




Cambios horméticos por efecto de radiación gamma ^{60}Co en plantas M_1 de chile apaxtleco

Hormetic changes by gamma ^{60}Co radiation effect in chile apaxtleco M_1 plants

Martha Isela Croseños-Palazin¹ ,
Oscar Martín Antúñez-Ocampo^{2*} ,
Juan Elías Sabino-López¹ ,
Mariana Espinosa-Rodríguez¹ ,
Serafín Cruz-Izquierdo³ 

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Universidad Autónoma de Guerrero. Periférico Poniente S/N. Colonia Villa de Guadalupe. CP. 4040. Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Iguala. Carretera Iguala-Tuxpan, km 2.5. CP. 40000. Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

³Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Carretera Federal México-Texcoco, km 36.5. CP. 56230. Montecillo. Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: antunez.oscar@inifap.gob.mx

Artículo científico

Recibido: 11 de agosto 2022

Aceptado: 05 de junio 2023

Como citar: Croseños-Palazin MI, Antúñez-Ocampo OM, Sabino-López JE, Espinosa-Rodríguez M, Cruz-Izquierdo S (2023) Cambios horméticos por efecto de radiación gamma ^{60}Co en plantas M_1 de chile apaxtleco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(2): e3444. DOI: 10.19136/era.a10n2.3444

RESUMEN. El estado de Guerrero cuenta con gran diversidad de chiles nativos que son aprovechados a nivel local y regional, entre ellos, el chile apaxtleco. El objetivo de la investigación fue evaluar los efectos de la radiación a la semilla con rayos gamma ^{60}Co en aspectos morfológicos, parámetros de rendimiento y calidad del fruto de plantas M_1 de tres fenotipos de chile apaxtleco. La combinación de las dosis de radiación (0, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 Gy) con los tres fenotipos de chile originó 21 tratamientos, que se distribuyeron en un diseño completamente al azar con seis repeticiones. La radiación gamma no afectó la altura, el diámetro del tallo y la formación de ramas, ni los componentes del rendimiento (número y peso de frutos) de las plantas. En calidad del fruto; las dosis intermedias (100 a 200 Gy) incrementaron el peso (fresco y seco) y diámetro (polar y ecuatorial) de los frutos; mientras que, dosis altas redujeron la formación de semillas. Sin embargo, la interacción de las dosis de radiación con el fenotipo de chile mostró significancia estadística ($\alpha \leq 0.05$) en crecimiento, rendimiento y calidad del fruto; ya que el Ancho liso presentó plantas con mayor altura y número de ramas; mientras que, el Ancho chino 1 y 2 tuvieron mayor rendimiento y tamaño de frutos. Los individuos resultantes de semillas tratadas con 100 a 200 Gy pueden usarse a futuro en investigaciones de mejoramiento genético para la selección y obtención de variantes de importancia económica.

Palabras clave: Crecimiento, rayos gamma, rendimiento, mutagénesis, semillas.

ABSTRACT. The state of Guerrero has a great diversity of native chiles that are used locally and regionally, among them, the apaxtleco chili. The objective of the research was to evaluate the effects of radiation to the seed with gamma rays ^{60}Co in morphological aspects, yield parameters and quality of the fruit of M_1 plants of three phenotypes of apaxtleco chili. The combination of radiation doses (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 Gy) with the three chili phenotypes resulted in 21 treatments, which were distributed in a completely randomized design with six replications. Gamma radiation did not affect the height, stem diameter and branch formation, nor yield components (number and weight of fruits) of the plants. In quality of the fruit; intermediate doses (100 to 200 Gy) increased the weight (fresh and dry) and diameter (polar and equatorial) of the fruits; whereas, high doses reduced seed formation. However, the interaction of radiation doses with the chili phenotype showed statistical significance ($\alpha \leq 0.05$) in growth, yield and fruit quality; since the smooth width presented plants with greater height and number of branches; while Chinese Width 1 and 2 had higher yield and fruit size. Individuals resulting from seeds treated with 100 to 200 Gy can be used in future genetic improvement research for the selection and production of variants of economic importance.

Key words: Growth, gamma rays, yield, mutagenesis, seeds.

INTRODUCCIÓN

El Chile (*Capsicum* spp.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial por el volumen de producción de 41 125 955 t en el 2021 (FAOSTAT 2023) y consumo; sus frutos se utilizan en fresco y seco para proporcionar sabor, aroma y color a diversos platillos (Molina-Suarez et al. 2021). También, son usados como condimento, verdura, ornamental, medicinal y colorante alimenticio (Xiao-min et al. 2016, Massot y Barbieri 2016, Haralayya y Asha 2017, Konishi et al. 2019).

En México, se han identificado más de 60 morfotipos de chiles en estudios *in situ* y por información de productores, la mayoría corresponden a *C. annum* L., y exhiben gran diversidad de forma, tamaño, color, rango de maduración (precocidad) y pungencia (Gálvez et al. 2021); los tipos que destacan son el Jalapeño, Ancho, Guajillo, Pasilla, Serrano, Chile de árbol y Piquín, todos ellos distribuidos en todo el territorio mexicano y de importancia cultural, social y económica (Castellón-Martínez et al. 2012). En el 2021, la producción de Chile verde fue de 3 238 244.81 t, con rendimiento promedio de 21.65 t ha⁻¹ y consumo *per cápita* de 18.4 kg. Los principales Estados productores fueron Sinaloa (757 769 t/53.5 t ha⁻¹), Chihuahua (682 084 t/24.53 t ha⁻¹), Zacatecas (450 098 t/12.70 t ha⁻¹), San Luis Potosí (323 141 t/13.33 t ha⁻¹) y Sonora (192 365 t/42.89 t ha⁻¹); mientras que, el Estado de Guerrero sólo produjo 8 970 t, con rendimiento de 6.70 t ha⁻¹ (SIAP 2021).

A pesar del bajo rendimiento por superficie, el Estado de Guerrero cuenta con gran diversidad de chiles con alto potencial para su aprovechamiento y de impacto en la economía regional y local, así como, en la gastronomía (Vera-Sánchez et al. 2016). Tal es el caso de los chiles apaxtlecos (fenotipos locales conocidos como: Ancho Liso, Ancho Chino, Delgado Liso y Carricillo), considerados como material nativo y de presencia en la cultura y económica de los habitantes de Apaxtla de Castejón, Guerrero, México (Aguilar-Rincón et al. 2010, Vázquez-Casarrubias et al. 2011); usados para mole y guisos típicos de la región Norte del Estado. Pero la variabilidad genética y fenotípica de estos chiles ha disminuido por efecto

de algunos factores como polinización de la planta y método de mejoramiento (selección) que realizan los productores, afectando negativamente las características cuantitativas (tamaño, grosor) y cualitativas (forma, color, olor, sabor) de los frutos (López 2003). Por otro lado, las investigaciones referentes a la caracterización genotípica y agronómica de estos tipos de chiles es escasa. Solo se reportan resultados obtenidos por Vázquez-Casarrubias et al. (2011), quienes evaluaron el efecto de la edad de la plántula al trasplante en los parámetros de crecimiento y rendimiento de las plantas de morfotipos de Chile apaxtleco.

