



## Extractos de espirulina revierten los efectos del déficit hídrico simulado con PEG 6 000 en maíz

### Spirulina extracts reverse the effects of simulated water deficit with PEG 6 000 in corn

<sup>1</sup>Lisbel Martínez González, <sup>2</sup>Yanelis Reyes Guerrero\*, <sup>3</sup>Miriam de la C. Núñez Vázquez, <sup>4</sup>Geydi Pérez Domínguez, <sup>5</sup>Donaldo Morales Guevara

Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32 700

**RESUMEN:** El déficit hídrico retrasa la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de maíz y la aplicación de bioestimulantes puede revertir este efecto. El objetivo de esta investigación fue determinar los efectos de dos extractos etanólicos de espirulina (*Arthrospira platensis*, originalmente incluidas en el género *Spirulina*) en la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de maíz sometidas a déficit hídrico simulado con PEG 6000. Se ejecutaron dos experimentos utilizando el cultivar de maíz P-7928. En el primero, las semillas desinfectadas se pusieron a germinar durante siete días en agua, PEG 6 000 15 % y PEG 6 000 15 % suplementado con diferentes concentraciones (1, 0,5 y 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$ ) de dos extractos etanólicos de espirulina (ESp1 y ESp2). Al final del experimento, se evaluaron el porcentaje final de germinación y algunos indicadores del crecimiento de las plántulas. En el segundo, se utilizó el extracto de espirulina de mejor comportamiento con las mismas concentraciones y se procedió de forma similar al primer experimento. Se siguió la dinámica de germinación cada 12 horas y se calcularon el porcentaje final de germinación (% G), la velocidad de germinación (VG), el tiempo medio de germinación (TMG) y la tasa de germinación (TG). Los resultados mostraron que el estrés osmótico impuesto retrasó la germinación, pero no afectó el porcentaje final y disminuyó, significativamente, la longitud del vástago. La adición de 1,0  $\mu\text{L mL}^{-1}$  del extracto etanólico de espirulina (ESp 2) revirtió totalmente el retraso de la germinación impuesto por el PEG 6 000 y estimuló, de forma general, el crecimiento de las plántulas.

**Palabras clave:** estrés osmótico, germinación, *Spirulina platensis*, *Zea mays*.

**ABSTRACT:** The water deficit delays the germination and initial growth of maize seedlings and the application of biostimulants can reverse this effect. The objective of this research was to determine the effects of two ethanolic extracts of spirulina (*Arthrospira platensis*) on the germination and initial growth of maize seedlings subjected to simulated water deficit with PEG 6 000. Two experiments were performed using cultivar P-7928. At the first one, disinfected seeds were placed to germinate, during seven days, in water, PEG 6 000 15 % and PEG 6 000 15 % supplemented with different concentrations (1, 0.5 and 0.1  $\mu\text{L mL}^{-1}$ ) of two ethanolic extracts of spirulina (SpE 1 y SpE 2). At the end of experiment, final percentage of germination and some indicators of seedling growth were evaluated. In the second one, the best performing spirulina extract was used with the same concentrations proceeded in a similar way to the first experiment. The germination dynamics was followed every 12 hours and final percentage of germination (% G), germination velocity (GV), mean germination time (MGT), germination rate (GR) were calculated. Results showed that the imposed osmotic stress delayed germination but did not affect the final percentage and decreased significantly the shoot length. The addition of an ethanolic extract of spirulina (SpE 2) at 1.0  $\mu\text{L mL}^{-1}$  concentration completely reversed the delay in germination imposed by PEG 6000 and generally stimulated the seedling growth.

**Key words:** osmotic stress, germination, *Spirulina platensis*, *Zea mays*.

\*Autor para correspondencia. [yanelisrg@inca.edu.cu](mailto:yanelisrg@inca.edu.cu)

Recibido: 08/10/2023

Aceptado: 11/06/2024

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflicto de intereses

**Contribución de los autores:** **Conceptualización-** Miriam de la C. Núñez Vázquez y Yanelis Reyes Guerrero. **Investigación-** Lisbel Martínez González, Geydi Pérez Domínguez, Donaldo Morales Guevara. **Metodología-** Lisbel Martínez González, Miriam de la C. Núñez Vázquez y Yanelis Reyes Guerrero. **Supervisión-** Miriam de la C. Núñez Vázquez y Yanelis Reyes Guerrero. **Escritura del borrador inicial, Escritura y edición final y Curación de datos-** Lisbel Martínez González, Miriam de la C. Núñez Vázquez y Yanelis Reyes Guerrero.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los tres cereales más importantes del mundo, junto con el trigo y el arroz. Actualmente, se produce en 125 países, aproximadamente, 201 millones de hectáreas (ha) cultivadas y su producción alcanza 1224,5 millones de toneladas (t), que significa un aumento de 6,4 % en comparación al año anterior. Los principales productores participan con 65.2 % de la producción mundial de maíz: Estados Unidos con 30.3 %, China 24.1 % y Brasil 10.9 %, respectivamente (1).

El maíz se cultiva en Cuba desde la época de los aborígenes y constituye un alimento básico en la nutrición humana, del ganado y las aves (2). En Cuba, existen 126 000 ha dedicadas a este cultivo, con un rendimiento promedio de 1,89 t ha<sup>-1</sup> (3).

