

Artículo original

Efecto del polietilenglicol-6000 en la germinación y crecimiento temprano de *Phaseolus vulgaris* L. cv. ‘Delicias’

Liliddrey Torres-Hernández¹ 

Maryla Sosa-del Castillo² 

Yunel Pérez-Hernández² 

Lilibeth Rodríguez-Izquierdo³ 

Yusleidys Cortés-Martínez³ 

Ramón Liriano-González³ 

¹Grupo Azucarero AZCUBA Matanzas, carretera a Varadero, Matanzas, Cuba

²Centro de Estudios Biotecnológicos. Universidad de Matanzas, carretera a Varadero km 3½, Matanzas, Cuba

³Departamento Agronomía. Universidad de Matanzas, carretera a Varadero km 3½, Matanzas, Cuba

* Autor para correspondencia: yunel.perez@umcc.cu

RESUMEN

El estrés hídrico afecta numerosos procesos biológicos y el rendimiento de los cultivos. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del estrés hídrico inducido por polietilenglicol (PEG) en la germinación y crecimiento temprano de semillas de *Phaseolus vulgaris* cv. ‘Delicias 364’. Las semillas de frijol se sembraron en placas Petri con diferentes soluciones de PEG-6000 (0-18 %) durante ocho días. Se evaluaron los indicadores: porcentaje de germinación, vigor, longitud de raíz, hipocótilo y epicótilo, relación raíz/parte aérea, contenidos de carbohidratos solubles, azúcares reductores, proteínas y fenoles solubles. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con cuatro repeticiones. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza simple y se realizó la prueba de Duncan para la comparación entre las medias. El polietilenglicol redujo el porcentaje de germinación, la longitud de la raíz, el hipocótilo, el epicótilo y la formación de estructuras foliares. El contenido de azúcares reductores en las raíces fue superior al control en 3, 6 y 9 % de PEG. De manera similar, la concentración de proteínas solubles en las raíces fue superior al control en 3 y 6 % de PEG, lo que sugiere la presencia de mecanismos de ajuste osmótico en esta variedad. La relación raíz/parte aérea aumentó en presencia de PEG. La concentración de polifenoles solubles en la parte aérea fue similar entre el control y los tratamientos 3, 6 y 9 % de PEG, lo que puede contribuir a reducir el daño oxidativo que se genera en condiciones de estrés hídrico.

Palabras clave: bioquímica, frijol, estrés hídrico

Recibido: 19/10/2020

Aceptado: 29/09/2021

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye uno de los cultivos más importantes para el consumo humano. Representa una de las fuentes principales de proteína y otros nutrientes como vitaminas, minerales, ácidos grasos insaturados y fibra dietética en numerosos países del mundo, especialmente en los subdesarrollados de Latinoamérica y África ⁽¹⁾. Por su importancia, en Cuba se dedican anualmente cuantiosos recursos a la producción de este grano; sin embargo, en muchas regiones se cultiva esta planta en condiciones de secano, lo que reduce su producción de manera significativa.

A nivel mundial el déficit hídrico disminuye en más del 60 % el rendimiento del frijol con valores promedios bajos de aproximadamente 0,9 t ha⁻¹ ⁽²⁾. Esta situación se complejiza debido al efecto del cambio climático sobre los patrones de precipitación, que afecta la disponibilidad de agua en los sistemas agrícolas; así como la incidencia de eventos intensos como tormentas que destruyen los cultivos y ponen en riesgo la seguridad alimentaria de numerosas regiones del planeta ⁽³⁾.

La sequía incide negativamente en varios procesos biológicos vitales de las plantas y en las distintas etapas de su ciclo de vida, especialmente durante la germinación donde son más vulnerables y se define el establecimiento, posterior desarrollo y rendimiento de las mismas. Este estrés abiótico afecta diferentes indicadores morfológicos y fisiológicos como: el porcentaje de germinación ⁽⁴⁾, la longitud de los órganos vegetativos, la masa seca y fresca, el vigor ⁽⁵⁾, el contenido de clorofilas y la actividad fotosintética ⁽⁶⁾, entre otros. Esto influye negativamente en otros indicadores reproductivos como el número de flores, y el rendimiento y sus componentes ⁽⁷⁾.

Las plantas poseen diferentes mecanismos para enfrentar las consecuencias del déficit hídrico, los cuales incluyen cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos como: un incremento de la conductancia estomática ⁽⁸⁾; la producción de compuestos osmóticamente activos como aminoácidos y azúcares, que posibilitan un ajuste del potencial osmótico de los tejidos ⁽⁹⁾ y un aumento de la defensa antioxidante ⁽¹⁰⁾.

El estudio de estos mecanismos es básico para comprender el sistema de defensa antiestrés de las plantas y determinar la capacidad de tolerancia de las mismas, lo cual es esencial en los programas de mejora vegetal ⁽⁹⁾. *Phaseolus vulgaris* L. posee una amplia variación con relación a la tolerancia a la sequía entre los cultivares, por lo que se realizan estudios para la identificación de genotipos tolerantes en diferentes estadios de desarrollo. Uno de los métodos más utilizados para estimar la tolerancia de las plantas al estrés hídrico, consiste en determinar la capacidad de las semillas de germinar y emerger en condiciones de sequía simulada por el polímero polietilenglicol, ya que este limita la absorción de agua y puede retardar y/o afectar los diferentes procesos fisiológicos ^(4,6). Este compuesto se caracteriza por ser altamente hidrofílico, inerte, no iónico y no tiene efectos tóxicos sobre los organismos vivos ^(11,12). El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del estrés hídrico inducido por polietilenglicol (PEG) en la germinación y crecimiento temprano de semillas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Delicias 364'.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se utilizaron semillas certificadas de frijol del cultivar ‘Delicias 364’ suministradas por la Empresa Provincial de Semillas del municipio Jovellanos, provincia de Matanzas.

