



**INDUCTION OF VARIABILITY IN SEEDLING VIGOR,
MORPHOLOGICAL CHARACTERS AND SELF-INCOMPATIBILITY OF
M₁ PLANTS OF THREE VARIETIES OF *Physalis ixocarpa* Brot. THROUGH
⁶⁰Co GAMMA RAYS †**

[INDUCCIÓN DE VARIABILIDAD EN EL VIGOR DE PLÁNTULA,
CARACTERES MORFOLÓGICOS Y AUTOINCOMPATIBILIDAD DE
PLANTAS M₁ DE TRES VARIEDADES DE *Physalis ixocarpa* Brot.
MEDIANTE RAYOS GAMMA ⁶⁰Co]

**Oscar M. Antúñez-Ocampo^{1*}, Manuel Sandoval-Villa², Serafín Cruz-Izquierdo,
Leopoldo E. Mendoza-Onofre², Aureliano Peña-Lomelí³,
Amalio Santacruz-Varela and Eulogio De la Cruz-Torres⁴**

¹*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Iguala. Carr. Iguala-Tuxpan, km 2.5. Iguala de la Independencia, Guerrero, México. C. P. 40000. antunez.oscar@inifap.gob.mx*

²*Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Carr. Federal México-Texcoco Km 36.5, Montecillo. Estado de México. México. C.P. 56230.*

³*Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Carr. Federal México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México. México. C. P. 56230.*

⁴*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Carr. México-Toluca s/n. La Marquesa, Ocoyoacac, México. C. P. 52750.*

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) is an obligated allogam species with gametophyte auto-incompatibility, which impedes the generation of endogamic lines by auto-fecundation to obtain hybrids. **Objective.** To evaluate the effect of six doses of ⁶⁰Co gamma rays (from 0 to 300 Gy) applied to seeds, over seedling vigor, growth and reproductive features of M₁ plants of three husk tomato varieties (Manzano, Verde Puebla, and San Miguel). **Methodology.** The 18 treatments were distributed in a completely randomized design with five replications for the variables related to seedling vigor and 10 replications for the morphological and reproductive plant variables. **Results.** The radiation decreased emergency and survival of seedlings, height, and length of roots of M₁ seedling. Regarding the growth of M₁ plants, the doses of 100 and 300 Gy stimulated only height, the other doses had the same response as the control. Irradiation did not change self-incompatibility, as no fruit produced seed. **Implications.** The study allows to determine the sensitivity of the peel tomato to irradiation, by subjecting seeds to different doses of gamma rays and assess whether it is possible to obtain outstanding individuals in force and flowers that present self-fertilization, considering all the advantages of this type of pollination (form lines, to generate hybrids). **Conclusions.** The M₁ plants of the varieties Manzano and Verde Puebla excelled in growth; but those of San Miguel presented more self-pollinated flowers. The three varieties resulted sensitive to radiation; but growth variables varied depending on the variety and dose of radiation.

Key words: Self-incompatibility; growth; gamma rays; tomatillo; seeds; vigor.

RESUMEN

Antecedentes. El tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) es una especie alógama obligada con autoincompatibilidad gametofítica, lo que impide generar líneas endogámicas por autofecundación para la eventual obtención de híbridos. **Objetivo.** Evaluar el efecto de seis dosis de rayos gamma ⁶⁰Co (desde 0 hasta 300 Gy) aplicados a semilla, en el vigor de plántula y rasgos de crecimiento y reproductivos de las plantas M₁ de tres variedades (Manzano, Verde Puebla, San Miguel). **Metodología.** Los 18 tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones para las variables relacionadas con el vigor de plántula y 10 repeticiones

† Submitted May 24, 2022 – Accepted May 26, 2023. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4373>



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

ISSN: 1870-0462.

ORCID iD= Oscar Martín Antunez Ocampo: <http://orcid.org/0000-0002-9943-1032>; Manuel Sandoval Villa: <http://orcid.org/0000-0002-0228-0734>; Serafín Cruz Izquierdo: <http://orcid.org/0000-0002-3947-5877>; Leopoldo E. Mendoza Onofre: <http://orcid.org/0000-0002-7676-8660>; Aureliano Peña Lomelí: <http://orcid.org/0000-0002-9123-494X>; Amalio Santacruz Varela: <http://orcid.org/0000-0003-1018-5224>; Eulogio De la Cruz Torres: <http://orcid.org/0000-0002-6870-1765>

para las variables morfológicas y reproductivas de la planta. **Resultados.** La radiación disminuyó la emergencia y supervivencia de plántulas; la altura de y longitud de la raíz de plántulas M₁. En cuanto al crecimiento de planta M₁, las dosis de 100 y 300 Gy estimularon solamente la altura, las demás dosis tuvieron el mismo comportamiento que el testigo. La irradiación no modificó la autoincompatibilidad, pues ningún fruto produjo semilla. **Implicaciones.** El estudio permite determinar la sensibilidad del tomate de cáscara a la irradiación, al someter semillas a diferentes dosis de rayos gamma y valorar si es posible obtener individuos sobresalientes en vigor y de flores que presenten autofecundación, considerando todas las ventajas que tiene este tipo de polinización (formar líneas, para generar híbridos). **Conclusiones.** Las plantas M₁ de las variedades Manzano y Verde Puebla sobresalieron en crecimiento; pero, las de San Miguel presentaron más flores autofecundadas. Las tres variedades resultaron sensibles a la radiación; pero los rasgos de crecimiento variaron según la variedad y la dosis de radiación.

Palabras clave: Autoincompatibilidad; crecimiento; rayos gamma; tomatillo; semillas; vigor.

INTRODUCCIÓN

El tomate de cáscara o tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) es una solanácea nativa de México, que incluye variedades de hábito rastrero, semi-rastrero o erecto con frutos de diferente tamaño y color (*i.e.*, verde, morado, amarillo, blanco) protegidos por un cáliz de color verde; además, las plantas son anuales o perennes (Santiaguillo *et al.*, 2010). En la gastronomía mexicana, el fruto se utiliza principalmente en salsas o guisos pues es un sustituto del jitomate (*Solanum lycopersicum* L.); también se emplean otros órganos de la planta con fines comestibles, medicinales, industriales y ornamentales (Santiaguillo y Blas, 2009). La producción se destina al mercado nacional e internacional (EE.UU. y Canadá) (Ponce *et al.*, 2012). En el año 2018 (41, 317 ha) se ubicó como el séptimo cultivo hortícola en México (Coronado-González *et al.*, 2019). Las entidades federativas que destacan por su producción son Sinaloa, Puebla, Jalisco, Zacatecas, Sonora, Michoacán y Estado de México (SIAP, 2019).

