Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex. Vol. 48 (2): 151-161, 2025

EFECTO DE LA RADIACIÓN GAMMA EN LA GERMINACIÓN Y SUPERVIVENCIA DE PLÁNTULAS EN LA VARIEDAD DE AJONJOLÍ PACHEQUEÑO

EFFECT OF GAMMA RADIATION ON GERMINATION AND SEEDLING SURVIVAL IN THE PACHEQUEÑO SESAME VARIETY

Genny Llaven-Valencia[1], Fernando Castillo-González[1]*, Amalio Santacruz-Varela[1], Elizabeth García-León[2], Serafín Cruz-Izquierdo[1], Oscar M. Antúnez-Ocampo[3] y Aidé Hernández-Hernández[4]

[1]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. [2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle del Fuerte, Juan José Ríos, Sinaloa, México. [3]INIFAP, Campo Experimental Iguala, Iguala, Guerrero, México. [4]Tecnológico Nacional de México, Campus Guasave, Guasave, Sinaloa, México.

**Autor de correspondencia* (fcastill@colpos.mx)

RESUMEN

La escasa variabilidad genética de especies introducidas representa una limitante para los programas de fitomejoramiento, siendo esto muy acentuado en ajonjolí (*Sesamun indicum* L.), esa variabilidad podría incrementarse mediante la mutagénesis. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la radiación gamma en la germinación, vigor y supervivencia de plántulas en la variedad Pachequeño de ajonjolí. Las semillas se trataron con 14 dosis de rayos gamma ^{60}Co (0, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 y 600 Gy) y se sembraron en charolas de 200 cavidades bajo un diseño completamente al azar con cinco repeticiones. Las variables evaluadas fueron porcentaje de germinación, velocidad de emergencia, altura de plántula, longitud de raíz, porcentaje de supervivencia y dosis letal media. Los resultados indicaron diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) en todas las variables. En supervivencia, las dosis aplicadas de 100, 250 y 300 Gy mostraron valores de 95.0, 95.0 y 100.0 %, respectivamente por efecto de radioestimulación con respecto al testigo (76.35 %), mientras que para la dosis de 600 Gy se observó un descenso significativo al 39.17 %. En velocidad de emergencia, los tratamientos 100, 150, 200 y 250 Gy fueron superiores a la dosis de 600 Gy. En dosis de 25 a 450 Gy se registró mayor desarrollo de la raíz. La germinación al sexto día osciló entre 8 y 95 %, mientras que el testigo mostró 69 %. El análisis multivariado indicó que los dos primeros componentes principales fueron los más relevantes, y explicaron el 88.4 % de la varianza total, el primero como un indicador general de vigor, y el segundo por la velocidad de emergencia. La regresión lineal indicó que la dosis letal media en semillas de ajonjolí fue de 605.5 Gy. En general, dosis intermedias pueden producir individuos de mayor vigor, favoreciendo la selección al inducir mutaciones efectivas.

Palabras clave: Dosimetría, mejoramiento, mutagénesis, mutágenos físicos.

SUMMARY

The low genetic variability of introduced species represents a limitation for plant breeding programs, this being very marked in sesame (*Sesamun indicum L.*), this variability could be increased through mutagenesis. The aim of this study was to evaluate the effect of gamma radiation on germination, vigor, and seedling survival in the variety Pachequeño of sesame. Seeds were treated with 14 doses of ^{60}Co gamma rays (0, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 and 600 Gy) and sown in 200-well trays under a completely randomized design with five replicates. The variables evaluated were germination percentage, emergence speed, seedling height, root length, survival percentage, and median lethal dose. Results indicated significant differences ($P \leq 0.0001$) in all variables. In survival, the applied doses of 100, 250 and 300 Gy showed values of 95.0, 95.0 and 100.0 %, respectively by radiostimulation effect in relation to the control (76.35 %), while for the 600 Gy dose a significant decrease was observed to 39.17 %. In emergence speed, the 100, 150, 200 and 250 Gy treatments were superior to the 600 Gy dose. At doses of 25 to 450 Gy there was increased root development. Germination at the sixth day ranged between 8 and 95 %, while the control showed 69 % . Multivariate analysis indicated that the first two principal components were the most relevant, explaining 88.4% of the total variance, the first one as a general indicator of vigor, and the second one by emergence speed. Linear regression indicated that the median lethal dose in sesame seeds was 605.5 Gy. In general, intermediate doses can produce individuals with greater vigor, favoring selection by inducing effective mutations.

Index words: Breeding, dosimetry, mutagenesis, physical mutagens.

INTRODUCCIÓN

El ajonjolí (*Sesamun indicum* L.) es una oleaginosa, cuyo centro de origen más probable es África, y como centros secundarios la India, China y Japón, países donde existe gran diversidad genética (Ramprasad *et al.*, 2019). En el año 2022, México ocupó la posición 17 a nivel internacional en producción, al generar más de 56 mil toneladas de ajonjolí (0.9 %) (FIRCO, 2022), siendo los principales estados productores Guerrero (26.1 %), Sinaloa (21.8 %), Michoacán (18.2 %), Oaxaca (14.1 %) y Sonora (10.1 %), que en conjunto contribuyeron con el 90.3 % de la producción nacional (SIAP, 2023).

La semilla de ajonjolí, por sus características organolépticas, es considerada de buena calidad industrial, por lo que su producción resulta rentable; sin embargo, la problemática del cultivo son los bajos rendimientos (0.4 a 0.6 t ha^{-1}) de las variedades mejoradas disponibles en el mercado, debido a las limitantes bióticas y abióticas que amenazan su desarrollo tales como sequía, temperaturas arriba de 35 °C, dehiscencia de la

Recibido: 02 de diciembre de 2024
Aceptado: 21 de mayo de 2025
DOI: https://doi.org/10.35196/rfm.2025.2.151

cápsula y enfermedades como pudrición carbonosa del tallo (*Macrophomina phaseolina*), pudrición del tallo y cuello de la raíz (*Phytophthora* sp.) y mancha de la hoja (*Phaeoisariopsis griseola*). La mayoría de los genotipos de ajonjolí sembrados en México son criollos y sólo se tienen ocho variedades mejoradas con registro (SNICS, 2023), y de éstas, siete se generaron hace más de tres décadas, lo que refleja la urgencia de emprender acciones para su mejoramiento genético.