Una alternativa para incrementar la variabilidad genética de las poblaciones y seleccionar individuos sobresalientes en corto tiempo es la mutagénesis mediante radiación ionizante (Aklilu 2021, Madriz-Martínez et al. 2022). Los rayos gamma originan nuevas combinaciones genéticas de genes parentales ya existentes (Majeed et al. 2018); además, tienen alta penetración, reproducibilidad y frecuencia de mutaciones (Abaza et al. 2020). La irradiación de semillas u otros órganos (yemas, esquejes, polen) de la planta con ⁶⁰Co ha producido cambios favorables en parámetros morfológicos (porte alto o bajo; formación de tallos, ramas, hojas), reproductivos (forma y color de flores, semillas) y del rendimiento (Oladosu et al. 2016) de especies, como frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (Martirena et al. 2019), pasto africano (*Eragrostis lehmanniana* Ness) (Álvarez-Holguín et al. 2018); cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) (Brito y Ángeles 2016); ajo (*Arachis hypogaea* L.) (Pardo-Roldan 2015); soya (*Glycine max* L.), trigo (*Triticum* spp.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) (Foroughbakhch-Pournavab et al. 2015); papa (*Solanum tuberosum* L.) (Salomón et al. 2017); vainilla (*Vanilla planifolia* L.) (Reyes-López et al. 2018) y ornamentales (Patil et al. 2015, Deshmukh y Malode 2018, Billore et al. 2019). Otro efecto de la irradiación es que estimula la capacidad de las plantas para resistir periodos de sequía, plagas y enfermedades (Oladosu et al. 2016). Por ejemplo, Gaswanto et al. (2016) emplearon los rayos gamma para inducir la resistencia del Chile a *Begomovirus* sp. y mejorar las características agronómicas

cas. No obstante, los efectos estimulantes de la radiación gamma van a depender de la dosis (Ramchander *et al.* 2015) y el material vegetal; pues se ha reportado que dosis mayores de 300 Gy disminuyen el crecimiento de las plantas de *C. annuum* (Thi-sawech *et al.* 2020).

Considerando que los trabajos de mejoramiento genético del chile apaxtleco son escasos y que la planta es autógama; se considera de interés un programa de mejoramiento por mutagénesis radioinducida como complemento al mejoramiento convencional (Villalta-Villalobos y Gatica-Arias 2019). Por lo tanto, la presente investigación tuvo el objetivo de evaluar los efectos de diferentes dosis (0 a 300 Gy) de radiación gamma a la semilla en el comportamiento morfológico y productivo (rendimiento y calidad del fruto) de las plantas M₁ de tres morfotipos de chile apaxtleco; bajo la hipótesis de que al menos una dosis de rayos gamma induce cambios biológicos que amplían la variabilidad morfológica, rendimiento y calidad del fruto, que pueden ser aprovechados por selección para obtener nuevas variedades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Germoplasma

Se usaron semillas de tres fenotipos (Ancho liso, Ancho chino 1 y 2) de chile apaxtleco (*Capsicum annuum* L.) de un año; provenientes de Apaxtla de Castrejón, Guerrero, México. Los frutos del Ancho chino se caracterizan por la epidermis rugosa (al deshidratarse), forma trapezoidal y color es rojo intenso a negro. Mientras que, el chile Ancho liso se diferencia solamente en la epidermis del fruto que es lisa (Aguilar-Rincón *et al.* 2010). En este sentido, los frutos colectados de Ancho chino 1 tuvieron un peso seco promedio de 6.82 g (peso sin semilla de 5.19 g), con 11.26 cm de longitud, y diámetro medio de 38.82 mm (basal de 45.8 mm y apical de 16.86 mm). El Ancho chino 2 presentó 6.82 g de peso seco (peso sin semillas de 5.19 g), longitud de 11.26 cm y diámetro medio de 38.82 mm (basal de 45.8 mm y apical de 16.86 mm). Por último, los frutos de Ancho liso registraron 3.59 g de peso seco (peso sin semillas de 2.45 g), longitud de 9.14 cm y diámetro medio de 24.67

mm, (basal de 28.9 mm y apical de 10.29 mm). La irradiación del germoplasma se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el Estado de México, en un irradiador LGI-01 Transelektro, en junio de 2018.

Diseño de tratamientos

Los factores de estudio fueron (i) dosis de irradiación (0, 50, 100, 200, 250 y 300 Gy de rayos gamma ⁶⁰Co (en 5 g de semilla) y (ii) fenotipo de chile (Ancho chino 1 y 2, y Ancho liso). Los tratamientos resultaron de la combinación de estos dos factores, y se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con seis repeticiones (cada repetición la constituyó seis plantas M₁, seleccionando una planta que presentó diferencias fenotípicas con respecto al testigo) de cada dosis en cada fenotipo, trasplantadas en bolsa negra de polietileno de 9 L de volumen con piedra pómez como sustrato.

Establecimiento de semilleros y trasplante

Las semillas se sembraron en octubre de 2018, en charolas de poliestireno con turba como sustrato y se regaron con agua de llave, con pH 7.6 y conductividad de 0.5 dS m⁻¹. En cuanto, a la sensibilidad de la semilla; las dosis de 100 y 300 Gy fueron las que estimularon el proceso de germinación.

Las plántulas se regaron manualmente dos veces al día con agua de llave y solución nutritiva Steiner (1984) al 25% de su concentración desde la emergencia hasta su trasplante. El trasplante se realizó en noviembre de 2018 en invernadero tipo cenital cubierto con plástico de 720 μm en el techo y malla antiáfidos en las paredes, ubicado en la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, unidad Tuxpan, de la Universidad Autónoma de Guerrero (18° 20' 51" LN, 99° 30' 32" LO, 758 msnm). Para esta actividad, se seleccionaron seis plántulas M₁ (las más vigorosas) por cada dosis en cada fenotipo de chile. El sustrato fue piedra pómez con granulometría de 2 a 9 mm, densidad aparente de 0.4 a 0.9 g cm⁻³, 24% de porosidad total, 16% de porosidad de aireación, 2.49% de agua fácilmente disponible (Luna *et al.* 2021).

Manejo del cultivo

Las plantas se mantuvieron en posición vertical mediante tutoreo con rafia que se colocó a lo largo de las hileras y se sujetó a postes de madera en los extremos de las mismas. Para el fertirriego se empleó la solución nutritiva Steiner (1984) al 50% de su fuerza iónica original, con pH ajustado a 5.5. Durante el desarrollo del experimento en invernadero se presentó temperatura máxima de 42 °C y mínima de 24 °C, y humedad relativa de 58%.

