



APLICACIÓN DE RADIACIÓN GAMMA EN SEMILLAS DE TRES GENOTIPOS DE MAÍZ NATIVO

APPLICATION OF GAMMA RADIATION TO SEEDS OF THREE NATIVE MAIZE GENOTYPES

Rosa Isela Valencia-Magaña¹, Eulogio de la Cruz-Torres², Rosario Yadira Avalos-Barajas¹, Juan Carlos Álvarez-Hernández³, Ariel Villalobos-Olivera⁴ y Gamaliel Valdivia-Rojas^{1*}

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes, Los Reyes, Michoacán, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Biología, Ocoyoacac, Estado de México, México. ³Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de Apatzingán, Antúnez, Michoacán, México. ⁴Universidad de Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez", Ciego de Ávila, Cuba.

*Autor de correspondencia (gamaxew@gmail.com)

RESUMEN

La mutagénesis inducida es una de las vías directas para obtener de manera rápida nuevos genotipos mediante el uso de irradiaciones o agentes mutagénicos. La utilización de radiaciones gamma es una vía de mutaciones inducidas empleada con frecuencia y con éxito. La presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de la radiación gamma sobre las semillas de genotipos locales de maíz. Se utilizaron tres genotipos: Oax 01, de Oaxaca, y Mich 01 A y Mich 01 B, de Michoacán, México. Los genotipos se irradiaron directamente con las dosis de 0 (Control), 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 Gy. Se registró el porcentaje de germinación a los 7 días, la emergencia, variables morfológicas y supervivencia a los 14 días. Se determinó la dosis letal media, cuyo resultado fue de 320 Gy para el genotipo Oax 01, de 215 Gy para Mich 01 A y de 231 Gy para Mich 01 B. Las mayores afectaciones en la supervivencia fueron a partir de 250 Gy para el genotipo Oax 01, de 150 Gy para Mich 01 A y Mich 01 B, siendo más severas las dosis de 400-550 Gy en los tres genotipos. La germinación en los genotipos Oax 01 y Mich 01 A, tuvo porcentajes superiores al 90 % en todas las dosis, mientras que Mich 01 B mantuvo tendencia a la reducción. Los genotipos mostraron reducción en la longitud de la planta y de la hoja, con incremento en longitud de la raíz, volumen de raíz y la masa fresca de la planta como consecuencia de irradiación leve.

Palabras clave: Emergencia, germinación, irradiación, supervivencia, variables morfológicas.

SUMMARY

Induced mutagenesis is one of the direct routes to obtain new genotypes rapidly by using irradiations or mutagenic agents. The use of gamma radiation is a frequently and successfully used pathway for induced mutations. This research aimed to determine the effect of gamma radiation on seeds of local maize genotypes. Three local genotypes were used: Oax 01 from Oaxaca, and Mich 01 A and Mich 01 B from Michoacan, Mexico. Genotypes were directly irradiated at doses of 0 (control), 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 and 500 Gy. The percentage of germination at 7 days, and emergence, morphological traits and survival at 14 days. The median lethal dose was determined, resulting in 320 Gy for genotype Oax 01, 215 Gy for Mich 01 A and 231 Gy for Mich 01 B. The largest effects in survival were from 250 Gy for Oax 01 and 150 Gy for both Mich 01 A and Mich 01 B, with doses of 400-550 Gy being more severe in all three genotypes. Germination in the genotypes Oax 01 and Mich 01 A exceeded 90% at all doses, while Mich 01 B showed

a consistent decreasing trend. All genotypes showed reductions in plant and leaf length, with increases in root length, root volume, and plant fresh matter as a result of slight irradiation.

Index words: Emergence, germination, irradiation, morphological traits, survival.

INTRODUCCIÓN

México es un país megadiverso, y gran parte de su población se dedica a la agricultura para sostener su alimentación (Jaime-Vargas, 2024). Este país es considerado centro de origen del maíz (*Zea mays* L.) y se posiciona como el octavo productor a nivel mundial de este cultivo, ya que este grano es el alimento básico de la población, sobre todo la de bajos ingresos (FAO, 2025). La diversidad genética del maíz en el territorio mexicano se ha documentado con la presencia de 59 razas nativas que se han agrupado con base en su adaptabilidad y sus caracteres morfológicos y genéticos en siete grupos o complejos raciales que son: Cónico, Sierra de Chihuahua, Ocho Hileras, Chapalote, Tropicales Precoces, Dentados Tropicales y Maduración Tardía (Sanchez *et al.*, 2000). Todos estos maíces, en diferente proporción, son esenciales en la alimentación y la cultura de los pueblos mexicanos (Hernández-Santoyo y Ayala-Ortiz, 2024).