Uno de los estadios clave en el desarrollo de un cultivo es el establecimiento exitoso de las plántulas; por tanto, la falta de humedad durante, o inmediatamente después de la siembra, afecta la germinación y el crecimiento inicial, reduciendo la densidad de plantas y el rendimiento final (4, 5). Este efecto es especialmente marcado en maíz, donde la rápida deshidratación de las plántulas está asociada con sistemas radicales poco desarrollados (6). En este cultivo se ha estimado que la sequía, durante la germinación, puede causar pérdidas en el número de plantas, lo que causa mermas en los rendimientos, comparables con la producida por la sequía durante la etapa de floración (7).

Respecto al efecto del déficit hídrico en el proceso de la germinación de las semillas de maíz, al comparar genotipos tolerantes y no tolerantes a la sequía, se encontró que la fase de la imbibición es la que se retrasa, debido a que se demora el proceso de ósmosis al aumentar el déficit hídrico, siendo más marcado este retraso en los genotipos no tolerantes (8). El primer proceso que se afecta por el déficit hídrico es el crecimiento, el cual se inicia con la germinación de las semillas; que comprende las fases de imbibición, metabolismo e inicio del crecimiento de las estructuras que se encuentran en el embrión (4).

En los estudios de laboratorio, el déficit hídrico en el suelo se puede simular mediante el uso de soluciones con potenciales hídricos definidos. Varios estudios se han realizado para evaluar el comportamiento de distintas especies bajo deficiencia hídrica simulada con polietilenglicol (PEG) (9-11). Este compuesto tiene la ventaja de que, además de aumentar el potencial osmótico de la solución, es inactivo metabólicamente.

Por otra parte, la espirulina (*Arthrospira platensis*) es un tipo de cianobacteria que posee gran interés por sus altos valores nutricionales (12, 13). Su utilización es muy amplia en la farmacéutica y la cosmética, aunque es poco explotada en la agricultura. Por su composición química rica en proteínas, ácidos grasos poliinsaturados esenciales y vitaminas, así como xantinas, ficobiliproteínas, carbohidratos, minerales, fitohormonas, antioxidantes y polisacáridos, es un complemento biológico excelente (12, 14).

Se ha estudiado el efecto de la aplicación de *Arthrospira platensis* en maíz donde incrementó la germinación y el crecimiento (15). También, en los últimos años, se ha investigado sus potencialidades para proteger a las plantas contra el estrés abiótico. Por ejemplo, el uso de extractos acuosos de *Spirulina* spp. mejoró la tolerancia del trigo a la salinidad, aumentando el contenido de proteínas, carbohidratos, fenoles totales y antioxidantes de las plántulas (16). Sin embargo, está poco estudiado el efecto de extractos de espirulina en plantas sometidas a estrés hídrico por defecto. Por esa razón, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de dos extractos de espirulina en la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de maíz cv. P-7928, sometidas a déficit hídrico simulado con PEG 6 000.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se ejecutaron en el Departamento de Fisiología y Bioquímica Vegetal, del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), ubicado en el municipio San José de las Lajas, provincia Mayabeque.

### Preparación de los extractos alcohólicos de espirulina

Los extractos alcohólicos de espirulina se prepararon como se describe a continuación: para el extracto número 1 (ESp1): se tomaron 10g del polvo de espirulina, proveniente de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Espirulina, de Jaruco, y se disuelve en 100 mL de etanol al 90 %. Este homogeneizado se agita durante 10 min cada 24 horas por 21 días, pasado este tiempo se filtra y se guarda a 4 °C. Para el extracto número 2 (ESp2) se siguió esta metodología, pero la disolución se realizó en 100 mL de etanol al 70 % por 10 días.

### Efecto de diferentes concentraciones de extractos alcohólicos de espirulina en la germinación de semillas de maíz cv. P-7928, en condiciones de déficit hídrico

Para la simulación del estrés hídrico se utilizaron soluciones de polietilenglicol (PEG-6000) (Sigma-Aldrich) al 15 % (-0,295 MPa) preparadas con agua destilada estéril. El experimento se repitió en dos ocasiones.

Se utilizaron semillas de maíz (*Zea mays* L.) cv. P-7928, las cuales se desinfectaron con NaClO 5 % durante 10 minutos. Después de lavadas tres veces con agua destilada estéril, se colocaron en placas Petri esterilizadas (15 semillas por placa y cinco placas por tratamiento), a las cuales se les adicionó 15 mL de cada una de las soluciones de ensayo (Tabla 1).

Las placas se colocaron en la oscuridad en cámara de crecimiento a 28-30 °C, durante siete días. Pasado este tiempo, se evaluó el porcentaje final de germinación, y se seleccionaron 25 plántulas por tratamiento, para evaluar la longitud del vástago y la radícula y la masa seca de las plántulas.

