



## GERMINACIÓN Y ASPECTOS MORFOLÓGICOS DE PLÁNTULAS DE *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto TRATADAS CON RAYOS GAMMA†

[GERMINATION AND MORPHOLOGICAL ASPECTS OF *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto SEEDLINGS TREATED WITH GAMMA RAYS]

Oscar M. Antúñez-Ocampo<sup>1</sup>, Gerardo A. Castañeda-Zárate<sup>2</sup>,  
Juan E. Sabino-López<sup>3\*</sup>, Mariana Espinosa-Rodríguez<sup>3</sup>  
and Serafín Cruz-Izquierdo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).  
Campo Experimental Iguala. km 2.5 Carr. Iguala-Tuxpan, Iguala de la  
Independencia, estado de Guerrero. México. C.P. 40000. Email:  
antunez.oscar@inifap.gob.mx.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de Tehuacán. Agricultura Sustentable y Protegida. San  
Pablo Tepetzingo, Tehuacán, Puebla. México. C.P. 75859. Email:  
geralcaza93@gmail.com.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Ciencias Agropecuarias y  
Ambientales. km 2.5 Carr. Iguala-Tuxpan, Iguala de la Independencia, estado de  
Guerrero. México. C.P. 40101. Emails: \*juanelias\_sab@hotmail.com;  
maresprodiguez@gmail.com

<sup>4</sup>Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Colegio de  
Postgraduados. Campus Montecillo. km 36.5 Carr. México-Texcoco, Montecillo,  
Estado de México. México. C.P. 56230. Email: seracruz@colpos.mx

\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background.** The sweet biznaga (*Echinocactus platyacanthus*) is endemic to Mexico, whose seeds show low germination, viability, longevity, genetics, and latency; therefore, gamma irradiation is an alternative to stimulate the emergence and growth of seedlings, by causing variations in the chemical composition of DNA, which causes cytological, biochemical, physiological and morphological changes in plants. **Objective.** The objective of the present investigation was to evaluate the effect of different doses of gamma <sup>60</sup>Co radiation on seed germination and seedling vigor of *E. platyacanthus*. **Methodology.** *E. platyacanthus* seeds were irradiated at 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 and 550 Gy of <sup>60</sup>Co gamma rays, then they were sown in transparent plastic containers covered with filter paper and were distributed in a completely randomized design with four repetitions in a germination chamber, the percentage of germination and survival of seedlings in the container was recorded 30 days after sowing (das). The seedlings were transplanted at 30 das into black polyethylene bags with tezontle and established in a completely randomized design with 12 treatments and four replications, in a tunnel-type greenhouse. At 20 and 30 days after transplantation (dat) seedling vigor was measured based on height (cm), stem diameter (mm) and root length (mm) and at 20 dat survival was recorded (%) of seedling in the substrate. An analysis of variance and Tukey's test for comparison of means ( $p \leq 0.05$ ) were performed. **Results.** Gamma irradiation stimulated seed germination from 10 to 29%. In seedlings, root height and length were modified with intermediate doses of gamma rays (100 to 200 Gy); but higher doses negatively affected these indicators. Survival of containerized M<sub>1</sub> seedlings was up to 63% higher than the control, depending on the irradiation dose. **Implications.** Irradiation with <sup>60</sup>Co gamma rays improves seed germination, survival and vigor of *E. platyacanthus* seedlings. **Conclusions.** Irradiation with <sup>60</sup>Co gamma rays stimulated seed germination and improved some characteristics of vigor in *E. platyacanthus* seedlings, by modifying root height and length according to age. In addition, it increased the survival of containerized seedlings.

**Keywords:** sweet biznaga; *Echinocactus platyacanthus*; germination; seedling; gamma rays.

### RESUMEN

**Antecedentes.** La biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus*) es endémica México, cuyas semillas presentan baja germinación, viabilidad, longevidad, genética y latencia; por lo tanto, la irradiación gamma es una alternativa para estimular la emergencia y crecimiento de las plántulas, al provocar variaciones en la composición química del ADN,

† Submitted February 9, 2022 – Accepted May 24, 2022. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4235>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

lo que origina cambios citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos en las plantas. **Objetivo.** El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de diferentes dosis de radiación gamma  $^{60}\text{Co}$  en la germinación de la semilla y el vigor de plántula de *E. platyacanthus*. **Metodología.** Semillas de *E. platyacanthus* se irradiaron a 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 y 550 Gy de rayos gamma  $^{60}\text{Co}$ , enseguida se sembraron en contenedores de plástico transparente cubiertos con papel filtro y se distribuyeron en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones en una cámara de germinación, se registró el porcentaje de germinación y de supervivencia de plántulas en contenedor 30 días después de la siembra (dds). Las plántulas se trasplantaron a los 30 dds en bolsas de polietileno negro con tezontle y se establecieron en un diseño completamente al azar con 12 tratamientos y cuatro repeticiones, en un invernadero tipo túnel. A los 20 y 30 días después del trasplante (ddt) se midió el vigor de plántula con base en la altura (cm), diámetro del tallo (mm) y longitud de la raíz (mm) y a los 20 ddt se registró la supervivencia (%) de plántula en el sustrato. Se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). **Resultados.** La irradiación gamma estimuló la germinación de semillas de 10 a 29%. En plántula, la altura y longitud de la raíz se modificó con dosis intermedias de rayos gamma (100 a 200 Gy); pero dosis mayores afectaron negativamente estos indicadores. La supervivencia de plántulas  $M_1$  en contenedor fue superior al testigo hasta en 63%, según la dosis de irradiación. **Implicaciones.** La irradiación con rayos gamma  $^{60}\text{Co}$  mejora la germinación de semillas, la supervivencia y vigor de plántulas de *Echinocactus platyacanthus*. **Conclusiones.** La irradiación con rayos gamma  $^{60}\text{Co}$  estimuló la germinación de semillas y mejoró algunas características del vigor en plántulas de *Echinocactus platyacanthus*, al modificar la altura y longitud de la raíz según la edad. Además, incrementó la supervivencia de las plántulas en contenedor.

**Palabras clave:** biznaga dulce; *Echinocactus platyacanthus*; germinación; plántula; rayos gamma.

## INTRODUCCIÓN

México es el centro de diversificación y endemismo del 75 % de las especies de la familia Cactaceae (Bravo-Hollis y Scheinvar, 1999), representada por 66 géneros y 596 especies (Goettsch *et al.*, 2015). En particular, la biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]) que es endémica del desierto del estado de Chihuahua y se distribuye en Coahuila, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas; es útil como planta medicinal, cerco vivo, ornamental y alimento (dulce y forraje); sin embargo, su distribución ha decrecido por la recolección y el comercio ilegal. Por lo anterior, la legislatura mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010) la ha designado en la categoría de Protección especial (Pr) (Jiménez-Sierra y Eguiarte, 2010).