Prueba de germinación

La prueba de germinación se realizó en placas Petri de 9 cm de diámetro. Las semillas (10 por placa Petri) se colocaron sobre papel de filtro humedecido con diferentes concentraciones (3, 6, 9, 12, 15 y 18 %) de polietilenglicol-6000 (PEG-6000) y un tratamiento control, que no se le aplicó el compuesto osmóticamente activo. Se utilizaron cuatro placas Petri por tratamiento (concentraciones de PEG). El agente estresante (PEG) se aplicó en una proporción de tres veces la masa del sustrato seco. El proceso de germinación se evaluó diariamente durante siete días y los resultados se expresaron en porcentaje de plántulas normales. Las placas Petri se colocaron en un cuarto de crecimiento a una temperatura de $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, con un fotoperíodo de 16 h ($35 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Valor de germinación

Se evaluó diariamente la cantidad de semillas germinadas y no germinadas durante los siete días del ensayo de germinación. Con los datos obtenidos se calculó el valor de la germinación (VG) mediante la fórmula de Djavanshir y Pourbeik ⁽¹³⁾:

$$VG = \left(\sum_{i=1}^n V_{edi} \right) \left(\frac{E_f}{10N} \right)$$

donde:

Ved = velocidad de emergencia diaria, calculada como el porcentaje de la emergencia acumulada entre el número de días desde el inicio de la prueba.

N = frecuencia o número de Ved que se calculó durante la prueba.

Ef = porcentaje de la emergencia de las plántulas al final de los siete días de la prueba.

Emergencia pico

Se determinó mediante porcentaje máximo de emergencia en un mismo día (EP) ⁽¹⁴⁾.

Relación raíz/parte aérea

Se determinó mediante la razón entre la longitud de la raíz (cm) y la longitud de la parte aérea (cm).

Indicadores morfológicos

Se evaluaron los indicadores siguientes: longitud de raíz, hipocótilo y epicótilo y presencia (porcentaje) de hojas verdaderas. Los datos de longitud se obtuvieron con el uso de un papel milimetrado y se expresaron en centímetro.

Indicadores bioquímicos

La extracción y cuantificación de proteínas, carbohidratos solubles totales y azúcares reductores se realizó en las raíces y en la parte aérea de las plántulas al final del ensayo de germinación. El material vegetal se maceró en frío con solución tampón de fosfato de sodio 50 mmol L⁻¹, pH 7,0 y en en una relación de 25 %:75 %. El homogenizado se centrifugó a 10 000 rpm y el sobrenadante se colectó y conservó a -20 °C hasta el momento de las determinaciones.

Contenido de proteínas solubles totales

El contenido proteico se determinó colorimétricamente mediante el método descrito por Lowry ⁽¹⁵⁾, con el uso de albúmina de suero bovino como patrón. Los valores de absorbancia se obtuvieron a 750 nm y las concentraciones (mg mL⁻¹) se determinaron mediante la curva patrón.

Contenido de carbohidratos solubles totales

El contenido de carbohidratos en las muestras se determinó colorimétricamente mediante el método del fenol-sulfúrico ⁽¹⁶⁾. Se utilizó la D-glucosa como azúcar patrón y la absorbancia se determinó a 490 nm. Las concentraciones se determinaron a partir de la curva patrón y se expresaron en mg mL⁻¹.

Contenido de azúcares reductores

El contenido de azúcares reductores se cuantificó por el método del ácido dinitrosalisílico y se empleó la D-glucosa (Sigma) como azúcar patrón ⁽¹⁷⁾. Los valores de absorbancia se obtuvieron a una longitud de onda de 456 nm y la concentración se expresó en mg L⁻¹ a partir de la curva patrón.

Contenido de fenoles solubles

La extracción de fenoles solubles se realizó por el método de Friend ⁽¹⁸⁾. Se maceró 0,1 g del material vegetal en 1,0 mL de metanol y se agitó vigorosamente. La muestra se centrifugó a 12 000 rpm durante 10 min y el sobrenadante se colectó para la determinación de los fenoles solubles. Para determinar la concentración de fenoles se utilizó el ácido clorogénico (0,05 mol L⁻¹) como patrón y los valores de absorbancia se obtuvieron a 725 nm.

Todas las mediciones espectrofotométricas descritas se realizaron en un espectrofotómetro UV/VIS Ultrospec 2000 (Pharmacia Biotech, Suecia).

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con cuatro repeticiones. Para los análisis bioquímicos se tomaron cinco muestras por tratamientos, mientras que para la evaluación de los parámetros morfológicos y fisiológicos se analizaron 10 plántulas.

Para el análisis estadístico de los datos experimentales se utilizó el Paquete estadístico SPSS versión 18.0. Se comprobó la normalidad y la homogeneidad de varianza mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, respectivamente. Con los datos que cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se aplicó un análisis de varianza y la prueba de rangos múltiples de Duncan para un nivel de confianza del 95 %. En el caso donde no se cumplieron estos supuestos se realizó un análisis no paramétrico mediante las pruebas de Kruskal Wallis y Mann Whitney ($p < 0,05$).

La comparación entre los porcentajes de plántulas con hojas verdaderas entre tratamientos, se realizó mediante un análisis de proporciones con el uso del programa CompaProp versión 3.01 sobre Windows ⁽¹⁹⁾.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Germinación

El polietilenglicol afectó el porcentaje de germinación de *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Delicias 364' (Figura 1). En concentraciones bajas (3 y 6 %) del agente osmótico se obtuvieron porcentajes superiores al 90 % a partir del segundo día de experimento. En contenidos superiores del polímero (9, 12 y 15 %) el porcentaje de germinación disminuyó de manera significativa con valores de 76,7; 73,3 y 20,0 %, respectivamente, mientras que 18 % del polímero provocó la inhibición total de la germinación.