**Tabla 1.** Tratamientos utilizados en el experimento

Nomenclatura	Descripción
1 Control	Agua destilada estéril
2 PEG	Solución de PEG 6000 15 %
3 PEG +1 ESp-1	Solución de PEG 6000 15 % + 1 $\mu\text{L mL}^{-1}$ ESp-1
4 PEG+ 0,5 ESp-1	Solución de PEG 6000 15 % + 0,5 $\mu\text{L mL}^{-1}$ ESp-1
5 PEG+ 0,1 ESp-1	Solución de PEG 6000 15 % + 0,1 $\mu\text{L mL}^{-1}$ ESp-1
6 PEG +1 ESp-2	Solución de PEG 6000 15 % + 1 $\mu\text{L mL}^{-1}$ ESp-2
7 PEG+ 0,5 ESp-2	Solución de PEG 6000 15 % + 0,5 $\mu\text{L mL}^{-1}$ ESp-2
8 PEG+ 0,1 ESp-2	Solución de PEG 6000 15 % + 0,1 $\mu\text{L mL}^{-1}$ ESp-2

En el segundo experimento, se utilizó el extracto etanólico de mejor respuesta con las tres concentraciones y se procedió, de manera similar al primer experimento, excepto que se utilizó la solución nutritiva de Hoagland para la preparación de las soluciones de ensayo. En este caso, se siguió la dinámica de germinación mediante el conteo de las semillas germinadas cada 12 h (12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144 horas) por seis días y se expresó en porcentaje. Además, se calculó el comportamiento de diferentes indicadores de la germinación, según la metodología propuesta por la International Seed Testing Association (ISTA):

- porcentaje final de germinación (G %)

$$G \% = \left(\frac{G_f}{N}\right)100$$

donde:

$G_f$  es el número total de semillas germinadas al final de la prueba y  $N$  es el número total de semillas utilizadas en la prueba.

- velocidad de germinación (VG)

$$VG = \sum\left(\frac{N_i}{T_i}\right)$$

donde:

$N_i$  es el número de semillas germinadas en el día  $t$  y  $T_i$  es el número de días desde el comienzo de la prueba de germinación.

- tiempo medio de germinación (TMG)

$$TMG = \frac{\sum(T_i \times n_i)}{\sum n_i}$$

donde:

$n_i$  es el número de semillas recién germinadas en el tiempo  $T_i$  y  $T$  es el número de días desde el comienzo de la prueba de germinación.

- tasa de germinación (TG)

$$TG = \frac{\sum N_i}{\sum T_i} N_i$$

donde:

$N_i$  es el número de semillas recién germinadas en el momento  $T_i$ .

## Procesamiento estadístico

Los datos obtenidos, en ambos experimentos, se procesaron mediante el cálculo de las medias, la desviación estándar y los intervalos de confianza a  $\alpha=0,05$ .

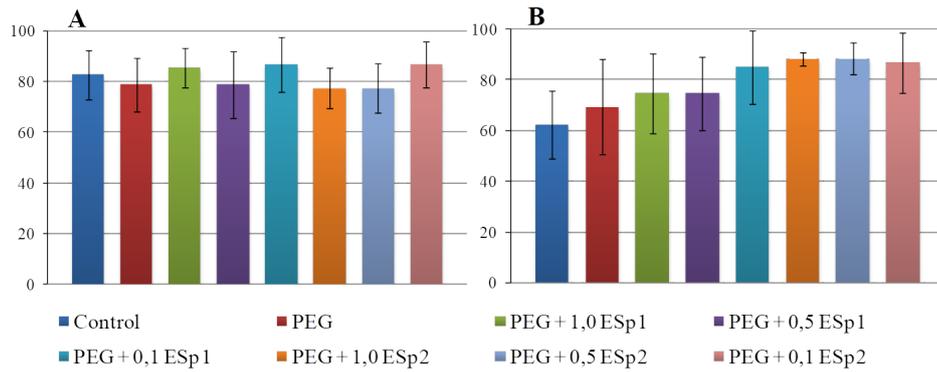
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del porcentaje final de germinación de semillas de maíz cv. P7928 sometidas a déficit hídrico simulado con PEG se muestran en la [Figura 1](#). Como se puede observar, no hubo diferencias significativas en este indicador, ni con el PEG, ni con la aplicación de las diferentes concentraciones de los extractos evaluados, en ninguna de las dos repeticiones del experimento.

Con anterioridad, se había encontrado que el porcentaje final de germinación de semillas de maíz no se afectó hasta los -0,9 MPa, e incluso a -0,3 MPa se obtuvo el mayor valor de este indicador (17). Los resultados del presente trabajo confirmaron lo anterior, ya que el potencial osmótico utilizado fue de -0,295 MPa. Sin embargo, otros autores encontraron una disminución del porcentaje final de germinación en semillas de varias accesiones de maíz crecidas en soluciones de PEG 10 %, siendo más significativo este decremento a las concentraciones de 15 % y 20 %, aunque el efecto varió con los diferentes cultivares (5).

En la [Tabla 2](#) se muestran los resultados de los indicadores de crecimiento de las plántulas de maíz en ambas repeticiones, en esta se puede observar que el déficit hídrico impuesto solamente redujo, significativamente, la longitud del vástago. Sin embargo, en la primera repetición sí hubo una reducción significativa de la longitud de las raíces, efecto que no se observó en la segunda. La masa seca no se vio afectada en ninguna de las dos repeticiones realizadas.

La adición de diferentes concentraciones de los dos extractos de espirulina demostró que, en la primera repetición, solamente ESp2 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$  fue capaz de revertir parcial y totalmente las reducciones inducidas por el PEG en la longitud del vástago y de las raíces, respectivamente. No obstante, se observó que la concentración 0,5  $\mu\text{L mL}^{-1}$ , de ambos extractos, fue capaz de revertir parcialmente la reducción inducida por el PEG en la longitud de las raíces; mientras que el extracto ESp1 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$  disminuyó significativamente la longitud de las plantas.