El maíz, al ser el cultivo más importante destinado a la alimentación humana, se encuentra en proceso continuo de mejoramiento genético (Preciado-Ortiz y Vázquez-Carrillo, 2024). Este proceso continuo tiene como propósito que los cultivos expresen su máximo potencial en todas sus características de interés agronómico y adaptación al cambio climático (Ocampo *et al.*, 2025). Recientemente, en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se reformaron y adicionaron diversas disposiciones en los artículos 4º y 27, orientadas a la conservación y protección

de los maíces nativos (SG, 2025), lo que refuerza la utilización de los maíces nativos dentro de la política agroalimentaria del país.

La mutagénesis inducida es una de las vías directas para obtener nuevos genotipos mediante el uso de irradiaciones y agentes mutagénicos (Bharath *et al.*, 2024). La utilización de radiaciones gamma es una vía de mutaciones inducidas empleada con frecuencia y con mucho éxito (Khare *et al.*, 2025). Una de las principales ventajas de la irradiación radica en la obtención rápida de cultivares de alta adaptación (Gupta y Sharma, 2025). La determinación de la radiosensibilidad de los tejidos se logra exponiendo el material vegetal a diferentes intensidades (Gálvez-Marroquín *et al.*, 2023).

Las semillas son el material biológico ideal para las irradiaciones, ya que en su estado de latencia sufren la menor cantidad de daños biológicos durante el proceso (Khare *et al.*, 2025). En semillas de maíz se han realizado estudios para determinar el efecto de la irradiación (Rafiuddin *et al.*, 2015; Yadav *et al.*, 2019; Zafar *et al.*, 2020). En estudios recientes se ha determinado la dosis letal media (LD_{50}) para distintos genotipos de maíz, lo que ayuda a optimizar las dosis para mutagénesis (Al-Sayed *et al.*, 2025); además, se ha profundizado en el efecto hormético de dosis bajas de radiación gamma, que produce un incremento en el índice mitótico de las células de las raíces, un mejor crecimiento de la planta (Al-Sayed *et al.*, 2025), mayor tolerancia al estrés hídrico (Katiyar *et al.*, 2022) y resistencia a plagas (Abozahra *et al.*, 2025; Afram *et al.*, 2024).

Los maíces nativos son poco utilizados en los programas de mejoramiento genético por mutagénesis, debido a la preferencia del mercado por híbridos comerciales de alto rendimiento. Esta tendencia ha llevado a que muchas variedades tradicionales permanezcan subexplotadas y en riesgo de erosión genética. Los maíces nativos poseen una enorme diversidad genética, con características únicas de adaptación a climas, suelos y condiciones de estrés, por lo que la aplicación de mutagénesis inducida sería altamente beneficioso.

La utilización de mutagénesis con radiaciones gamma en maíces nativos permitiría inducir variabilidad genética adicional sin perder su base adaptativa. Estos aspectos permitirían la generación de líneas con mejoras en tolerancia a sequía, plagas o rendimiento, al mismo tiempo que se conserva y revaloriza el germoplasma local. El objetivo de esta investigación fue conocer la respuesta en etapas tempranas a la aplicación de radiación gamma en semillas de tres genotipos de maíz nativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y material genético

El estudio se realizó en el Laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes, ubicado en Los Reyes Michoacán, México. Se utilizaron semillas de tres genotipos de maíz colectadas en el año 2022, uno de la producción local colectado en el municipio de Santiago Ixtayutla, Oaxaca, México, mismo que se distingue por su color amarillo, del grupo Tropical Precoz (ciclo de 90 días) y dos genotipos del estado de Michoacán, ambos de color blanco y maduración tardía (ciclo de 210 días). Se utilizó 1 kg de semilla por genotipo, las cuales presentaban humedad de 12 a 13 % y una masa de 1000 semillas (entre 270 y 286 g), sin signos visuales de afectación por plagas.

Aplicación de los tratamientos

Las semillas se colocaron en bolsas de polietileno (Ziploc) de 17.7 × 18.8 cm para ser irradiadas con rayos gamma en las siguientes dosis: 0 (control), 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 Gy. Cada dosis constituyó un tratamiento, el cual fue replicado cuatro veces. Las semillas fueron tratadas en un irradiador (LGI-01 Transelektro, Holding Ltd, Budapest, Hungría) con una potencia de 13.71 Gy min⁻¹ en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ubicado en Ocoyoacac, Estado de México.

Se sembraron 100 semillas irradiadas por cada tratamiento, divididas en cuatro repeticiones de 25 semillas, en bandejas de plástico con tapas de 22 cm de largo × 25 cm de ancho, utilizando sustrato comercial Peat Moss humedecido (Davoudi y Tagizadeh, 2020).