A pesar de la importancia que tiene este cultivo en México, existen pocas investigaciones enfocadas en su mejoramiento genético, debido a la autoincompatibilidad gametofítica que presenta esta especie, lo que impide generar líneas endogámicas por autofecundación para eventualmente producir híbridos; por lo que se siguen sembrando poblaciones nativas (Peña *et al.*, 2011; Santiaguillo *et al.*, 2012). La mayoría de las investigaciones en tomate de cáscara provienen del programa de mejoramiento genético de la Universidad Autónoma Chapingo, que ha registrado 16 variedades, 12 de ellas mejoradas por selección, mediante los métodos de Selección Masal Visual Estratificada, Selección Familiar de Medios Hermanos Maternos y Selección Combinada de Medios Hermanos Maternos (Peña *et al.*, 2002; SNICS, 2019).

Una forma de generar variabilidad genética y en menor tiempo es mediante la mutagénesis, específicamente con la aplicación de rayos gamma ⁶⁰Co (Oladosu *et al.*, 2016), que producen alteraciones de tipo estructural, fenotípico y de comportamiento, en células, tejidos, órganos y plantas completas; además, radioestimulan los procesos fisiológicos de las plantas a través de la

producción de radicales libres en las células (Kim *et al.*, 2004; Ilyas y Naz, 2014; Oladosu *et al.*, 2016). Fayza *et al.* (2011) evaluaron mutaciones de clorofila y morfológicas de las progenies M₂ de *Physalis ixocarpa* provenientes de semillas irradiadas con 20 a 100 Gy de rayos gamma. La mutagenesis también se ha utilizado para modificar la autoincompatibilidad de la papa (*Solanum tuberosum* L.) (Hernández y Sosa, 1998). Por lo tanto, es posible que mediante el uso de la radiación como método geotécnico se mejoren las características fenotípicas y reproductivas de las plantas; así como, la calidad de los frutos (Honda *et al.*, 2006).

Existe una creciente demanda de variedades mejoradas de tomate de cáscara que destaquen por su rendimiento (≥ 40 t ha⁻¹), hábito de crecimiento erecto, precocidad, tamaño y color de fruto (Ponce *et al.*, 2012; Peña-Lomelí *et al.*, 2014). En la presente investigación se evaluó el efecto de la irradiación gamma ⁶⁰Co aplicada en semillas, en el vigor de plántulas M₁, en el crecimiento vegetativo subsecuente y en la presencia de semillas en frutos provenientes de flores autofecundadas de tres variedades de tomate de cáscara (Manzano, Verde Puebla y San Miguel). Se plantea que la aplicación de rayos gamma a la semilla aumenta la emergencia y el crecimiento de las plántulas M₁ de tomate de cáscara, y que al menos una de las dosis de irradiación aplicadas en las semillas de las variedades de tomate, origina plantas M₁ sobresalientes en características de crecimiento y frutos con semilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

En el experimento se utilizaron semillas de tomate de cáscara de un año de edad de las variedades Manzano (hábito erecto, ciclo tardío, fruto de color amarillo), Verde Puebla (hábito semi-erecto, ciclo precoz, fruto de color verde oscuro) y San Miguel (hábito rastrero, ciclo precoz, fruto de color morado) provenientes de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en Texcoco de Mora, Estado de México en las coordenadas 19.48 LN y -98.89 LO, a una altitud de 2253 msnm.

Irradiación de las semillas

Las semillas se irradiaron en febrero de 2016, con el equipo LGI-01 Transelektro, en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) (coordenadas: 19.29 LN y -99.39 LO, a una altitud de 3055 msnm), ubicado en la carretera Toluca-México, Estado de México.

Factor de estudio y diseño experimental

Los factores en estudio fueron: dosis de irradiación (0, 100, 150, 200, 250, 300 Gy de rayos gamma ^{60}Co en 5 g de semilla) y variedades de tomate. Los 18 tratamientos resultaron de la combinación factorial de estos dos factores, y se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con cinco repeticiones para las variables relacionadas con el vigor de plántula y 10 repeticiones para las correspondientes al crecimiento de plantas M_1 . La unidad experimental para medir el vigor de la plántula fue una charola con 100 semillas por dosis en cada variedad, y para evaluar el crecimiento de plantas M_1 fue una planta representativa de cada dosis, la que se trasplantó a una bolsa negra de polietileno de 9 L de volumen.

Establecimiento y manejo del experimento

Las semillas irradiadas se sembraron el 28 de febrero de 2016, en charolas de unicel con turba como sustrato y se regaron con agua potable (pH 7.6 y conductividad eléctrica de 0.5 dS m^{-1}). Desde que las plántulas emergieron hasta su trasplante se regaron manualmente dos veces al día también con agua potable. El trasplante se realizó el 11 de abril de 2016 en invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral, ubicado en Montecillo (coordenadas: 19.46 LN y -98.90 LO, a una altitud de 2240 msnm), Estado de México. El sustrato utilizado fue tezontle con granulometría de 1 a 10 mm, densidad aparente promedio de 0.82 g cm^{-3} , 50 % de porosidad total, 45 % de porosidad de aireación, 5.42 % de agua fácilmente disponible, sin capacidad de intercambio de cationes y conductividad eléctrica cercana a cero (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2011). Las plantas M_1 se mantuvieron en posición vertical mediante tutores con rafia que se colocó a lo largo de las hileras y se sujetó a postes de madera en los extremos de las mismas. Se empleó la solución nutritiva Steiner a 75 % de su fuerza iónica original (Steiner, 1984) con pH ajustado a 6.0.

Variables evaluadas

El vigor de la plántula M_1 se cuantificó mediante cinco variables: el porcentaje de emergencia de plántulas a los 24 días después de la siembra (dds), con respecto a

las semillas sembradas; porcentaje de supervivencia de plántulas, con base en el número de plántulas presentes a los 40 dds; altura de la plántula (cm) de la base de la raíz hasta la hoja más joven; diámetro de tallo (mm) a 1 cm desde la base de la raíz y la primera hoja; longitud de la raíz (cm) desde la base de la raíz a la raíz más larga. Las tres últimas variables se registraron a los 40 dds en cinco plántulas M_1 seleccionadas al azar por dosis en cada variedad y se obtuvo un promedio por repetición. En cuanto a las variables relacionadas con el crecimiento de las plantas M_1 , a partir de los 25 días después del trasplante (ddt), en cada unidad experimental se midió: altura de la planta (cm) con un flexómetro, desde el sustrato hasta la rama más larga, y diámetro de tallo (mm) mediante un vernier, a 2 cm de la base del tallo. Después de esta fecha, estas variables continuaron registrándose cada 20 días hasta la cosecha. A los 60 ddt se cuantificó el número de ramas a la primera bifurcación por planta. Al inicio de la floración se cubrieron 10 botones florales por planta con bolsa de papel para contabilizar el número de flores autofecundadas y el número de frutos con semilla (julio, 2016; aproximadamente a los 100 ddt).