En Sinaloa, la variedad criolla Pachequeño es de las más utilizadas por su adaptación a las condiciones locales y aptitud para mecanización, al presentar buena arquitectura de planta y rendimiento (500 kg ha^{-1}), pero sus limitantes son el ciclo biológico tardío, susceptibilidad a *M. phaseolina* y heterogeneidad en madurez fisiológica, lo que dificulta la cosecha, teniendo pérdidas por la recolección tardía y caída de semillas debido a dehiscencia; no obstante, su base genética puede ser empleada para un programa de mejoramiento e inducir variabilidad mediante mutagénesis en búsqueda de mejores atributos como resistencia a enfermedades, duración de ciclo biológico y cápsulas indehiscentes, siguiendo la experiencia de otros cultivos (Jan *et al*., 2012; Oladosu *et al*., 2016), lo que reduciría la dependencia en el uso de germoplasma introducido.

La mutagénesis es una estrategia complementaria para generar variabilidad genética adicional y modificar características agronómicas importantes, calidad y resistencia a plagas (Spencer-Lopes *et al*., 2021). La radiación gamma de ^{60}Co es uno de los mutágenos más utilizados, al ser aplicado a diversas partes de la planta (Oladosu *et al*., 2016). La eficiencia de esta estrategia depende de la dosis, características del material vegetal y condiciones ambientales (Cubero, 2002). Para ello, es crucial determinar la dosis óptima, misma que puede variar incluso entre cultivares de la misma especie (Olasupo *et al*., 2016). En plántula, se ha reportado que la supervivencia está influenciada por la dosis aplicada; dosis moderadas (100-250 Gy) han mostrado efectos favorables, como resistencia a factores bióticos adversos (altas temperaturas, sequías prolongadas, etc.), mientras que dosis mayores de 400 Gy reducen la supervivencia, debido a la interrupción de la división celular y acumulación de radicales libres. Los efectos negativos en los tejidos son proporcionales a la dosis recibida, evidenciándose disminución en la germinación, supervivencia, altura y biomasa de la plántula (Mba, 2013).

Estudios previos en ajonjolí han reportado mutantes precoces en floración y madurez, menor altura a la primera cápsula (Kouighat *et al*., 2022) y mayor productividad, observándose alta eficiencia mutagénica con dosis de 250 y 350 Gy, que originaron mutantes con espectro más amplio de variación, y con 450 Gy en dos poblaciones M_2 (Ramadoss *et al*., 2014). Por otro lado, Çağırgan (2006), con dosis de 300 y 400 Gy, observó cápsulas multicarpeladas deformes, respuesta que no garantiza que sea positiva, pero ambas dosis resultaron efectivas para inducción de mutación y generación de variabilidad fenotípica en caracteres como color, posición y pubescencia de hojas, color del tallo a la madurez, tipo de ramificación y pubescencia de cápsulas (Mussi *et al*., 2016). Por lo descrito anteriormente, se planteó como objetivo evaluar el efecto de la radiación gamma en la germinación y supervivencia de plántulas de ajonjolí variedad Pachequeño, e identificar la mejor dosis de irradiación, bajo la hipótesis de que las plántulas responderán positivamente a dosis intermedias y sobresaldrán en atributos relacionados con el establecimiento del cultivo, ya que se busca respuesta positiva en arquitectura de planta, cápsulas indehiscentes, ciclo corto y resistencia a enfermedades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y tratamientos de irradiación

Se utilizaron semillas de la variedad Pachequeño, provenientes de la cosecha del ciclo agrícola 2022 en Los Mochis, Sinaloa, México. Los tratamientos consistieron en dosis crecientes de radiación gamma ^{60}Co: 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 y 600 Gy, en muestras de mil semillas con 10 % de humedad. La irradiación se realizó en un irradiador (LGI-01, Transelektro, Holding Ltd, Budapest, Hungría) ubicado en Ocoyoacac, Estado de México.

Manejo y diseño experimental

La germinación de las semillas irradiadas y las testigos fueron en condiciones de invernadero tipo túnel, con cubierta de polietileno UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral en Montecillo, Texcoco, Estado de México en septiembre de 2023. La siembra se realizó en charolas plásticas de 200 cavidades, depositando dos semillas por cavidad, se usó arena como sustrato, y se regaron manualmente con agua de la llave con pH 7.5 y conductividad eléctrica de 0.65 dS m^{-1}. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar, con cinco repeticiones, utilizando 20 semillas por unidad experimental.

Variables evaluadas

A los 6 días después de la siembra (dds), se determinó la variable porcentaje de germinación (PG) con la fórmula:

PG = (número de plántulas emergidas/número de semillas sembradas) × 100

La velocidad de emergencia (VE) se determinó mediante conteos de plántulas emergidas a partir del día 1 hasta los 16 dds, considerando como emergidas las plántulas cuyos cotiledones estaban por encima de la superficie del sustrato, como se describe en la ISTA (2013) para el cultivo de ajonjolí. Para determinar la velocidad de emergencia se consideró la fórmula de Maguire (1962):

$$VE = \left(\frac{\text{Número de plántulas normales 1er conteo}}{\text{Días al 1er conteo}} + \ldots + \frac{\text{Número de plántulas normales conteo final}}{\text{Días al conteo final}} \right)$$

La supervivencia de plántulas (PS) se evaluó a los 16 dds con la fórmula:

PS = (número de plantas vivas/número de semillas sembradas) × 100

Trascurridos 30 días después de la siembra, a las plántulas se les midió la altura (cm) y longitud de raíz (cm); para ello, se seleccionaron seis plántulas al azar por cada unidad experimental. El primer carácter se midió de la base de la raíz hasta el ápice del tallo, y el segundo, desde el cuello hasta el extremo de la raíz primaria. La dosis letal se calculó contabilizando la cantidad de plántulas muertas en el período de tiempo establecido y se determinó como la dosis de radiación que eliminó al 50 % de los individuos.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante el procedimiento de modelos lineales generalizados (GLM) utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2011). Se realizó análisis de varianza de una vía para cada variable evaluada y la comparación de medias de los tratamientos se realizó mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.01$). Para el caso de las variables cuyas unidades fueron porcentajes (germinación y supervivencia), antes de realizar el análisis de varianza se realizó una transformación arcoseno de la raíz cuadrada del porcentaje correspondiente, y las medias se reportan en las unidades originales. Se realizó también análisis de componentes principales y se graficó la dispersión de las diferentes dosis sobre el plano determinado para los dos primeros componentes, permitiendo visualizar de manera global el efecto de las dosis sobre el establecimiento inicial.

Para determinar la dosis letal media (DL_{50}) se utilizó un modelo de regresión lineal y cuadrática con la información de supervivencia, a fin de estimar el mejor ajuste de acuerdo con la menor probabilidad del error (*p-value*) y valorar la mortalidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza (Cuadro 1) mostró diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) para todas las variables analizadas, lo cual indicó el efecto de la radiación con ^{60}Co, y al mismo tiempo, la sensibilidad de esta especie, por lo que podría esperarse que se generen niveles aprovechables de variabilidad que sustenten un eventual programa de mejoramiento genético.