A. Primera repetición. B. Segunda repetición (Las barras de error representan los intervalos de confianza a  $\alpha=0,05$ )

**Figura 1.** Influencia de diferentes concentraciones de dos extractos etanólicos de espirulina en el porcentaje final de germinación de semillas de maíz cv. P-7928 sometidas a déficit hídrico simulado con PEG-6000 (15 %)

**Tabla 2.** Influencia de diferentes concentraciones de dos extractos alcohólicos de espirulina en indicadores del crecimiento de plántulas de maíz, cv. P-7928 sometidas a déficit hídrico simulado con PEG 6 000 (15 %)

Tratamientos	Longitud del vástago (cm)		Longitud de raíces (cm)		Masa seca de las plántulas (mg)	
	Primera repetición	Segunda repetición	Primera repetición	Segunda repetición	Primera repetición	Segunda repetición
Control	12,0 ± 0,4	9,7 ± 0,4	15,8 ± 0,7	7,8 ± 0,5	257,8 ± 8,6	262,1 ± 2,6
PEG	4,8 ± 0,2	2,0 ± 0,2	12,5 ± 0,5	8,4 ± 0,5	252,8 ± 5,6	256,3 ± 3,1
PEG + 1,0 ESp1	<b>3,6 ± 0,2*</b>	<b>4,8 ± 0,3*</b>	12,1 ± 0,4	<b>10,8 ± 0,7*</b>	<b>270,0 ± 4,2*</b>	<b>275,8 ± 3,0*</b>
PEG + 0,5 ESp1	<b>3,7 ± 0,1*</b>	<b>4,2 ± 0,2*</b>	<b>14,0 ± 0,6*</b>	<b>9,7 ± 0,5*</b>	256,5 ± 6,0	<b>272,8 ± 5,2*</b>
PEG + 0,1 ESp1	<b>3,7 ± 0,2*</b>	<b>4,6 ± 0,2*</b>	<b>9,9 ± 0,4*</b>	<b>10,7 ± 0,5*</b>	<b>301,1 ± 7,8*</b>	<b>310,3 ± 1,3*</b>
PEG + 1,0 ESp2	4,9 ± 0,1	<b>4,4 ± 0,1*</b>	12,1 ± 0,6	<b>13,5 ± 0,6*</b>	252,6 ± 8,9	<b>278,9 ± 1,2*</b>
PEG + 0,5 ESp2	4,7 ± 0,1	<b>4,4 ± 3,1*</b>	<b>13,9 ± 0,6*</b>	<b>13,5 ± 0,6*</b>	<b>279,3 ± 6,0*</b>	<b>284,8 ± 3,1*</b>
PEG + 0,1 ESp2	<b>5,2 ± 0,1*</b>	<b>3,1 ± 0,2*</b>	<b>15,5 ± 0,6*</b>	8,3 ± 0,6	239,0 ± 8,3	240,5 ± 6,2

(Medias ± intervalos de confianza). \* Representa los tratamientos que difieren significativamente del tratamiento con PEG según intervalo de confianza para  $\alpha=0,05$

En la segunda repetición, todas las concentraciones ensayadas de ambos extractos revirtieron, parcialmente, la reducción en la longitud del vástago inducido por el PEG y, además, estimularon significativamente la longitud de las raíces, en comparación con las plantas del tratamiento control, excepto el tratamiento ESp2 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$ .

La masa seca, que no se vio afectada por el PEG en ninguno de los dos ensayos realizados, se incrementó, significativamente, en la primera repetición con ESp1 1,0 y 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$ , sin embargo, estos tratamientos disminuyeron, significativamente, la longitud del vástago y la longitud de las raíces, en el caso de la concentración menor, en comparación con el tratamiento control con PEG.

La respuesta en la segunda repetición fue diferente, ya que todas las concentraciones de ambos extractos fueron capaces de estimular, significativamente, la longitud de la planta, así como la masa seca, excepto el tratamiento ESp2 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$ , que solamente estimuló la longitud del vástago.

Es interesante destacar que, la mejor respuesta se obtuvo con el extracto de espirulina ESp2, en el cual se utilizó como solvente etanol 70 % y la maceración tuvo una duración de 10 días, lo cual favorecería su producción a mayor escala, pues se obtendría en menos tiempo y con menor cantidad de etanol.

El efecto observado con el ESp1, probablemente, se deba a una mayor concentración de compuestos activos extraídos, pues al estar más tiempo en contacto con el solvente a mayor concentración (90 %), pudiera tener mayor contenido de compuestos con acción hormonal. Con respecto a este tema, varios autores han planteado que los extractos de algas a bajas concentraciones (dilución 1:1000 o más) estimulan respuestas positivas en las plantas tratadas, mientras que concentraciones relativamente altas producen efectos inhibitorios (18, 19). Por ejemplo, algunos autores demostraron que, en plantas de trigo, la masa y la longitud se incrementaron con las dosis más bajas de un extracto de *Chorella*, mientras que la dosis más alta tuvo un efecto inhibitorio. Igualmente, la forma de aplicación influyó en la respuesta, puesto que el tratamiento a las semillas de *Lepidium sativum* por 24 horas inhibió la longitud de la parte aérea y las raíces, mientras que la adición al medio de germinación estimuló estos indicadores. Sin embargo, en trigo, el tratamiento a la semilla reflejó los mejores resultados (20).

