efectos principales altamente significativos de la escarificación ($p < 0.001$) y la imbibición ($p < 0.001$), mientras que el AG₃ no fue significativo de forma aislada. No obstante, las interacciones imbibición $\times$ AG₃ ($p < 0.01$) y escarificación $\times$ imbibición $\times$ AG₃ fueron estadísticamente significativas ($p < 0.01$), lo que sugiere que el efecto del AG₃ en el crecimiento radicular se ve potenciado por la hidratación previa de las semillas.

Respecto al número de raíces, la imbibición presentó el efecto más marcado ($p < 0.001$), seguido por un efecto moderado del ácido giberélico ($p < 0.05$). Además, se identificaron interacciones significativas entre escarificación $\times$ AG₃ ($p < 0.01$), imbibición $\times$ AG₃ ($p < 0.001$), y la interacción triple ($p < 0.01$), lo que demuestra que la formación de raíces fue más eficiente cuando se combinaron los tres tratamientos.

Estos resultados demuestran que todos los tratamientos influyeron en el desarrollo de las plántulas, así, es importante combinar métodos físicos (escarificación e imbibición) con la aplicación de AG₃ para optimizar el crecimiento inicial del espárrago.

Estas respuestas concuerdan con investigaciones previas en otras especies de *Asparagus*, donde la combinación

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) para altura de plántula, longitud de raíz primaria y número de raíces en respuesta a tratamientos pregerminativos de escarificación, imbibición y ácido giberélico (AG₃).**Table 2.** Analysis of variance (ANOVA) for seedling height, primary root length, and number of roots in response to pre-germination treatments of scarification, imbibition, and gibberellic acid (GA₃).

Fuente de variación	gl	Cuadrados medios							
		Emergencia		Altura		Longitud de raíz primaria		Número de raíces	
Escarificación (E)	1	4.028	***	173.882	***	14.840	***	0.252	ns
Imbibición (I)	1	0.881	***	179.953	***	14.491	***	66.752	***
AG ₃ (G)	7	0.047	*	4.750	**	1.108	ns	7.219	*
E x I	1	0.150	**	24.526	***	0.102	ns	0.469	ns
E x G	7	0.024	ns	1.960	ns	0.785	ns	8.600	**
I x G	7	0.030	ns	3.753	**	2.403	**	17.081	***
E x I x G	7	0.064	**	3.633	**	2.237	**	7.550	**
Error	448	0.020		1.100		0.738		2.719	

* = Significativo, ** = medianamente significativo, *** = altamente significativo, ns = no significativo

* = Significant, ** = moderately significant, *** = highly significant, ns = not significant

de escarificación con ácido sulfúrico o nitrato de potasio, más métodos hormonales (AG₃) han demostrado mejorar tanto la germinación como el desarrollo inicial (Katsenios *et al.*, 2019; Prabha *et al.*, 2018).

Efecto de la escarificación química

Los tratamientos de escarificación con hipoclorito de sodio incrementaron significativamente la emergencia de plántulas (87.36 %) en comparación con el testigo (37.63 %) (Tabla 3). Resultados similares se obtuvieron en chile amashito, donde se logró una germinación del 93 % al sumergir sus semillas durante 72 horas en hipoclorito de sodio al 3 % (Brondo-Ricárdez *et al.*, 2020). Lo anterior indica que la escarificación facilita la entrada de agua y gases al embrión, al reducir la resistencia física de las cubiertas seminales y romper la latencia; para estos fines se han utilizado productos como ácido sulfúrico y nitrato de potasio, los cuales son ácidos fuertes (Prado-Urbina *et al.*, 2015). El hipoclorito de sodio, si bien es corrosivo también, al utilizarse en una baja concentración (3-6 %), reduce el riesgo de dañar la semilla y su manejo es menos peligroso que con los ácidos fuertes.

Tabla 3. Efecto de la escarificación con hipoclorito de sodio en variables de emergencia y crecimiento inicial de plántulas de espárrago (*A. officinalis* L.).**Table 3.** Effect of scarification with sodium hypochlorite on emergence and early growth variables of asparagus seedlings (*A. officinalis* L.).