Germinación y supervivencia

La irradiación de la semilla con rayos gamma ^{60}Co causó un efecto tanto estimulatorio como de inhibición de la germinación de las plántulas, según la dosis aplicada. De acuerdo con la prueba de Tukey, las dosis intermedias de 100, 150, 200 y 250 Gy tuvieron un efecto positivo de radioestimulación (92.0, 91.0, 92.0 y 95.0 %, respectivamente) con respecto al testigo (69.0 %), caso contrario a las dosis altas de 500, 550 y 600 Gy, donde se observó un declive significativo de la germinación, registrando el 10.0 % con la dosis más alta (Cuadro 2).

Cuadro 1. Análisis de varianza para el factor dosis de radiación gamma ^{60}Co en variables relacionadas con establecimiento inicial.

Factor de variación	Cuadrados medios	Valor de F	Valor P	R^2	C.V (%)
Porcentaje de germinación	2511.08	38.44	<0.0001	0.906	15
Velocidad de emergencia	6.67	55.39	<0.0001	0.930	11
Altura de plántula	3.02	19.83	<0.0001	0.837	15
Longitud de raíz	24.94	35.27	<0.0001	0.895	12
Porcentaje de supervivencia	795.99	14.22	<0.0001	0.785	10

Cuadro 2. Comparación de medias para las variables de germinación evaluadas con las diferentes dosis de radiación gamma ^{60}Co aplicadas a la semilla de ajonjolí.

Dosis (Gy)	Germinación (%)	VE	AP (cm)	LR (cm)	Supervivencia (%)
0	69.0 a	3.20	2.65 a	6.75 a	93.0 a
25	52.0	2.52	2.61 a	7.98 a	82.0
50	83.0 a	3.88	3.01 a	7.78 a	88.0 a
100	92.0 a	4.96 a	3.05 a	7.83 a	95.0 a
150	91.0 a	4.80 a	3.50 a	7.98 a	89.0 a
200	92.0 a	4.56 a	3.02 a	9.03 a	94.0 a
250	95.0 a	4.16a	3.45 a	8.96 a	95.0 a
300	8.0	2.20	2.76 a	7.41 a	100.0 a
350	72.0	3.36	2.11	4.01	94.0 a
400	45.0	2.80	2.63 a	7.73 a	89.0 a
450	45.0	2.80	2.96 a	7.36 a	91.0 a
500	29.0	2.24	2.30	5.23 a	72.0
550	27.0	2.16	2.35	6.45 a	72.0
600	10.0	1.04	0.31	0.60	40.0
DSH (5%)	4.97	0.77	0.86	1.86	4.97

Medias con la letra a en las columnas son estadísticamente superiores (Tukey, $P \leq 0.05$). VE: velocidad de emergencia, AP. altura de plántula, LR: longitud de raíz, DSH: diferencia significativa honesta.

Los tratamientos presentaron valores aceptables de supervivencia de plántulas, los cuales oscilaron entre 82 y 100 %, mientras que el testigo presentó 93 %, con diferencia mínima de 7 % respecto a la dosis de 300 Gy, que mostró el 100 % de supervivencia. En el Cuadro 2 se observa una tendencia decreciente en la supervivencia de las plántulas (72, 72 y 40 %) con dosis de 500, 550 y 600 Gy, las cuales también mostraron un lento desarrollo y escaso sistema radicular, lo que no permitió el desarrollo óptimo de las plántulas. Los efectos también podrían visualizarse a nivel morfológico, bioquímico, fisiológico y biofísico, donde la magnitud del cambio depende en gran medida de la exposición, dosis, suelo, manejo agrícola y otros factores ambientales (Ahuja *et al*., 2014).

Los resultados de germinación de este estudio coinciden con lo reportado por Antúnez-Ocampo *et al.* (2022), quienes indicaron que la irradiación con rayos gamma ^{60}Co mejoró la germinación de la semilla, la supervivencia y vigor de plántulas de *Echinocactus platyacanthus*, mientras que Kiong *et al.* (2008) indicaron que la tasa de germinación de las semillas depende del nivel de daño cromosómico causado por dosis crecientes de radiación; además, Kim *et al*. (2004) mencionaron que el daño se acentúa debido a que las radiaciones reducen la presencia de reguladores del crecimiento, como las citocininas, las cuales disminuyen o no se sintetizan, aumentando así la sensibilidad de la planta.

Por otra parte, en las Figuras 1A-N se puede observar que a los 5 dds se presentó un equilibrio de la germinación en etapa más temprana con la dosis de 200 Gy, pero a los 6 dds fue con las dosis de 100, 150 y 250 Gy, mientras que el testigo mostró equilibrio a los 7 dds, al igual que 50 y 350 Gy. Las dosis altas que van de 400 a 600 Gy transcurrieron de ocho a los 12 dds. En la dosis de 300 Gy se presentó una germinación estadísticamente igual a la del testigo y de los tratamientos de dosis bajas.

Canul-Ku *et al*. (2012), al aplicar rayos gamma ^{60}Co en semillas de nochebuena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch), observaron que dosis de 50 a 275 Gy disminuyeron el porcentaje de emergencia (30 a 70 %) en comparación con el testigo; por el contrario, Corazon-