Variables de crecimiento y rendimiento

A los 120 días después del trasplante (ddt) se registraron las variables morfológicas: (i) altura (cm) de planta con un flexómetro Truper[®], desde la base del tallo en contacto con el sustrato hasta el punto de crecimiento apical de la rama más larga; (ii) diámetro del tallo (mm) mediante un vernier digital Truper[®] modelo CAL-6MP, a 2 cm de la base del tallo, y (iii) el número de ramas por planta. El rendimiento, se evaluó con base en el número de frutos acumulados de cuatro cosechas (el número de cosechas se limitó por las temperaturas mayores de 40 °C, en los meses de febrero a mayo) y su peso (g) (fresco y seco), con una báscula digital Torrey[®] serie L-PCR. Para la obtención del peso seco, los frutos recolectados en cada cosecha se almacenaron en bolsas de papel con perforaciones y se colocaron en una estufa de secado con aire reforzado (Riossa[®]) modelo HCF-62D, a 75 °C hasta que las muestras se mantuvieron a peso constante. Los parámetros de calidad del fruto se determinaron en 30 frutos cosechados (y se obtuvo un promedio por repetición), a los cuales se midió el diámetro polar (cm) y ecuatorial (mm); el primero de la base del pedúnculo al ápice, con un flexómetro Truper[®], y el segundo, con un vernier digital Truper[®] modelo CAL-6MP; el peso (g) (fresco y seco) individual de los frutos, con y sin semilla, se registraron con una báscula digital ISOLAB[®]; también, se contabilizó el número de semillas por fruto. Con el valor de los 30 frutos se obtuvo un promedio por repetición.

Se realizó un análisis de varianza combinado para cada variable cuyas fuentes de variación fueron Dosis (D), Fenotipo (F) y la interacción Dosis ×

Fenotipo. Las medias se compararon con la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$). Los análisis se efectuaron con el programa estadístico SAS, versión 9.1 (SAS 2002).

RESULTADOS

Los análisis de varianza combinados detectaron significancia ($\alpha \leq 0.05$) de las dosis de radiación (D) en el número de frutos por planta y los parámetros de calidad del fruto; mientras que, el fenotipo (F) mostró significancia ($\alpha \leq 0.05$) en los rasgos de crecimiento (excepto número de ramas), rendimiento y los parámetros de calidad del fruto. La interacción D × F solo fue significativa en altura y diámetro de tallo de las plantas M₁, y calidad del fruto (Tabla 1 a 3).

Efecto de radiación × fenotipo en aspectos morfológicos de plantas M₁

Las variables morfológicas (altura, diámetro del tallo y número de ramas) de las plantas M₁ de los tres fenotipos de chiles apaxtlecos evaluados presentaron respuesta similar con las dosis de radiación (0 a 300 Gy) (Figura 1). En Ancho chino 1, la altura de planta osciló entre 104.88 y 126.02 cm, el grosor del tallo de 12.89 a 21.87 mm y de 3.33 a 4.00 ramas. En plantas de Ancho chino 2, la altura varió de 87.53 a 118.30 cm, el diámetro de tallo de 11.40 a 21.27 mm y de 2.83 a 5.00 ramas. Únicamente, el Ancho liso mostró respuesta favorable en altura de planta (154.87 cm) con 300 Gy, y grosor del tallo (23.81 y 23.88 mm) de la planta M₁, cuando las semillas se irradiaron con 150 a 200 Gy, respectivamente (Figura 1a-b), el número de ramas fue de 3.00 a 4.33 (Tablas 2 y 3). La respuesta observada en los dos primeros parámetros se puede relacionar con el tamaño del fruto, ya que Ancho liso produce frutos de menor tamaño que los del Ancho chino (Tabla 3), situación que puede alterar el crecimiento de las plantas.

Efecto de radiación × fenotipo en parámetros del rendimiento y calidad del fruto de plantas M₁

La radiación gamma y el fenotipo de Chile afectaron estadísticamente ($\alpha \leq 0.05$) la producción de frutos de Chile apaxtleco (Tabla 1 a 3). La irradiación

Tabla 1. Grados de libertad y cuadrados medios de las fuentes de variación para características morfológicas, rendimiento y calidad del fruto de plantas M₁ de tres fenotipos de chiles apaxtleco.

FV	GL	AL	DT	NR	NFA	PFF	DPF	DEF	PFF	PSF	NSF	PSSF	PSFS
Dosis (D)	6	760.39 ^{ns}	53.31 ^{ns}	1.65 ^{ns}	1486.56*	45990.96 ^{ns}	5.81*	77.44*	20.36*	3.84*	1843.80*	0.08*	2.69*
Fenotipo (F)	2	7190.30*	194.84*	2.38 ^{ns}	4427.72*	469226.54*	2.55*	1108.91*	362.69*	31.80*	3447.14*	0.74*	25.03*
D × F	12	1072.98*	72.46*	1.76 ^{ns}	910.51 ^{ns}	35961.00 ^{ns}	3.70*	33.55*	37.76*	2.40*	884.15*	0.05*	1.92*
C.V. (%)		18	32	33	54	52	7	6	9	10	20	22	13

FV = Fuente de variación. GL = Grados de libertad. AL = Altura de la planta. DT = Diámetro de tallo. NR = Número de ramas. NFA = Número de frutos acumulados. PFF = Peso fresco del fruto. DPF = Diámetro polar del fruto. DEF = Diámetro ecuatorial del fruto. PFF = Peso fresco del fruto. PSF = Peso seco del fruto. NSF = Número de semillas por fruto. PSSF = Peso de semillas por fruto. PSFS = Peso seco del fruto sin semilla. * = Significativo, $\alpha \leq 0.05$. ns = No significativo, $\alpha \geq 0.05$.

Tabla 2. Medias de dosis de radicación para las características morfológicas y rendimiento de plantas M₁ de tres fenotipos de Chile apaxtleco.

Dosis (Gy)	AL (cm)	DT (mm)	NR	NFA	PFF (g)	DPF (mm)	DEF (mm)	PFF (g)	PSF (g)	NSF	PSSF (g)	PSFS (g)
0	108.33 ^a	20.46 ^a	3.56 ^a	57.11 ^{ab}	422.84 ^a	7.02 ^b	25.40 ^d	9.77 ^{ab}	2.81 ^b	64.09 ^d	0.53 ^{ab}	2.28 ^b
50	109.37 ^a	16.55 ^a	3.61 ^a	47.56 ^{ab}	340.99 ^a	7.03 ^b	26.98 ^c	10.47 ^a	3.22 ^a	64.32 ^a	0.54 ^a	2.68 ^a
100	116.02 ^a	19.07 ^a	4.00 ^a	65.78 ^a	416.56 ^a	7.52 ^b	26.74 ^{cd}	9.81 ^{ab}	3.16 ^a	63.91 ^a	0.52 ^{ab}	2.64 ^a
150	110.3 ^a	17.75 ^a	3.78 ^a	52.78 ^{ab}	393.44 ^a	7.21 ^{ab}	29.06 ^{ab}	10.14 ^{ab}	3.32 ^a	52.27 ^{bc}	0.46 ^{ab}	2.86 ^a
200	117.92 ^a	16.03 ^a	3.44 ^a	49.94 ^a	369.42 ^a	6.23 ^c	29.42 ^a	10.53 ^a	3.29 ^a	60.31 ^{ab}	0.49 ^{ab}	2.88 ^a
250	120.17 ^a	17.33 ^a	3.72 ^a	36.00 ^b	275.33 ^a	5.89 ^c	27.75 ^{bc}	7.97 ^c	2.41 ^c	43.67 ^{cd}	0.35 ^c	2.06 ^{bc}
300	125.99 ^a	20.08 ^a	4.33 ^a	52.11 ^{ab}	374.28 ^a	6.82 ^b	23.46 ^e	9.31 ^b	2.26 ^c	40.71 ^d	0.43 ^{bc}	1.92 ^c
C.V. (%)	18	32	33	54	52	7	6	9	10	20	22	13
DMS	10.98	5.91	1.25	28.05	193.58	0.45	1.51	0.92	0.30	11.35	0.10	0.32