Recientemente, se ha informado la utilización de extractos de *Arthrospira platensis* para mitigar los efectos adversos que el estrés hídrico y osmótico provocan en las plantas. De esta forma, se demostró que el tratamiento de semillas de trigo de un cultivar tolerante y uno susceptible

con un extracto acuoso de espirulina (10 %) fue capaz de mejorar significativamente el vigor de las plantas, la tasa fotosintética, el contenido de carbohidratos y los componentes del rendimiento de ambos cultivares en condiciones de sequía (21).

Previamente, en el cultivo de algodón se había informado que la aplicación de un extracto de espirulina estimuló la tolerancia de las plantas al estrés hídrico en suelos afectados por la sal, a través del incremento en la acumulación de carbohidratos no estructurales que mejoraron el almacenamiento de energía y la retención de agua de las hojas. Esto se debe al alto contenido de  $K^+$  presente en el extracto, lo cual es necesario para mantener el equilibrio de la fotosíntesis bajo estrés salino e hídrico (22).

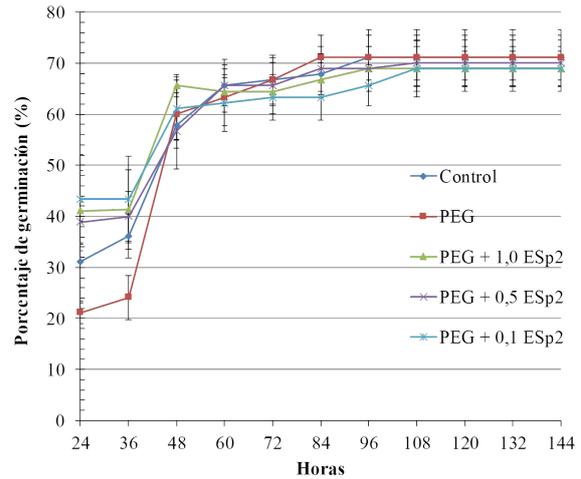
También se ha demostrado la efectividad del uso de extractos de espirulina para mejorar el comportamiento de plantas de *Vicia faba* sometidas a  $NaCl$   $135\text{ mmol L}^{-1}$  (23). De igual manera, la aplicación de extractos acuosos de *Arthrospira platensis* a plantas de trigo irrigadas con agua de mar incrementó la capacidad antioxidante de las mismas, mediante el aumento de metabolitos y enzimas antioxidantes (16). Por otra parte, la aplicación de biocarbón al suelo y la aspersión foliar con un extracto acuoso de espirulina estimuló el crecimiento de plantas de albahaca crecidas en condiciones salinas (24).

Los resultados obtenidos en el primer experimento propiciaron que se escogiera el extracto ESp 2 para estudiar la dinámica de germinación de las semillas de maíz ante el déficit hídrico simulado por PEG.

En la Figura 2 se muestra la dinámica de germinación de las semillas de maíz cv. P-7928 sometidas a déficit hídrico simulado con PEG-6000. Como se puede observar, el estrés hídrico provocó un retraso en la germinación de las semillas, ya que el tratamiento con PEG difirió, significativamente, del resto de los tratamientos a las 24 y 36 h. Después de las 48 h, no se observaron diferencias significativas en ninguno de los tratamientos evaluados. Las tres concentraciones del ESp2 ensayadas lograron revertir el impacto del déficit hídrico en el retraso de la germinación.

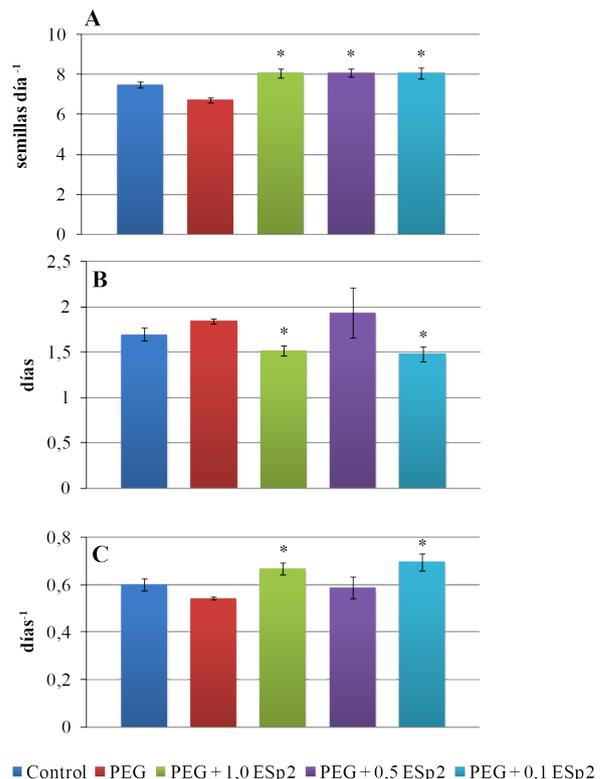
Resultados similares fueron informados anteriormente, donde la presión osmótica de  $-0,3\text{ MPa}$  retrasó la germinación de semillas de maíz hasta las 48 h. Sin embargo, a partir de  $-0,6\text{ MPa}$  se afectó de manera irreversible el porcentaje de germinación (25).