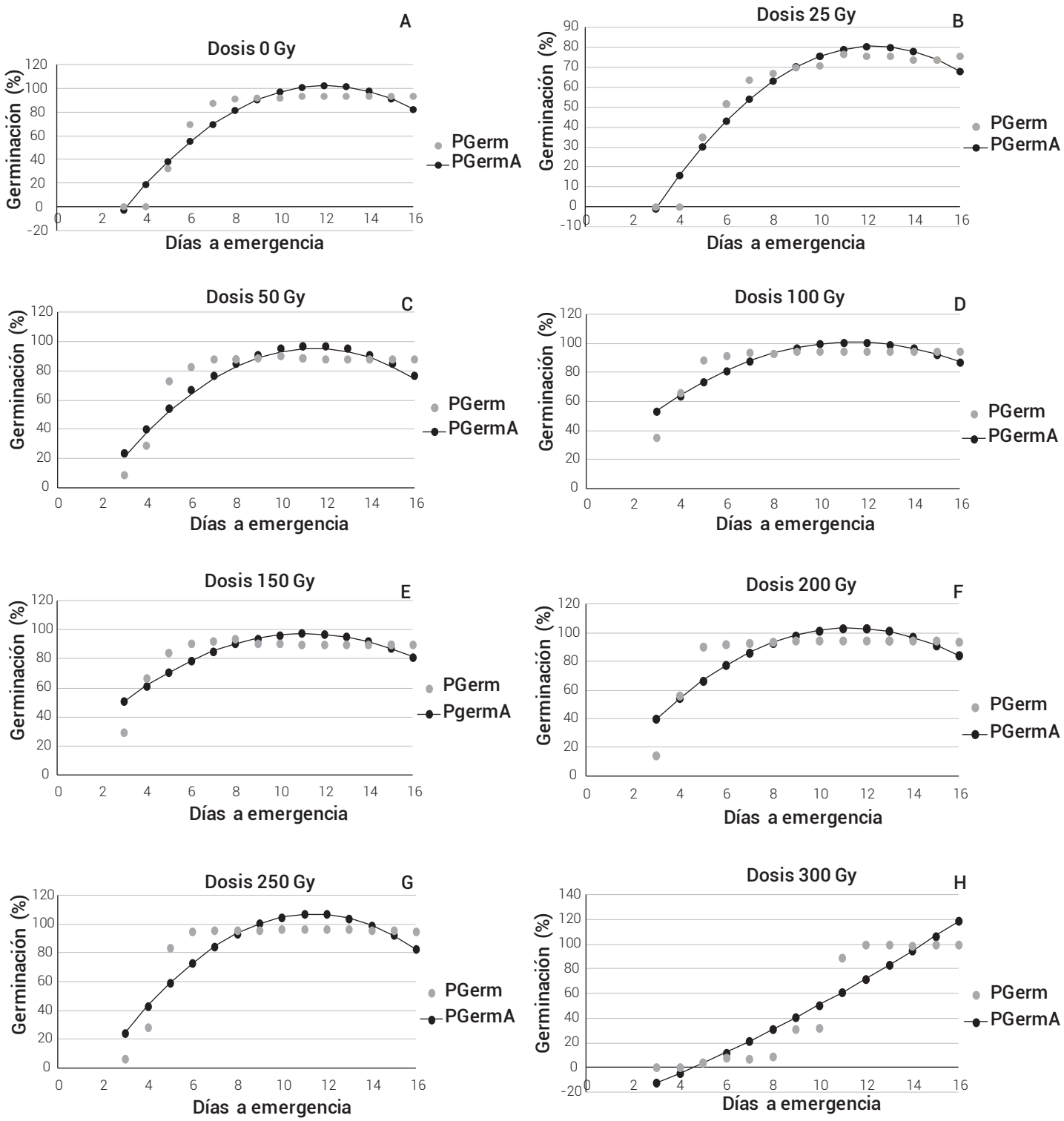

Figura 1. Efecto de diferentes dosis de irradiación gamma ^{60}Co sobre porcentaje de germinación (Pgerm) y porcentaje de germinación ajustada (PgermA) en semillas de ajonjolí. Dosis de 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 Gy.

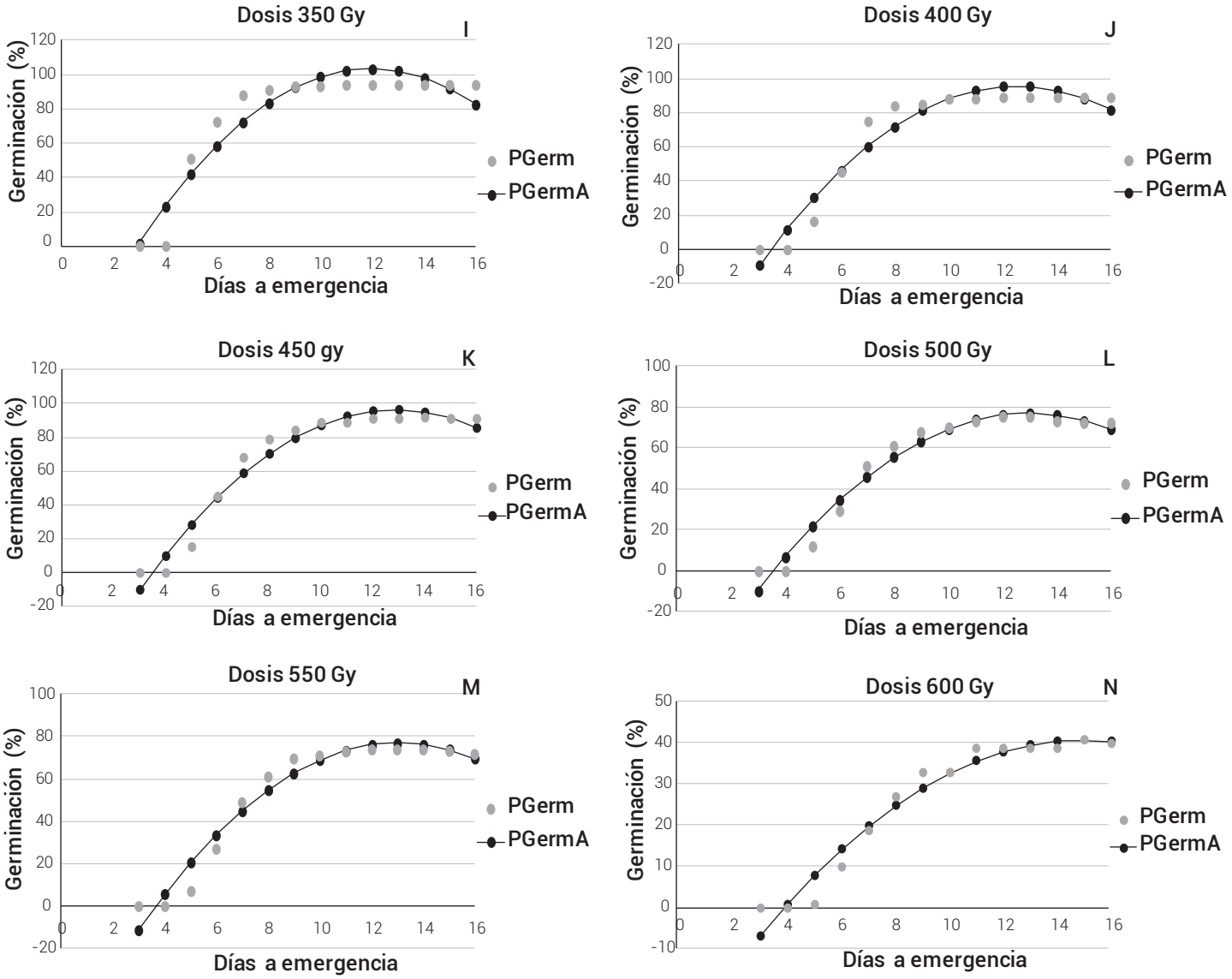

Figura 1. Continuación. Efecto de diferentes dosis de irradiación gamma 60Co sobre porcentaje de germinación (Pgerm) y porcentaje de germinación ajustada (PgermA) en semillas de ajonjolí. Dosis de 350, 400, 450, 500, 550 y 600 Gy.