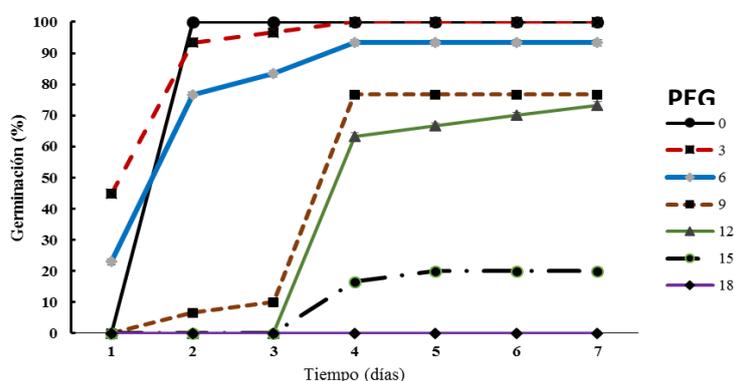


Figura 1. Efecto del polietilenglicol-6000 sobre el porcentaje de germinación de semillas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Delicias 364'

La presencia del polietilenglicol en concentraciones elevadas provocó también una disminución en la velocidad de germinación dada en función de la emergencia pico (Tabla 1). En los tratamientos control, 3 y 6 % de PEG se observó el mayor porcentaje de germinación (día pico) en el segundo día. En concentraciones superiores del

agente osmótico (9, 12 y 15 %) se observó un retardo del proceso de germinación y un máximo de germinación en el cuarto día del experimento.

Tabla 1. Emergencia pico en semillas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. ‘Delicias 364’ germinadas en diferentes concentraciones de polietilenglicol-6000

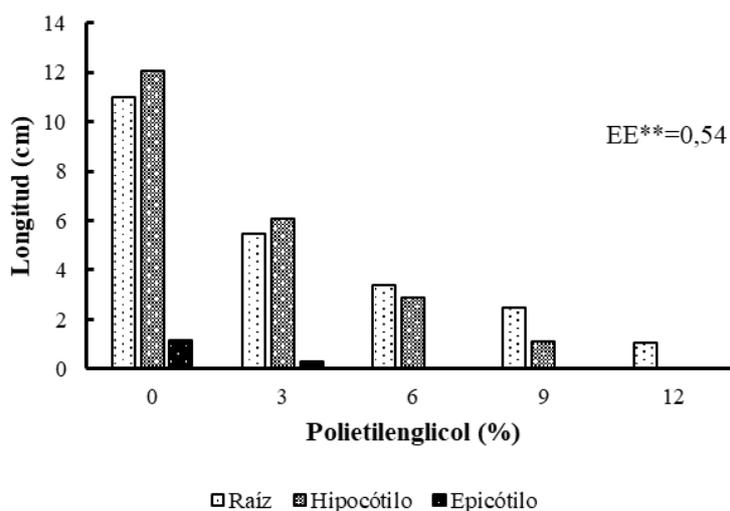
	PEG-6000 (%)					
	0	3	6	9	12	15
Día pico	2	2	2	4	4	4
Emergencia pico (%)	100	53	53	66,6	63,3	16,6

El efecto negativo del polietilenglicol sobre la germinación puede estar relacionado con una disminución en el proceso de imbibición de las semillas, debido al carácter altamente hidrofílico de polímero que provoca una disminución del potencial osmótico e hídrico del medio ⁽²⁰⁾. La imbibición es fundamental para que se inicie la germinación, ya que la entrada de agua permite la hidratación de enzimas y sustratos respiratorios que activan los procesos metabólicos en el embrión y en el endospermo de la semilla. Entre estos procesos están los de hidrólisis enzimática que permiten el uso de las reservas alimenticias para el crecimiento del embrión. Además, una disminución en el proceso de imbibición afecta la entrada de dióxígeno y la respiración aerobia, lo que reduce la obtención de energía metabólica que se requiere para suplir el costo elevado de la germinación ⁽²¹⁾.

Estos resultados coinciden con los referidos por otros autores quienes demostraron el efecto negativo del estrés hídrico inducido por polietilenglicol sobre la germinación y el crecimiento temprano de fabáceas como *Phaseolus vulgaris* L. ⁽²²⁾ y *Vigna radiata* L. ⁽¹²⁾, así como otras especies no leguminosas de importancia económica como *Sorghum bicolor* (L.) Moench ⁽⁵⁾, *Brassica napus* L. ⁽⁴⁾ y *Triticum aestivum* L. ⁽²³⁾.

Indicadores morfológicos y fisiológicos

El polietilenglicol disminuyó significativamente el crecimiento de las raíces en todas las concentraciones estudiadas (Figura 2). Los tratamientos 6, 9 y 12 % de PEG disminuyeron la longitud de las raíces en un 69,8; 77,6 y 90,4 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento control. La concentración 15 % del agente osmótico inhibió completamente el desarrollo radical. De manera similar, el hipocótilo evidenció una reducción significativa del crecimiento en presencia de polietilenglicol y una mayor sensibilidad con relación a la raíz, ya que en 12 % de PEG se inhibió totalmente el crecimiento de este órgano. Con relación al epicótilo, la presencia de PEG en baja concentración (3 %) redujo significativamente el crecimiento con relación al control. Contenidos más elevados del polímero en el medio inhibió totalmente el crecimiento del mismo.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo órgano (Duncan, $p < 0,05$). $EE = 0,54^{**}$, $n = 10$

Figura 2. Efecto del PEG-6000 sobre el crecimiento de la raíz, el hipocótilo y el epicótilo de *Phaseolus vulgaris* L. 'Delicias 364'

Estos resultados coinciden con los referidos por otros autores quienes observaron una disminución del crecimiento de la raíz y de la parte aérea de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. ^(2,24), *Vigna unguiculata* cv. 'BRS Tumucumaque' ⁽²⁵⁾, *Glycine max* (L.) Merr. ⁽²⁶⁾, *Brassica napus* L. ⁽⁴⁾ y *Ocimum basilicum* L. ⁽²⁷⁾ en presencia de PEG-6000. No obstante, los trabajos evidenciaron que existieron distintos niveles de tolerancia frente al agente osmótico debido a las diferencias genotípicas que existen entre las especies y variedades evaluadas.