La Figura 3 muestra los resultados de varios índices relacionados con la germinación. El estrés hídrico inducido con PEG disminuyó significativamente la velocidad de germinación (VG) y la tasa de germinación (TG), con un aumento del tiempo medio de germinación (TMG). Resultados similares se encontraron en este mismo cultivo con  $-0,3\text{MPa}$  de presión osmótica inducida con PEG (25). Igualmente, en líneas híbridas de maíz el aumento de la presión osmótica del medio con PEG disminuyó el porcentaje final y la velocidad de germinación (26).



Las barras de error representan los intervalos de confianza a  $\alpha=0,05$  y los asteriscos los tratamientos que difieren significativamente de su respectivo control

**Figura 2.** Influencia de diferentes concentraciones de un extracto alcohólico de espirulina en la dinámica de germinación de semillas de maíz cv. P-7928 sometidas a déficit hídrico simulado con PEG-6000 (15 %)



A. Velocidad de germinación (VG). B. Tiempo medio de germinación (TMG). C. Tasa de germinación (TG). Las barras de error representan los intervalos de confianza a  $\alpha=0,05$  y los asteriscos los tratamientos que difieren significativamente del tratamiento con PEG

**Figura 3.** Influencia de un extracto alcohólico de Espirulina en indicadores de la germinación de semillas de maíz cv. P-7928, sometidas a déficit hídrico simulado con PEG-6000 (15 %)

Los efectos negativos están relacionados con el estrés osmótico inducido por el polietilenglicol que crea una reducción del potencial de soluto del medio y, por tanto, del potencial hídrico. La disminución del potencial hídrico afecta el proceso de imbibición y la disponibilidad de agua para las semillas, lo que es fundamental para la hidratación de las enzimas y los sustratos que participan en las diversas reacciones bioquímicas que inician el proceso de germinación (27).

En cuanto al efecto del extracto de *Espirulina* en los índices de germinación, las concentraciones de 1 y 0,1  $\mu\text{L mL}^{-1}$  aumentaron la velocidad y la tasa de germinación, así como disminuyeron el TMG.

En este mismo cultivo, en condiciones normales, la aplicación de *Chorella* sp. incrementó el porcentaje de germinación y disminuyó el TMG, tanto en las semillas embebidas en el extracto como con la aplicación del mismo al sustrato (28).

Las microalgas y sus extractos son estimulantes naturales que aceleran la germinación de las semillas y aumentan el vigor de las plántulas, cuando se emplean dosis relativamente bajas (13). Varios estudios describen sus efectos beneficiosos en el porcentaje, índice y tiempo medio de germinación, así como en la longitud de la plúmula y de la radícula. Estos resultados se atribuyen a la activación de rutas enzimáticas clave para la fisiología de la germinación. Por ejemplo, la  $\alpha$ -amilasa es una enzima sintetizada en la capa de aleurona y su expresión génica está regulada por las giberelinas. Esta enzima es responsable de la movilización de sustancias de reserva, como el almidón, desde el endospermo, para apoyar el crecimiento y la diferenciación del embrión (29). En apoyo a esta hipótesis, recientemente, se demostró que el tratamiento de semillas de frijol mungo durante tres horas con un extracto de *Espirulina*, incrementó el ácido giberélico y la actividad de la enzima  $\alpha$ -amilasa (30). Igualmente, varios autores han informado la disminución de los contenidos de proteínas y carbohidratos en semillas de maní, frijol y maíz, lo que ha correlacionado con incrementos en las actividades de las enzimas proteasa y  $\alpha$ - y  $\beta$ -amilasa (13, 31, 32).

Este efecto positivo del extracto de *Espirulina* en la germinación de las semillas de maíz sometidas a PEG-6000, pudiera contribuir a incrementar su productividad en condiciones de déficit hídrico. Esta hipótesis será investigada y comprobada en trabajos futuros.

## CONCLUSIONES

El déficit hídrico simulado con PEG 6 000 (15 %) retrasó la germinación de las semillas de maíz cv. P-7928 las primeras 36 h y redujo la longitud del vástago de las plántulas, aunque no afectó el porcentaje final de germinación. La adición de extractos etanólicos de *espirulina*, de forma general, revirtió parcialmente la disminución en la longitud del vástago y estimularon la longitud de las raíces y la masa seca de las plántulas;

destacándose el extracto obtenido por maceración con EtOH 70 %, durante 10 días (ESp 2), a la concentración de 1  $\mu\text{L mL}^{-1}$  el que, además, revirtió totalmente el retraso en la germinación impuesto por el PEG.