Guivin *et al*. (2023) indicaron que la radiación gamma no afectó la germinación de las semillas de *Plukenetia volubilis*, a pesar de que aplicaron dosis mayores de 500 Gy. Por su parte, Olasupo *et al*. (2016) señalaron que la germinación de algunas especies como *Oryza sativa*, *Triticum* spp., *Solanum tuberosum* y *Phaseolus vulgaris* tiende a disminuir conforme aumenta la radiación, ya que se inhiben funciones vitales para las células por el contenido de humedad de la semilla, debido a que la radiación ionizante provoca la ruptura de enlaces covalentes y la descomposición de moléculas de agua. Debido a estos desórdenes, se ha observado que la semilla irradiada con dosis altas no es capaz de germinar, como mencionaron Marcu *et al*. (2013) en maíz, ya que las plántulas no sobrevivieron más de ocho días. Esto se relaciona con lo observado en este estudio con 600 Gy (Figura 1N); sin embargo, Urrea y Ceballos (2005) indicaron que las dosis que reducen la supervivencia y el crecimiento al 50 % con respecto al testigo, son aquellas con las que se obtiene la mayor cantidad de mutaciones. Otros autores mencionan que la dosis óptima debe llevar a la supervivencia de 40 a 60 % del material tratado con respecto del no tratado (Corazon-Guivin *et al*., 2023; Díaz, 2020).

Velocidad de emergencia

La velocidad de emergencia es un indicador confiable del vigor de las semillas que proporciona información

detallada sobre la rapidez y uniformidad de la germinación de los tratamientos. De acuerdo con el índice de Maguire (1962) y la prueba de Tukey, las dosis intermedias (100, 150 y 200 Gy) fueron superiores al testigo, mientras que con las dosis de 250 a 450 la velocidad de germinación disminuyó igualando al testigo, y después de 450 Gy las dosis fueron inferiores al testigo. La dosis de 300 Gy mostró un comportamiento muy singular, pues a pesar de que obtuvo la mayor supervivencia (100 %), el vigor de la semilla fue reducido, incluyendo la velocidad de emergencia (Cuadro 2).

Los resultados obtenidos podrían ser considerados en los programas de mejoramiento genético, pues el establecimiento es una etapa crítica en el cultivo de ajonjolí, y se ha demostrado que plántulas con mayor vigor posteriormente presentan características sobresalientes de área foliar, peso seco y longitud de raíz (Maguire, 1962). Algunos autores indican que dosis de 100 a 250 Gy, consideradas como moderadas y aplicadas en *Physalis peruviana* y chía negra, inducen respuestas positivas en emergencia y vigor en las semillas (Antúnez-Ocampo *et al*., 2017; Díaz, 2020); por el contrario, dosis mayores de 300 Gy disminuyen esta respuesta (Antúnez-Ocampo *et al*., 2022; Gálvez-Marroquín *et al*., 2023; González y Nakayama, 2015), lo cual está asociado con inhibición de funciones celulares como síntesis de proteínas y actividad enzimática (Olasupo *et al*., 2016).

Altura de plántula

El análisis de varianza detectó diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) en la altura de plántula a los 30 dds por efecto de dosis de irradiación. Se identificaron dos grupos, el primero con dosis menores de 450 Gy, cuyos resultados en altura de plántula fueron superiores e igualaron estadísticamente al testigo, mientras que el segundo grupo, con dosis de 500, 550 y 600 Gy, ocasionaron afectaciones significativas y originaron plantas de menor tamaño (Cuadro 2). Algunos estudios, como el de Çağırgan (2001), revelaron que cuando las semillas de ajonjolí son irradiadas con rayos gamma, la altura de las plántulas puede reducirse notablemente, lo cual depende de la dosis aplicada; aunque las semillas de ajonjolí se consideraron resistentes a la irradiación, se observó una reducción del crecimiento en todas las poblaciones irradiadas a las dosis más altas (600 y 750 Gy), donde las plantas estaban generalmente atrofiadas; en el presente estudio se observaron plántulas con deformaciones en hojas, tallos débiles y raíces de menor desarrollo, malformaciones que se observaron en mayor frecuencia cuando aumentó la dosis aplicada.

Longitud de raíz

Las dosis de 25 a 450 Gy provocaron una estimulación significativa ($P \leq 0.0001$) en el desarrollo de la raíz, superando estadísticamente al testigo, con excepción de 350 Gy, que fue inferior (Cuadro 2). A partir de los 500 Gy se observó un declive en la magnitud de la raíz, de manera que las dosis de 500 y 550 Gy fueron semejantes al testigo. Cuando la irradiación se incrementó hasta 600 Gy, la afectación fue severa, ya que el tamaño de la raíz fue dramáticamente inferior al resto de las dosis aplicadas.

La inhibición o disminución del crecimiento de la longitud de plántula y de radícula puede deberse a que la radiación ionizante altera el metabolismo y la división celular (Majeed *et al*., 2017; Olasupo *et al*., 2016). En relación a lo anterior, Kiong *et al.* (2008) encontraron que la radiación gamma puede disminuir la cantidad de proteínas y compuestos clorofílicos, lo cual afecta el metabolismo de las plantas. Resultados similares reportaron Toker *et al.* (2005), donde radiaciones de hasta 200 Gy aumentaron la longitud de los brotes, pero al aumentar a 400 Gy causaron reducción en la longitud de los mismos. Con respecto a atributos de altura de planta y longitud de raíz, resultados en pasto garrapata (*Eragrostis superba*) obtenidos por Álvarez-Holguín *et al.* (2019) indicaron que éstas disminuyeron con el incremento de la dosis de irradiación, información similar a lo observado en *Eleusine coracana* L. Gaertn, donde la altura de planta (AP) y la longitud de raíz (LR) se vieron afectadas por el incremento en la dosis de radiación a los 500 Gy para ambas variables (Ambavane *et al.,* 2015); así también, Preuss y Britt (2003) reportaron que la radiación gamma puede inhibir el crecimiento de las plantas, ya que éstas tienen un mecanismo de señales de transducción que monitorea el daño celular y que detiene la división celular al producirse un daño en la estructura de la célula. Al respecto, Melki y Marouani (2010) concluyeron que dosis bajas, como 20 Gy, estimulan la longitud y el número de raíces entre 18 y 32 %, tal como se obtuvo en el presente estudio para dosis bajas, lo que indica que las oportunidades para selección de plantas con atributos de mejor estructura radicular se encontrarían con dosis menores de 450 Gy. La longitud de la raíz pudiera considerarse como un indicador de radiosensibilidad; bajo esta consideración, Ramírez *et al.* (2006) observaron que al aplicar dosis crecientes de rayos gamma en cuatro variedades de *Solanum lycopersicum* L., las dosis de 5 y 20 Gy incrementaron la longitud de la raíz, y que dosis superiores a los 100 Gy redujeron el crecimiento; así también, la supervivencia comienza a decrecer conforme la dosis aumenta, 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 en la tasa de respiración de la planta (Cheng *et al*., 2010).