La disminución de la longitud de las raíces y la parte aérea de las plántulas, puede estar relacionada con el estrés osmótico de los tejidos en presencia del agente estresante. En condiciones de bajo potencial hídrico ocurre la salida de agua de las células vegetales, para compensar la diferencia de potencial osmótico entre los tejidos del vegetal y el medio. Esto provoca a su vez, una disminución de la presión de turgencia que se requiere para la expansión y el crecimiento celular ⁽²⁸⁾. Otro factor que pudo afectar el crecimiento de las plántulas está relacionado con el estrés oxidativo que se genera en condiciones de estrés osmótico ⁽²⁹⁾. En estas condiciones se exageran la concentración de especies reactivas del oxígeno (ERO) como el peróxido de hidrógeno, el anión superóxido y el potente anión hidroxilo, que oxidan numerosas macromoléculas importantes como ácidos nucleicos, proteínas y lípidos ^(29,30). Esto provoca modificaciones estructurales y funcionales en estos compuestos lo cual afecta numerosos procesos metabólicos, la homeostasia celular y el crecimiento de la plántula ⁽³¹⁾.

Los valores correspondientes a la relación raíz/parte aérea mostraron un aumento en los tratamientos con polietilenglicol: control (0,83), 3 % (0,86), 6 % (1,18) y 9 % (2,24). Valores superiores de PEG inhibieron el crecimiento del brote. El incremento en la relación raíz/parte aérea indica que el agente osmótico tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento de la raíz en comparación con las estructuras aéreas, lo que puede significar un mecanismo de supervivencia en condiciones de estrés hídrico. Un aumento en la relación raíz/parte aérea en presencia

de estrés osmótico inducido por PEG también se observó en *Phaseolus vulgaris* L. ⁽²⁸⁾, *Glycine max* L. ⁽²²⁾, *Triticum aestivum* L. ^(32,33) y puede considerarse un indicador de tolerancia al déficit hídrico ⁽³⁴⁾.

El efecto del polietilenglicol sobre el desarrollo de hojas verdaderas en plántulas de frijol se muestra en la Tabla 2. El tratamiento 3 % de PEG disminuyó en un 55 % el porcentaje de plántulas con hojas verdaderas con relación al control, mientras que en presencia de 6 % del agente osmótico solamente el 18 % de las plántulas desarrollaron estructuras fotosintéticas y con una menor superficie, en comparación con las hojas de los tratamientos control y 3 % de PEG. En concentraciones superiores del polímero hubo una inhibición completa de la formación de hojas verdaderas.

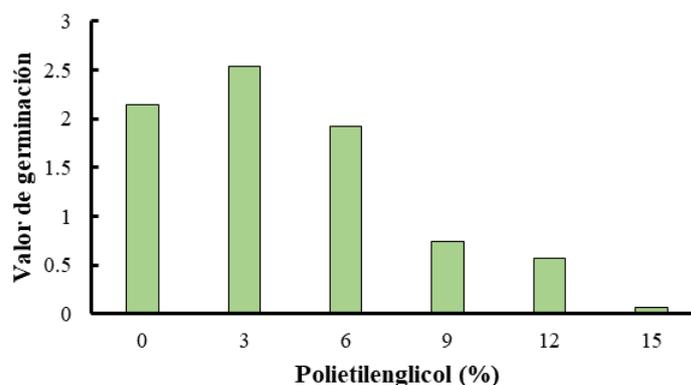
Tabla 2. Porcentaje de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. ‘Delicias 364’ con hojas verdaderas, germinadas en diferentes concentraciones de PEG-6000

PEG-6000 (%)	Proporción	%	EE
0	1,00 (a)	100	0,08
3	0,45 (b)	45	0,08
6	0,18 (c)	18	0,08

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$)

El efecto negativo del estrés hídrico sobre el número de hojas en las plantas de frijol se refirió con anterioridad por otros autores ⁽³⁵⁾. El estrés osmótico inhibe considerablemente los procesos de división y alargamiento celular, los cuales influyen de manera significativa en el número y volumen celular y en consecuencia, en la formación y crecimiento de nuevas estructuras foliares. En trabajos similares se observó una reducción en el área foliar de las plántulas de *P. vulgaris* cv. ‘ICA Pajao’ con la aplicación de PEG-6000 en concentraciones superiores a 6 % del agente estresante ⁽²²⁾.

El valor de germinación de las plántulas de frijol germinadas en presencia de polietilenglicol, disminuyó significativamente en concentraciones iguales o superiores a 9 % (Figura 3). En los tratamientos 9, 12 y 15 % del agente osmótico la reducción fue del 66,0; 73,5 y 96,8 %, respectivamente, con relación al control; mientras que en los tratamientos 0, 3 y 6 % de PEG no se observaron diferencias.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Mann Whitney ($p < 0,05$). EE=0,31*, n=10

Figura 3. Efecto del PEG-6000 sobre el valor de germinación de *Phaseolus vulgaris* L. cv. ‘Delicias 364’

Estos resultados coinciden con los obtenidos en *P. vulgaris* cv. ‘ICA Pijao’, donde se observó una reducción significativa de la germinación y el vigor de las plántulas en condiciones de estrés hídrico inducido por PEG-6000 en concentraciones superiores a 14 % ⁽²⁴⁾. En estudios similares realizados con *Vigna unguiculata* L., se observó una reducción en varios indicadores como el vigor y la germinación media diaria, en plántulas germinadas en condiciones de estrés hídrico inducido por PEG-4000 ⁽³⁶⁾.