AL = Altura de la planta. DT = Diámetro de tallo. NR = Número de ramas. NFA = Número de frutos acumulados. PFF = Peso fresco del fruto. DPF = Diámetro polar del fruto. DEF = Diámetro ecuatorial del fruto. PFF = Peso fresco del fruto. PSF = Peso seco del fruto. NSF = Número de semillas por fruto. PSSF = Peso de semillas por fruto. PSFS = Peso seco del fruto sin semilla. Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05.

Tabla 3. Medias del fenotipo para las características morfológicas y rendimiento de plantas M₁ de tres chiles apaxtleco.

Fenotipo	AL (cm)	DT (mm)	NR	NFA	PFF (g)	DPF (mm)	DEF (mm)	PFF (g)	PSF (g)	NSF	PSSF (g)	PSFS (g)
Ancho chino 1	113.12 ^b	16.80 ^b	3.55 ^a	57.19 ^a	410.23 ^a	6.82 ^b	27.90 ^b	9.70 ^b	3.05 ^b	57.09 ^b	0.62 ^a	3.14 ^a
Ancho chino 2	103.69 ^b	17.08 ^b	4.02 ^a	39.76 ^b	450.42 ^a	7.06 ^a	31.58 ^a	13.86 ^a	3.72 ^a	63.84 ^a	0.43 ^b	2.65 ^b
Ancho liso	129.54 ^a	20.70 ^a	3.76 ^a	57.88 ^a	250.59 ^b	6.57 ^c	21.43 ^c	5.58 ^c	2.00 ^c	45.91 ^c	0.37 ^c	1.63 ^c
C.V. (%)	18	32	33 ^a	54	52	7	6	9	10	20	22	13
DMS	10.98	3.06	0.64	14.52	100.22	0.23	0.78	0.47	0.15	5.87	0.05	0.16

AL = Altura de la planta. DT = Diámetro de tallo. NR = Número de ramas. NFA = Número de frutos acumulados. PFF = Peso fresco del fruto. DPF = Diámetro polar del fruto. DEF = Diámetro ecuatorial del fruto. PFF = Peso fresco del fruto. PSF = Peso seco del fruto. NSF = Número de semillas por fruto. PSSF = Peso de semillas por fruto. PSFS = Peso seco del fruto sin semilla. Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05.

de las semillas con 100 Gy en los fenotipos Ancho chino 1 (88 frutos planta⁻¹) y Ancho liso (74 frutos planta⁻¹), originó las plantas M₁ con mayor número de frutos (Figura 2a), en comparación con las plantas de Ancho chino 2 (29 a 42 frutos planta⁻¹). Por otro lado, el peso fresco por planta no varió significativamente por las dosis de radiación (0 a 300 Gy; pero, si por efecto del fenotipo; los mayores pesos se presentaron en los frutos provenientes de chiles Ancho chino 1 (224.00 a 528.10 g) y 2 (289.50 a 550.30 g), en comparación con los frutos de Ancho liso (183.70 a 323.60 g) (Figura 2b). En este sentido, el comportamiento del rendimiento de los tres chiles dependió directamente de los parámetros de calidad del fruto (tamaño y peso), los cuales fueron alterados significativamente por la radiación (Tablas 2 y 3, Figura 3).

El tamaño (diámetro ecuatorial y polar) y peso

(fresco y seco) del fruto fueron favorecidos con dosis de irradiación de 100 a 200 Gy; principalmente en los fenotipos Ancho chino 1 y 2; mientras que, dosis mayores de 200 Gy provocaron una respuesta negativa en los parámetros, especialmente en los frutos del Ancho liso, de tal modo que, en frutos de Ancho chino 1; el mayor diámetro ecuatorial (29.52 mm) se presentó con 200 Gy; mientras que, el diámetro polar (8.21 cm) y peso seco (3.80 g) fue con 150 Gy, y con 300 Gy fue el mayor peso fresco (11.47 g). En cuanto al Ancho chino 2; el mayor diámetro ecuatorial (35.89 mm) se obtuvo con 200 Gy, y con 150 Gy se presentó mayor diámetro polar (7.42 cm), peso fresco (16.81 g) y seco del fruto (4.93 g). Por otro lado, la formación de semilla mostró ser un parámetro sensible a la radiación gamma específicamente en los fenotipos de mayor tamaño (Ancho chino 1 y 2), y