Componentes principales

El análisis de componentes principales permitió reducir la dimensionalidad de la información y obtener una panorámica sobre las relaciones entre las variables analizadas y su respuesta a las dosis de radiación. Los dos primeros componentes principales (CP1) y (CP2) fueron los más importantes, ya que capturaron el 88.4 % de la varianza total, donde CP1 representa un índice general de crecimiento y vigor y explica por sí solo el 78.3 % de la varianza total, y el CP2 el 10.1 %, lo que significa que con los dos primeros componentes es posible extraer casi toda la información (Cuadro 3).

Con el biplot de los dos primeros componentes principales (Figura 2) se ratificó la variabilidad de respuesta entre las dosis aplicadas y permitió observar dos agrupaciones, CP1 indica que todas las variables tienen una contribución positiva, lo que sugiere que este componente está relacionado con un patrón general que afecta a todas las variables de manera similar; es decir, representa un índice general de vigor. En el CP2 las variables de porcentaje de emergencia y porcentaje de supervivencia tuvieron contribuciones negativas; sin embargo, la velocidad de emergencia tuvo una contribución positiva significativa. Estos resultados permiten orientar líneas de investigación relacionados con la aplicación de radiación gamma ^{60}CO como alternativa para inducir variabilidad en programas de mejoramiento. Se observa claramente que las dosis de 100 a 450 Gy, consideradas en este estudio como intermedias, tienen un efecto positivo para germinación y vigor. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Mussi *et al.* (2016), quienes concluyeron que las modificaciones fenotípicas de mayor utilidad, generadas por los tratamientos con irradiación de ajonjolí en dosis de 300 y 400 Gy consisten en incrementos en la pubescencia de hojas, tallos y frutos, además de que pueden contribuir a la mejora de la resistencia a enfermedades virales.

Cuadro 3. Valores y vectores propios del análisis de componentes principales para dosis aplicadas.

	CP1	PC2
Valores propios	4.918	0.507
Proporción de varianza explicada (%)	0.783	0.101
Varianza acumulada (%)	0.783	0.884
Vectores propios		
Variables originales		
Porcentaje de germinación	0.465	-0.427
Velocidad de emergencia	0.407	0.785
Altura de plántula	0.475	0.117
Longitud de raíz	0.444	-0.062
Porcentaje de supervivencia	0.467	-0.440

Dosis letal media

Al considerar la curva de tendencia de la variable mortalidad (complemento de supervivencia) mediante modelos de regresión (Figura 3), se estimó la dosis letal media DL_{50} en 605.5 Gy de radiación gamma de ^{60}Co mediante el modelo cuadrático que se muestra en el Cuadro 4, por ser el de mejor ajuste. Los resultados obtenidos en la variedad Pachequeño sugieren que con dosis bajas (25 a 300 Gy) se puede obtener variantes morfológicas de interés agroindustrial, favoreciendo la selección en menor tiempo al inducir mutaciones efectivas en ajonjolí variedad Pachequeño (Figura 3). Lo anterior coincide con lo reportado por Muhamad *et al.* (2018), quienes indicaron que las dosis de 250 a 500 Gy fueron eficaces para lograr una mutación viable en ajonjolí. En este mismo sentido, Diouf *et al.* (2010) mencionaron que 300 y 400 Gy originaron mutaciones favorables para cápsulas cerradas, hábito de ramificación, tipos de floración, y número y forma de cápsulas en ajonjolí.

CONCLUSIONES

La radiación gamma ^{60}Co afecta el desempeño de las semillas de ajonjolí en la germinación, crecimiento inicial y supervivencia de plántulas en función de las dosis aplicadas. Dosis intermedias (100 a 450 Gy) de radiación estimulan la germinación de la semilla y el vigor inicial de las plantas de ajonjolí en la variedad Pachequeño. Con dosis intermedias se pueden obtener individuos de interés, favoreciendo la selección al inducir mutaciones efectivas, mientras que dosis mayores de 500 Gy son detrimentales en las primeras etapas de desarrollo en esta variedad. La dosis letal media en semillas de ajonjolí es de 605.5 Gy en la variedad Pachequeño.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por las facilidades para el desarrollo del experimento.