Indicadores bioquímicos

El contenido de carbohidratos solubles totales, azúcares reductores y proteínas solubles totales, en raíces y parte aérea de las plántulas germinadas en diferentes concentraciones de polietilenglicol se muestran en la Tabla 3. Con relación a la concentración de carbohidratos solubles, se observó un mayor contenido de estos compuestos en la raíz en los tratamientos 6 y 9 % de PEG, en comparación con el control y el resto de los tratamientos donde se obtuvieron valores similares. En la parte aérea no hubo diferencias entre el control y 3 % de PEG; sin embargo, se observaron valores inferiores en los tratamientos 6, 9 y 12 % en relación con el control.

Tabla 3. Contenido de carbohidratos solubles totales (CST), azúcares reductores (AR) y proteínas solubles totales (PST) en raíces y parte aérea de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. ‘Delicias’ germinadas en diferentes concentraciones de polietilenglicol-6000

PEG-6000 (%)	CST (mg mL ⁻¹)		AR (mg L ⁻¹)		PST (mg mL ⁻¹)	
	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea
0	15,49 ^b	19,80 ^a	2,16 ^c	2,99 ^c	3,89 ^a	6,18 ^a
3	15,86 ^b	19,01 ^{ab}	2,32 ^b	3,51 ^b	4,23 ^a	5,44 ^b
6	18,68 ^a	18,34 ^b	2,89 ^a	3,68 ^a	3,78 ^a	3,23 ^c
9	18,56 ^a	18,02 ^b	2,36 ^b	2,05 ^d	2,97 ^b	3,08 ^c
12	15,13 ^b	17,87 ^b	0,84 ^d	1,75 ^e	2,60 ^b	2,42 ^d
	EE=2,75**; n=5		EE=0,15**; n=5		EE=0,22**; n=5	

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo órgano (Duncan, p<0,05). EE= error estándar

El contenido más elevado de azúcares reductores en las raíces se obtuvo en las plántulas germinadas con 6 % de polietilenglicol, seguido de los tratamientos con 3 y 9 % del agente osmótico sin diferencias entre estos pero superiores al control. Los valores más bajos se obtuvieron con 12 % de PEG en el medio. En la parte aérea, los tratamientos con 3 y 6 % de PEG mostraron contenidos de azúcares reductores superiores al control, mientras que los valores más bajos se obtuvieron con 9 y 12 % de PEG en ese orden.

El polietilenglicol afectó el contenido de proteínas en raíces y parte aérea de manera diferente. La parte aérea mostró una mayor sensibilidad que las raíces, ya que el contenido proteico disminuyó en la concentración más baja de PEG evaluada (3 %) con relación al control y al resto de los tratamientos. En el caso de las raíces no hubo diferencias entre el control y los tratamientos 3 y 6% de polietilenglicol, mientras que en concentraciones superiores (9 y 12 %) del agente osmótico se obtuvieron valores inferiores sin diferencias significativas entre estos.

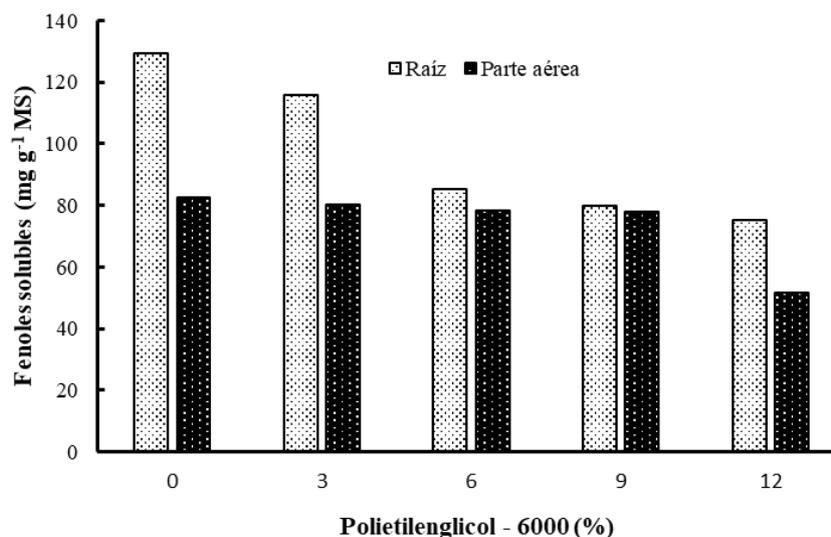
La reducción en el contenido de carbohidratos puede estar relacionada con la degradación de estos compuestos en monosacáridos y la oxidación de los mismos para la obtención de ATP, para su uso en el mantenimiento de las funciones metabólicas en condiciones de estrés hídrico (energía de mantenimiento).

El aumento en el contenido de azúcares reductores en concentraciones bajas y medias de PEG (3 y 6 %) en las raíces y en la parte aérea de las plántulas, puede estar relacionado con un aumento de la actividad α -amilasa en los tejidos del vegetal. Una respuesta similar se observó en plántulas de *Sorghum bicolor* L. germinadas en condiciones de estrés hídrico inducido por PEG-6000⁽²⁰⁾. El aumento en el contenido de azúcares reductores en presencia de PEG-6000 también se evidenció en plántulas de alfalfa (*Medicago sativa* L.), una especie que crece adecuadamente en zonas afectadas por la sequía⁽³⁰⁾.