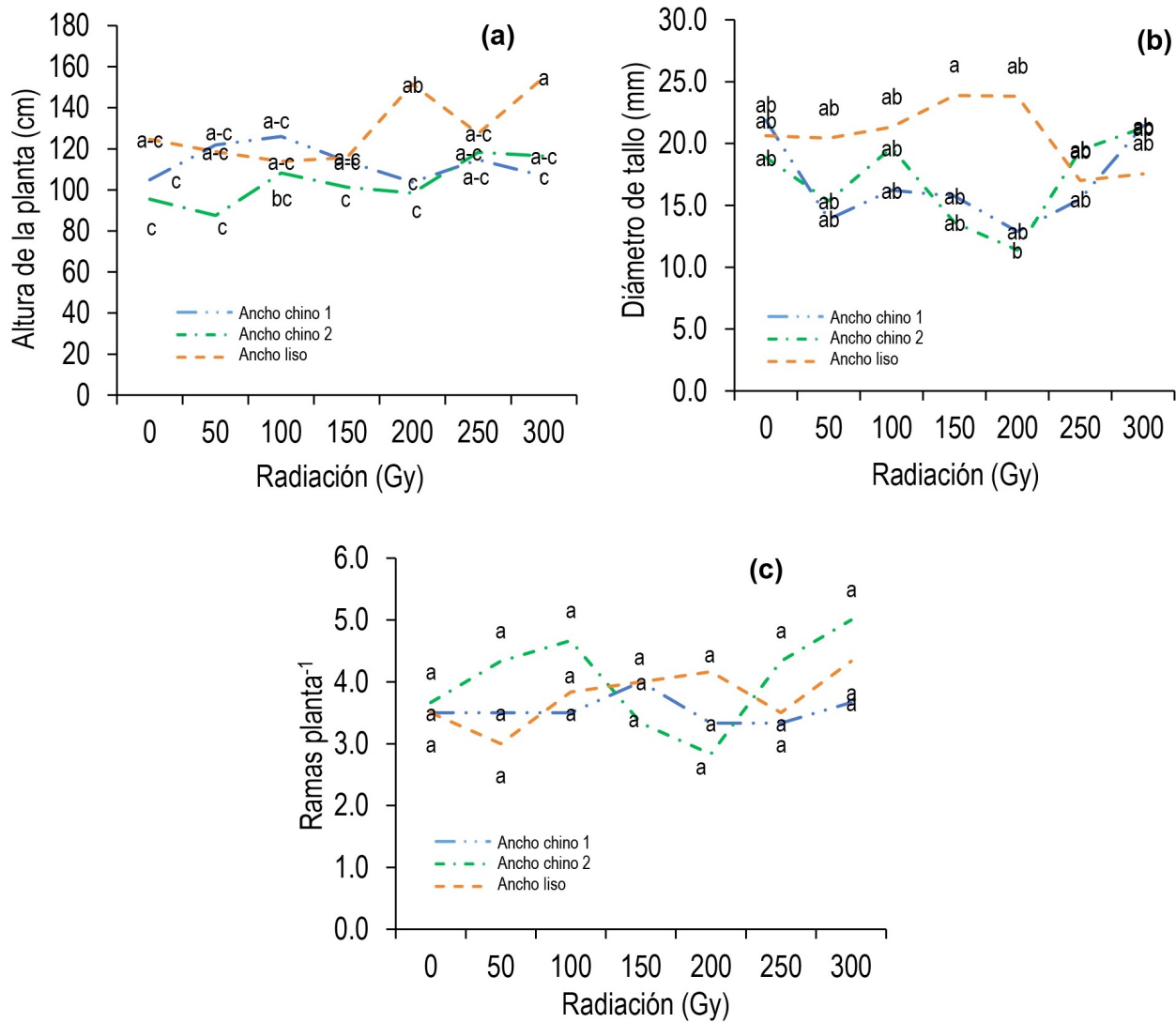


Figura 1. Efecto de dosis de radiación en rasgos morfológicos de tres fenotipos de chiles apaxtleco. Letras iguales en cada parámetro son estadísticamente iguales ($p \geq 0.05$). DMSa = 44.8. DMSb = 12.5. DMSc = 2.64.

que conforme aumentó la dosis de irradiación (> 200 Gy) se tuvo menor cantidad de semillas en los frutos. Respuesta contraria, se observó en los frutos de plantas M_1 del Ancho liso, provenientes de cualquier dosis de irradiación (100 a 300 Gy), que presentaron la mayor cantidad de semillas (42 a 51 semillas por fruto), en comparación con los frutos de plantas testigo (semillas sin irradiar), con 36 semillas por fruto.

DISCUSIÓN

La respuesta observada en aspectos morfológicos de los chiles apaxtlecos se puede relacionar con características ligadas a la planta (especie, cultivar, etapa de desarrollo, arquitectura de los tejidos y organización del genoma) (Chen *et al.* 2020; Muhammad *et al.* 2021) y con el grado de sensibilidad a la radiación ionizante (dosis, duración, tipo de mutágeno) (Hasan *et al.* 2020, Sani Haliru *et al.* 2020). En este sentido, diversas investigaciones señalan que las semillas irradiadas con rayos

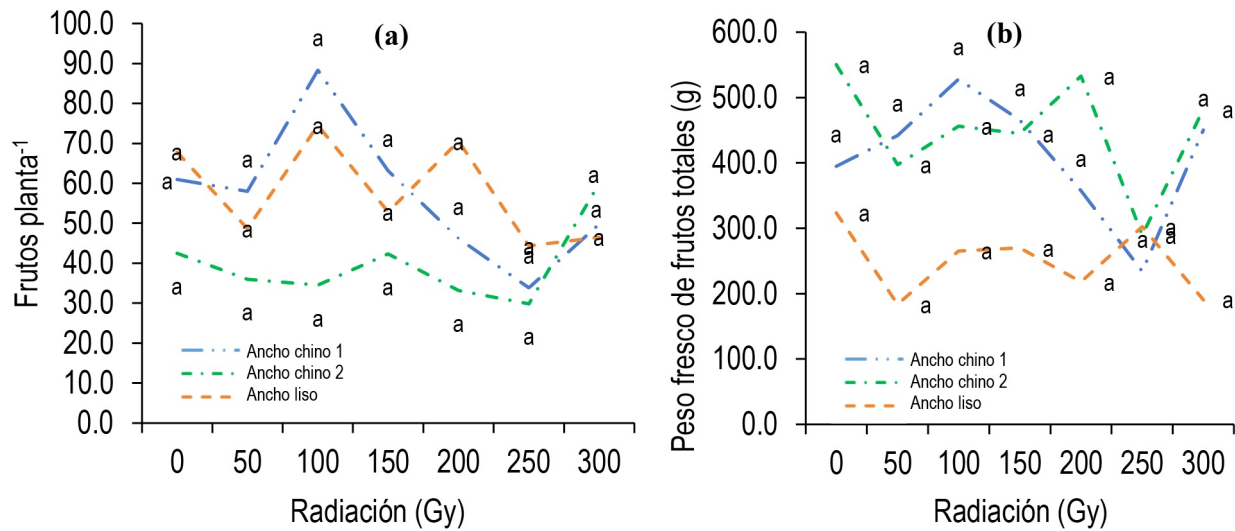


Figura 2. Efecto de dosis de radiación en el rendimiento de tres fenotipos de chiles apaxtleco. Letras iguales en cada parámetro son estadísticamente iguales ($p \geq 0.05$). DMSa = 59.21. DMSb = 408.55.

gamma originaran plantas que manifiestan cambios en el balance hormonal, actividad enzimática y ciclo celular, debido a daños en el DNA (Puerta-Ortiz y Morales-Aramburo 2020, Hong *et al.* 2022), en algunas situaciones la planta tiene la capacidad para reparar el daño, por lo tanto, los cambios se pueden expresar en mejor vigor, crecimiento, rendimiento o supresión en las progenies (enanismo, clorosis) (Andrew-Peter-Leon *et al.* 2021, Choi *et al.* 2021, Hong *et al.* 2022). Con respecto a los fenotipos de chiles apaxtlecos estudiados, ninguna dosis limitó el crecimiento de las plantas M_1 (Figura 1).