Variable	Escarificación		
	Con	Sin	DMSH
Emergencia (%)	87.36 ^a	37.63 ^b	3.4222
Altura (cm)	6.99 ^a	5.78 ^b	0.1882
Longitud de raíz primaria (cm)	6.27 ^a	5.92 ^b	0.1542
Número de raíces	2.31 ^a	2.27 ^a	0.2958

Letras distintas entre filas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). DMSH=Diferencia Mínima Significativa Honesta.Different letters within rows indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$). HSD= Honest Significant Difference.

También se observó un incremento significativo en la altura de la plántula (6.99 vs 5.78 cm) y en la longitud de raíz primaria (6.27 cm vs 5.92 cm), sin embargo, el número de raíces no mostró diferencias significativas lo que indica que la escarificación con hipoclorito de sodio es una técnica efectiva para mejorar la emergencia y el crecimiento inicial del espárrago, pero no influyó directamente en la formación de raíces secundarias (Yamaguchi y Maeda, 2015).

Efecto de la imbibición

La imbibición previa de las semillas también generó efectos positivos en todas las variables evaluadas (Tabla 4). Las semillas hidratadas alcanzaron un porcentaje de emergencia 75.12 % a los 25 días después de la siembra, significativamente superior al 50.82 % obtenido en semillas sin imbibición, lo que representa un aumento del 47.8 %. Estos resultados son superiores a lo obtenido en *A. acutifolius* L., donde se obtuvo una germinación del 47 % (Conversa y Elia, 2009), lo que confirma que la hidratación previa de las semillas activa procesos metabólicos esenciales para la germinación (Bhatla y Lal, 2023), además de reducir el tiempo requerido para la emergencia.

Tabla 4. Efecto de la imbibición en variables de emergencia y crecimiento inicial de plántulas de espárrago (*A. officinalis* L.).**Table 4.** Effect of imbibition on emergence and early growth variables of asparagus seedlings (*A. officinalis* L.).

Variable	Imbibición		
	Con	Sin	DMSH
Emergencia (%)	75.12 ^a	50.82 ^b	3.4222
Altura (cm)	6.99 ^a	6.77 ^b	0.1882
Longitud de raíz primaria (cm)	6.27 ^a	5.92 ^b	0.1542
Número de raíces	2.66 ^a	1.92 ^b	0.2958

Letras distintas entre filas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta.Different letters within rows indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$). HSD= Honest Significant Difference.

En cuanto al crecimiento, las plántulas provenientes de semillas imbibidas mostraron una mayor altura (6.99 cm vs 6.77 cm) y longitud radicular (6.27 cm vs 5.92 cm), siendo ambos estadísticamente significativos. No obstante, el efecto más notable se observó en el número de raíces secundarias, con un aumento del 38.5 % en semillas hidratadas. Este resultado destaca la importancia de la imbibición como un tratamiento pregerminativo práctico y efectivo para mejorar la uniformidad y calidad del establecimiento del cultivo.

Efecto del AG₃

La aplicación de AG₃ mostró efectos variables según la concentración aplicada (Tabla 5). El mayor porcentaje de emergencia (75.24 %) se obtuvo con 500 ppm, contrario a lo obtenido por Cermeño y colaboradores (2002), quienes observaron que a 500 ppm se inhibía completamente la germinación alcanzando un máximo de 95 % a 100 ppm bajo temperaturas de 20–30 °C. De manera similar, se ha documentado que la respuesta positiva al AG₃ ocurre principalmente a concentraciones bajas (20–150 ppm), mientras que a dosis superiores la germinación tiende a decrecer (Gupta *et al.*, 2015). En concordancia, Dhoran y Gudadhe (2012) reportaron que en *A. sprengeri* las concentraciones de 50–60 ppm promovieron significativamente la germinación (70–75 % en luz y hasta 89 % en oscuridad), pero que a medida que la concentración aumentaba, el porcentaje de germinación disminuía. En conjunto, la evidencia indica que la respuesta al AG₃ depende de múltiples factores, incluyendo la especie, el genotipo, la temperatura y la interacción con otros tratamientos pregerminativos. Así, es posible que la temperatura relativamente baja de este estudio (14 °C, dado que se condujo en época invernal) haya favorecido una respuesta distinta a concentraciones elevadas de AG₃, modulando la germinación en comparación con lo reportado en condiciones más cálidas.

Table 5. Efecto del ácido giberélico (AG₃) en la emergencia y crecimiento inicial de plántulas de espárrago (*A. officinalis* L.)