La propagación sexual (semillas) es la principal forma de preservación de *E. platyacanthus* en su medio natural; sin embargo, las semillas presentan distinto tamaño (Ayala-Cordero *et al.*, 2004; Sánchez-Salas *et al.*, 2006); viabilidad (Flores-Martínez *et al.*, 2008), longevidad (Rojas-Aréchiga y Batis, 2001), genética y latencia fisiológica (Márquez-Guzmán *et al.*, 2013; Baskin y Baskin, 2014). Los aspectos anteriores provocan variación en la cantidad de nutrientes disponibles para el embrión, lo cual repercute en el tiempo de germinación y la supervivencia de la plántula (Rojas-Aréchiga y Batis, 2001; Sánchez-Salas *et al.*, 2006; Navarro *et al.*, 2014). En relación a la latencia de la semilla, se ha tratado de inhibir con escarificación química; con ácidos (Flores-Martínez *et al.*, 2008; Larrea-Alcázar y López, 2008) o de manera mecánica mediante el desgaste de la testa (Sánchez-Salas *et al.*, 2006; Flores y Jurado, 2011) y con la aplicación de calor o hidratación (Navarro *et al.*, 2014;

Baskin y Baskin, 2014), pero sin resultados favorables en la germinación. Por lo tanto, una alternativa para incrementar y acelerar la germinación de las semillas es la aplicación de radiación ionizante; en particular, los rayos gamma  $^{60}\text{Co}$ , que son los más utilizados para irradiar plantas enteras, tejido vegetal, semillas y granos de polen (Oladosu *et al.*, 2016).

La importancia del empleo de la irradiación gamma en semillas es que estimula la germinación y provoca cambios citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos en las plantas; tal respuesta se debe a la formación de radicales libres (*i.e.*,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ) que causan inestabilidad genómica en las células y tejidos, por los rompimientos y variaciones en la composición química del ADN (Kim *et al.*, 2004). Por ejemplo, la irradiación gamma a semillas de orquídea (*Laelia autumnalis*) favoreció la germinación y formación de promeristemos, clorofila, hojas y plántulas completas (Hernández-Muñoz *et al.*, 2017); mientras que, en soya (*Glycine max* L.) (De la Fé *et al.*, 2000), jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Ramírez *et al.*, 2006), *Stevia rebaudiana* (González y Nakayama, 2015) y uchuva (*Physalis peruviana* L.) (Antúñez-Ocampo *et al.*, 2017), se estimuló la emergencia y vigor de plántula. Sin embargo, los cambios dependerán de la dosis (Rajarajan *et al.*, 2016) y duración del estrés inducido por la radiación; además, de las características del material vegetal como el contenido de agua, edad, tipo de tejido y número cromosómico (Lagoda, 2011; Jan *et al.*, 2012).

A pesar de que la radiación induce cambios sobresalientes en la morfología y fisiología de varios cultivos de interés económico (Jan *et al.*, 2012; Oladosu *et al.*, 2016), su aplicación en otras especies vegetales es limitada. En la literatura no se reportan resultados referentes al efecto de la radiación ionizante

en la germinación de semillas de *E. platyacanthus*. Solo se tiene información de la germinación de semillas de especies de cactáceas, pero con tratamientos químicos y físicos en condiciones controladas (Sánchez-Salas *et al.*, 2006; Flores y Jurado, 2011). Por lo tanto, en la presente investigación se planteó el siguiente objetivo: evaluar el efecto de diferentes dosis de radiación gamma  $^{60}\text{Co}$  en la germinación de la semilla y el vigor de plántula de *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]. La hipótesis del trabajo fue que existe un rango de dosis de irradiación gamma que favorecen la germinación y modifican los aspectos morfológicos de las plántulas de biznaga dulce.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Irradiación de semillas

En la presente investigación se utilizaron semillas de *E. platyacanthus*, con un año de edad, provenientes de la Universidad Tecnológica de Tehuacán, Puebla, México. La irradiación de las semillas se efectuó en un irradiador LGI-01 Transelektro del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el estado de México. Los tratamientos de irradiación fueron 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 y 550 Gy de rayos gamma  $^{60}\text{Co}$  en 1 g de semilla.

### Germinación

Los 12 tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones para germinación, la unidad experimental estuvo constituida por 10 semillas irradiadas, las que se sembraron en febrero de 2018, en contenedores de plástico transparente (14 cm x 14 cm x 4 cm), cubiertos con papel filtro de poro mediano. Los contenedores con semilla se mantuvieron en una cámara de germinación, a temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; fotoperiodo de 8 h luz y 16 h de oscuridad, y se regaron cada dos días con agua destilada.

### Trasplante

El trasplante se realizó a los 30 días después de la siembra (dds) y consistió en colocar una plántula en bolsas de polietileno negro, llenadas con tezontle como sustrato; cuyas propiedades físicas fueron granulometría menor de 5 mm, 8.0% agua difícilmente disponible, 1.1% agua retenida, 2.3% agua fácilmente disponible, 56.5% capacidad de aireación, 67.9% espacio poroso total y 32.1% material sólido (Trejo-Téllez *et al.*, 2013). Las bolsas con plántulas se establecieron en un diseño completamente al azar con 12 tratamientos y cuatro repeticiones, la unidad experimental la constituyeron 10 macetas, teniendo un total de 480 unidades experimentales, en un

invernadero tipo túnel, con cubierta de polietileno UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral, localizado en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, estado de México.

### VARIABLES ESTUDIADAS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El efecto de la irradiación gamma en la germinación y vigor de la plántula se registró con las siguientes variables: porcentaje de germinación, con base en el número de semillas germinadas (emisión de la radícula) con respecto a las semillas sembradas. Mientras que, el vigor de la plántula se determinó con la altura, diámetro del tallo y longitud de la raíz a los 20 y 30 después del trasplante (ddt) en tres plántulas al azar por repetición en cada tratamiento. La altura (mm) del tallo y la longitud (mm) de la raíz se midieron con un vernier digital Steren®; la primera a partir del cuello de la raíz hasta el ápice del tallo, y la segunda desde el cuello hasta el extremo de la raíz más larga; el diámetro de tallo (mm), mediante el vernier antes descrito, entre la base de la raíz y la primera hoja de la plántula. En todas las variables registradas en los dos muestreos (20 y 30 ddt) se obtuvo el promedio por plántula en cada repetición. También, se registró la supervivencia (%) de plántulas en el contenedor, con base en el número de plántulas presentes a los 30 dds; así mismo, la supervivencia en el sustrato (10 plántulas por repetición, por dosis); con base en el número de plántulas trasplantadas con respecto a las plántulas presentes en el sustrato a los 20 ddt. Se realizó un análisis de varianza por cada variable y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), con el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 2002) versión 9.1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se reportan investigaciones de la radiosensibilidad de semilla de diversas especies de cereales [*i.e.*, maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.)], hortalizas [*i.e.*, jitomate (*Solanum Lycopersicum* L.), chile (*Capsicum annuum* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.)] (Oladosu *et al.*, 2016) y ornamentales [*i.e.*, girasol (*Helianthus annuus* L.), nochebuena (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch), orquídea (*Laelia autumnalis* La Llave & Lex, Lindl.)] (Canul-Ku *et al.*, 2012; Castillo-Martínez *et al.*, 2015; Hernández-Muñoz *et al.*, 2017). Por lo tanto, los resultados de esta investigación aportan conocimiento sobre el efecto de la irradiación gamma en la sensibilidad de la especie y la determinación de las dosis de rayos gamma que estimulan la germinación de la semilla; así como, efectos en la morfología de las plántulas de *E. platyacanthus* Link & Otto (Tabla 1).