Análisis estadísticos

En cada variable se aplicó un análisis de varianza combinado cuyas fuentes de variación fueron Dosis, Variedad y la interacción Dosis \times Variedad. Las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los análisis se efectuaron con el programa estadístico SAS, versión 9.1 (SAS Institute, 2002). Además, en las variables del vigor y rasgos de crecimiento de la planta se aplicó regresión polinomial con los datos de las dosis de irradiación para cada variedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado detectó significancia ($\alpha \leq 0.05$) de las tres fuentes de variación en características del vigor de plántula como emergencia, supervivencia y altura; pero casi ninguna fuente de variación influyó en el diámetro de tallo y la longitud de la raíz (Tabla 1).

En cuanto a los caracteres de crecimiento (altura y diámetro de tallo) de las plantas M_1 , los resultados del análisis de varianza presentaron significancia ($\alpha \leq 0.05$) en distintos muestreos por efecto de Dosis, Variedad y su interacción (Tabla 2). El número de ramas a la primera bifurcación fue afectado por las tres fuentes de variación y el número de flores autofecundadas solo fue afectado por la Variedad (Tabla 3). La condición de autoincompatibilidad no se modificó; pues en todos los tratamientos los frutos fueron partenocárpicos (sin semilla), por lo cual no se presenta esta variable en el Tabla 3.

Tabla 1. Grados de libertad y cuadrados medios de las fuentes de variación para los caracteres de vigor de plántulas M₁ de *Physalis ixocarpa* Brot.

F. V.	G. L.	EM	SP	AL	DT	LR
Dosis (D)	5	3906.6*	3906.6*	19.4*	0.1 ^{ns}	9.4*
Variedad (V)	2	1486.7*	1486.7*	0.7 ^{ns}	0.1 ^{ns}	3.5 ^{ns}
D × V	10	1504.1*	1504.1*	0.9*	0.1 ^{ns}	1.5 ^{ns}
C.V. (%)		20	20	22	19	16

F. V. = Fuente de variación. G. L. = Grados de libertad. EM = Emergencia. SP = Supervivencia. AL= Altura. DT = Diámetro de tallo. LR = Longitud de raíz. C.V. = Coeficiente de variación. * = Significativo ($\alpha \leq 0.05$). ns = No significativo ($\alpha \geq 0.05$).

Tabla 2. Grados de libertad y cuadrados medios de las fuentes de variación para la altura y diámetro de tallo de plantas M₁ de *Physalis ixocarpa* (Brot.).

F. V.	G. L.	Altura de la planta				Diámetro de tallo			
		Días después del trasplante (ddt)							
		25	45	65	85	25	45	65	85
Dosis (D)	5	23.3*	21.2 ^{ns}	102.7 ^{ns}	877.6*	0.6 ^{ns}	2.9*	7.4 ^{ns}	9.0 ^{ns}
Variedad (V)	2	37.7*	1147.2*	5876.7*	7381.2*	0.3 ^{ns}	58.4*	28.5*	1.3 ^{ns}
D × V	10	14.9*	39.7*	117.3*	435.2*	1.1*	7.8*	5.5 ^{ns}	10.6 ^{ns}
C. V. (%)		18	17	18	17	33	17	18	23

F. V. = Fuente de variación. C. V. = Coeficiente de variación. * = Significativo ($\alpha \leq 0.05$). ns = No significativo ($\alpha \geq 0.05$).

Tabla 3. Grados de libertad y cuadrados medios de las fuentes de variación para número de ramas a la primera bifurcación y flores autofecundadas de plantas M₁ de *Physalis ixocarpa* (Brot.).

F. V.	G. L.	NR	NFA
Dosis (D)	5	11.5*	1.3 ^{ns}
Variedad (V)	2	86.5*	91.2*
D × V	10	7.9*	1.3 ^{ns}
C. V. (%)		27	49

F. V. = Fuente de variación. C. V. = Coeficiente de variación. NRB = Número de ramas. NFA = Número de flores autofecundadas. * = Significativo ($\alpha \leq 0.05$). ns = No significativo ($\alpha \geq 0.05$).

Efecto de tratamientos en caracteres de plántulas M₁

Las características de vigor de plántulas M₁ de las tres variedades de tomate de cáscara (Figura 1) disminuyeron con todas las dosis de radiación (100 a 300 Gy), y especialmente a 300 Gy donde el crecimiento fue significativamente menor que el testigo ($p \leq 0.05$).

El porcentaje de plántulas emergidas fue igual al porcentaje de plántulas supervivientes a los 40 dds, por lo que en la Figura 1 solamente se incluye esta última variable (Figura 1d). La disminución de la altura de plántula (Figura 1a) por efecto de las dosis de radiación fue mayor que la disminución en el diámetro de tallo (Figura 1b) o que la longitud de la raíz (Figura 1c). En general, la respuesta de las plántulas de las tres variedades a las dosis de irradiación fue similar y

solamente la variedad Verde Puebla mostró una respuesta favorable en el porcentaje de supervivencia cuando las semillas se irradiaron con 200 Gy (Figura 1d). Los resultados obtenidos se pueden relacionar con la calidad de las semillas de *P. ixocarpa*, las cuales presentan problemas de viabilidad (Ramírez *et al.*, 2013; García-Osuna *et al.*, 2015) y baja tasa de germinación, donde los parámetros de tamaño y sanidad (daños o rupturas en la testa) influyen en la capacidad germinativa y el vigor de plántula, independientemente de sus características genéticas (Doria, 2010; Ayala-Villegas *et al.*, 2014). Al respecto, Martínez *et al.* (2004) reportaron mayor porcentaje de germinación cuando se realiza la clasificación de la semilla de tomate de cáscara; además, indicaron que el tamaño de semilla medio (estándar) es de mejor calidad. Por otro lado, en diversos cultivos (soya, arroz, jitomate, trigo) (Álvarez *et al.*, 2013; Oladosu *et al.*, 2016) se han documentado los efectos de las dosis rayos gamma en la germinación de la semilla y el crecimiento de plántulas irradiadas, los cuales se relacionan con los cambios morfológicos, bioquímicos y fisiológicos registrados durante el crecimiento del cultivo. En este sentido, dosis bajas provocan cambios en el balance hormonal y el intercambio gaseoso en las hojas para superar factores de estrés, como la variación de la intensidad de la luz y la temperatura que prevalecen durante el crecimiento de la planta (Lagoda, 2012). Mientras que, la inhibición del crecimiento inducida por dosis altas se ha atribuido a la detención del ciclo celular (en zonas meristemáticas), síntesis de auxinas y al daño en el genoma (Hernández-Muñoz *et al.*, 2019).