Table 5. Effect of gibberellic acid (GA₃) on emergence and early growth of asparagus seedlings (*A. officinalis* L.)

Ácido giberélico (ppm)	Variable			
	Emergencia (%)	Altura (cm)	Longitud de raíz (cm)	Número de raíces
0	62.99 ^{ab}	6.12 ^{bc}	5.93 ^a	2.57 ^{ab}
50	67.16 ^{ab}	6.20 ^{bc}	6.11 ^a	2.39 ^{ab}
100	64.68 ^{ab}	6.37 ^{abc}	5.91 ^a	1.77 ^b
200	61.57 ^{ab}	6.43 ^{abc}	6.25 ^a	2.25 ^{ab}
300	47.05 ^b	5.99 ^c	6.09 ^a	1.97 ^b
400	59.50 ^{ab}	6.51 ^{abc}	6.12 ^a	2.25 ^{ab}
500	75.24 ^a	6.88 ^a	6.29 ^a	2.90 ^a
600	66.20 ^{ab}	6.58 ^{ab}	6.06 ^a	2.23 ^{ab}
DMSH	3.33	0.58	0.48	0.92

Letras distintas entre columnas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). DMSH = Diferencia Mínima Significativa Honesta.

Different letters within columns indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$). HSD = Honest Significant Difference.

Efecto de la interacción de AG₃, imbibición y escarificación

La interacción triple mostró un efecto significativo para modificar las condiciones físico-químicas que rodean al embrión promoviendo la emergencia y el crecimiento inicial de las plántulas de espárrago (Tabla 2; Figura 2). Así, la combinación de estímulos físicos (remoción de barreras mecánicas y activación metabólica), imbibición, y hormonales (estimulación del crecimiento) tuvieron un efecto sinérgico que maximizó la eficiencia germinativa (Gupta *et al.*, 2002).

Los mejores resultados de emergencia, altura y desarrollo radicular se alcanzaron únicamente cuando las semillas fueron escarificadas con hipoclorito de sodio, embebidas y tratadas con 500 ppm de AG₃ (Figura 2). En particular, se observó un aumento superior al 80 % el porcentaje de emergencia y una mayor altura de plántulas en comparación con tratamientos incompletos. La remoción de barreras físicas mediante la escarificación y la activación metabólica con la imbibición fueron necesarios para que el AG₃ actuara eficazmente en el proceso de la germinación (Yamaguchi y Maeda, 2015; Bhatla y Lal, 2023).

Las curvas de emergencia acumulada muestran que la emergencia comenzó entre el día 20 y 21 después de la siembra, y alcanzó su valor máximo más rápidamente, mientras que los tratamientos sin acondicionamiento pregerminativo mostraron un patrón tardío y disperso (Figura 3). La sincronización de la emergencia es clave para lograr un establecimiento uniforme del cultivo.

Los datos también evidencian que el desarrollo radicular (número de raíces secundarias y longitud de raíz) fue más robusto en tratamientos que integraron los tres factores estudiados, lo cual tiene implicaciones directas en la calidad del trasplante y el vigor posterior de la planta en campo. Como han señalado estudios previos en otras especies de espárrago (Prabha *et al.*, 2018; Katsenios *et al.*, 2019), el uso combinado de estímulos físicos y hormonales mejora no solo la germinación, sino también el potencial fisiológico de la plántula.

En conjunto, estos resultados respaldan la implementación de un enfoque integrado en la pregerminación del espárrago, en el que los tratamientos físicos y hormonales se combinan de forma sinérgica para optimizar la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas. Este protocolo podría representar una alternativa técnica efectiva para regiones donde el bajo porcentaje de germinación limita la disponibilidad de plántulas, especialmente para pequeños productores con recursos restringidos para adquirir semillas de alto valor comercial, como ocurre en ciertas zonas del Estado de México.