**Tabla 1. Germinación y parámetros morfológicos de plántulas M<sub>1</sub> de *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto, provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma <sup>60</sup>Co.**

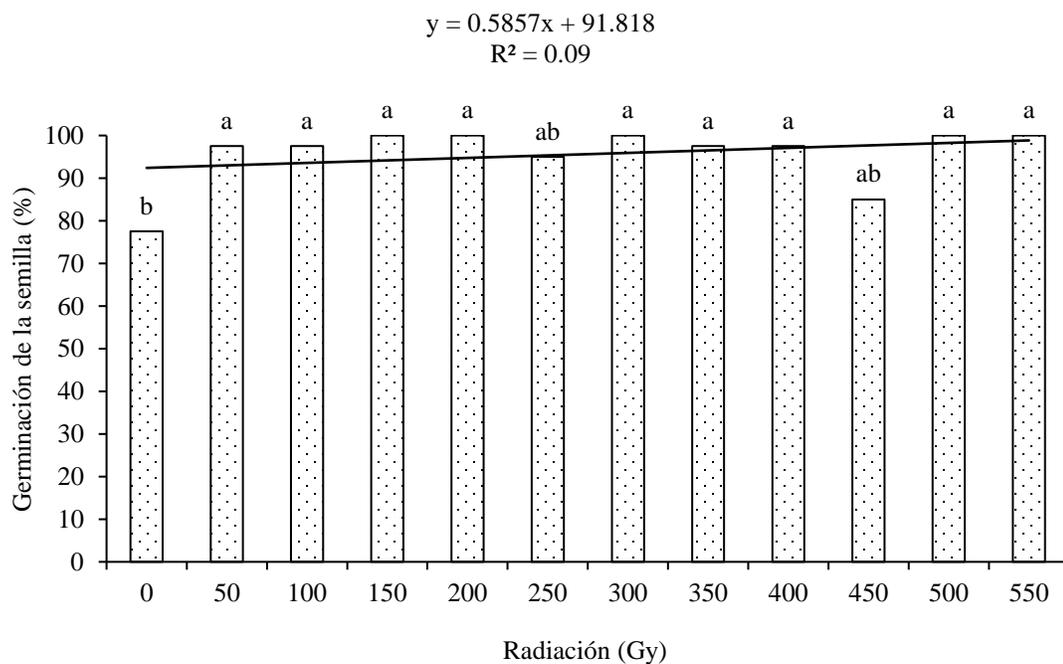
F.V.	Ge	Al		Dt		Lr		Sp	
		In	Fn	In	Fn	In	Fn	Cp	St
Media	3.56	2.62	3.30	2.33	2.41	2.38	3.95	90.83	25.83
CM	0.55	0.06	0.29	0.11	0.10	0.05	0.19	0.81	371.70
Significancia	*	*	*	ns	ns	*	*	*	ns
C. V. (%)	8	9	8	14	13	10	11	10	66

CM= cuadrado medio de error. F.V. = Fuente de variación. C. V. = Coeficiente de variación. Ge = Germinación de la semilla. Al = altura de plántula. Dt = Diámetro de tallo. Lr = Longitud de la raíz. Sp = Supervivencia de plántulas. Cp = en contenedor de plástico. St = en sustrato. In = Inicial. Fn = Final. \* = Significativo,  $\alpha \leq 0.5$ . ns = No significativo,  $\alpha \geq 0.5$ .

### Germinación

La radiación gamma influyó significativamente en la germinación de la semilla de *E. platyacanthus* ( $p \leq 0.05$ ) (Figura 1). Todas las dosis de rayos gamma <sup>60</sup>Co estimularon la germinación de 10 a 29%, con respecto al testigo; sin embargo, la respuesta no fue creciente con los tratamientos de radiación (aumento de la dosis). La estimulación de la germinación por la irradiación también se ha reportado en semillas de otras especies vegetales que presentan latencia o

cuando las condiciones ambientales no son las apropiadas (*i.e.*, humedad menor de 5%, temperaturas mayores de 30 °C) para la germinación (Ramírez *et al.*, 2006). Por ejemplo, dosis de 10 a 500 Gy favorecieron la germinación de semillas de soya (*Glycine max* L.) (De la Fé *et al.*, 2000), jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Ramírez *et al.*, 2006), *Stevia rebaudiana* (González y Nakayama, 2015) y uchuva (*Physalis peruviana* L.) (Antúñez-Ocampo *et al.*, 2017); sin embargo, dosis mayores de 500 Gy disminuyeron este indicador (González y Nakayama, 2015).



**Figura 1.** Efecto de la irradiación gamma <sup>60</sup>Co en la germinación (%) de la semilla de biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]). DMS = 1.83. C.V. (%) = 8. Medias con letras iguales entre columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

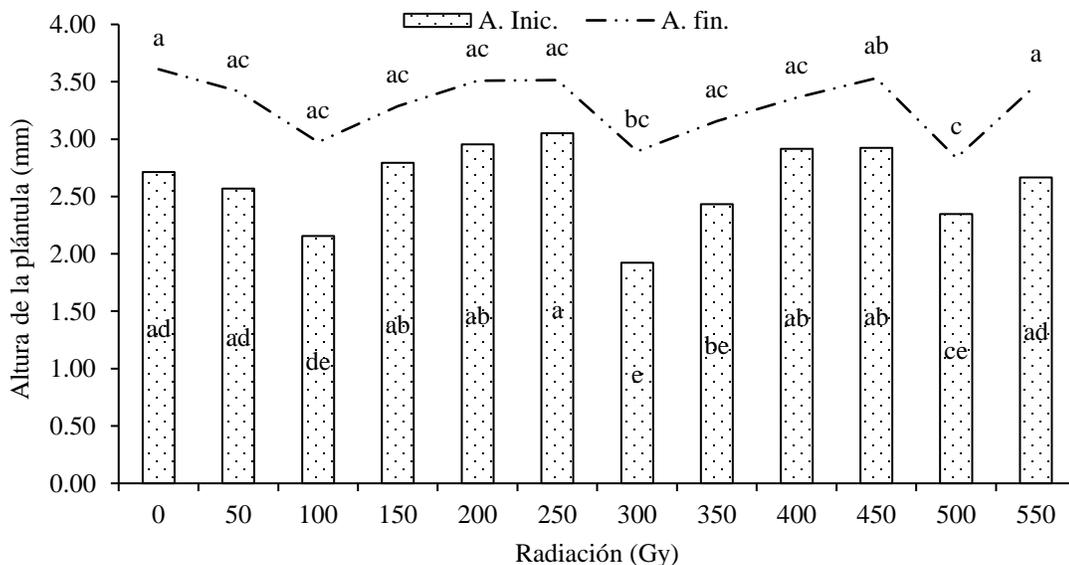
En diversas investigaciones se ha documentado, que la irradiación causa un efecto estimulante en la germinación, y se ha relacionado con alteraciones celulares (Mortazavi *et al.*, 2002; Muckerheide, 2004). Aunque en esta investigación no se midió ningún parámetro celular, en la bibliografía se reporta que la radiación aumenta la permeabilidad de las membranas celulares, permitiendo la entrada de agua y de oxígeno, e incrementando la actividad enzimática, como las enzimas hidrolíticas y de oxidación-reducción (Chen *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2011), que garantizan el acceso más rápido y completo del agua y las sustancias nutritivas al embrión, lo que favorece la división celular y des-diferenciación de las células; también, se afecta la síntesis de ARN y proteínas, el balance hormonal y e intercambio gaseoso (Akshatha y Chandrashekar, 2014). Sin embargo, el efecto biológico de la radiación va a depender del tipo de radiación, la dosis absorbida y el genotipo (De Micco *et al.*, 2011).