## BIBLIOGRAFIA

1. USDA. Maíz y soya: proyecciones para la campaña 2023/2024 USDA- julio 2023 Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) 2023. Available from: [https://www.3tres3.com/latam/ultima-hora/maiz-y-soya-proyecciones-para-la-campana-2023-2024-usda-%E2%80%93julio-2023\\_15557/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mundial%20de%20ma%C3%ADz,\(1150%2C7%20Mt.](https://www.3tres3.com/latam/ultima-hora/maiz-y-soya-proyecciones-para-la-campana-2023-2024-usda-%E2%80%93julio-2023_15557/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mundial%20de%20ma%C3%ADz,(1150%2C7%20Mt.)
2. Ferro Valdés EM, Gigato Toledo A, Chirino González E, Ravelo Pimentel K, González Jiménez OL, Villareal Domínguez J. Determinación de las razas de maíz existentes en el municipio Viñales, Pinar del Río, Cuba, a través de descriptores morfoagronómicos. Revista ECOVIDA 2019; 9(1): 47-61. Available from: <http://revistaecovida.upr.edu.cu/index.php/ecovida/article/view/149/html>.
3. ONEI. Oficina Nacional de Estadística e Información. Anuario Estadístico de Cuba 2021 : Capítulo 9 Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca. 2022: 16-25.
4. Queiroz MS, Oliveira CES, Steiner F, Zuffo AM, Zoz T, Vendruscolo EP, et al. Drought Stresses on Seed Germination and Early Growth of Maize and Sorghum. Journal of Agricultural Science. 2019; 11(2). <https://doi.org/10.5539/jas.v11n2p310>.
5. Badr A, El-Shazly HH, Tarawneh RA, Börner A. Screening for Drought Tolerance in Maize (*Zea mays* L.) Germplasm Using Germination and Seedling Traits under Simulated Drought Conditions. Plants. 2020; 9: 565. <https://doi.org/10.3390/plants9050565>.
6. López Fleites R, Gil Díaz V. Generalidades del Cultivo del Maíz: Editorial Feijóo; 2011. 64 p.
7. Mi N, Cai F, Zhang YS, Ji RP, Zhang SJ, Wang Y. Differential responses of maize yield to drought at vegetative and reproductive stages. Plant Soil Environ. 2018; 64: 260-7. <https://doi.org/10.17221/141/2018-PSE>.
8. Espinosa-Paz N, Martínez-Sánchez J, Ariza-Flores R, Cadena-Iñiguez P, Hernández-Maldonado M, Ramírez-Córdova AL. Germinación de semillas de variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) bajo déficit hídrico. Agroproductividad. 2017; 10(9): 41-7. Available from: <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/download/189/150&ved=2ahUKEwit0K6p3LaGAXWd8MkDHbRXCvkQFnoECBQQAQ&usq=AOvVaw0UH7i7B6R225la3UgNaKt>.
9. Radic V, Balalic I, Cvejic S, Jovic S, Marjanovic-Jeromela A, Miladinovic D. Drought Effect on maize seedling development. Ratar Povrt. 2018; 55(3): 135-8. <https://doi.org/10.5937/ratpov55-19648>.
10. Mendoza-Rodríguez MF, Veitía N, Martirena-Ramírez A, Rojas LE, Torres D, Hernández S, et al. Respuesta diferencial de tres cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. al estrés hídrico in vitro inducido por PEG-6000.