El efecto estimulante de la radiación en *C. annuum* L. fue reportado por Mullainathan y Aruldoss (2015) en plantas M_2 , provenientes de semillas irradiadas con 300 y 400 Gy; pues obtuvieron plantas de porte alto (75 a 80 cm) e intermedio (31 a 45 cm), con menor ramificación; sin embargo, la dosis de 500 Gy provocó plantas enanas (≤ 20.16 cm), con respecto a las plantas testigo (65 a 72.8 cm). Igualmente, en cereales y leguminosas se han observado resultados sobresalientes, principalmente con dosis bajas (< 100 Gy), que favorecen la acumulación de materia seca, el contenido total de clorofila y rendimiento (Majeed *et al.* 2018); mientras que, dosis altas (> 100 Gy) provocaron lesiones, irregu-

laridad en la síntesis de proteínas, desequilibrio hormonal (Ulukapi 2021) y en algunos casos la muerte de la planta (Olasupo *et al.* 2016). No obstante, los resultados anteriores contrastan con lo reportado por Soyam *et al.* (2019), quienes encontraron que dosis de 200 a 400 Gy aplicados a semillas, redujeron altura (6 a 15%), formación de ramas (4 a 16%) y frutos, y por ende rendimiento (peso en fresco del fruto) de las plantas M_1 de *C. annuum*, con respecto a las plantas testigo (altura: 74 cm; ramas: 8; frutos: 708 y peso: 52 kg por planta); mientras que, el tamaño (diámetro polar y ecuatorial) del fruto fue estadísticamente similar entre las plantas irradiadas y no irradiadas. Estos autores señalaron que al incrementar la dosis de irradiación gamma se generó una respuesta negativa en estos indicadores.

Los resultados obtenidos en productividad de chiles apaxtlecos evaluados en el presente estudio tienen similitud con lo reportado en plantas M_2 de *C. annuum* L. de semillas irradiadas con 400 Gy, que tuvieron mayor producción de flores y frutos (52 a 60), estos últimos con mayor tamaño que los frutos de plantas testigo (≤ 30 frutos) (Mullainathan y Aruldoss 2015). Asimismo, en plantas M_1 de *Psoralea corylifolia* L.; la irradiación estimuló la formación de ramas, flores y frutos; sin embargo, estos disminuyeron con-

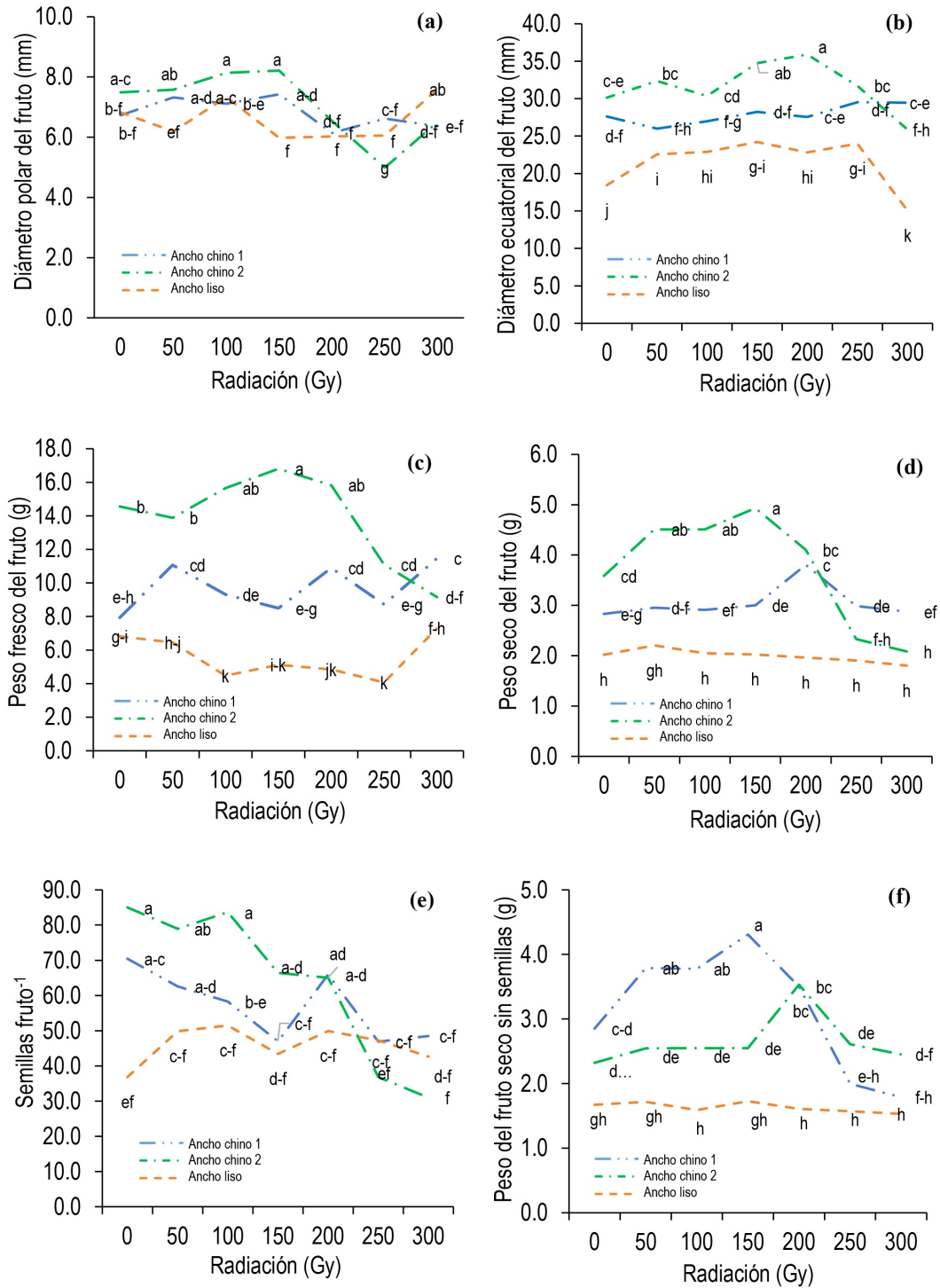


Figura 3. Efecto de dosis de radiación en parámetros de calidad del fruto de tres fenotipos de chiles apaxtleco. Letras iguales en cada parámetro son estadísticamente iguales ($p \geq 0.05$). DMSa = 0.95. DMSb = 3.19. DMSc = 1.95. DMSd = 0.65. DMSe = 23.96. DMSf = 0.68.

siderablemente con dosis altas (> 1000 Gy) de rayos gamma (Jan *et al.* 2011).

Existen resultados por el efecto de la aplicación de radiación gamma en los componentes del rendimiento de cultivos industriales (algodón, soya, frijol, cacahuete, okra) y cereales (arroz, trigo) (Billore *et al.* 2019, Martirena *et al.* 2019, Abaza *et al.* 2020, Chen *et al.* 2020). No obstante, se ha observado que la magnitud de los efectos horméticos son ligeros, inconsistentes y representan el 10% del valor obtenido en el control (Hase *et al.* 2020). En otros casos, la radioestimulación no se expresa en las siguientes generaciones o suele ser diferente entre individuos, principalmente en aquellos que tienen baja producción de biomasa (Choi *et al.* 2021). Lo anterior se debe a que en la generación M₁; las plantas son genéticamente heterocigotas, ya que un solo alelo es afectado por una mutación durante el tratamiento (Oladosu *et al.* 2016).

La disparidad de cambios biológicos que expresan las plantas por la irradiación gamma, se debe al grado de daño o modificación que provocan los radicales libres (peróxido de hidrogeno) en los componentes de las células (DNA, mitocondria y cloroplastos), que participan directamente en aspectos de la anatomía, fisiología, bioquímica y morfología de las plantas (Choi *et al.* 2021, Hong *et al.* 2022). Es por ello, que algunos investigadores sugieren dosis bajas e intermedias (< 200 Gy) (Majeed *et al.* 2018,

Andrew-Peter-Leon *et al.* 2021), porque estimulan la respiración, actividades enzimáticas y niveles de fitohormonas de las plantas (Han *et al.* 2020, Hong *et al.* 2022).