### Altura de la plántula

El análisis de varianza detectó diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en la altura inicial (20 ddt) y final (30 ddt) de la plántula por efecto de dosis de rayos gamma. En general, la mayoría de los tratamientos de irradiación tuvieron una respuesta similar en la altura; excepto, las dosis de 100, 300 y 500 Gy, que originaron plántulas de menor porte (Figura 2). Solo el primer muestreo presentó un aumento de 3 a 12% en la altura, cuando las semillas se irradiaron con dosis intermedias (150 a 250 Gy) y altas (400 y 450 Gy); mientras que,

el resto de las dosis redujeron este parámetro de 14 a 29% (Figura 2). Pero, conforme avanzó la edad de la plántula no se observó ningún incremento; solo se mantuvo el lento crecimiento de las plántulas tratadas con 300 y 500 Gy (20% menos que el testigo).

El comportamiento observado en el porte de plántula de biznaga dulce por el efecto de las dosis de irradiación también ha sido señalado por otros investigadores en otras especies (De la Fé *et al.*, 2000; Jan *et al.*, 2012; Álvarez *et al.*, 2013), que indicaron que la altura va a depender de la edad de la plántula y los daños provocados por la dosis. Entre las alteraciones que se han reportado en cereales y ornamentales (*i.e.*, trigo, arroz, soya, nochebuena) son el retraso de la actividad metabólica o daños en el proceso de división y elongación celular (Akgun y Tosun, 2004); lo que retrasa el crecimiento de las plántulas (Chandrashekar, 2014; Olasupo *et al.*, 2016). Tal respuesta se describió en plántulas  $M_1$  de *Glycine max* L., donde dosis de 50 a 320 Gy estimularon este parámetro morfológico a los 10 dds; mientras que, a los 20 y 50 dds las dosis 100 y 200 Gy favorecieron esta característica; sin embargo, las plántulas de semillas irradiadas con 480 Gy mostraron una reducción de 50% de la altura (De la Fé *et al.*, 2000). También, en plántulas de *S. lycopersicum* L. de semillas irradiadas con 5 y 20 Gy, incrementaron su altura más del 15%, con respecto al testigo (Álvarez *et al.*, 2012). Cabe señalar que, en otras especies dosis mayores de 400 Gy afectan negativamente esta característica (Porta y Jiménez, 2018).



**Figura 2.** Efecto de la irradiación gamma  $^{60}\text{Co}$  en la altura de la plántula  $M_1$  de biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]) en sustrato. A. Inic. = Altura a los 20 ddt. A. fin. = Altura a los 30 ddt.  $\text{DMS}_{A, \text{Inic.}} = 0.60$ .  $\text{C.V.}_{A, \text{Inic.}} (\%) = 9$ .  $\text{DMS}_{A, \text{fin.}} = 0.68$ .  $\text{C.V.}_{A, \text{fin.}} (\%) = 8$ . Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

### Diámetro del tallo

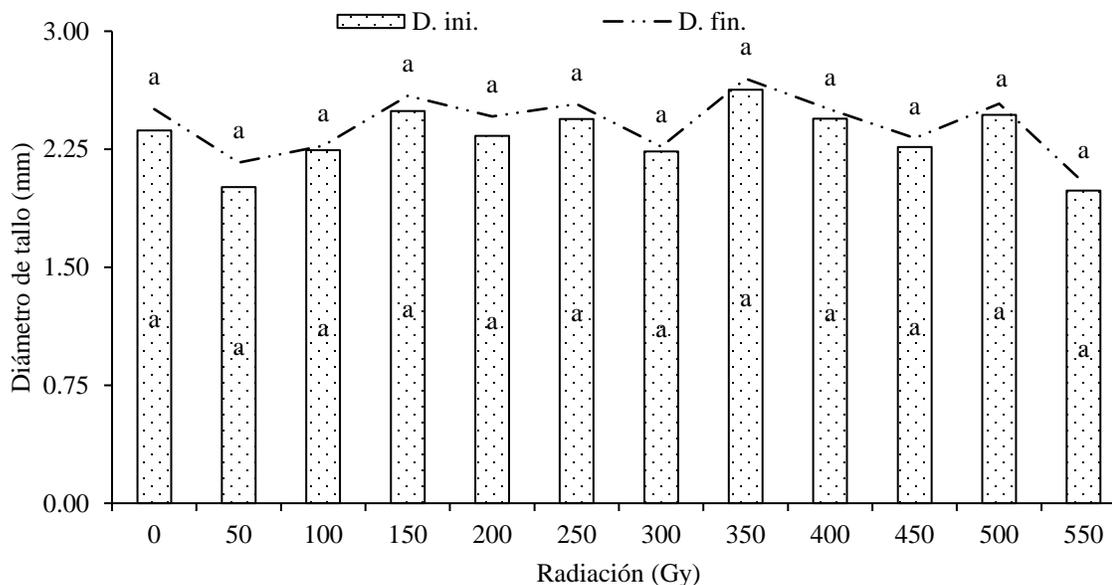
Las plántulas testigo y M<sub>1</sub> de *E. platyacanthus* no presentaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en el diámetro de tallo inicial y final (Figura 3). En la primera medición (20 ddt) el grosor del tallo varió de 1.99 a 2.63 mm; mientras que, en el segundo muestreo (30 ddt) osciló de 2.04 a 2.70 mm (Figura 3). La escasa respuesta de este parámetro morfológico también se ha reportado en otras plantas como chíca negra *Salvia hispanica* L.) (Díaz, 2020) y pasto (*Eragrostis superba*) (Álvarez-Holguín *et al.*, 2018) provenientes de semillas irradiadas con dosis mayores de 800 Gy. Los resultados anteriores pueden deberse a que las especies poco domesticadas, presentan alta plasticidad fenotípica para resistir los daños ocasionados por la irradiación gamma con <sup>60</sup>Co, esto se relaciona con el rápido mecanismo de reparación de ADN de estas especies (Díaz, 2020).