- Biología Vegetal. 2020; 20(4): 351 - 9. Available from: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/download/684/pdf&ved=2ahUKEWiL6rXY3raGAxUD48kDHSkrDKMQFnoECBcQAQ&usq=AOvVaw1FZdhFqzsgA4QHdcoAsQ24>.
11. Basal O, Szabó A, Veres S. Physiology of soybean as affected by PEG-induced drought stress. *Current Plant Biology*. 2020; 22: 100135. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100135>.
  12. Bello AS, Saadaoui I, Ben-Hamadou R. "Beyond the Source of Bioenergy": Microalgae in Modern Agriculture as a Biostimulant, Biofertilizer, and Anti-Abiotic Stress. *Agronomy*. 2021; 11(1610). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081610>.
  13. Sivalingam KM. Isolation, identification and evaluation of *Espirulina platensis* for its effect on seed germination of groundnut (*Arachis hypogaea* L.), Wolaita Sodo, Southern Ethiopia. *Journal of Algal Biomass Utilization*. 2020; 11(2): 34-42. Available from: <https://storage.unitedwebnetwork.com/files/521/4ca5cd59fe556a59877dcb110401ee19.pdf>.
  14. Rahim A, Çakir C, Ozturk M, Şahin B, Soulaïmani A, Sibaoueih M, et al. Chemical characterization and nutritional value of *Espirulina platensis* cultivated in natural conditions of Chichaoua region (Morocco). *South African Journal of Botany*. 2021; 141: 235-42. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.006>.
  15. Dineshkumar R, Subramanian J, Gopalsamy J, Jayasingam P, Arumugam A, Kannadasan S, et al. The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L.). *Waste and Biomass Valorization*. 2019; 10(5): 1101-10. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>.
  16. Hamouda R, Shehawy M, Mohy El.Din S, Albalwe F, Albalawi H, Hussein M. Protective role of *Espirulina platensis* liquid extract against salinity stress effects on *Triticum aestivum* L. *Green Processing and Synthesis*. 2022; 11: 648-58. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0065>.
  17. Zahedifar M, Zohrabi S. Germination and seedling characteristics of drought-stressed corn seed as influenced by seed priming with potassium nаноchelate and sulfate fertilizers. *Acta agriculturae Slovenica*. 2016; 107(1): 113-28. <https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.1.12>.
  18. Hernández-Herrera RM, Santacruz-Ruvalcaba F, Zandúo-Hernández J, Hernández Carmona G. Activity of seaweed extracts and polysaccharide-enriched extracts from *Ulva lactuca* and *Padina gymnospora* as growth promoters of tomato and mung bean plants. *Journal of Applied Phycology* 2016; 28: 2549-60. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0781-4>.
  19. Espinosa-Antón AA, Hernández-Herrera RM, González González M. Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas. *Biología Vegetal*. 2020; 20(4): 257-82. Available from: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/677>.
  20. Michalak I, Górka B, Wiczorek PP, Rój E, Lipok J, Łęska B, et al. Supercritical fluid extraction of algae enhances levels of biologically active compounds promoting plant growth. *European Journal of Phycology*. 2016; 51(3): 243-52. <https://doi.org/10.1080/09670262.2015.1134813>.
  21. Elnajar M, Aldesuquy H, Abdelmoteleb M, Eitanahy E. Mitigating drought stress in wheat plants (*Triticum Aestivum* L.) through grain priming in aqueous extract of *Espirulina platensis*. *BMC Plant Biology*. 2024; 24: 233. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04905-z>.
  22. Alharbi K, Hafez EM, Omara AE-D, Osman HS. Mitigating Osmotic Stress and Enhancing Developmental Productivity Processes in Cotton through Integrative Use of Vermicompost and Cyanobacteria. *Plants*. 2023; 12(9): 1872. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/9/1872>.
  23. Selem EE-S. Physiological effects of *Espirulina platensis* in salt stressed *Vicia faba* L. plants. *Egypt J Bot*. 2019; 59(1): 185 - 94. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2018.3836.1178>.
  24. Fekri M, Gomah H, Eissa M. Growth Improvement of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) Irrigated with Saline Water Using Biochar and *Espirulina* Algae Extract. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*. 2024; 55: 260-75. <https://doi.org/10.21608/AJAS.2024.260394.1324>.
  25. Wu L, Zhang X, Ashraf U, Zhaowen M, Suo H, Li G. Dynamics of seed germination, seedlings growth and physiological responses of sweet corn under PEG-induced water stress. *Pak J Bot*. 2017; 49(2): 639-46. Available from: [https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/49\(2\)/33.pdf](https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/49(2)/33.pdf).
  26. Magar MM, Parajuli A, Sah BP, Shrestha J, Sakh BM, Koirala KB, et al. Effect of PEG Induced Drought Stress on Germination and Seedling Traits of Maize (*Zea mays* L.) Lines. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*. 2019; 6(2): 196-205. <https://doi.org/10.30910/turkjans.432957>.
  27. Fathi A, Tari DB. Effect of drought stress and its mechanism in plants. *Int J Life Sci (Kathmandu)*. 2016; 10(1): 1-6. <http://dx.doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14509>.
  28. Grzesik M, Romanowska-Duda Z. Improvements in Germination, Growth, and Metabolic Activity of Corn Seedlings by Grain Conditioning and Root Application with Cyanobacteria and Microalgae. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2014; 23(4): 1147-53. Available from: <https://www.pjoes.com/pdf-89291-23149%3Ffileaname%3DImprovements%2520in.pdf>.
  29. Oliveira GE, Garcia Von Pinho R, de Andrade T, de Resende Von Pinho ÉV, dos Santos CD, Delly Veiga A. Physiological quality and amylase enzyme expression in maize seeds. *Ciênc agrotec, Lavras*. 2013; 37(1): 40-8. Available from: <https://www.scielo.br/lj/cagro/a/JJpGvzwnJkQ9Zx5JLQRN9xR/%3Flang%3Den>.
  30. Quang Thinh N. Influences of seed priming with *Espirulina platensis* extract on seed quality properties in black gram (*Vigna mungo* L.). *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*. 2021; 63(1): 36-41. [http://dx.doi.org/10.31276/VJSTE.63\(1\).36-41](http://dx.doi.org/10.31276/VJSTE.63(1).36-41).
  31. Krishna Moorthy S, Kassahun A, Dereje E, Tomas A. Isolation and Identification of Blue Green Algae and Its Plant Growth Promoting Efficacy using Red Kidney Beans

- (*Phaseolus vulgaris* L.) by Seed Germination Experiment. *Journal of Algal Biomass Utilization*. 2019; 10(2): 52-9. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/338460657\\_ISOLATION\\_AND\\_IDENTIFICATION\\_OF\\_CYANOBACTERIA\\_AND\\_ITS\\_IMPACT\\_ON\\_SEED\\_GERMINATION\\_POTENTIAL\\_OF\\_MAIZE\\_Zea\\_mays\\_L\\_USING\\_SEED\\_GERMINATION\\_EXPERIMENT](https://www.researchgate.net/publication/338460657_ISOLATION_AND_IDENTIFICATION_OF_CYANOBACTERIA_AND_ITS_IMPACT_ON_SEED_GERMINATION_POTENTIAL_OF_MAIZE_Zea_mays_L_USING_SEED_GERMINATION_EXPERIMENT).
32. Sivalingam K, Delfe K. Isolation and identification of cyanobacteria and its impact on seed germination potential of maize (*Zea mays* L.) using seed germination experiment. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2019; 04: 65-72. <http://dx.doi.org/10.33564/IJEAST.2019.v04i07.010>.