Cálculo de la dosis letal media (DL_{50})

Para el cálculo de la dosis letal media (DL_{50}) se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado. Se utilizaron 100 semillas de cada dosis de irradiación, las cuales fueron puestas a germinar en placas de Petri de 10 cm de diámetro, a razón de 20 semillas por placa, la unidad experimental consistió en una semilla o una planta. En condiciones de laboratorio, las semillas se colocaron sobre papel filtro humedecido con 5 mL de agua destilada, a una temperatura de 25 ± 2 °C y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 de oscuridad. A los 7 d después de la siembra se determinó el porcentaje de germinación (Zafar *et al.*, 2020), para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$PS = (S/N) \times 100$$

Donde: PS es el porcentaje de supervivencia, S el número

de semillas vivas o viables y N el número total de semillas puestas a germinar.

El porcentaje de supervivencia de las semillas se utilizó para el cálculo de la DL_{50} . Para la determinación de esta variable se empleó un modelo de regresión lineal (Álvarez-Holguín *et al.*, 2018; Angeles-Espino *et al.*, 2013). Este modelo permite, mediante el ajuste de la ecuación de la recta, calcular la DL_{50} despejando de la variable X, que representa los valores de irradiación, considerando $Y = 50$, correspondiente al 50 % de supervivencia de las semillas a los 7 d de germinación.

Determinación de germinación, emergencia e indicadores morfológicos

Se registró la germinación de las semillas a los 7 d y la emergencia a los 14 días según Davoudi y Tagizadeh (2020), a los 14 días después de la siembra se evaluó la longitud de la planta (cm), longitud de la hoja (cm), longitud de la raíz (cm), el volumen de raíz (cm^3) y masa fresca de la planta (g) en las plantas emergidas de las semillas irradiadas, según Al-Sayed *et al.* (2025).

Análisis estadístico de los datos

El procesamiento estadístico de los datos se realizó mediante el paquete estadístico IBM SPSS versión 25. Se demostró que los datos de cada tratamiento cumplían con los supuestos de distribución normal y homogeneidad de varianzas, según las pruebas Kolmogorov-Smirnov y Levene respectivamente para $P \leq 0,05$. Se realizaron pruebas paramétricas (ANOVA de un factor) y para detectar diferencias estadísticas se aplicó la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) Los datos en porcentaje fueron transformados según la función $y' = 2 \arcsen \sqrt{(y/100)}$. El tipo de procesamiento y transformación realizada en cada caso aparecen reflejados en los cuadros y figuras en Resultados y Discusión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Supervivencia

En las Figura 1A, B y C se muestra la reducción del porcentaje de germinación de las semillas de los tres genotipos de maíz, a medida que se incrementa la dosis de irradiación gamma. Las principales afectaciones en la supervivencia se presentaron a partir de 250 Gy para el genotipo Oax 01, de 150 Gy para el genotipo Mich 01 A y de 150 Gy para el genotipo Mich 01 B, que tuvieron las mayores pérdidas de semillas (Figura 1A). Los efectos más severos se alcanzaron en las semillas tratadas con las dosis de 400 a 550 Gy en los tres genotipos.

La reducción de la supervivencia de plantas puede atribuirse principalmente a daños en el ADN a consecuencia de la radiación gamma (Bharath *et al.*, 2024; Llaven-Valencia *et al.*, 2025). En semillas de soya *Glycine max* L Merrill) destacan mayores afectaciones en la supervivencia a medida que se incrementaron las radiaciones Gamma (Gálvez, 2017; Com. Pers.)¹.

Dosis letal media

La DL_{50} se estimó a los 320 Gy para el genotipo Oax 01 (Figura 1A), a los 231 Gy para el genotipo Mich 01 A (Figura 1B) y a los 150 Gy para el genotipo Mich 01 B (Figura 1C). Según los estudios de Yadav *et al.* (2019), Zafar *et al.* (2020) y Al-Sayed *et al.* (2025), donde se expusieron semillas de maíz a radiaciones gamma, la DL_{50} varió de 200 a 500 Gy, resultados que son similares en su parte baja a la DL_{50} obtenida en los genotipos aquí evaluados, pero en el extremo alto resultan excesivos en comparación con los resultados de la presente investigación.

Porcentaje de germinación y emergencia

Por otra parte, en la Figura 2 se muestra la germinación de las semillas, se pudo observar que no hubo efecto significativo en los genotipos Oax 01 (Figura 2A) y Mich 01 A (Figura 2C), los cuales tuvieron porcentajes de germinación superiores al 90 % en todas las dosis, sin mostrar diferencias estadísticas. En contraste, el genotipo Mich 01 B (Figura 2E), sí mantuvo una tendencia a la reducción a medida que aumentaron las dosis de irradiación.

En el caso de la emergencia, se pudo apreciar una tendencia similar a la supervivencia (Figuras 1A, B, C y 2B, D, F). Esta variable disminuyó para los tres genotipos a medida que aumentaron las dosis de irradiación gamma. Las mayores afectaciones se presentaron en el genotipo Oax 01 a partir de 250 Gy (Figura 2A), en el genotipo Mich 01 A a partir de 200 Gy (Figura 2B) y en Mich 01 B a partir de 100 Gy (Figura 2C). A partir de estas dosis, el porcentaje de emergencia de las semillas fue inferior de 80 %.