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio demuestran las respuestas morfológicas cuantitativas de las plantas de chile apaxtleco a la irradiación, que ocurren durante el crecimiento vegetativo y la reproducción. La radiación gamma ⁶⁰Co en dosis de 100 a 300 Gy no alteró los aspectos morfológicos de las plantas M₁ de los tres fenotipos de chiles apaxtlecos. Las dosis de 100 a 200 Gy estimularon los parámetros del rendimiento y calidad del fruto; sin embargo, dosis mayores de 200 Gy limitaron la formación de semillas en los frutos. Con relación al fenotipo de chile apaxtleco; el Ancho liso sólo mostró respuesta favorable en los rasgos de altura y número de ramas por planta; mientras que, los fenotipos Ancho chino 1 y 2 sobresalieron en parámetros del rendimiento y calidad del fruto. Estos resultados aportan conocimiento de la sensibilidad de las plantas y permite seleccionar individuos sobresalientes (en variantes de importancia económica) que pueden emplear en futuras investigaciones de mejoramiento genético.

LITERATURA CITADA

- Abaza GMSM, Awaad HA, Attia ZM, Abdel-lateif KS, Gomaa MA, Abaza SMMSM, Mansour E (2020) Inducing Potential Mutants in Bread Wheat Using Different Doses of Certain Physical and Chemical Mutagens. *Plant Breeding Biotechnology* 8: 252-264.
- Abaza GMSM, Awaad HA, Attia ZM, Abdel-lateif KS, Gomaa MA, Abaza SMSM, Mansour E (2020) Inducción de mutantes potenciales en trigo harinero utilizando diferentes dosis de ciertos mutágenos físicos y químicos. *Fitomejoramiento y Biotecnología* 8: 252-264.
- Aguilar RVH (2012) Cultivo del chile en México. Reseña de libro. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35: 264-265.
- Aguilar-Rincón VH, Corona-Torres T, López-López P, Latournerie-Moreno L, Ramírez-Meraz M, Villalón-Mendoza H. Aguilar-Castillo JA (2010) Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, ITConkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114p.
- Aklilu E (2021) Review on forward and reverse genetics in plant breeding. *All Life* 14: 127-135.

- Álvarez-Holguín A, Morales-Nieto CR, Avendaño-Arrazate CH, Santellano-Estrada E, Melgoza-Castillo A, Burrola-Barraza ME, 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: 81-88.
- Andrew-Peter-Leon MT, Ramchander S, Kumar KK, Muthamilarasan M, Pillai MA (2021) Assessment of efficacy of mutagenesis of gamma irradiation in plant height and days to maturity through expression analysis in rice. *PLoS ONE* 16: e0245603. DOI: 10.1371/journal.pone.0245603.
- Billore V, Shriram JM, Suprasanna P, Jain M (2019) Gamma irradiation induced effects on *in vitro* shoot cultures of dendrobium sonia orchid. *Biotechnology Reports* 22: 1-7. DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00343.
- Brito DA, Ángeles EA (2016) Inducción de Mutaciones con ⁶⁰Co y selección de quimeras en cacahuete (*Arachis hypogaea*) Tipo Virginia. *Acta Universitaria* 26: 11-17.
- Castellón-Martínez É, Chávez-Servia JL, Carrillo-Rodríguez JC, Vera-Guzman, Araceli M (2012) Preferencias de consumo de chiles (*Capsicum annuum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35 (spe5): 27-35.
- Chen T, Huang L, Wang M, Huang Y, Zeng R, Wang X, Wang L, Wan S, Zhang L (2020) Ethyl methyl sulfonate-induced mutagenesis and its effects on peanut agronomic, yield and quality traits. *Agronomy* 10(5): 655. DOI: 10.3390/agronomy10050655.
- Choi HI, Han SM, Jo YD, Hong MJ, Kim SH, Kim JB (2021) Effects of acute and chronic gamma irradiation on the cell biology and physiology of rice plants. *Plants* 10(3): 439. DOI: 10.3390/plants10030439.
- Deshmukh PD, Malode SN (2018) Effects of gamma radiation on seed germination, plant survival and growth characteristics in *Dianthus caryophyllus* var. Chabaud. *Journal of Global Biosciences* 7: 5403-5410.
- FAOSTAT (2023) Producción de chiles, pimientos. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2023.
- Foroughbakhch-Poumavab R, Bacó pulos-Mejía E, Benavides-Mendoza A (2015) Efecto de la irradiación con UV-C en la germinación y vigor de tres especies vegetales. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2: 129-137.
- Gálvez MYA, Cea M, Leshner GJM, Latournerie ML, Martínez ME, Martínez SJL, Castañón NG (2021) Comparación molecular de poblaciones de Chile (*Capsicum* spp.) de Tabasco y Chiapas, México. *Bioagro* 33: 3-12.
- Gaswanto R, Syukur M, Purwoko SB, Hidayat HS (2016) Induced mutation by gamma rays irradiation to increase chilli resistance to Begomovirus. *AGRIVITA* 38: 24-32.
- Han AR, Hong MJ, Nam B, Kim BR, Park HH, Baek I, Kil YS, Nam JW, Jin CH, Kim JB (2020) Comparison of flavonoid profiles in sprouts of radiation breeding wheat lines (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy* 10(10): 1489. DOI: 10.3390/agronomy10101489.
- Haralayya B, Asha IS (2017) Molecular Marker Application in Capsicum spp: A Supplement to Conventional Plant Breeding. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6: 3840- 3855.
- Hasan N, Rafii MY, Rahim HA, Ahmad F (2020) Mutagenic effect of ion beam irradiation on survival and seedling growth characters of Malaysian rice (*Oryza sativa* L.) variety MR84. *Annals of Agri Bio Research* 25: 228-233.
- Hase Y, Satoh K, Seito H, Oono Y (2020) Genetic consequences of acute/chronic gamma and carbon ion irradiation of Arabidopsis thaliana. *Frontiers in Plant Science* 11: 336. DOI: 10.3389/fpls.2020.00336.