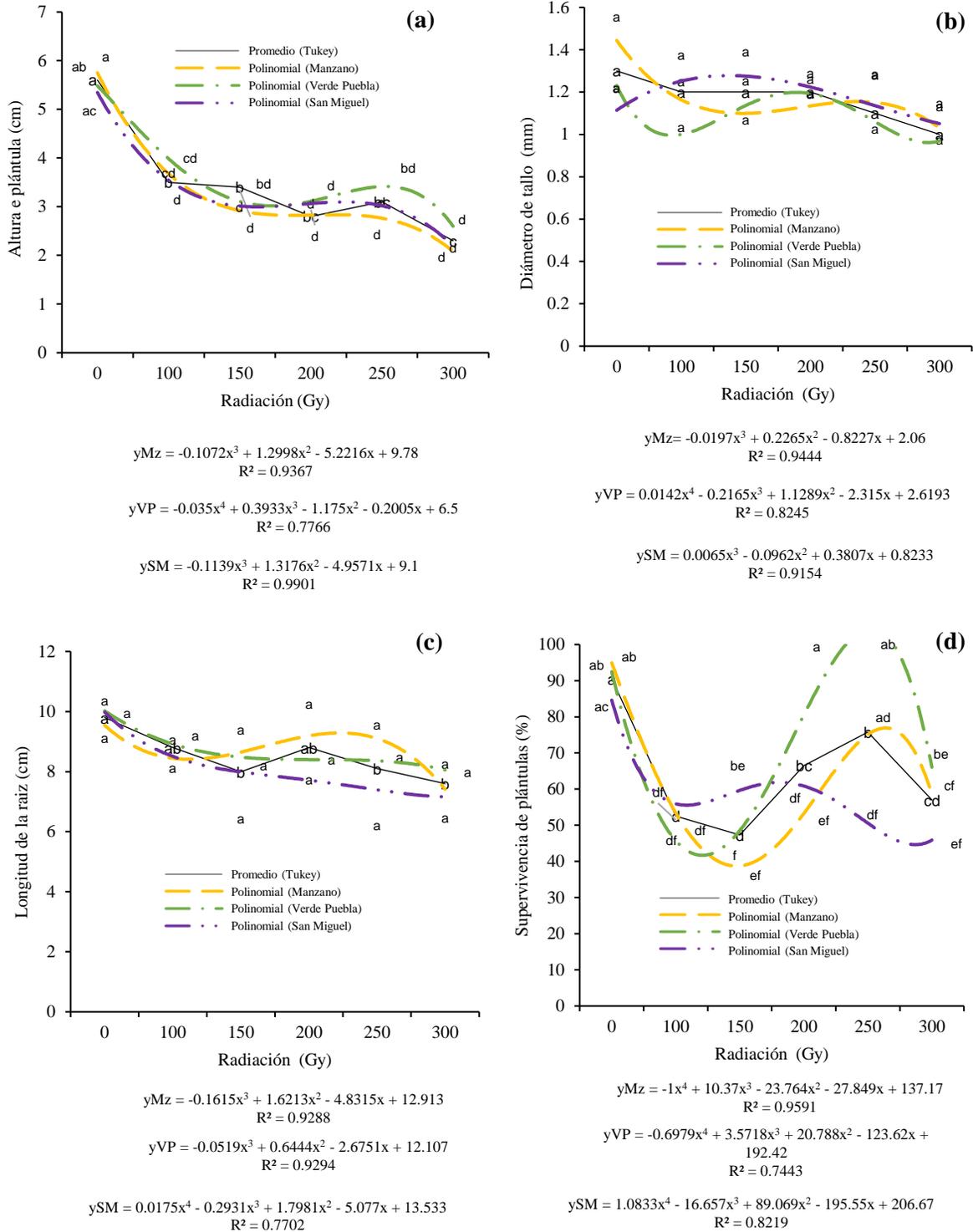


Figura 1. Efecto de la radiación en la altura (a), diámetro de tallo (b), longitud de raíz y supervivencia de plántulas (d) M₁ de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. El promedio Tukey corresponde al valor promedio de las tres variedades de tomate de cáscara. Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05. DMS_{PTukey} (a) = 0.83. DMS_{D×V} (a) = 1.77. DMS_{PTukey} (b) = 0.23. DMS_{D×V} (b) = 0.50. DMS_{PTukey} (c) = 1.44. DMS_{D×V} (c) = 3.08. DMS_{PTukey} (d) = 13.78. DMS_{D×V} (d) = 29.50.

El efecto negativo de las dosis de radiación en variables relacionadas con el establecimiento y crecimiento de plántulas ha sido documentado en chile Agua (*Capsicum annuum* L.) (López-Mendoza *et al.*, 2012); en chile Herbar (Tomlekova *et al.*, 2006) y tomate rojo (*S. lycopersicum* L.) (Ramírez *et al.*, 2006). Por otro lado, la escasa diferencia en el vigor de plántula en las variedades se relaciona con el lento crecimiento del eje principal de la plántula de tomate, pues esto sucede desde la emergencia hasta un periodo de 32 a 40 dds (Santiagoullo y Peña, 1997).

El escaso crecimiento de la plántula indica que la radiación con rayos gamma especialmente en las dosis altas (> 200 Gy) ocasiona múltiples alteraciones que se expresan como aberraciones (*i.e.*, enanismo, malformaciones, clorosis) o cambios fisiológicos negativos (*i.e.*, daño en el proceso de división y elongación celular, desbalance hormonal, baja intensidad de la respiración y fotosíntesis) (Songsri *et al.*, 2011, Thole *et al.*, 2011).

Efecto de los tratamientos en plantas M₁

En las tres variedades las dosis de radiación causaron un nulo efecto en el diámetro de tallo a los 85 ddt (Figura 2b) y en el número de flores autofecundadas (Figura 2d). Sin embargo, el efecto de las dosis en la altura de planta a los 85 ddt (Figura 2a) y el número de ramas a la primera bifurcación (Figura 2c) fue diferente entre variedades. En el primer caso, la altura de planta se incrementó a medida que las dosis aumentaron, pero el incremento fue mayor en la variedad Manzano que en las otras variedades (Figura 2a). En el segundo caso, el efecto de la interacción Dosis × Variedad fue notable ya en todas las dosis, el número de ramas fue mayor en la variedad San Miguel, pero no hubo efecto alguno de las dosis en esa variedad; en cambio, en la variedad Verde Puebla el número de ramas disminuyó a medida que las dosis aumentaron hasta 200 Gy; mientras que, en la variedad Manzano las ramas fueron más numerosas en las dosis de 150 y 300 Gy (Figura 2c).