La radiación provoca rupturas en las cadenas de ADN, lo que puede resultar en mutaciones (Yadav *et al.*, 2019). Si estas mutaciones son perjudiciales, pueden afectar la viabilidad y el desarrollo de las plantas (Davoudi y Tagizadeh, 2020). Las semillas irradiadas a dosis elevadas pueden presentar una menor tasa de germinación y un desarrollo inicial deficiente de las plántulas (Mukri *et al.*, 2022); en algunos casos, el daño severo al ADN puede

¹Gálvez M. L. A. (2017) Mutaciones inducidas mediante radiaciones gamma para caracteres de rendimiento en soya (*Glycine max* L Merrill) genotipo H10-2416 y variedad Huasteca 400. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 104 p.

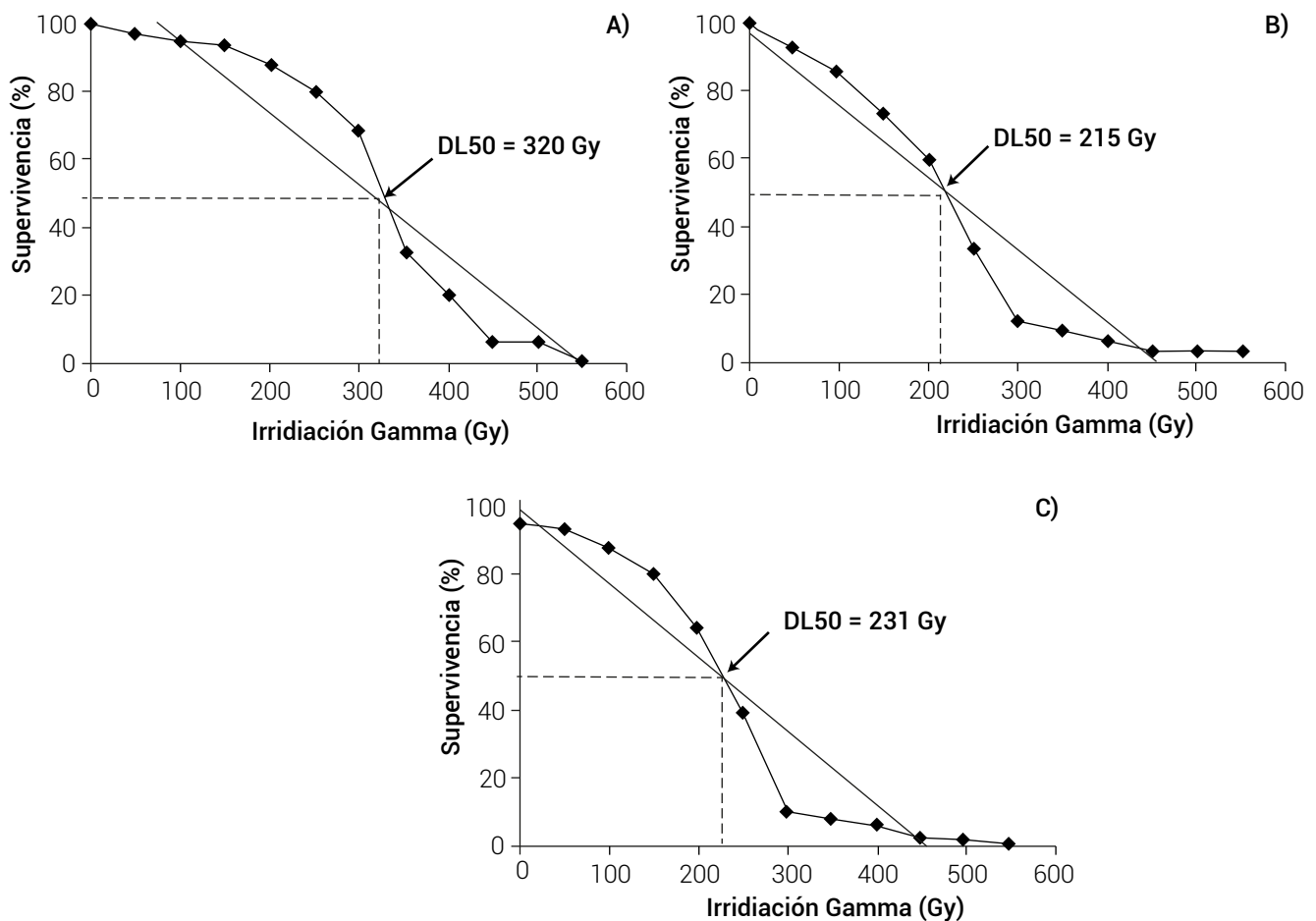


Figura 1. Efecto de la radiación gamma sobre la supervivencia de semillas de maíz. DL50: dosis letal media con base en análisis de regresión lineal. A) Genotipo Oax 01, B) Genotipo Mich 01 A, C) Genotipo Mich 01 B. Cada dato representa medias para $n = 100$.

inducir la apoptosis (muerte celular programada), lo que reduce la cantidad de semillas viables (Juárez y Palacios, 2023). Estos efectos pudieran estar relacionados con baja emergencia en las dosis superiores a 200 Gy.