El incremento en la concentración de azúcares reductores puede estar relacionado con un mecanismo fisiológico para compensar la diferencia de potencial hídrico entre los tejidos del vegetal y el medio externo; ya que los azúcares reductores son compuestos osmóticamente activos que disminuyen el potencial de soluto e hídrico de las células, lo que permite retener y/o absorber agua en condiciones de sequía fisiológica y el osmoacondicionamiento de los tejidos del vegetal.

La disminución en el contenido de azúcares reductores en los tratamientos con concentraciones elevadas de PEG, puede estar relacionado con la inactivación de la enzima α -amilasa que tiene la función catalítica de hidrolizar las moléculas de almidón. En estudios similares se observó una correlación positiva entre la actividad de la α -amilasa y las concentraciones de azúcares reductores en semillas de *Zea mays* L. tratadas con PEG-6000⁽³⁷⁾. Por otra parte, la disminución en el contenido de azúcares reductores también puede estar asociada con una mayor utilización de estos compuestos, debido a un aumento de la respiración en estas plántulas⁽³⁸⁾. Esto permite el desarrollo de procesos vitales como el recambio celular y la síntesis de proteínas, enzimas y otros compuestos que participan en la respuesta antiestrés.

La disminución en el contenido proteico puede estar relacionada con afectaciones en la maquinaria de biosíntesis de proteínas, así como en procesos fundamentales como la respiración celular, ya que una disminución en la tasa respiratoria representa una menor disponibilidad de energía metabólica para los procesos de biosíntesis. Esto concuerda con la reducción observada en el contenido de azúcares reductores en los tratamientos con las concentraciones más elevadas de polietilenglicol. Además, una disminución en el proceso de respiración celular implica una menor concentración de ácidos orgánicos derivados del ciclo de Krebs, que pueden servir de base para la síntesis de aminoácidos que se utilizan en la biosíntesis de proteínas. El contenido de polifenoles solubles en las plántulas sometidas a estrés hídrico se muestra en la Figura 4. En las raíces los valores disminuyeron con el aumento de la concentración de PEG. Este resultado puede estar relacionado con una reducción en la actividad de enzimas que participan en la ruta biosintética de los polifenoles, en especial de la fenilalanina amonioliasa que tiene una función central en el metabolismo de estos compuestos. El contenido de polifenoles en la parte aérea mostró una mayor estabilidad con valores similares entre el control y los tratamientos 3; 6 y 9 % de PEG y solo disminuyó en 12 % de PEG.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Mann Whitney ($p < 0,05$), $EE=4,04^{**}$, $n=5$

Figura 4. Contenido de polifenoles solubles en raíz y parte aérea de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Delicias 364' germinadas en condiciones de estrés hídrico

Estos resultados están en correspondencia con los observados en otras especies como *Solanum lycopersicum* sp. ⁽³⁹⁾, *Sorghum bicolor* (L.) Moench ⁽²⁰⁾ y *Ocimum basilicum* L. ⁽²⁷⁾. La estabilidad en los contenidos de estos compuestos en la parte aérea, puede constituir un mecanismo de defensa antioxidante asociado con la síntesis de polifenoles y el movimiento de los fenoles solubles hacia los tejidos superiores de la planta, donde se evidenció una mayor susceptibilidad al estrés hídrico. En las plantas, los polifenoles pueden tener una función importante dentro del sistema antioxidante. Estos compuestos disminuyen la producción de especies reactivas del oxígeno, al reducir la velocidad de la reacción de Fenton mediante la cual se forman ERO al reaccionar el peróxido de hidrógeno con metales de transición. Esto se debe a que los compuestos fenólicos tienen la capacidad de donar electrones a la enzima guayacol peroxidasa para la eliminación del peróxido de hidrógeno, y por otra parte, pueden también quelatar metales tóxicos ^(40,41).