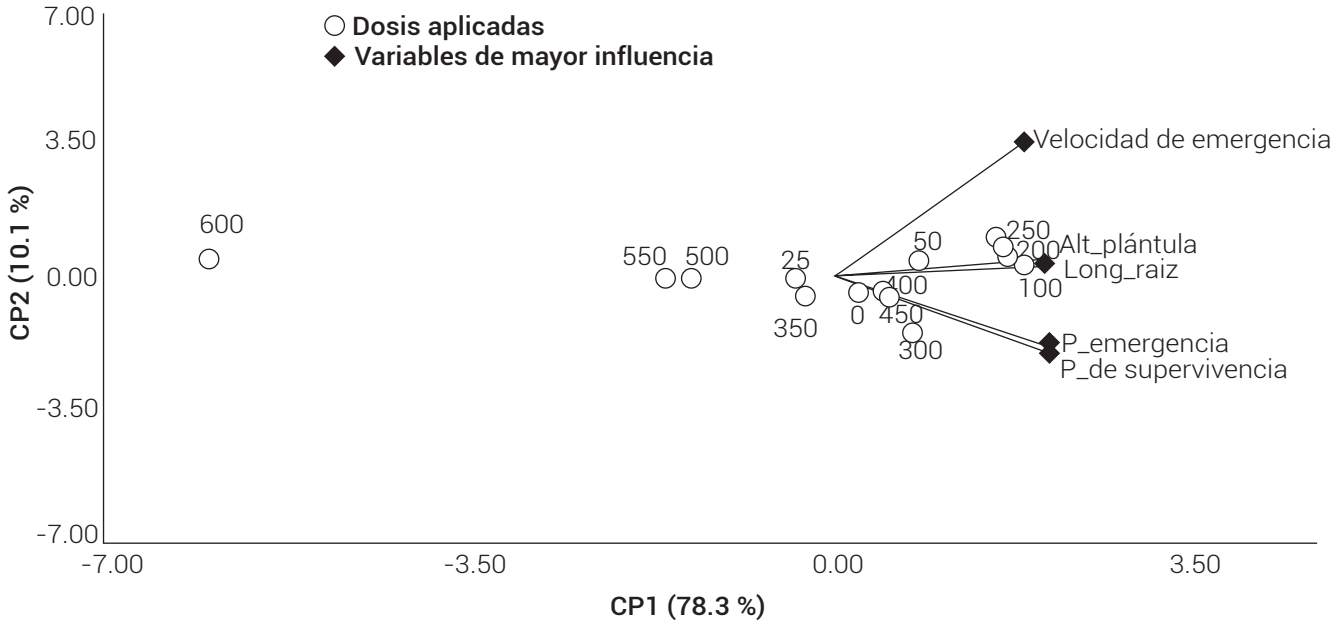

Figura 2. Biplot de las variables evaluadas sobre el plano determinado por los dos primeros componentes principales.

Cuadro 4. Estimación de la dosis letal media DL50 con radiación gamma ^{60}Co en ajonjolí variedad Pachequeño, mediante el modelo de regresión con efecto cuadrático.

Variable	R^2	Ecuación cuadrática	DL_{50}
Mortalidad a los 16 dds	0.8266	P_MortA = 17.77 - 0.1489(Dosis) + 0.0003(Dosis)^2	605.5

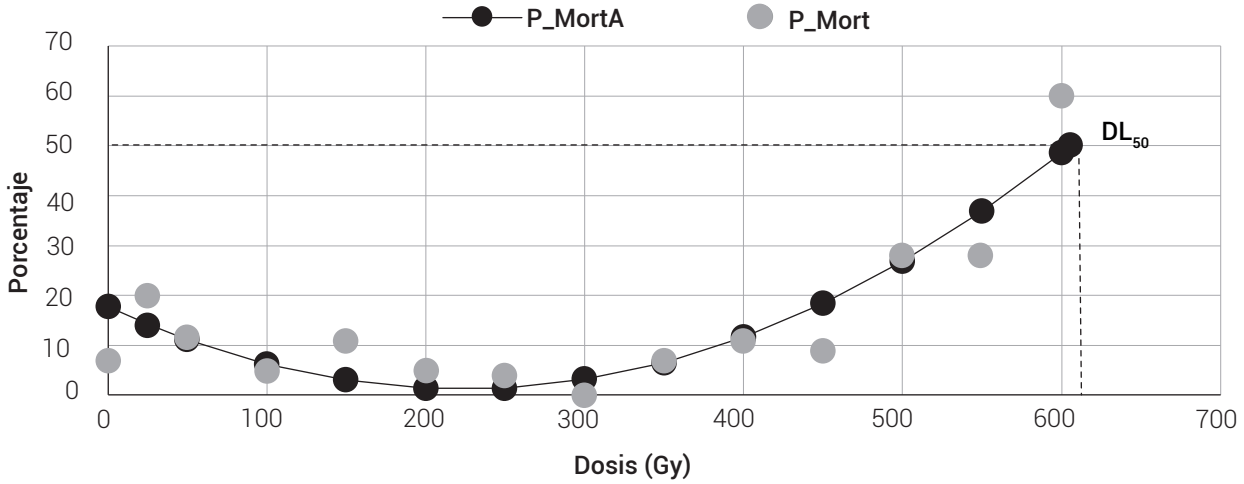

Figura 3. Mortalidad de plántulas de ajonjolí al 50 % en función de dosis de radiación gamma ^{60}Co. Se muestran datos directos (P_Mort) y valores ajustados (P_MortA) al modelo cuadrático.

BIBLIOGRAFÍA

Ahuja S., M. Kumar, P. Kumar, V. K. Gupta, R. K. Singhal, A. Yadav and B. Singh (2014) Metabolic and biochemical changes caused by gamma irradiation in plants. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 300:199-212, https://doi.org/10.1007/s10967-014-2969-5

Álvarez-Holguín A., C. R. Morales-Nieto, C. H. Avendaño-Arrazate, R. Corrales-Lerma, F. Villarreal-Guerrero, E. Santellano-Estrada y Y. Gómez-Simuta (2019) Dosis letal media (DL_{50}) y reducción de crecimiento (GR_{50}) por irradiación gamma en pasto garrapata (*Eragrostis superba*). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 10:227-238, https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i1.4327

Ambavane A. R., S. V. Sawardekar, S. A. Sawantdesai and N. B. Gokhale (2015) Studies on mutagenic effectiveness and efficiency of gamma rays and its effect on quantitative traits in finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn). *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 8:120-125, https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.12.004

Antúnez-Ocampo O. M., S. Cruz-Izquierdo, M. Sandoval-Villa, A. Santacruz-Varela, L. E. Mendoza-Onofre, E. De la Cruz-Torres y A. Peña-Lomelí (2017) Variabilidad inducida en caracteres fisiológicos de *Physalis peruviana* L. mediante rayos gamma ^{60}Co aplicados a la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40:211-218. https://doi.org/10.35196/rfm.2017.2.211-218

Antúnez-Ocampo O. M., G. A. Castañeda-Zárate, J. E. Sabino-López, M. Espinosa-Rodríguez y S. Cruz-Izquierdo (2022) Germinación y aspectos morfológicos de plántulas de *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto tratadas con rayos gamma. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 25:101, http://doi.org/10.56369/tsaes.4235

Çağırgan M. İ. (2001) Mutation techniques in sesame (*Sesamum indicum* L.) for intensive management: confirmed mutants. *In*: Sesame Improvement by Induced Mutations. Final Report FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. pp:31-40.

Çağırgan M. İ. (2006) Selection and morphological characterization of induced determinate mutants in sesame. *Field Crops Research* 96:19-24, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.06.010

Canul-Ku J., F. García-Pérez, E. Campos-Bravo, E. J. Barrios-Gómez, E. De la Cruz-Torres, J. M. García-Andrade, … y S. Ramírez-Rojas (2012) Efecto de la irradiación sobre nochebuena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) en Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:1495-1507, https://doi.org/10.29312/remexca.v3i8.1316

Cheng L., H. Yang, B. Lin, Y. Wang, W. Li, D. Wang and F. Zhang (2010) Effect of gamma-ray radiation on physiological, morphological characters and chromosome aberrations of minitubers in *Solanum tuberosum* L. *International Journal of Radiation Biology* 86:791-799, https://doi.org/10.3109/09553002.2010.484478

Corazon-Guivin M. A., S. Rengifo-Del Aguila, A. D. Hernández-Amasifuen, V. M. Arévalo-Rojas, R. A. Acosta-Córdova, A. Cerna-Mendoza, … y J. C. Guerrero-Abad (2023) Gamma irradiation of *Plukenetia volubilis* L. seeds promotes several changes during its germination and vegetative growth. *Advances in Agriculture* 2023:9737125, https://doi.org/10.1155/2023/9737125

Cubero J. I. (2002) Introducción a la Mejora Genética Vegetal. Mundi-Prensa. Madrid, España. 565 p.