Variables morfológicas

En las variables morfológicas, la radiosensibilidad de las semillas fue específica para cada uno de los genotipos (Cuadro 1). Las principales variaciones para el genotipo Oax 01 estuvieron en el intervalo de 50 a 350 Gy, para Mich 01 A de 150 a 250 Gy y para Mich 01 B de 50 a 250 Gy. Estas diferencias indican que cada genotipo responde de manera distinta a la irradiación gamma, mostrando intervalos específicos en los que se producen los cambios más significativos en su desarrollo morfológico.

Las principales variaciones consistieron para todos los genotipos en la reducción de la longitud de la planta y de la hoja, y simultáneamente, se observó un incremento en la

longitud de la raíz, el volumen de la raíz y la masa fresca de la planta, lo que sugiere una respuesta compensatoria al estrés inducido por la radiación. Estos resultados reflejan la importancia de ajustar las dosis de irradiación según el genotipo, para aprovechar la variabilidad inducida sin comprometer la supervivencia y el crecimiento inicial de las plantas.

Estos resultados concuerdan con lo reportado en algunas investigaciones, en el sentido de que la irradiación a dosis altas, mayores de 300 Gy, genera disminución en la germinación de semillas, reducción del crecimiento, longitud de la raíz, producción de metabolitos primarios como la clorofila y producción de semilla (Avenida-Arrazate *et al.*, 2021; Rubio-Ochoa *et al.*, 2025).

Los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con estudios previos que indican que las plantas expuestas a dosis controladas de radiación gamma pueden presentar un aumento en la altura y la