### Longitud de la raíz

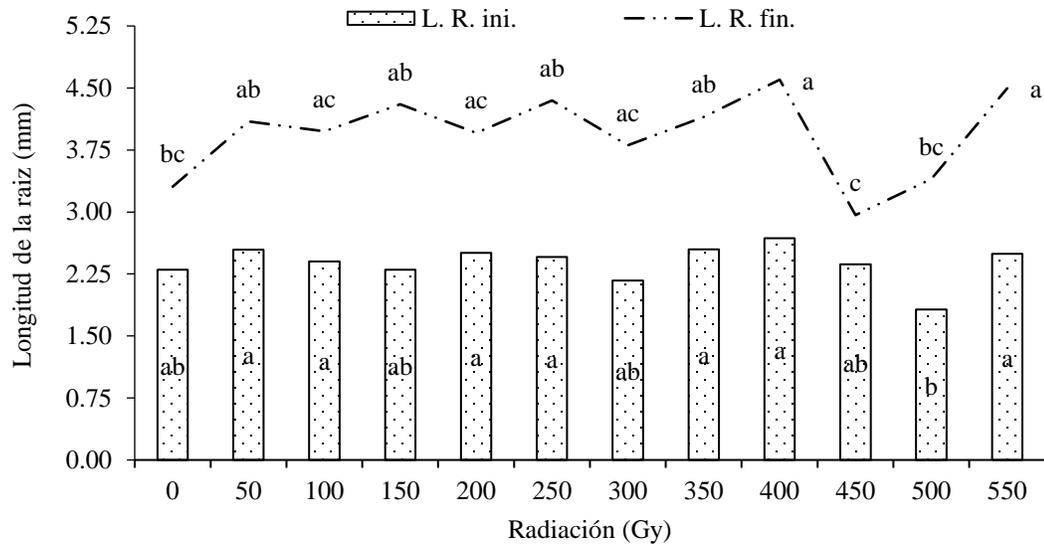
Los rayos gamma alteraron ( $p \leq 0.05$ ) la longitud inicial de la raíz de la plántula en sustrato. En general, las semillas expuestas a los tratamientos de irradiación originaron plántulas con raíces de longitudes similares al testigo a los 20 ddt; aunque la dosis de 500 Gy

disminuyó el crecimiento de la raíz en 20 % con respecto al testigo (Figura 4). En la lectura final (30 ddt) del tamaño de la raíz, la mayoría de las dosis estimularon el crecimiento de la misma entre 17 y 38 %. En contraste, la dosis de 450 Gy disminuyó este parámetro en 10%, con respecto al testigo.

Los resultados anteriores sugieren que existen dosis específicas e intermedias de radiación que estimulan, y otras que disminuyen el crecimiento de la raíz, lo que podría estar relacionado con la especie, el estado fisiológico de la semilla y contenido de humedad (Jan *et al.*, 2012; Araújo *et al.*, 2016; Majeed *et al.*, 2017). En el caso del efecto positivo de la radiación en la formación de raíces es que favorece el desarrollo de la plántula (Hernández-Muñoz *et al.*, 2017); mientras que, el negativo es que dosis altas (*i.e.*, 450, 500 Gy) dañan los órganos celulares (mitocondria y cloroplastos) y componentes bioquímicos (Ali *et al.*, 2015); por lo tanto, los cambios pueden aparecer en varias etapas del desarrollo del individuo como división celular anormal, muerte celular, falta o fallas de tejidos y órganos y la reducción del crecimiento de la planta (Lagoda, 2011; Songsri *et al.*, 2011, Thole *et al.*, 2011); asimismo, inactivan el mecanismo de defensa de las plantas para hacer frente al daño causado por la radiación (Lagoda, 2011).



**Figura 3.** Diámetro de tallo de la plántula M<sub>1</sub> de biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]) en sustrato, provenientes de semillas irradiadas con diferentes dosis de rayos gamma <sup>60</sup>Co. D. Ini. = Diámetro a los 20 ddt. D. fin. = Diámetro a los 30 ddt. DMS<sub>D. ini.</sub> = 0.83. C.V.<sub>D. ini.</sub> (%) = 14. DMS<sub>D. fin.</sub> = 0.78. C.V.<sub>D. fin.</sub> (%) = 13. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

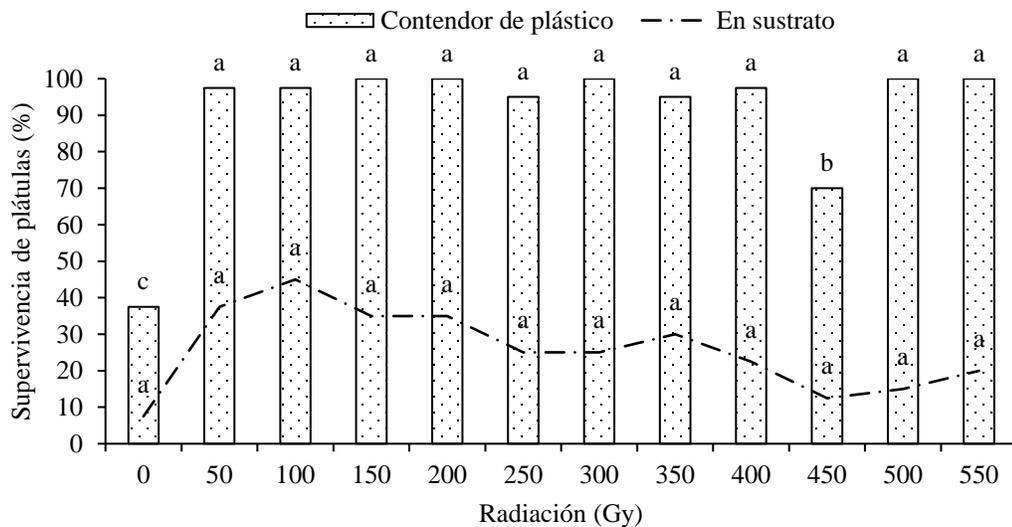


**Figura 4.** Longitud de la raíz de la plántula  $M_1$  de biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]) provenientes de semillas irradiadas con diferentes dosis de rayos gamma  $^{60}\text{Co}$ . L. R. ini. = Longitud de raíz a los 20 ddt. L. R. fin. = Longitud de raíz a los 30 ddt.  $\text{DMS}_{\text{L.R. ini.}} = 0.57$ .  $\text{C.V.}_{\text{L.R. ini.}} (\%) = 10$ .  $\text{DMS}_{\text{L.R. fin.}} = 1.07$ .  $\text{C.V.}_{\text{L.R. fin.}} (\%) = 11$ . Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

### Supervivencia de plántulas

La aplicación de rayos gamma con  $^{60}\text{Co}$  a las semillas afectó significativamente ( $p \leq 0.05$ ) la supervivencia de plántulas en contenedor de plástico. Todos los tratamientos de irradiación presentaron aumentos en la supervivencia (70 a 100%) de plántulas con respecto al testigo (37%), siendo superado hasta en 63% con la

mayoría de las dosis, a excepción de las dosis de 450 Gy que superó al testigo en 33%. En contraste, la supervivencia en sustrato no fue diferente entre plántulas  $M_1$  y el testigo ( $P \geq 0.05$ ) (Figura 5), ya que el aumento proporcional de la dosis de rayos gamma no afectó el establecimiento de la plántula, ni se observó un patrón definido.