La diferentes cambios biológicos que expresan las plantas provenientes de semillas o tejidos irradiados, se debe a que la radiación provoca la radiólisis del agua presente en la célula, lo que genera la producción de especies reactivas de oxígeno como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y los radicales hidroxilo (OH), los cuales inducen estrés oxidativo y, en última instancia, afectan las moléculas estructurales (alteración del DNA, activación del RNA) (Abdel-Hady *et al.* 2008) y funcionales de la planta al causar una alteración en las vías metabólicas (membrana de los tilacoides, síntesis de proteínas, fotosíntesis, respiración) (Noreen y Ashraf, 2009). En diversos estudios de radiosensibilidad en cultivos de trigo (Foroughbakhch-Pournavab *et al.*, 2015), tomate rojo (Álvarez *et al.*,

2011), arroz (Singh y Datta, 2010), café (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2021) y caña de azúcar (Fuchs *et al.*, 2002) se ha reportado que dosis bajas de rayos gamma favorecen el crecimiento al aumentar el crecimiento celular, la capacidad antioxidante de las células o al cambiar la señalización hormonal y la acumulación de fenoles en la planta (Aslhrif, 2009). Por ejemplo, en *Triticum durum* se reportó que dosis menores de 20 Gy incrementaron la longitud y cantidad de raíces (18 a 32 %). Del mismo modo, la altura de plántula de pimiento (*Capsicum annuum* L.) aumentó de 2 a 15 %, el diámetro de tallo de 5 a 7 % y la longitud de la raíz de 4 a 12 % con dosis de 5 a 30 Gy (Álvarez *et al.*, 2013). En plántulas de tomate rojo (*S. lycopersicum* L.) provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma (exposiciones de 5 a 20 s) incrementaron la altura de 10 a 50 %, el diámetro de tallo de 5 a 20 % y la longitud de la raíz de 5 a 15 % (Álvarez *et al.*, 2011). Por otro lado, dosis altas (> 200 Gy) de rayos gamma afectan los orgánulos ultraestructurales, además, alteran el fenotipo de la planta (Oladosu *et al.*, 2016). Ya que se han registrado resultados que indican la disminución de reguladores del crecimiento, como las citocinas (al descomponerlos o no sintetizarlos), lo que aumenta la sensibilidad de las plantas. Otros cambios documentados son la disminución del crecimiento de brotes, raíces y del área foliar (Quintana *et al.*, 2019; Spinoso-Castillo *et al.*, 2021). En este contexto, diversos autores (Oladosu *et al.*, 2016; Avendaño-Arrazate, 2021; Spinoso-Castillo *et al.*, 2021) han señalado que el efecto biológico de radiación está relacionado particularmente con las características de la planta (especie, cultivar, etapa de desarrollo, arquitectura del tejido y organización del genoma) y con las características de la radiación (calidad, dosis, duración de la exposición) (Wi *et al.*, 2005).

Los frutos cosechados en las tres variedades en cada dosis de radiación fueron partenocárpicos, por consiguiente, la autoincompatibilidad no se modificó. A pesar de estos resultados se recomienda seguir evaluando esta característica con dosis mayores de irradiación (> 300 Gy) y realizar cruces de P a P de plantas M₁, para observar si los individuos de la siguiente generación (M₂ o M_n) producen frutos con semilla, puesto que la irradiación afecta al azar a uno o más genes relacionados con la reproducción. Las acciones anteriores se basan en los resultados obtenidos por Hernández y Sosa (1998) en plantas mutantes de papa, provenientes de tubérculos irradiados con dosis de 20 a 200 Gy.

Dinámica del crecimiento

Una vez que las plantas se establecieron en invernadero, aumentaron su crecimiento en altura y diámetro de tallo conforme avanzó su edad (25 a 85 ddt) (Figura 3a-b). En cada muestreo las plantas M₁ de la variedad Manzano fueron de mayor altura que las