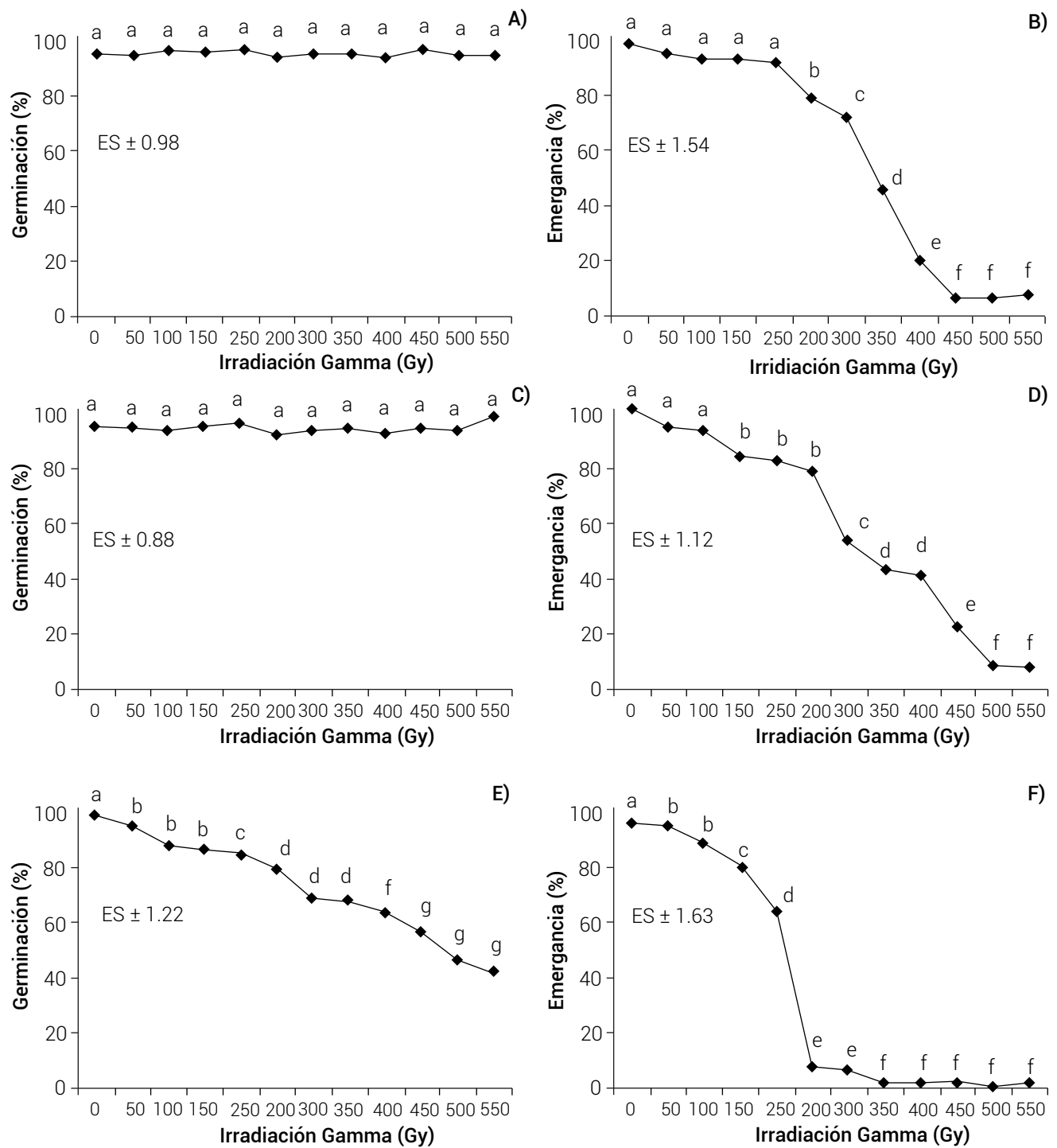


Figura 2. Efecto de la irradiación gamma en la germinación y la emergencia, respectivamente, de semillas de maíz. A y B) Genotipo Oax 01, C y D) Genotipo Mich 01 A, E y F) Genotipo Mich 01 B. Medias con letras diferentes indican significación (Tukey, $P \leq 0.05$). ES: error estándar de la media. Cada dato representa la media para $n = 100$.

Cuadro 1. Variables morfológicas de las plántulas obtenidas de la germinación de semillas de maíz locales expuestas a irradiaciones gamma.

Genotipos	Variables Morfológicas	Dosis de irradiación Gamma (Gy)													
		0 (Control)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550		
Oax 01	Longitud de plántula (cm)	22.25±0.88a	20.26±0.99b	20.48±0.94b	16.250±0.74c	16.58±0.72c	11.22±0.79d	11.85±0.77d	10.48±0.78d	2.2±0.18e	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f
	Longitud de hoja (cm)	10.22±0.24a	8.26±0.18b	8.18±0.16b	6.98±0.14c	6.84±0.13c	3.88±0.02d	3.97±0.12d	3.84±0.11d	0.88±0.08e	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f
	Longitud de raíz (cm)	4.88±0.14d	5.25±0.18c	8.64±0.18b	6.98±0.14c	6.84±0.13c	3.88±0.02d	9.24±0.26a	9.19±0.18a	0.92±0.01e	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f
	Volumen de raíz (cm ³)	18.22±0.18c	20.22±0.32b	42.22±0.78a	44.22±0.88a	42.7±0.78a	42.8±0.86a	41.55±0.79a	44.22±0.82a	0.88±0.02d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Masa fresca de raíz (cm ³)	4.78±0.01c	6.88±0.14b	6.77±0.12b	6.84±0.13b	7.42±0.18a	6.94±0.65b	6.79±0.12b	6.22±0.15b	1.88±0.02d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Masa fresca de la plántula (g)	18.25±0.12a	18.12±0.11a	17.88±0.13a	14.18±0.74b	15.56±0.72b	15.22±0.79b	8.24±0.11c	7.88±0.10c	9.88±0.10c	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d
Mich 01 A	Longitud de plántula (cm)	10.22±0.02a	10.14±0.04a	10.24±0.03a	7.92±0.14b	7.84±0.13b	7.88±0.02b	4.22±0.01c	3.88±0.01c	3.98±0.01c	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d
	Longitud de hoja (cm)	5.25±0.18b	5.46±0.20b	5.32±0.22b	8.22±0.12a	7.89±0.11a	8.74±0.10a	4.88±0.14c	4.45±0.18c	4.52±0.16c	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f	0±0.00f
	Longitud de raíz (cm)	10.96±0.15c	10.18±0.14c	10.22±0.13c	16.22±0.32b	25.44±0.18a	22.26±0.22a	12.18±0.18c	10.22±0.15c	11.28±0.16c	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d	0±0.00d
	Volumen de raíz (cm ³)	5.12±0.12b	4.88±0.14b	5.02±0.18b	6.98±0.14a	6.84±0.13a	6.88±0.12a	4.89±0.26b	4.87±0.24b	4.22±0.22c	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Masa fresca de la plántula (g)	20.47±0.22a	18.22±0.18b	17.58±0.16b	18.12±0.16b	18.23±0.15b	10.24±0.22c	2.55±0.01d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Longitud de plántula (cm)	9.57±0.08a	7.22±0.04b	7.18±0.03b	7.28±0.03b	7.17±0.02b	4.88±0.18c	1.22±0.02d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
Mich 01 B	Longitud de hoja (cm)	3.88±0.25b	6.87±0.25a	6.75±0.24a	6.79±0.23a	6.90±0.24a	2.56±0.12c	0.88±0.08d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Longitud de raíz (cm)	14.58±0.14b	20.54±0.22a	21.45±0.24a	22.12±0.24a	21.85±0.24a	8.18±0.28c	0.96±0.12d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Volumen de raíz (cm ³)	4.89±0.2b	6.22±0.24a	6.18±0.26a	6.13±0.22a	6.24±0.25a	2.54±0.12c	0.56±0.02d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Masa fresca de plántula (g)	4.89±0.2b	6.22±0.24a	6.18±0.26a	6.13±0.22a	6.24±0.25a	2.54±0.12c	0.56±0.02d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Longitud de plántula (cm)	20.47±0.22a	18.22±0.18b	17.58±0.16b	18.12±0.16b	18.23±0.15b	10.24±0.22c	2.55±0.01d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e
	Longitud de hoja (cm)	9.57±0.08a	7.22±0.04b	7.18±0.03b	7.28±0.03b	7.17±0.02b	4.88±0.18c	1.22±0.02d	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e	0±0.00e