**Figura 5.** Supervivencia (%) de plántulas  $M_1$  de biznaga dulce (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto [C Mex.]) provenientes de semillas irradiadas con diferentes dosis de rayos gamma  $^{60}\text{Co}$ , establecidas en contenedor (c.p.) (a los 30 ddt) y tezontle (S.S.) (a los 20 ddt).  $\text{DMS}_{\text{C.P.}} = 22.20$ ;  $\text{C.V.}_{\text{C.P.}} (\%) = 10$ .  $\text{DMS}_{\text{S.S.}} = 42.55$ ;  $\text{C.V.}_{\text{S.S.}} (\%) = 66$ . Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

En la Figura 5, se observa que cualquier dosis favoreció la supervivencia de la plántula, esta respuesta se ha relacionado con alteraciones en el metabolismo de la plántula, principalmente en compuestos como auxinas, ácido ascórbico, clorofila y proteínas, los cuales pueden estimular el crecimiento de las plántulas (El-Beltagi *et al.*, 2011; Ahuja *et al.*, 2014). También, se ha señalado que la supervivencia aumenta cuando la plántula presenta un rápido crecimiento de raíces (Hernández-Muñoz *et al.*, 2017), tal y como se observó en la presente investigación, donde la mayoría de las plántulas provenientes de semillas irradiadas presentaron mayor longitud de raíz que aquellas del testigo (Figura 4).

Es importante mencionar que el comportamiento de los parámetros morfológicos y fisiológicos de las plantas por la radiación gamma va a depender del nivel de radiación, la especie y su constitución genética, y el tipo de daño (Deshpande *et al.*, 2010; Anbarasan *et al.*, 2013; Rajarajan *et al.*, 2016). En el caso de dosis altas, sus efectos por los radicales libres (*i.e.*, H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) pueden inhibir funciones vitales para las células (*i.e.*, síntesis de proteínas, actividad enzimática, división celular), lo cual puede provocar la muerte de algunas células e incluso de la plántula al inicio de su crecimiento o un tiempo posterior al tratamiento de radiación (Chandrashekar, 2014). Por ejemplo, plantas de pasto expuestas a 600 Gy presentaron un comportamiento normal al inicio de su crecimiento; sin embargo, no fueron capaces de sobrevivir más de 34 días después del trasplante. Este mismo efecto también lo reportó Marcu *et al.* (2013), quienes encontraron que las plántulas de maíz que emergieron de semillas irradiadas con dosis mayores de 500 Gy, no fueron capaces de sobrevivir más de 10 días. En este sentido, se ha reportado que las plantas crecen sin afectaciones en una etapa temprana de vida, pero conforme avanza el tiempo y la edad de la planta, la supervivencia comienza a decrecer, probablemente por los daños que ocasionan los radicales libres a los diferentes organelos de la célula e incluso a las moléculas de ADN y a la incapacidad de repararlos o por el aumento de la tasa de respiración de la planta (Cheng *et al.*, 2010). Por último, es importante resaltar que las tasas de letalidad o porcentajes de supervivencia obtenidas en condiciones de laboratorio pueden diferir considerablemente de las observadas en condiciones de campo, debido a la posible aparición de estrés ambiental en las fases de crecimiento de la planta u otros factores.

## CONCLUSIONES

La irradiación con rayos gamma mejoró la germinación de semillas de *E. platyacanthus* hasta en 80%. Sin embargo, algunas características del vigor en las plántulas M<sub>1</sub> de *E. platyacanthus* presentaron un comportamiento diferente con respecto al testigo en

determinada edad, de manera tal que la altura de plántula aumentó hasta en 12% a los 20 días después de trasplante con dosis de 150 a 250 y de 400 y 450 Gy, respectivamente; mientras que, el crecimiento de la raíz se inhibió en 20% con 500 Gy a los 20 dds y en 10% con 450 Gy a los 30 dds. La irradiación de semilla de *E. platyacanthus* con rayos gamma incrementó la supervivencia de plantas M<sub>1</sub> en contenedor de 33 a 63%.

## Agradecimientos

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México, y al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares en México por los fondos y facilidades para el desarrollo de la presente investigación.

**Funding.** This research was conducted with funds from Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

**Conflict of interest.** The authors declare that there is no conflict of interest. The funding sources had no role in the design of the study, in the collection, analysis, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

**Compliance with ethical standards.** Does not apply.

**Data availability.** The authors confirm that all data underlying the findings are fully available without restriction upon reasonable request to the corresponding author, Juan Elias Sabino López (juanelias\_sab@hotmail.com). All relevant data necessary to replicate this study are described in the paper.

**Author contribution statement (CRediT).** O. M. Antúñez-Ocampo - Data curation, formal análisis and writing of manuscript; G. A. Castañeda-Zárate – Methodology and data curation, J. E. Sabino-López - Validation, writing-review and editing; S. Cruz-Izquierdo - Funding acquisition, methodology, supervision, validation, writing-review and editing; M. Espinosa-Rodríguez - Supervision, validation, writing-review and editing.