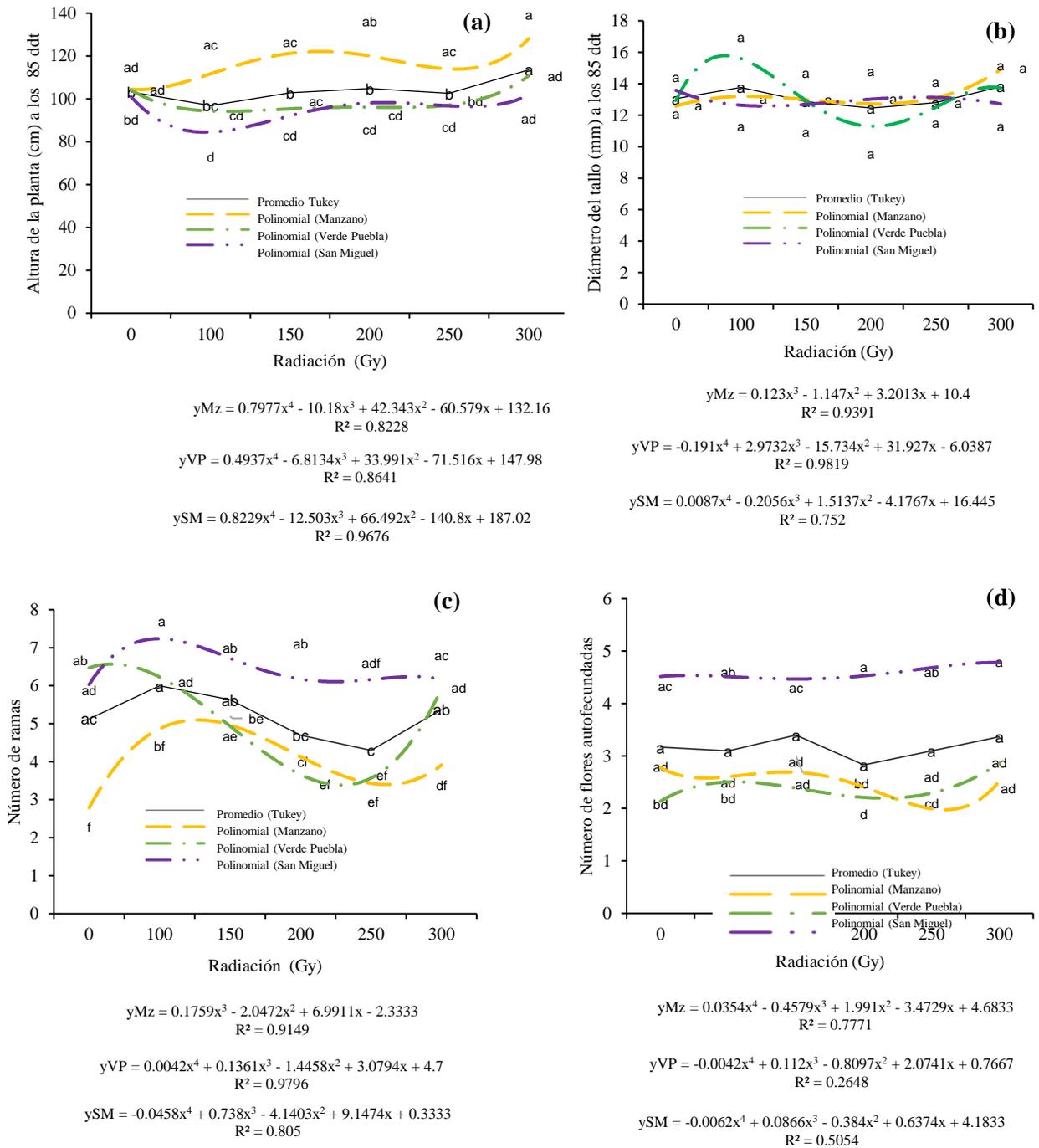


Figura 2. Efecto de la radiación en características vegetativas y reproductivas: a) altura, b) diámetro de tallo, c) ramas a la primera bifurcación y d) flores autofecundadas de plantas M_1 de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. El promedio Tukey corresponde al valor promedio de las tres variedades de tomate de cáscara. Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05. DMS_{PTukey} (a) = 12.83. $DMS_{D \times V}$ (a) = 27.32. DMS_{PTukey} (b) = 2.21. $DMS_{D \times V}$ (b) = 4.71. DMS_{PTukey} (c) = 1.00. $DMS_{D \times V}$ (c) = 2.34. DMS_{PTukey} (d) = 1.15. $DMS_{D \times V}$ (d) = 2.46.

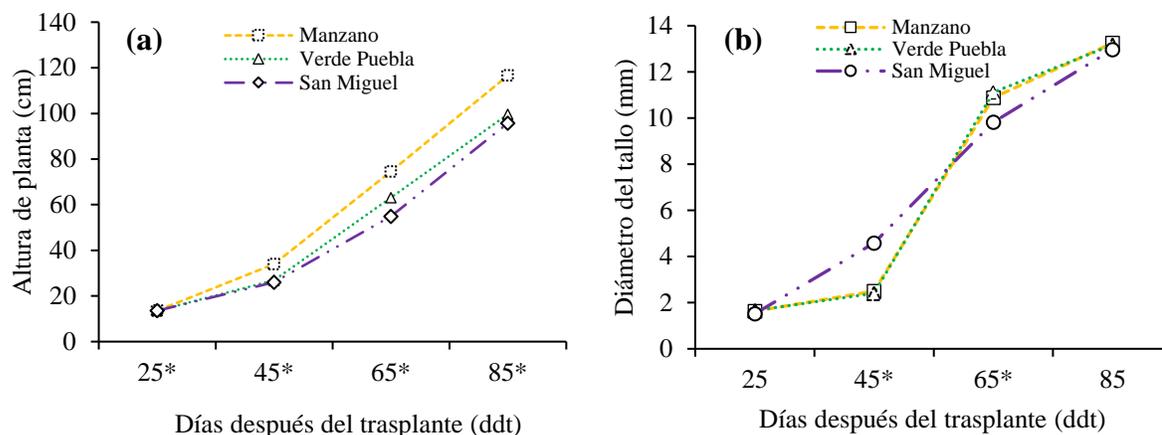


Figura 3. Efecto de radiación en la dinámica de crecimiento de los caracteres vegetativos: a) altura, b) diámetro de tallo de plantas M_1 de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. Cada punto de la línea corresponde al valor promedio de las dosis de radiación. * = Significativo ($p \leq 0.05$).

variedades Verde Puebla y San Miguel; esta última tuvo plantas de menor porte y grosor de tallo, pero produjeron el mayor número de ramas y flores.

La variación observada en los rasgos de crecimiento de las plantas M_1 (Figura 2) de tomate de cáscara en cada muestreo puede ser por el crecimiento de la variedad (erecto o semierecto), ya que a partir de los 24 días la planta acelera su crecimiento (ramas y flores) hasta los 55 días, después, crece lentamente hasta que comienza a envejecer (después de la producción) y muere (Santiaguillo y Peña, 1997; Santiaguillo *et al.*, 2012). Al respecto, Santiaguillo *et al.* (1998) evaluaron a los 20 y 40 ddt la altura de planta de 40 variedades de *P. ixocarpa* cultivadas en campo; en la primera medición, las variedades Mazamitla, Tamazula y Milpero tuvieron las plantas más altas (≥ 22 cm); mientras que, en la segunda medición las plantas de la variedad Milpero fueron las más altas (110 y 107 cm). Por otro lado, Ponce *et al.* (2012), no encontraron diferencia estadística en la altura y diámetro de tallo de la planta de tres variedades de *P. ixocarpa* (Población 3, Tamazula SM2 y Población Tecámac).

La significancia de la interacción dosis x variedad en las variables del vigor (emergencia y supervivencia de plántulas), y en rasgos del crecimiento de las plantas (altura, diámetro de tallo y número de ramas) (Tabla 1 y 2; Figuras 1 y 2), confirman que hay una dosis de irradiación óptima para cada rasgo morfológico en cada variedad (Ramírez *et al.*, 2006; Udensi *et al.*, 2012). Además, es importante mencionar que existen varios factores que influyen en las respuestas de los cultivos a los tratamientos de irradiación como la fuente y dosis de radiación (Lagoda, 2011), el órgano irradiado (Álvarez *et al.*, 2013) y contenido de agua del material irradiado (Lagoda, 2011); así como, los

factores bióticos y abióticos del ambiente, y manejo agronómico (*i. e.*, nutrición, riego) que prevalecieron durante el ciclo del cultivo y que modifican la actividad biológica de la planta (De Souza *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

La aplicación de rayos gamma a la semilla de tomate de cáscara tuvo un efecto negativo en el vigor de la plántula de las tres variedades, pues disminuyó la emergencia, altura, longitud de raíz y supervivencia. El comportamiento de los caracteres del crecimiento (altura y diámetro de tallo) de las plantas M_1 no fue lineal con la dosis en cada muestreo; pero, la mejor respuesta se tuvo con las dosis de 100 y 300 Gy.

La variedad no influyó en el vigor de la plántula, pero sí en la formación de ramas y flores autofecundadas, donde las plantas de San Miguel presentaron la mayor cantidad de estas.

La irradiación no modificó la autoincompatibilidad del tomate de cáscara, ya que todos los frutos fueron partenocárpicos.

Los resultados obtenidos en la investigación aportan información de la radiosensibilidad de la semilla y el vigor de la plántula de tres variedades de tomate de cáscara. Además, el uso de radiación gamma puede ser una alternativa para mejorar los cultivares en ciertos rasgos morfológicos y con ello diseñar programas de mejoramiento y aprovechamiento de estos recursos vegetales. Las futuras investigaciones se enfocarán a obtener líneas endogámicas por autofecundación para generar híbridos.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero del CONACYT, y el apoyo técnico de los profesores de los Posgrados de Fisiología Vegetal y Genética del COLPOS.