CONCLUSIONES

- El polietilenglicol-6000 afectó el proceso de germinación y el crecimiento temprano de *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Delicias 364'; sin embargo, los resultados indican la presencia de mecanismos de tolerancia al déficit hídrico en esta variedad, como el aumento en los niveles de azúcares reductores y proteínas solubles totales en presencia de concentraciones bajas y medias de polietilenglicol (3-9 %), que puede constituir un mecanismo de acondicionamiento osmótico.
- El aumento significativo en la relación raíz/parte aérea en 9 % de PEG y la producción estable de compuestos polifenólicos en la parte aérea de las plántulas sometidas a estrés hídrico, también sugieren la presencia de mecanismos de supervivencia y vías para atenuar el estrés oxidativo que se genera como consecuencia del estrés osmótico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Celmeli T, Sari H, Canci H, Sari D, Adak A, Eker T, et al. The nutritional content of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces in comparison to modern varieties. *Agronomy* [Internet]. 2018;8(9):166. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/8/9/166>
2. Moliehi R, Mateboho M, Motlatsi M. Screening of common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) for drought tolerance. *Global J. Agril. Res* [Internet]. 2017;5(4):20–9. Available from: <https://www.eajournals.org/journals/global-journal-of-agricultural-research-gjar/vol-5-issue-4-november-2017/screening-common-bean-cultivars-phaseolus-vulgaris-l-drought-tolerance-1/>
3. Kumar P, Tokas J, Kumar N, Lal M, Singal HR. Climate change consequences and its impact on agriculture and food security. *International Journal of chemical studies* [Internet]. 2018;6(6):124–33. Available from: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58343934/Praveen_et_al_2018-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1639106739&Signature=brsKsqMWXICQkvTTDjirzvFCVaQggmwdJSThy5EbxXsL Lny6WEXIS1hd589WdcT58pgbJ5IXmJ7gQfWAMQ5UIb7obi8eBLKiq9nGwvWmIJvRcmSrE9ZbNo Vcy90EaeuRIH-ftIKxXLScCvYRAFhLIB--~6g4BVNYz~zI54ZgiYmw14JOlmJbayRnouma47A~8xBocKSQDRw4GAQwAsJB~4x7twGhGUTG TEbbGLet2Xa~jRr7KQJlj03QOocmtfhPTMZmLfls~4eJx4SQBqo3z6Z~L6rgyhAJheLYJTjpE5AUZqG-pvQbK93mxT3AvqkoBGLAQ8h4SxZj7tFa-dKkg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
4. Channaoui S, El Kahkahi R, Charafi J, Mazouz H, El Fechtali M, Nabloussi A. Germination and seedling growth of a set of rapeseed (*Brassica napus*) varieties under drought stress conditions. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* [Internet]. 2017;2(1):238696. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Hamid-Mazouz/publication/314235482_Germination_and_Seedling_Growth_of_a_Set_of_Rapeseed_Brassica_napus_Varieties_under_Drought_Stress_Conditions/links/58bd64b2aca27261e52d6acf/Germination-and-Seedling-Growth-of-a-Set-of-Rapeseed-Brassica-napus-Varieties-under-Drought-Stress-Conditions.pdf
5. Rezende RKS, Masetto TE, Oba GC, Jesus MV. Germination of sweet Sorghum seeds in different water potentials. *American Journal of Plant Sciences* [Internet]. 2017;8(12):3062. Available from: https://www.scirp.org/html/9-2603419_80311.htm?pagespeed=noscript
6. Mujtaba SM, Faisal S, Khan MA, Mumtaz S, Khanzada B. Physiological studies on six wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought stress tolerance at seedling stage. *Agric. Res. Technol. Open Access J* [Internet]. 2016;1(2):001–5. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Athar-Khan-4/publication/299391240_physiological_studies_on_six_wheat_genotypes_for_drought_stress_tolerance_at_seedling_stage/links/56f7954608ae38d710a1c452/physiological-studies-on-six-wheat-genotypes-for-drought-stress-tolerance-at-seedling-stage.pdf

7. Fathi A, Tari DB. Effect of drought stress and its mechanism in plants. International Journal of Life Sciences [Internet]. 2016;10(1):1–6. Available from: https://www.researchgate.net/publication/294108106_Effect_of_Drought_Stress_and_its_Mechanism_in_Plants
8. Duan J, Cai W. OsLEA3-2, an abiotic stress induced gene of rice plays a key role in salt and drought tolerance. 2012; Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0045117>
9. Queiroz RJ, Cazetta JO. Proline and trehalose in maize seeds germinating under low osmotic potentials. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental [Internet]. 2016;20:22–8. Available from: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/sqZTgDzgwCqkLvSBvVzFf6g/?lang=en&format=html>
10. Hellal FA, El-Shabrawi HM, Abd El-Hady M, Khatab IA, El-Sayed SAA, Abdelly C. Influence of PEG induced drought stress on molecular and biochemical constituents and seedling growth of Egyptian barley cultivars. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology [Internet]. 2018;16(1):203–12. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687157X17300835>
11. Ahmad NS, Kareem SH, Mustafa KM, Ahmad DA. Early screening of some Kurdistan wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under drought stress. J. Agric. Sci [Internet]. 2017;9(2):88–103. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/49a8/3df4b0a603cc6d4e372820739b451c077d41.pdf>
12. Imtiaz AA, Shahriar SA, Baque MA, Eaty MNK, Falguni MR. Screening of Mungbean Genotypes under Polyethylene Glycol (PEG) Induced Drought Stress Condition. Annual Research & Review in Biology [Internet]. 2020;1–12. Available from: <https://www.journalarrb.com/index.php/ARRB/article/view/30184>
13. Djavanshir K, Pourbeik H. Germination value-a new formula. Silvae genetica [Internet]. 1976;25(2):79–83. Available from: https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1976/Vol._25_Heft_2/25_2_79.pdf
14. Murillo Gamboa O. Variación en parámetros de germinación de una población natural de *Alnus acuminata* de Guatemala. 1998; Available from: <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6916/A7182e.pdf?sequence=1>
15. Lowry OH, Rosebrough NJ, Farr AL, Randall RJ. Protein measurement with the Folin phenol reagent. Journal of biological chemistry [Internet]. 1951;193:265–75. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14907713/>
16. Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers P t, Smith F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical chemistry [Internet]. 1956;28(3):350–6. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ac60111a017>
17. Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical chemistry [Internet]. 1959;31(3):426–8. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ac60147a030>