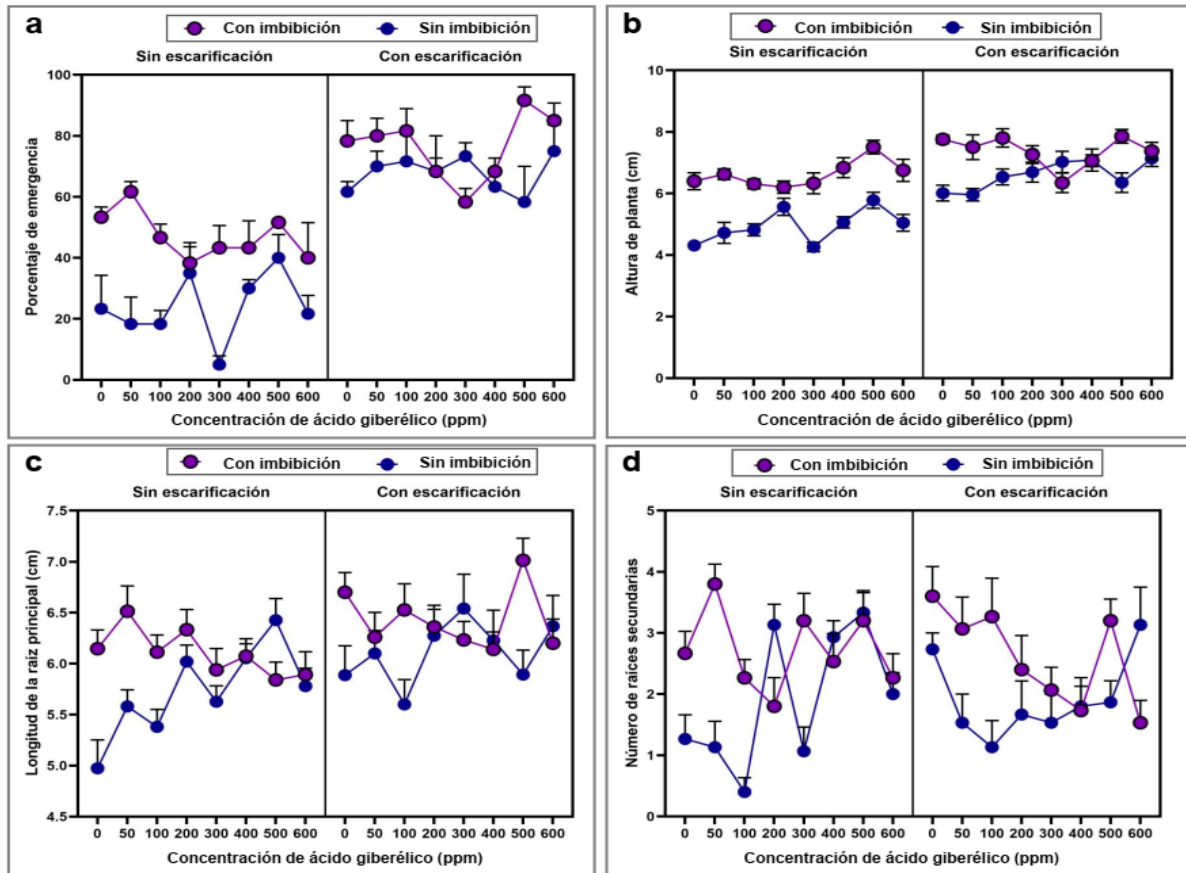


Figura 2. Interacción entre escarificación, imbibición y concentración de ácido giberélico en la emergencia y crecimiento inicial de plántulas de espárrago. Las barras indican el error estándar ($n = 3$). a) Emergencia promedio a los 25 días después de la siembra (%). b) Altura de plántula (cm). c) Longitud de la raíz principal (cm). d) Número promedio de raíces secundarias. b, c, d: Se evaluaron a los 34 días después de la siembra.

Figure 2. Interaction between scarification, imbibition, and gibberellic acid concentration on the emergence and early growth of asparagus seedlings. Bars indicate standard error ($n = 3$). a) Average emergence at 25 days after sowing (%). b) Seedling height (cm). c) Primary root length (cm). d) Average number of secondary roots. b, c, d: Evaluated at 34 days after sowing.