Funding. This research was conducted with funds from the COLPOS Campus Montecillo.

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

Compliance with ethical standards. Do not apply.

Data availability. The authors confirm that all data underlying the findings are fully available without restriction upon reasonable request to the corresponding author, Oscar Martín Antúñez Ocampo (antune.oscar@inifap.gob.mx). All relevant data necessary to replicate this study are described in the paper.

Author contribution statement (CRediT). **O.M. Antúñez-Ocampo** - Data curation, Formal analysis, Writing of manuscript., **M. Sandoval-Villa** - Validation, Writing-review & editing., **S. Cruz-Izquierdo** - Methodology, Formal Analysis, Writing-review & editing, Funding acquisition, Supervision, Validation, Resources, Project administration., **L.E. Mendoza-Onofre** - Supervision, Validation, Writing-review & editing., **A. Peña-Lomelí** - Investigation, Methodology, Validation., **A. Santacruz-Varela** - Visualization, Methodology, Validation., **E. De la Cruz-Torres** - Methodology, Formal analysis; Validation.

REFERENCIAS

- Abdel-Hady, M. S., Okasha E. M., Soliman, S. S. A. and Talaat M., 2008. Effect of Gamma radiation and gibberellic acid on germination and alkaloid production in *Atropa belladonna*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2(3), pp. 401-405.
- Álvarez, A., Ramírez, R., Chávez, L., Camejo, Y., Licea, L., Porrás, E. and García, B., 2011. Efectos del tratamiento de semillas con láser de baja potencia sobre el crecimiento y rendimiento en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Información Técnica Económica Agraria*, 107(4), pp. 290-299.
- Álvarez, F. A., Chávez, S. L., Ramírez, F. R., Estrada, P. W., Estrada, L. Y. and Maldonado R. A., 2013. Efecto del tratamiento de semillas con bajas dosis de rayos X en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Nucleus*, 53, pp. 14-18. Disponible en línea: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-084X2013000100004
- Antúñez-Ocampo, O. M., Cruz-Izquierdo, S., Mendoza-Onofre, L. E., Sandoval-Villa, M., Santacruz-Varela, A., De la Cruz-Torres, E. and Peña-Lomelí, A., 2020. Growth dynamics of morphological and reproductive traits of *Physalis peruviana* L. M₁ plants obtained from seeds irradiated with gamma rays. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48, pp. 200-209. <http://doi.org/10.15835/nbha48111745>
- Ashraf, M., 2009. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotechnology Advances*, 27, pp. 84-93. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.003>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Gómez-Simuta, Y., Martínez-Bolaños, M., Méndez-López, I., Ortíz-Curiel, S., Oriza-Flores, R., Canul-Ku, J. and Reyes-López, D., 2021. La Radiación gamma de ⁶⁰Co en características morfológicas y reproductivas de plantas M1 en *Coffea arabica* L.: Radiación gamma de ⁶⁰Co en Café. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1), pp. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2730>
- Ayala-Villegas, M. J., Ayala-Garay, O. J., Aguilar-Rincón, V. H. and Corona-Torres, T. 2014. Evolución de la calidad de semilla de *Capsicum annuum* L. durante su desarrollo en el fruto. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37, pp. 79-87.
- Coronado-González, J., Peña-Lomelí, A., Magaña-Lira, N., Sahagún-Castellanos, J. and Ybarra-Moncada, C., 2019. Extracción y beneficio de semilla de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42, pp. 147-154. Disponible en línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200147&lng=es&tlng=es
- De Souza, A., Garcí, D., Sueiro, L., Gilart, F., Licea, L. and Porrás, E., 2006. Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics*, 27, pp. 247-257. <http://doi.org/10.1002/bem.20206>

- Doria, J., 2010. Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31, pp. 74-85.
- Fayza, Nofal, H., Mohamed, El-Segai, U., Engy, Seleem, A. and El, Hakim, M. A., 2011. Induced Macromutations in Tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5, pp. 111-120. Available online: <http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2011/111-120.pdf>
- Foroughbakhch-Poumavab, R., Bacó pulos-Mejía, E. and 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, pp. 129-137.
- Fuchs, M., González, V., Castroni, S., Díaz, E. and Castro, L., 2002. Efecto de la radiación gamma sobre la diferenciación de plantas de caña de azúcar a partir de callos. *Agronomía Tropical*, 52(3), pp. 311-324.
- García-Osuna, H. T., Escobedo, B. L., Robledo-Torres, V., Benavides, M. A. and Ramírez, G. F. 2015. Germinación y micropropagación de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*) tetraploide. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, pp. 2301-2311.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Hernández-Escobar, J., Ortiz-Solorio, C. A., Anicua-Sánchez, R. and Hernández-Lara, M. E., 2011. Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17, pp. 183-196. Disponible en línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000300010
- Hernández, A. M. and Sosa, C. R., 1998. Uso de mutágenos en el mejoramiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Latinoamericana de la Papa*, 1, pp. 104-119. Disponible en línea: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5512118.pdf>
- Hernández-Muñoz, S., Pedraza-Santos, M. E., López, P. A., Gómez-Sanabria, J. M. and Morales-García, J. L., 2019. Mutagenesis in the improvement of ornamental plants. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 25(3), pp. 151-167. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.12.022>
- Honda, I., Kikuchi, K., Matsuo, S., Fukuda, M., Saito, H., Ryuto, H., Fukunishi, N. and Abe T., 2006. Heavyion-induced mutants in sweet pepper isolated by M₁ plant selection. *Euphytica*, 152, pp. 61-66. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9177-5>
- Ilyas, S. and Naz, S., 2014. Effect of Gamma irradiation on morphological characteristics and isolation of curcuminoids and oleoresins of *Curcuma longa* L. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 24, pp. 1396-1404. Available online: <http://www.thejaps.org.pk/docs/v-24-5/18.pdf>
- Kim, J. H., Baek, M. H., Chung, B. Y., Wi, S. G. and Kim, J. S., 2004. Alterations in the photosynthetic pigments and antioxidant machineries of red pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings from gamma-irradiated seeds. *Journal of Plant Biology*, 47, pp. 314-321. <https://doi.org/10.1007/BF03030546>
- Lagoda, P. J. L., 2011. Effects of radiation on living cells and plants. In: *Plant Mutation and Biotechnology*. Plant Breeding and Genetics Section. Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. International Atomic Energy Agency. pp. 123-134. Vienna, Austria. <http://www.fao.org/3/a-i2388e.pdf>
- López-Mendoza, H., J. C. Carrillo-Rodríguez, and J. L. Chávez-Servia., 2012. Effects of gamma-irradiated seeds on germination and growth in *Capsicum annuum* L. plants growth in a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 947, pp. 77-81.
- Martínez, S. J., A. Peña, L. and D. Montalvo, H., 2004. Producción y tecnología de semilla de tomate de cáscara. Boletín Técnico No. 4. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, 35 p.
- Melki, M. and Marouani, A., 2010. Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat. *Environmental Chemical Letters*, 8(4), pp. 307-310.
- Noreen, Z. and Ashraf, M., 2009. Changes in antioxidant enzymes and some key metabolites in some genetically diverse cultivars of radish (*Raphanus sativus* L.).