- Hong MJ, Kim DY, Jo YD, Choi HI, Ahn JW, Kwon SJ, Kim SH, Weon YS, Kim JB (2022) Biological effect of gamma rays according to exposure time on germination and plant growth in wheat. *Applied Sciences* 12(6): 3208. DOI: 10.3390/app12063208.
- Jan S, Parween T, Siddiqi TO, Mahmooduzzafar X (2011) Gamma radiation effects on growth and yield attributes of *Psoralea corylifolia* L. with reference to enhanced production of psoralen. *Plant Growth Regul* 64: 163-171.
- Konishi A, Furutani N, Minamiyama Y, Ohyama A (2019) Detection of quantitative trait loci for capsaanthin content in pepper (*Capsicum annuum* L.) at different fruit ripening stages. *Breeding Science* 69: 30-39.
- López RGO (2003) Chilli, La especia del nuevo mundo. Facultad de ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista Ciencia* 69: 66-75.
- Luna-Fletes JA, Cruz-Crespo E, Can-Chulim Á (2021) Piedra pómez, tezontle y soluciones nutritivas en el cultivo de tomate cherry. *Terra Latinoamericana* 39: e781. DOI: 10.28940/terra.v39i0.781.
- Madriz-Martínez M, Fernández-Acuña A, Hernandez-Villalobos S, Orozco-Rodríguez R, Argüello-Delgado J (2022) Radiosensibilidad del arroz (*Oryza sativa* L. var CR5272) por irradiación gamma en Costa Rica. *Cultivos Tropicales* 43(1): e08.
- Majeed A, Muhammad Z, Ullah R, Ali H (2018) Gamma irradiation I: Effect on germination and general growth characteristics of plants-a review. *Pakistan Journal of Botany* 50: 2449-2453.
- Martirena RA, Veitia RN, Rodríguez GL, Collado LR, Rodríguez TD, Rivero QL, Ramírez-López M (2019) Efecto de diferentes explantes irradiados en la regeneración *in vitro* de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar "ICA Pijao". *Acta Biológica Colombiana* 24: 13-25.
- Massot PH, Barbieri RL (2016) Plant breeding of chili peppers (*Capsicum*, Solanaceae) - A review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 10: 148-154.
- Molina-Suarez YZ, de Jesús Méndez-Aguilar M, Santos-Dzul RI, Emmanuel E, Brito-Estrella RE (2021) Diversidad de chiles (*Capsicum* spp.) cultivados en huertos familiares de seis comunidades en Quintana Roo, México. In: Méndez AMJ, Cáliz DH, Xolalpa A, Brito EE, Alvarado DSH, Luckson PJ (eds) *Experiencias productivas en los sistemas agroalimentarios de la Zona Maya de Quintana Roo*. UIMQROO, México. pp: 48-65.
- Muhammad I, Rafii MY; Nazli MH; Ramlee SI; Harun AR; Oladosu Y (2021) Determination of lethal (LD) and growth reduction (GR) doses on acute and chronic gamma-irradiated Bambara groundnut [*Vigna subterranea* (L.) Verdc.] varieties. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 14: 133-145.
- Mullainathan L, Aruldoss T (2015) Effect of Gamma Rays in Induced Morphological Mutants on M₂ Generation of Chilli (*Capsicum annuum* L.) Var K1. *International Letters of Natural Sciences* 3: 19-24.
- Oladosu Y, Rafii MY, Abdullah N, Hussin G, Ramli A, Rahim HA, Miah G, Magaji U (2016) Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 30: 1-16. DOI: 10.1080/13102818.2015.1087333.
- Olasupo FO, Ilori CO, Forster BP, Bado S (2016) Mutagenic Effects of Gamma Radiation on Eight Accessions of Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). *American Journal of Plant Sciences* 7: 339-351.
- Pardo-Roldán A (2015) Mutagénesis inducida en microbulbos de *Allium sativum* L. *Acta Agronómica* 64: 254-259.
- Patil HU, Deshmukh GN, Kazi NA (2015) Mutation breeding in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* T.). *Asian Journal of Multidisciplinary Studies* 3: 25-27.

- Puerta-Ortiz JA, Morales-Aramburo J (2020) Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. *Revista Colombiana de Cardiología* 27: 61-71.
- Ramchander S, Ushakumari R, Pillai MA (2015) Lethal dose fixation and sensitivity of rice varieties to gamma radiation. *Indian Journal of Agricultural Research* 49: 24-31.
- Reyes-López D, Huerta-Lara M, Avendaño-Arrazate CH, Silva-Gómez SE, De la Cruz-Torres E, García-Andrade JM, Martínez-Bolaños M (2018) Efectos de rayos gamma (^{60}Co) en esquejes de vainilla (*Vanilla planifolia* G. Jackson): In: Balcázar GM, Cortina RGE, Díaz SAC, De la Cruz-Sánchez E, Escobar AL, Ortiz SJJ, Rodríguez RRG, Tejeda VSA (eds) 60 años del nacimiento de las instituciones nucleares en México. ININ-SUTIN. Estado de México, México. pp: 243-250.
- Salomón JL, González CM, Castillo C, Varela M (2017) Comportamiento de Barna, cultivar de papa (*Solanum tuberosum* L.) ante diferentes dosis de rayos gamma de fuente cobalto 60. *Cultivos Tropicales* 38: 127-130
- Sani Haliru B, Rafii MY, Mazlan N, Ramlee SI, Muhammad I, Silas Akos I, Rini Bashir Y (2020) Recent strategies for detection and improvement of brown planthopper resistance genes in rice: A review. *Plants* 9(9): 1202. DOI: 10.3390/plants9091202.
- SAS (2002) SAS/STAT. User's Guide, versión 9.0. Statistical Analysis System Institute. Cary, N. C. USA. 4424p.
- SIAP (2021) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de Siembras y Cosechas. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/. Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021.
- Soyam SR, Musmade AM, Bhalekar MN, Patil BT, Kute NS, Nimbalkar CA (2019) Effect of gamma rays on quantitative characters of chilli in M_1 generation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 8: 514-515.
- Steiner AA (1984) The universal nutrient solution. In: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. pp: 633-649.
- Thisawech M, Saritnum O, Sarapirom S, Prakrajang K, Phakham W (2020) Effects of plasma technique and gamma irradiation on seed germination and seedling growth of chili pepper. *Chiang Mai Journal of Science* 47: 73-82.
- Ulukapi K (2021) Hormetic effect of gamma irradiation under salt stress condition in *Phaseolus vulgaris*. *Chilean journal of agricultural research* 81: 256-269.
- Vázquez-Casarrubias G, Escalante-Estrada JAS, Rodríguez-González Ma T, Ramírez-Ayala C, Escalante-Estrada LE (2011) Edad al trasplante y su efecto en el crecimiento y rendimiento de chile apaxtleco. *Revista Chapingo Seria Horticultura* 17: 61-65.
- Vera-Sánchez KS, Cadena IJ, Latournerie ML, Santiaguillo HJF, Rodríguez CA, Basurto PFA, Castro LD, Rodríguez GE, López LP (2016) Conservación y utilización sostenible de las hortalizas nativas de México. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, México. 132p.
- Villalta-Villalobos J, Gatica-Arias A (2019) Una mirada en el tiempo: mejoramiento genético de café mediante la aplicación de la biotecnología. *Agronomía Mesoamericana* 30: 577-599.
- Xiao-min Z, Zheng-hai Z, Xiao-zhen G, Sheng-li M, Xi-xiang L, Chadœuf J, Palloix A, Li-hao W, Bao-xi Z (2016) Genetic diversity of pepper (*Capsicum* spp.) germplasm resources in China reflects selection for cultivar types and spatial distribution. *Journal of Integrative Agriculture* 15: 1991-2001.