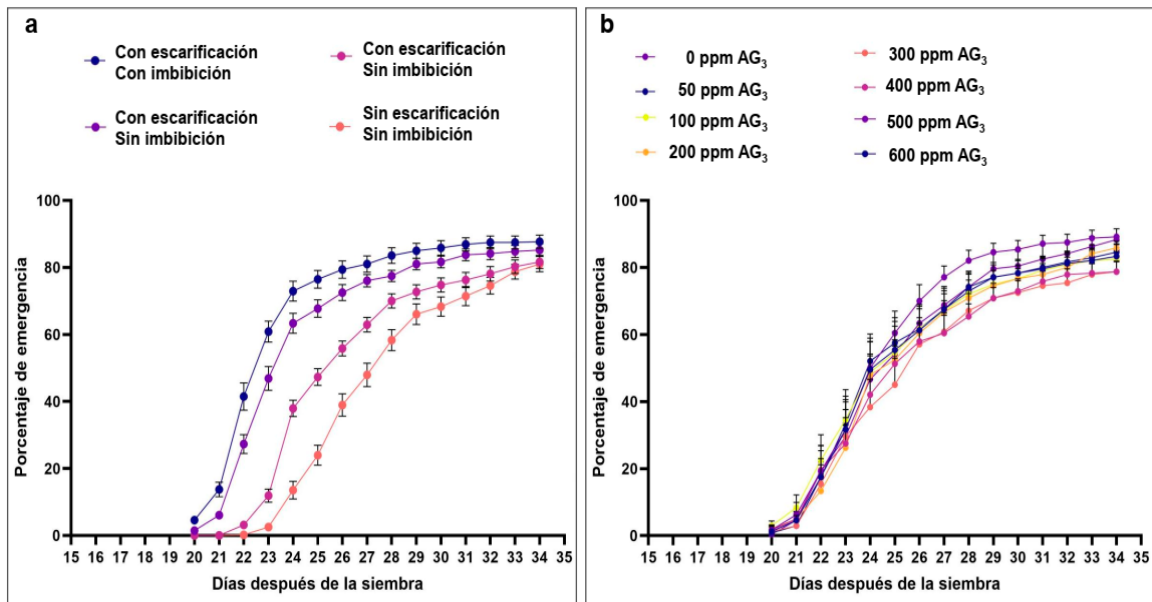


Figura 3. Porcentaje de emergencia acumulada de plántulas de *A. officinalis* L. durante 34 días después de la siembra. a) efecto de la escarificación x imbibición. b) Efecto de la aplicación de ácido giberélico. Las barras indican el error estándar ($n = 3$).

Figure 3. Cumulative emergence percentage of *A. officinalis* L. seedlings during 34 days after sowing. a) Effect of scarification x imbibition. b) Effect of gibberellic acid application. Bars indicate standard error ($n = 3$).

CONCLUSIONES

La combinación de escarificación con hipoclorito de sodio durante 2.5 horas, imbibición en agua durante 24 horas, y aplicación de ácido giberélico (500 ppm) durante 2.5 horas, fue una estrategia efectiva para mejorar la emergencia y el crecimiento inicial de plántulas de *Asparagus officinalis* L. El uso conjunto de estos tratamientos permitió alcanzar tasas de emergencia superiores al 85 % a los 25 días después de la siembra, lo que contribuye a reducir el tiempo necesario para la multiplicación sexual del cultivo y a mejorar la calidad morfológica de las plántulas. Además, el uso de hipoclorito de sodio como agente escarificador representa una alternativa viable y menos agresiva frente a la alta corrosividad del ácido sulfúrico, cuyo manejo implica un mayor riesgo de daño tanto para las semillas como para las personas que lo aplican.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), y a la Universidad Autónoma Chapingo, proyecto 25162-C-87, por el apoyo otorgado para llevar a cabo la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

El manuscrito fue elaborado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de intereses que declarar, que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