Medias con letras diferentes en cada hilera indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

biomasa (Rafiuddin *et al.*, 2015). En este estudio, las plantas generadas a partir de diferentes intervalos de dosis mostraron una tendencia a ser más robustas, lo que sugiere un efecto hormético de la radiación gamma. Este incremento en vigor y masa puede estar relacionado con la activación de mecanismos de crecimiento y la estimulación de la división celular en los tejidos vegetales, favoreciendo un desarrollo inicial más vigoroso a pesar del estrés inducido por la irradiación.

CONCLUSIONES

La irradiación gamma no alteró la germinación de las semillas de los genotipos Oax 01 y Mich 01 A. Las semillas del genotipo Mich 01 B fueron más sensibles a la radiación, siendo muy perjudiciales las dosis mayores de 400 Gy. La supervivencia de las plántulas en los tres genotipos muestra un comportamiento decreciente conforme aumenta la dosis de radiación, especialmente en el intervalo de 400 a 550 Gy. Las plantas de los tres genotipos presentaron una reducción en variables morfológicas, como longitud de la planta y de la hoja, en todas las dosis de radiación gamma, mientras que se registró un incremento en la longitud de la raíz, el volumen de raíz y la masa fresca de la planta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes por el financiamiento a este proyecto y al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por las facilidades otorgadas para la irradiación del material biológico.