- Environmental and Experimental Botany*, 67, pp. 395-402.
- Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H. A., Miah, G. and Usman, M., 2016. Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Journal Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 30, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>
- Peña, L. A., N. Magaña, L., S. Montes, H., J. Sánchez, M., J. F. Santiaguillo, H., O. Grimaldo, J. and A. Contreras, R., 2011. Manual gráfico para la descripción varietal de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. Ex Horm.). SNICS-SAGARPA, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo. Estado de México, México., 87 pp. Disponible en línea: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/390821/MGDV_TomateCascara.pdf
- Peña, L. A., Molina, G. J. D., Márquez, S. F., Sahagún, C. J., Ortiz C. J. and Cervantes S. T., 2002. Respuestas estimadas y observadas de tres métodos de selección en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25, pp. 171-178. Disponible en línea: <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/25-2/7a.pdf>
- Peña-Lomelí, A., Ponce-Valerio, J. J., Sánchez-del-Castillo, F. and Magaña Lira, N., 2014. Desempeño agronómico de variedades de tomate de cáscara en invernadero y campo abierto. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37, pp. 381-391. Disponible en línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-7380201400040011
- Ponce, V. J. J., Peña, L. A., Rodríguez, P. J. E., Mora, A. R., Castro, B. R. and Magaña, L. N., 2012. Densidad y poda en tres variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) cultivado en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18, pp. 325-332. Disponible en línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000300006
- Quintana, V., Alvarado, L., Saravia, D., Borjas, R., Castro-Cepero, V., Julca-Otiniano, A. and Gómez, L., 2019. Gamma radiosensitivity of coffee (*Coffea arabica* L. var. Typica). *Peruvian Journal of Agronomy*, 3(2), pp. 74-80. <http://doi.org/10.21704/pja.v3i2.1317>
- Ramírez-Godina, F., Robledo-Torres, V., Foroughbakhch-Pournavab, R., Benavides-Mendoza, A. and Alvarado-Vázquez, M. A., 2013. Viabilidad de polen, densidad estomática y tamaño de estomas en autotetraploides y diploides en *Physalis ixocarpa*. *Botanical Sciences*, 91(1), pp. 11-18.
- Ramírez, R., González, L. M., Camejo, Y., Zaldívar, N. and Fernández, Y., 2006. Estudio de radiosensibilidad y selección del rango de dosis estimulantes de rayos X en cuatro variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 27, pp. 63-67. Disponible en línea: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215885012>
- Santiaguillo, H. J. F. and Blas, Y. S., 2009. Aprovechamiento tradicional de las especies de *Physalis* en México. *Revista Geografía Agrícola*, 43, pp. 81-86. Disponible en línea: <https://www.redalyc.org/pdf/757/75715608006.pdf>
- Santiaguillo, H. J. F., E. Cedillo, P. and J. A. Cuevas, S., 2010. Distribución Geográfica del *Physalis* spp. en México. D. F. México. UACH-Prometeo Editores. 245 p.
- Santiaguillo, H. J. F., Vargas, P. O., Grimaldo, J. O., Magaña, L. N., Caro, V. F., Peña, L. A. and Sánchez, M. J., 2012. Perfil del Diagnóstico de la Red de Tomate de Cáscara. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 46 p.
- Santiaguillo, H. J. F. and Peña, L. A., 1997. Tomate de cáscara: elija su variedad. *Revista Agricultura*, 8, pp. 12-14.
- Santiaguillo, H. J. F., Peña, L. A. and Montalvo, D., 1998. Evaluación de variedades de tomate de cáscara (*Physalis* spp.) en Tlajomulco de Zuñiga, Jalisco. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 4, pp. 83-88. Disponible en línea: <https://docplayer.es/61100143-Evaluacion-de-variedades-de-tomate-de-cascara-physalis-spp-en-tlajomulco-de-zuniga-jalisco.html>
- SAS, Institute., 2002. SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1-7. SAS Institute. Cary, NC, USA.

- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), 2019. Catálogo Nacional de Variedades Vegetales. <https://www.gob.mx/snics/articulos/catalogo-nacional-de-variedades-vegetales-en-linea>. (Consultado el 14 de diciembre de 2019).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2019. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola del cultivo de tomate de cáscara por estados. México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. (Consultado el 14 de diciembre de 2019).
- Singh, B. and Datta, P. S. 2010. Effect of low dose gamma irradiation on plant and grain nutrition of wheat. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(8), pp. 819-825. <http://doi.or/10.1016/j.radphyschem.2010.03.011>
- Songsri, P., Suriharn, B., Sanitchon, J., Srisawangwong, S. and Kesmla, T., 2011. Effects of gamma radiation on germination and growth characteristics of physic nut (*Jatropha curcas* L.). *Journal of Biological Sciences*, 11, pp. 268-274. <http://doi.or/10.3923/jbs.2011.268.274>
- Spinoso-Castillo, J. L., Escamilla-Prado, E., Aguilar-Rincón, V. H., Morales-Ramos, V., García-de los Santos, G. and Corona-Torres, T., 2021. Respuesta fisiológica de semillas de tres variedades de café a rayos gamma (^{60}Co). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 27(2), pp. 101-112. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.07.019>
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: Proc. 6th Int. Congress on Soilless Culture. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. pp. 633-649.
- Thole V., Peraldi A., Worland B., Nicholson P., Doonan J. H. and Vain P., 2011. T-DNA mutagenesis in *Brachypodium distachyon*. *Journal of Experimental Botany*, 10, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1093/jxb/err333>
- Tomlekova, N., Todorova, V. and Daskalov, S., 2006. Creating variation in pepper (*Capsicum annuum* L.) through induced mutagenesis. *Plant Science*, 44, pp. 44-47.
- Udensi, O., Arong, G. A., Obu, J. A., Ikpeme, E. V. and Ojobe, T. O., 2012. Radio-Sensitivity of Some Selected landraces of pulses to gamma irradiation: indices for use as improvement and preservation techniques. *American Journal of Experimental Agriculture*, 2, pp. 320-335. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2012/1209>
- Wi, S. G., Chung, B. Y., Kim, J. H., Baek, M. H., Lee, J. W. and Kim, J. S., 2005. Ultrastructural changes of cell organelles in Arabidopsis stem after gamma irradiation. *Journal Plant Biology* 48, pp. 195-200.