18. Gurr SI, McPherson J, Bowles DJ. Lignin and associated phenolic acids in cell walls. *Molecular plant pathology and practical approach*. 1992;3:62.
19. Castillo Duvergel Y, Miranda I. COMPAPROP: Sistema para comparación de proporciones múltiples. *Revista de Protección Vegetal* [Internet]. 2014;29(3):231–4. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1010-27522014000300013&script=sci_arttext&tlng=pt
20. Pérez-Hernández Y, Navarro-Boulandier M, Rojas-Sánchez L, Fuentes-Alfonso L, Sosa-del Castillo M. Efecto del estrés hídrico en la germinación de semillas de *Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. UDG-110. *Pastos y Forrajes* [Internet]. 2018;41(4):243–52. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942018000400002&script=sci_arttext&tlng=pt
21. Taiz L, Zeiger E. *Plant physiology* 4th ed Sinauer Sunderland [Internet]. MA; 2006. Available from: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkozje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=717115](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=717115)
22. Reyes-Matamoros J, Martínez-Moreno D, Rueda-Luna R, Rodríguez-Ramírez T. Efecto del estrés hídrico en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de invernadero. *Revista Iberoamericana de Ciencias* [Internet]. 2014;1(2):191–203. Available from: <http://www.reibci.org/publicados/2014/julio/2200132.pdf>
23. Ghosh S, Shahed MA, Robin AHK. Polyethylene glycol induced osmotic stress affects germination and seedling establishment of wheat genotypes. *Plant Breeding and Biotechnology* [Internet]. 2020;8(2):174–85. Available from: <https://www.plantbreedbio.org/journal/view.html?doi=10.9787/PBB.2020.8.2.174>
24. García LR, Leiva-Mora M, Pérez AC, Collado R, Martínez IP, Veitía N, et al. Efecto del estrés hídrico inducido con PEG 6000 sobre la germinación in vitro de semillas de *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'ICA Pijao.' *Biología Vegetal* [Internet]. 2015;15(4). Available from: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/502>
25. Ferreira ACT, Felito RA, ROCHA A, CARVALHO MACD, Yamashita OM. Water and salt stresses on germination of cowpea (*Vigna unguiculata* cv. BRS Tumucumaque) SEEDS 1. *Revista Caatinga* [Internet]. 2017;30:1009–16. Available from: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/h7XW96tcPgM6gvcRryPMCVC/?lang=en&format=html>
26. Pavli OI, Foti C, Skoufogianni G, Karastergiou G, Panagou A, Khah EM. PEG-Induced Drought Stress During Germination Effects on Soybean Germplasm. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal* [Internet]. 2020;23(5):70–80. Available from: <https://juniperpublishers.com/artoaj/ARTOAJ.MS.ID.556250.php>
27. Ojeda-Silvera CM, Murillo-Amador B, Nieto-Garibay A, Troyo-Diéguez E, Ruíz-Espinoza FH, García-Hernández JL. Emergencia y crecimiento de plántulas de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) sometidas a estrés hídrico. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* [Internet]. 2015;2(5):151–61. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000200003

28. Sanchez-Reinoso AD, Ligarreto-Moreno GA, Restrepo-Diaz H. Physiological and biochemical responses of common bush bean to drought. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* [Internet]. 2018;46(2):393–401. Available from: <https://www.notulaeobotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/10965>
29. Cao Y, Luo Q, Tian Y, Meng F. Physiological and proteomic analyses of the drought stress response in *Amygdalus Mira* (Koehne) Yü et Lu roots. *BMC plant biology* [Internet]. 2017;17(1):1–16. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12870-017-1000-z>
30. Zhang C, Shi S. Physiological and proteomic responses of contrasting alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties to PEG-induced osmotic stress. *Frontiers in plant science* [Internet]. 2018;9:242. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00242/full>
31. Ahanger MA, Tomar NS, Tittal M, Argal S, Agarwal RM. Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants* [Internet]. 2017;23(4):731–44. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12298-017-0462-7>
32. Robin AHK, Matthew C, Uddin MJ, Bayazid KN. Salinity-induced reduction in root surface area and changes in major root and shoot traits at the phytomer level in wheat. *Journal of experimental botany* [Internet]. 2016;67(12):3719–29. Available from: <https://academic.oup.com/jxb/article/67/12/3719/2884943?login=true>
33. Hannan A, Hassan L, Hoque MN, Tahjib-Ul-Arif M, Robin AHK. Increasing new root length reflects survival mechanism of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under PEG-induced osmotic stress. *Plant Breeding and Biotechnology* [Internet]. 2020;8(1):46–57. Available from: <https://www.plantbreedbio.org/journal/view.html?volume=8&number=1&spage=46&year=2020>
34. Polania J, Rao IM, Cajiao C, Rivera M, Raatz B, Beebe S. Physiological traits associated with drought resistance in Andean and Mesoamerican genotypes of common bean *Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica* [Internet]. 2016;210(1):17–29. Available from: <https://repo.mel.cgiar.org/handle/20.500.11766/6881>
35. Sánchez-Blanco MJ, Álvarez S, Navarro A, Bañón S. Changes in leaf water relations, gas exchange, growth and flowering quality in potted geranium plants irrigated with different water regimes. *Journal of plant physiology* [Internet]. 2009;166(5):467–76. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0176161708002083>
36. Jain C, Saxena R. Varietal differences against PEG induced drought stress in cowpea. *Octa Journal of Environmental Research* [Internet]. 2016;4(1):58–62. Available from: <http://sciencebeingjournal.com/octa-journal-environmental-research/varietal-differences-against-peg-induced-drought-stress-cowpea>

37. Li WU, Zhang X, Ashraf U, Mo Z, Suo H, Li G. Dynamics of seed germination, seedling growth and physiological responses of sweet corn under peg-induced water stress. *Pakistan Journal of Botanical* [Internet]. 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)
38. Yasseen B, Al-Thani R, Alhady F, Abbas R. Soluble sugars in plants under stress at the arabian gulf Region: possible roles of microorganisms. *J Plant Biochem Physiol* [Internet]. 2018;6(224):2. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Bassam-Yasseen/publication/36208420_An_analysis_of_the_effects_of_salinity_on_leaf_growth_in_Mexican_wheats/links/5cf31158a6fdcc8475fcea22/An-analysis-of-the-effects-of-salinity-on-leaf-growth-in-Mexican-wheats.pdf
39. Florido Bacallao M, Bao Fundora L. Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos tropicales* [Internet]. 2014;35(3):70–88. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000300008
40. Rice-Evans C, Miller N, Paganga G. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in plant science* [Internet]. 1997;2(4):152–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1360138597010182>
41. Sakihama Y, Cohen MF, Grace SC, Yamasaki H. Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. *Toxicology* [Internet]. 2002;177(1):67–80. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300483X02001968>