BIBLIOGRAFÍA

- Abozahra M. S., M. A. Amin, T. C. Sarker, A. M. Abd-ElGawad and E. Aboelzezz (2025) Molecular, biophysical, and biochemical studies on irradiated *Zea mays* seeds using various sources of gamma rays for dosimetric applications. *Scientific Reports* 15:9340, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87531-5>
- Afram Y., G. Amenorpe, E. A. Bediako, A. A. Darkwa, S. F. Shandu, M. T. Labuschagne and I. K. Amegbor (2024) Induction of genetic variability of maize genotypes through radiation revealed mutants resistant to maize streak disease. *Applied Radiation and Isotopes* 207:111279, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111279>
- Al-Sayed W. M., H. H. El-Shazly, A. I. El-Nahas and A. A. Omran (2025) Cytogenetic impact of gamma radiation and its effects on growth, yield and drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). *BMC Plant Biology* 25:141, <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06111-x>
- Álvarez-Holguín A., C. R. Morales-Nieto, C. H. Avendaño-Arrazate, E. Santellano-Estrada, A. Melgoza-Castillo, M. E. Burrrola-Barraza y R. Corrales-Lerma (2018) Dosis letal media y reducción media del crecimiento por radiación gamma en pasto africano (*Eragrostis lehmanniana* Ness). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5:81-88, <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1268>
- Ángeles-Espino A., A. J. Valencia-Botín, G. Virgen-Calleros, C. Ramírez-Serrano, L. Paredes-Gutiérrez y S. Hurtado-De la Peña (2013) Determinación de la dosis letal (DL₅₀) con Co⁶⁰ en vitroplántulas de *Agave tequilana* var. Azul. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:381-386, <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.4.381>
- Avendaño-Arrazate C. H., Y. Gómez-Simuta, M. Martínez-Bolaños, I. Méndez-López, S. Ortíz-Curiel, R. Ariza-Flores, ... y D. Reyes-López (2021) Radiación gamma de ⁶⁰Co en características morfológicas y reproductivas de plantas M1 en *Coffea arabica* L. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8:e2730, <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2730>
- Bharath R. A., S. P. Prathmesh, F. Sarsu and P. Suprasanna (2024) Induced mutagenesis using gamma rays: biological features and applications in crop improvement. *OBM Genetics* 8:233, <https://doi.org/10.21926/obm.genet.2402233>
- Davoudi Y. and R. Tagizadeh (2020) The effect of gamma radiation from Cobalt-60 source on the seed germination of maize (*Zea mays*). *Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology* 41:167-174, <https://doi.org/10.24200/nst.2020.1106>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2025) La producción de maíz en México. FAOSTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <https://www.fao.org/faostat/es/#data> (Marzo 2025).
- Gálvez-Marroquín L. A., C. H. Avendaño-Arrazate, R. Ariza-Flores, Y. Gomez-Simuta, M. Martínez-Bolaños y J. A. Cruz-López (2023) Radiación gamma en semillas de jamaica para inducir variación morfológica y selección de mutantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14:27-37, <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3010>
- Gupta S. and N. Sharma (2025) Application of mutagenesis in the improvement of industrial crops. In: *Industrial Crops Improvement: Biotechnological Approaches for Sustainable Agricultural Development*. N. Kumar (ed.). Springer, Cham, Switzerland. pp:41-61, https://doi.org/10.1007/978-3-031-75937-6_3
- Hernández-Santoyo A. y D. A. Ayala-Ortiz (2024) Cultivo de maíz y soberanía alimentaria en regiones lacustres de Michoacán. Consideraciones para su fortalecimiento. *Relaciones Estudios de Historia y Sociedad* 45:136-166, <https://doi.org/10.24901/rehs.v45i178.1053>
- Jaime-Vargas J. A. (2024) El maíz amarillo como eje de la seguridad y soberanía alimentaria en México. *Estudios Sociales* 34:e241395, <https://doi.org/10.24836/es.v34i63.1395>
- Juárez C. L. A. y Z. N. Palacios N. (2023) Irradiación gamma: conceptos básicos, aplicación y efectos en mango (*Mangifera indica*) y pimientos (*Capsicum* spp.). *Aypate* 2:72-88, <https://doi.org/10.57063/ricay.v2i1.30>
- Katiyar P., N. Pandey and S. Keshavkant (2022) Gamma radiation: a potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem. *Plant Stress* 5:100089, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100089>
- Khare V., S. K. Gupta and J. G. Manjaya (2025) Exploring differential radiosensitivity in soybean genotypes exposed to gamma rays and determining optimal doses for induced mutagenesis. *Applied Radiation and Isotopes* 220:111778, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111778>
- Llaven-Valencia G., F. Castillo-González, A. Santacruz-Varela, E. García-León, S. Cruz-Izquierdo, O. M. Antúnez-Ocampo y A. Hernández-Hernández (2025) Efecto de la radiación gamma en la germinación y supervivencia de plántulas en la variedad de ajonjolí Pachequeño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 48:151-161, <https://doi.org/10.35196/rfm.2025.2.151>
- Mukri G., C. Prabha, S. Mondal, J. S. Bhat, D. Raju, R. N. Gadag, ... and J. Sharma (2022) Optimization of gamma-ray irradiation dose for induced mutagenesis in field corn (*Zea mays* L.). *Maize Journal* 11:54-60.
- Ocampo J. R., E. D. Sotelo-Ruiz, G. Salgado-Benítez, R. Flores-López, A. A. Martínez-Mendoza y H. Gil-Gil (2025) Evaluación de rendimiento de maíz para Valles Altos del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 16:e3368, <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i1.3368>
- Preciado-Ortiz R. E. y M. G. Vázquez-Carrillo (2024) Oportunidades y retos de los programas públicos y privados de mejoramiento genético de maíz en Latinoamérica, caso México. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* 16:e3383, <https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383>
- Rafiuddin, D. Dahlan, Y. Musa, B. Rasyid and M. F. Bdr (2015) Germination viability of maize M1 seeds (*Zea mays* L.) after gamma ray

- irradiation. *International Journal of Agriculture System* 1:112-118.
- Rajapandian P. and D. Dhanam (2018)** Effect of physical and chemical mutagenesis on grains germination studies, effectiveness and efficiency of maize (corn) *Zea mays* (L.). *International Journal of Current Research in Science and Technology* 4:1-7.
- Rubio-Ochoa E., E. De la Cruz-Torres, V. Olalde-Portugal, R. E. Pérez-Sánchez, J. F. Gómez-Leyva y P. A. García-Saucedo (2024)** Mutagénesis por radiación gamma para mejora genética de plantas de importancia alimentaria. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15:e3747, <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i5.3747>
- Sanchez G. J. J., M. M. Goodman and C. W. Stuber (2000)** Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59, <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- SG, Secretaría de Gobernación (2025)** DECRETO por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 4o. y 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de conservación y protección de los maíces nativos. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México. Edición 17 de octubre de 2025.
- Yadav A., B. Singh and S. D. Singh (2019)** Impact of gamma irradiation on growth, yield and physiological attributes of maize. *Indian Journal of Experimental Biology* 57:116-122.
- Zafar S. A., Maqbool and M. Naeem (2020)** Mutagenic effectiveness of gamma rays in inducing polygenic variability in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agriculture and Basic Sciences* 5:14-23.