## REFERENCIAS

- Ahuja, S., Kumar, M., Kumar, P., Gupta, V. K., Singhal R. K., Yadav, A. and Singh, B., 2014. Metabolic and biochemical changes caused by gamma irradiation in plants. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300, pp. 199-212. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-2969-5>.
- Akgun, I. and Tosun M., 2004. Agricultural and cytological characteristics of M<sub>1</sub> perennial rye (*Secale montanum* Guss.) as affected by the

- application of different doses of gamma rays. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7, pp. 827-833.
- Akshatha, K. and Chandrashekar, R., 2014. Gamma sensitivity of forest plants of Western Ghats. *Journal of Environmental Radioactivity*, 132, pp. 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.006>.
- Ali, H., Ghori, Z., Sheikh, S. and Gul, A., 2015. Effects of gamma radiation on crop production. En: *Crop Production and Global Environmental Issues*. K. R. Hakeem (ed.). Springer International Publishing. Springer, Cham. Suiza. pp. 27-78. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_2).
- Álvarez, A., Ramírez, R., Chávez, L., Camejo, Y., Licea, L., Porras, E. and García, B., 2011. Efectos del tratamiento de semillas con láser de baja potencia sobre el crecimiento y rendimiento en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *ITEA*, 107, pp. 290-299.
- Álvarez, F. A., Chávez, S. L., Ramírez, F. R., Estrada, P. W., Estrada, L. Y. and Maldonado, R. A., 2013. Efecto del tratamiento de semillas con bajas dosis de rayos X en plantas de pimiento (*Capsicum annum* L.). *Nucleus*, 53, pp. 14-18.
- Álvarez, F. A., Chávez Suárez, L., Ramírez F. R., Pompa B. R. and Estrada, P. W., 2012. Indicadores fisiológicos en plántulas de *Solanum lycopersicum* L., procedentes de semillas irradiadas con rayos X. *Biotecnología Vegetal*, 12, pp. 173-177. <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/172/html>.
- Álvarez-Holguín, A., Morales-Nieto, C. R., Avendaño-Arrazate, C. H., Santellano-Estrada, E., Melgoza-Castillo, A., Burrola-Barraza, M. E. and Corrales-Lerma, R., 2018. Dosis letal media y reducción media del crecimiento por radiación gamma en pasto africano (*Eragrostis lehmanniana* Ness). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5, pp. 81-88. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1268>.
- Anbarasan, K., Rajendran, R. Sivalingam, D., Anbazhagan, M. and Chidambaram A., 2013. Effect of gamma radiation on seed germination and seedling growth of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Var. TMV3. *International Journal Research in Botany*, 3, pp. 27-29.
- Antúñez-Ocampo, O. M., Cruz-Izquierdo, S., Sandoval-Villa, M., Santacruz-Varela, A., Mendoza-Onofre, L. E. and De la Cruz-Torres, E., 2017. Variabilidad inducida en caracteres fisiológicos de *Physalis peruviana* L. mediante rayos gamma <sup>60</sup>Co aplicados a la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40, pp. 211-218.
- Araújo, S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D. and Balestrazzi, A., 2016. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science*, 7, pp. 646. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>.
- Ayala-Cordero, G., Terrazas, T., López-Mata, L. and Trejo, C., 2004. Variación en el tamaño y peso de la semilla y su relación con la germinación en una población de *Stenocereus beneckeii*. *Interciencia*, 29, pp. 692-697.
- Baskin, C. C. and Baskin, J. M., 2014. Seed: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination. *Elsevier Inc.*, pp. 600.
- Bravo-Hollis, H. and Scheinvar, L., 1999. El interesante mundo de las cactáceas. Fondo de Cultura Económica. UNAM. México. pp. 233.
- Canul-Ku, J., García-Pérez, F., Campos-Bravo, E., Barrios-Gómez, E. J., De la Cruz-Torres, E., García-Andrade, J. M., Osuna-Canizalez, F. J. and Ramírez-Rojas, S., 2012. Efecto de la irradiación sobre nochebuena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) en Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3, pp. 1495-1507.
- Castillo-Martínez, C. R., De la Cruz-Torres, E., Carrillo-Castañeda, G. and Avendaño-Arrazate, C. H., 2015. Inducción de mutaciones en crisantemo (*Dendranthema grandiflora*) usando radiación gamma y etil metano sulfonato. *Agroproductividad*, 8, pp. 60-64.
- Chandrashekar, K. R. A. 2014. Gamma sensitivity of forest plants of Western Ghats. *Journal Environmental Radioactivity*, 132, pp. 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.006>
- Chen, Y. P., Liu, Y. J., Wang, X. L., Ren, Z. Y. and Yue, M., 2005. Effect of microwave and He-Ne laser on enzyme activity and biophoton emission of *Isatis indigotica* Fort. *Journal of Integrative Plant Biology*, 47, pp. 849-855.

- <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2005.00107.x>
- Cheng, L., Yang, H., Lin, B., Wang, Y., Li, W., Wang, D. and Zhang, F., 2010. Effect of gamma-ray radiation on physiological, morphological characters and chromosome aberrations of minitubers in *Solanum tuberosum* L. *International Journal of Radiation Biology*, 86, pp. 791-799. <https://doi.org/10.3109/09553002.2010.484478>.
- De la Fé, C., Romero, M., Ortiz R. and Ponce M., 2000. Radiosensibilidad de semillas de soya a los rayos gamma  $^{60}\text{Co}$ . *Cultivos Tropicales*, 21, pp. 43-47.
- De Micco, V., Arena, C., Pignalosa, D. and Durante, M., 2011. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants. *Radiation and Environmental Biophysics*, 50, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>.
- Deshpande, K. N., Mehetre S. S. and Pingle, S. D., 2010. Effect of different mutagens for induction of mutations in mulberry. *Asian Journal of Experimental Biological Sciences*, 1, pp. 104-108.
- Díaz, L. E., 2020. Estudio de radiosensibilidad de chía negra (*Salvia hispanica* L.) (Lamiaceae), bajo siete niveles de irradiación gamma. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle*, 14, pp. 37-48. <http://doi.org/10.26457/recein.v14i54.2695>.
- El-Beltagi, H.S., Ahmed, O. K., and El-Desouky, W., 2011. Effect of low doses  $\gamma$ -irradiation on oxidative stress and secondary metabolites production of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) callus culture. *Radiation Physics and Chemistry*, 80, pp. 968-976.
- Flores, J. and Jurado, E., 2011. Germinación de especies de cactáceas en categoría de riesgo del desierto chihuahuense. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2, pp. 59-70.
- Flores-Martínez, A., Manzanero, G., Rojas-Aréchiga, M., Mandujano, M. C. and Golubov, J., 2008. Seed age germination responses and seedling survival of an endangered cactus that inhabits cliffs. *Natural Areas Journal*, 28, pp. 51-57.
- Goettsch, B., Hilton-Taylor, C., Cruz-Piñón, G., Duffy, J. P., Frances, A., Hernández, H. M., Inger, R., Pollock, C., Schipper, J., Superina M., Taylor, N. P., Tognelli, M., Abba, A. M., Arias, S., Hilda J. Arreola-Nava, H. J., Baker, M. A., Bárcenas, R. T., Barrios, D., Braun, P., Charles A. Butterworth, C. A., Búrquez, A., Caceres, F., Chazaro-Basañez, M., Corral-Díaz, R., Del Valle P. M., Demaio, P. H., Williams A. Duarte B. W. A., Durán, R., Faúndez, Y. L., Felger, R. S., Fitz-Maurice, B., Fitz-Maurice, W. A., Gann, G., Gómez-Hinostrosa, C., Gonzales-Torres, L. R., Griffith, M. P., Guerrero, P. C., Hammel, B., Heil, K. D., Hernández-Oria, J. G., Hoffmann, M., Ishiki I. M., Kiesling, R., Larocca, J., León-de la Luz, J. L., Loaliza S. C. R., Lowry, M., Machado, M. C., Majure, L. C., Martínez A. J. G., Martorell, C., Maschinski, J., Méndez, E., Mittermeier, R. A., Nassar, J. M., Negrón-Ortiz, V., Oakley, L. J., Ortega-Baes, P., Pin F. A. B., Pinkava, D. J., Porter, J. M., Puente-Martínez, R., Roque Gamarra, J., Saldivia P. P., Sánchez M. E., Smith, Sotomayor M. del C. J. M., Stuart, S N., Tapia M. J. L., Terrazas, T. T., Terry M., Trevisson, M., Valverde, T., Van Devender, T. R, Véliz-Pérez, M. E., Walter, H. E., Wyatt, S. A., Zappi, D., Zavala-Hurtado, J. A. and Gaston, K. J. 2015. High proportion of cactus species threatened with extinction. *Nature Plants*, 1, 15142, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.142>.
- González, C. M. and Nakayama D. H., 2015. Radioestimulación de la germinación en *Stevia rebaudiana* cultivar KH-IAN VC-142 (Eireté), mediante el empleo de rayos gamma  $^{60}\text{Co}$ . *Cultivos Tropicales*, 36, pp. 117-119.
- Hernández-Muñoz, S., Pedraza-Santos, M. E., López, P. A., De la Cruz-Torres, E., Martínez-Palacios, A., Fernández-Pavía, S. P. and Chávez-Bárcenas, A. T., 2017. Estimulación de la germinación y desarrollo in vitro de *Laelia autumnalis* con rayos gamma. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40, pp. 271-283.
- Jan, S., Parween, T., Siddiqi, T. O. and Mahmooduzzafara., 2012. Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews*, 20, pp. 17-39. <https://doi.org/10.1139/a11-021>.
- Jiménez-Sierra, C. L. and Eguiarte, L. E., 2010. Candy Barrel Cactus (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto): A Traditional Plant Resource in Mexico Subject to Uncontrolled Extraction and Browsing. *Economic Botany*, 64, pp. 99-