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* 14:37-48, http://doi.org/10.26457/recein.v14i54.2695

Diouf M., S. Boureima, T. Diop and M. Çağirgan (2010) Gamma rays-induced mutant spectrum and frequency in sesame. *Turkish Journal of Field Crops* 15:99-105.

FIRCO, Fideicomiso de Riesgo Compartido (2022) Ajonjolí, oleaginosa como cultivo alternativo. Fideicomiso de Riesgo Compartido. Ciudad de México, https://www.gob.mx/firco/es/articulos/ajonjoli-oleaginosa-como-cultivo-alternativo?idiom=es (Marzo 2025).

Gálvez-Marroquín L. A., C. H. Avendaño-Arrazate, R. Ariza-Flores, Y. Gómez-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

González M. C. y H. D. Nakayama (2015) Radioestimulación de la germinación en *Stevia rebaudiana* cultivar KH-IAN VC-142 (Eireté), mediante el empleo de rayos gamma ^{60}Co. *Cultivos Tropicales* 36:117-119.

ISTA, International Seed Testing Association (2013) International Rules for Seed Testing. Edition 2013. International Seed Testing Association. Bassersdorf, Switzerland. 433 p.

Jan S., T. Parween, T. O. Siddiqi and Mahmooduzzafare (2012) Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews* 20:17-39, https://doi.org/10.1139/a11-021

Kim J. H., M. H. Baek, B. Y. Chung, S. G. Wi and J. S. Kim (2004) Alterations in the photosynthetic pigments and antioxidant machineries of red pepper (*Capsicum annuum L.*) seedlings from gamma-irradiated seeds. *Journal of Plant Biology* 47:314-321, https://doi.org/10.1007/BF03030546

Kiong A. L. P., A. G. Lai, S. Hussein and A. R. Harun (2008) Physiological responses of *Orthosiphon stamineus* plantles to gamma irradiation. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture* 2:135-149.

Kouighat M., H. Hanine, O. Cheto, S. Fakhour, M. El Fechtali and A. Nabloussi (2022) Evaluation of new mutagenesis-induced genetic diversity and estimation of genetic parameters in sesame M_4 lines mutants. *International Journal of Plant Biology* 13:644-662, https://doi.org/10.3390/ijpb13040052

Maguire J. D. (1962) Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science* 2:176-177, https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x

Majeed A., Z. Muhammad, R. Ullah, Z. Ullah R. Ullah, Z. Chaudhry and S. Siyar (2017) Effect of gamma irradiation on growth and post-harvest storage of vegetables. *PSM Biological Research* 2:30-35.

Marcu D., G. Damian, C. Cosma and V. Cristea (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* 39:625-634, https://doi.org/10.1007/s10867-013-9322-z

Mba C. (2013) Induced mutations unleash the potential of plant genetic resources for food and agriculture. *Agronomy* 3:200-231, https://doi.org/10.3390/agronomy3010200

Melki M. and A. Marouani (2010) Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat. *Environmental Chemistry Letters* 8:307-310, https://doi.org/10.1007/s10311-009-0222-1

Muhammad M. L., A. O. Falusi, M. O. Adebola, O. D. Oyedum, A. A. Gado and M. C. Dangana (2018) Spectrum and frequency of mutations induced by gamma radiations in three varieties of Nigerian sesame (*Sesamum indicum* L.). *Notulae Scientia Biologicae* 10:87-91, https://doi.org/10.15835/nsb10110219

Mussi C., H. Nakayama y R. O. de Cristaldo (2016) Variabilidad fenotípica en poblaciones M_1 de sésamo (*Sesamum indicum* L.) irradiado con rayos gamma. *Cultivos Tropicales* 37:74-80, https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3749.3362

Oladosu Y., M. Y. Rafii, N. Abdullah, G. Hussin, A. Ramli, H. A. Rahim, … and M. Usman (2016) Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment* 30:1-16, https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333

Olasupo F. O., C. O. Ilori, B. P. Forster and S. Bado (2016) Mutagenic effects of gamma radiation on eight accessions of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). *American Journal of Plant Sciences* 7:339-351, https://doi.org/10.4236/ajps.2016.72034

Preuss S. B. and A. B. Britt (2003) A DNA-damage-induced cell cycle checkpoint in *Arabidopsis*. *Genetics* 164:323-334, https://doi.org/10.1093/genetics/164.1.323

Ramadoss B. R., K. Ganesamurthy, K. Angappan and M. Gunasekaran (2014) Mutagenic effectiveness and efficiency of gamma rays in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Global Journal of Molecular Sciences* 9:1-6.

Ramírez R., L. M. González, Y. Camejo, N. Zaldívar y Y. Fernández (2006) Estudio de radiosensibilidad y selección del rango de dosis

estimulantes de rayos X en cuatro variedades de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales* 27:63-67.

Ramprasad E., S. Senthilvel, J. J. Lal, K. N. Yamini and D. K. Singh (2019) Analysis of genetic diversity in sesame (*Sesamum indicum* L.) advanced breeding lines and varieties collected from major breeding centers in India. *Electronic Journal of Plant Breeding* 10:1269-1274, http://doi.org/10.5958/0975-928X.2019.00162.5

SAS Institute (2011) SAS/STAT® 9.4 User's. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 8621 p.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ (Marzo 2025).

SNICS, Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2023) Catálogo Nacional de Variedades Vegetales en línea. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Ciudad de México. https://lookerstudio.google.com/reporting/5b7206ba-e190-48fe-9696-73523bfccf58/page/itBWB (Junio 2025).

Spencer-Lopes M. M., B. P. Forster y L. Jankuloski (2021) Manual de Mejoramiento por Mutaciones. Tercera edición. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, Austria. 245 p.

Toker C., B. Uzun, H. Canci and F. O. Ceylan (2005) Effects of gamma irradiation on the shoot length of *Cicer* seeds. *Radiation Physics and Chemistry* 73:365-367, https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2005.03.011

Urrea A. I. y S. M. Ceballos (2005) Empleo de las radiaciones gamma en la inducción de variabilidad genética en *Heliconia psittacorum*. *Actualidades Biológicas* 27:17-23, https://doi.org/10.17533/udea.acbi.329425