- Bhatla, S.C. y Lal, M.A. 2023. Seed dormancy and germination. In *Plant Physiology, Development and Metabolism* (pp. 625–640). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5736-1_28
- Bittencourt, M.L. de C., Dias, D.C.F. dos S., Dias, L.A. dos S. y Araújo, E.F. 2005. Germination and vigour of primed asparagus seeds. *Scientia Agricola*. 62(4): 319–324. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162005000400003>
- Brondo-Ricárdez, R., Domínguez-Angulo, S., Pérez-Hernández, I. y D'Artola-Barceló, A.L. 2020. Tratamientos pregerminativos a semillas y desarrollo inicial de plántulas de chime amashito (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*). *Agroproductividad*. 13(2): 53–59. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1589>
- Cermeño, P., del Olmo, L.A., Belda, J. y Corell, M. 2002. Pregermination and germination in *Asparagus*. *Acta Horticulturae*. 589: 341–345. doi:10.17660/actahortic.2002.589
- Condori Tarqui, A. y Martínez Flores, Z. 2020. Tratamientos físicos y químicos en la germinación de semillas de especies nativas del Altiplano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. 7(2): 46–57.
- Conversa, G. y Elia, A. 2009. Effect of seed age, stratification, and soaking on germination of wild asparagus (*Asparagus acutifolius* L.) *Scientia Horticulturae*. 119: 241–245. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.013>
- Dávila, R.E., Chávez, C.A., Emperatriz, C., Vargas, A. y Camilo, F. 2025. Uso de bacterias ácido lácticas en el tratamiento de pre-germinación para comprobar la dormición de semillas de espárrago. *Agroindustrial Science*. 15(1): 73–80. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2025.01.08>
- Dhoran, V.S. y Gudadhe S. 2012. Effect of plant regulators on seed germination and seedling. *International Research Journal of Biological Sciences*. 1(7):6–10.
- Díaz-Vázquez, D.P., Félix-Herrán, J.A., Sañudo-Ayala, E. y Ruelas-Ayala, R.D. 2019. Respuesta de las semillas de palo colorado (*Caesalpinia platyloba* S. Watson) a diferentes tratamientos pregerminativos. *Tecnociencia Chihuahua*. 13(3). <https://doi.org/10.54167/tch.v13i3.480>
- FAOSTAT. 2024. Cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Gupta, S., Kumar, A. y Sharma, S.N. 2002. Improvement of seed germination in *Asparagus racemosus* Willd. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*. 9(1): 3–9. https://doi.org/10.1300/j044v09n01_02
- Katsenios, N., Roussis, I.E., Efthimiadou, A., Kakabouki, I. y Bilalis, D. 2019. Seed treatment techniques to improve germination of wild *Asparagus* (*Asparagus acutifolius* L.), a potential new crop. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 47(3): 995–1000. <https://doi.org/10.15835/nbha47311554>
- Li, B. y Wolyn, D.J. 1996. Abscissic acid and ancymidol promote conversion of somatic embryos to plantlets and secondary embryogenesis in *Asparagus officinalis* L.. In *Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 32: 223–226. <https://doi.org/10.1007/BF02822691>
- Merino-Valdés, M., Andrés-Meza, P., Leyva-Ovalle, O.R., López-Sánchez, H., Murguía-González J., Núñez-Pastrana, R., Cebada-Merino, M., Serna-Lagunes, R., Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Sierra-Macías, M. y Rosario-Arellano, J.L. 2018. Influencia de tratamientos pregerminativos en semillas de chile manzano (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.). *Acta Agronómica*. 67(4): 531–537.
- Prabha, D., Bhutia, N.T., Chauhan, J.S. y Negi, Y.K. 2018. Effect of stratification and different soaking treatments on dormancy release and germination of *Asparagus racemosus* seeds. *Vegetos- an International Journal of Plant Research*. 31(1): 162. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2018.00022.8>
- Prado-Urbina, G., Lagunes-Espinoza, L., García-López, E., Bautista-Muñoz, C., Camacho-Chiu, W., Mirafuentes, G. y Aguilar-Rincón, V.H. 2015. Germinación de semillas de chiles silvestres en respuesta a tratamientos pre-germinativos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2(5): 139–149.
- Sánchez, J.A., Orta, R. y Muñoz, B.C. 2001. Tratamientos pregerminativos de hidratación-deshidratación de las semillas y sus efectos en plantas de interés agrícola. *Agronomía Costarricense*. 25(1): 67–91.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2024. Panorama Agroalimentario 2018 - 2024. La ruta de la Transformación Agroalimentaria. Servicio de Información Agroalimentaria Y Pesquera . https://drive.google.com/file/d/1NXcDhaB63Z94wjRUVF6f_FK0Urv6cgvJ/view
- Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIACON. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- Upreti, P., Bandara, M.S. y Tanino, K.K. 2024. The role of seed characteristics on water uptake preceding germination. *Seeds*. 3(4): 559–574. <https://doi.org/10.3390/seeds3040038>
- Yamaguchi, T. y Maeda, T. 2015. Effect of high-temperature treatments on the breaking of dormancy in one-year-old *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.). *Environment Control in Biology*. 53(1): 23–26. <https://doi.org/10.2525/ecb.53.23>