108. <https://doi.org/10.1007/s12231-010-9119-y>
- Kim, J. H., Baek, M. H., Chung, B. Y., Wi S. G. and Kim, J. S., 2004. Alterations in the photosynthetic pigments and antioxidant machineries of red pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings from gamma-irradiated seeds. *Journal of Plant Biology*, 47, pp. 314-321. <https://doi.org/10.1007/BF03030546>.
- Lagoda, P. J. L., 2011. Effects of radiation on living cells and plants. *In: Plant Mutation and Biotechnology*. Shu Q.Y. B. P. Forster and H. Nakagawa (eds). Plant Breeding and Biotechnology. Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. pp. 123-134. <https://doi.org/10.1079/9781780640853.0123>.
- Larrea-Alcázar, D. M. and López, R. P., 2008. Germinación de semillas de *Corryocactus melanotrichus* (K. Schum.) Britton & Rose (Cactaceae): un cactus columnar endémico de los Andes bolivianos. *Ecología en Bolivia*, 43, pp. 135-140.
- Majeed, A., Muhammad, Z., Ullah, R., Ullah Z., Ullah R., Chaudhry Z. and Siyar, S., 2017. Effect of gamma irradiation on growth and post-harvest storage of vegetables. *PSM Biological Research*, 2, pp. 30-35.
- Marcu, D., Damian, G., Cosma C. and Cristea, V., 2013. Gamma radiation effects on seed germination, growth and pigment content, and ESR study of induced free radicals in maize (*Zea mays*). *Journal of Biological Physics*, 39, pp. 625-634. <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9322-z>.
- Márquez-Guzmán, J., Collazo-Ortega, M., Martínez-Gordillo, M., Orozco-Segovia, A. and Vázquez-Santana, S., 2013. Biología de angiospermas. Facultad de Ciencias, UNAM. pp. 602.
- Mortazavi, S. M. J., Ghiassi-Nejad, M. and Ikushima, T., 2002. Do the findings on the health effects of prolonged exposure to very high levels of natural radiation contradict current ultra conservative radiation protection regulations? *International Congress Series*, 1236, pp. 19-21.
- Muckerheide, J., 2004. There has never been a time that the beneficial effects of low dose ionizing radiation were not known. Center for Nuclear Technology and Society at WPI. Radiation, Science, and Health. Worcester, MA. USA. pp. 4.
- Navarro, C. Ma., Tzompa R. and González, E. M., 2014. Propagación de *Echinocactus platyacanthus*: efectos del sustrato, viabilidad y escarificación de semillas. *Zonas Áridas*, 15, pp. 31-47.
- Norma Oficial Mexicana 059 SEMARNAT., 2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. pp. 78. [https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM\\_059\\_SEMARNAT\\_2010.pdf](https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf).
- Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H. A., Miah, G. and Usman, M., 2016. Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 30, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>.
- Olasupo, F. O., Ilori, C. O., Forster, B. P. and Bado, S., 2016. Mutagenic effects of gamma radiation on eight accessions of Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). *American Journal of Plant Sciences*, 7, pp. 339-351. <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.72034>.
- Porta, C. R. and Jiménez. E. J., 2018. Efectos de agentes mutagénicos en la germinación de semillas de aguaymanto. *Scientia Agropecuaria*, 9, pp. 231-238. <http://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.08>.
- Rajarajan, D., Saraswathi R. and Sassikumar, D., 2016. Determination of lethal dose and effect of gamma ray on germination percentage and seedling parameters in ADT (R) 47 rice. *International Journal of Advanced Biological Research*, 6, pp. 328-332.
- Ramírez, R., González, L. M., Licea, L., García, B., Porras, E. and Pérez, A., 2006. Incidencia de bajas dosis de rayos X sobre la productividad de cuatro variedades de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Alimentaria*, 314, pp. 56-64.
- Rojas-Aréchiga, M. and Batis, A. I., 2001. Las semillas de cactáceas ¿Forman bancos en el suelo?.

- Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 46, pp. 75-81.
- Sánchez-Salas, J., Flores, J. and Martínez-García, E., 2006. Efecto del tamaño de semilla en la germinación de *Astrophytum myriostigma* Lemaire. (Cactaceae), especie amenazada de extinción. *Interciencia*, 31, pp. 371-375.
- SAS Institute., 2002. SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1 - 7. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Songsri P., Suriharn B., Sanitchon J., Srisawangwong S. and Kesmala T., 2011. Effects of Gamma radiation on germination and growth characteristics of physic nut (*Jatropha curcas* L.). *Journal of Biological Sciences*, 11, pp. 268-274.
- Thole, V., Peraldi, A., Worland B., Nicholson, P., Doonan, J. H. and Vain, P., 2011. T-DNA mutagenesis in *Brachypodium distachyon*. *Journal of Experimental Botany*, 10, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1093/jxb/err333>.
- Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A. and Tejeda-Sartorius, O., 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, pp. 863-876.