



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

ASPECTOS FISIOLÓGICOS Y GENÉTICOS DE *Physalis peruviana* L. Y *Physalis ixocarpa* Brot.

OSCAR MARTÍN ANTÚNEZ OCAMPO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE :

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Oscar Martín Antúnez Ocampo, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Serafín Cruz Iquierdo, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

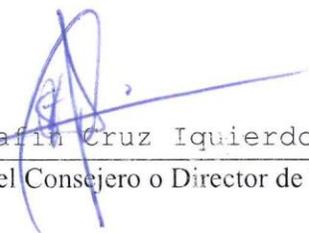
ASPECTOS FISIOLÓGICOS Y GENÉTICOS DE Physalis peruviana L. Y Physalis ixocarpa Brot.

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 15 de Noviembre de 20118



Firma del
Alumno (a)



Dr. Serafín Cruz Iquierdo
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: "**Aspectos fisiológicos y genéticos de *Physalis peruviana* L. y *Physalis ixocarpa* Brot.**", realizada por el alumno: **Oscar Martín Antúnez Ocampo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJERO

Dr. Serafin Cruz Izquierdo

ASESOR

Dr. Manuel Sandoval Villa

ASESOR

Dr. Leopoldo E. Mendoza Onofre

ASESOR

Dr. Amalio Santacruz Varela

ASESOR

Dr. Eulogio de la Cruz Torres

ASESOR

Dr. Aureliano Peña Lomelí

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2018

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS Y GENÉTICOS DE PLANTAS DE *Physalis peruviana* L.
Y *Physalis ixocarpa* Brot.**

**Oscar Martín Antúnez Ocampo, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2018**

RESUMEN

La uchuva y el tomate de cáscara presentan frutos de sabor agridulce con alto contenido de vitamina A y C, hierro, fósforo y antioxidantes; pero tienen limitado mejoramiento genético. La mutagénesis es una alternativa para obtener genotipos que pueden emplearse en programas de fitomejoramiento. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la radiación gamma en los rasgos morfológicos y reproductivos de las plantas M₁ de *P. peruviana* y *P. ixocarpa* provenientes de semillas irradiadas. En uchuva, la radiación estimuló la emergencia de plántulas; pero la supervivencia fue menor de 50 % con las dosis de 300 y 350 Gy. Las dosis de 125 a 225 Gy generaron mayor vigor de plántula; pero menor lectura SPAD y longitud de la raíz. Todas las dosis disminuyeron en 79 % el porte de planta; pero, las dosis de 125 a 200 Gy aumentaron el grosor de tallo, tallos y fructificación. La dosis de 200 Gy originó plantas más precoces. Todas las variables se incrementaron linealmente con la edad de la planta (R^2 entre 0.92 y 0.98). El peso del fruto disminuyó con las dosis mayores de 200 Gy; también, la dulzura del fruto pero con dosis mayores de 100 Gy, excepto la de 200 Gy. La firmeza aumentó de 1 a 9 % con las dosis de 100 y 75 Gy. En el tomate de cáscara, la radiación disminuyó de 32 a 57 % la germinación de la semilla y supervivencia de plántulas; la altura de 37 a 58 % y longitud de la raíz de 10 a 22 %. Las plantas de semillas irradiadas con las dosis de 100 y 300 Gy presentaron mayor crecimiento y fructificación; La autoincompatibilidad no se afectó. Las variedades Manzano y Verde Puebla produjeron las plantas con mejores características de crecimiento; pero, la mayor floración se tuvo con San Miguel. La radiación gamma estimula la germinación, el vigor y crecimiento de las plantas, también, la floración, fructificación y la calidad del fruto de uchuva. El tomate de cáscara es sensible a la radiación; pero, dosis bajas y altas estimulan el crecimiento y no la autofecundación de flores; además, el tipo de variedad influye en los rasgos de crecimiento.

Palabras clave: *Physalis peruviana*, *Physalis ixocarpa*, rayos gamma, mutagénesis, crecimiento, germinación, peso.

**PHYSIOLOGICAL AND GENETIC ASPECTS OF PLANTS OF *Physalis peruviana* L.
AND *Physalis ixocarpa* Brot.**

**Oscar Martín Antúnez Ocampo, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2018**

ABSTRACT

The uchuva and tomato have sweet and sour fruits with a high content of vitamin A and C, iron, phosphorus and antioxidants; but they have limited genetic improvement. Mutagenesis is an alternative to obtain genotypes that can be used in breeding programs. The objective of the study was to evaluate the effect of gamma radiation on the morphological and reproductive traits of the M₁ plants of *P. peruviana* and *P. ixocarpa* from irradiated seeds. In uchuva, the radiation stimulated seedling emergence; but survival was less than 50% with doses of 300 and 350 Gy. Doses of 125 to 225 Gy showed greater vigor; but lower SPAD reading and root length. Additionally, all doses decreased by 79% the plant size; but, the doses of 125 to 200 Gy increased the stem thickness, basal stems and fructification. The dose of 200 Gy originated earlier plants. Also, all the variables increased linearly with the age of the plant (R^2 varied from 0.92 to 0.98). Fruit weight decreased with doses higher than 200 Gy; also, the sweetness of the fruit but with doses greater than 100 Gy, except that of 200 Gy. The firmness increased from 1 to 9% with the doses of 100 and 75 Gy. The size and shelf life of the fruit of uchuva were not affected. In tomato, radiation decreased from 32 to 57 % the germination and survival of seedlings; likewise, the height of 37 to 58 % and length of the root of 10 to 22 %. Seed plants irradiated with doses of 100 and 300 Gy showed greater growth and fruiting. The self-incompatibility was not affected. Manzano and Verde Puebla tomato varieties produced plants with better growth characteristics; but, in flowers was San Miguel. The gamma radiation stimulates the germination, vigor and growth of plants, and also flowering, fructification and quality of the uchuva fruit. The tomato is sensitive to irradiation; but, low and high doses stimulated the growth and not the self-pollination of flowers; in addition, the type of variety influence the growth rate.

Key words: *Physalis peruviana*, *Physalis ixocarpa*, gamma rays, mutagenesis, growth, germination, weight.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por financiar mis estudios por medio de la beca otorgada durante mi formación académica como Doctor en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados y al programa de Recursos Genéticos y Productividad, por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios de postgrado y ofrecerme las facilidades para el desarrollo y conclusión del presente trabajo de investigación.

A los doctores Serafín Cruz Izquierdo, Manuel Sandoval Villa, Leopoldo Mendoza Onofre, Amalio Santacruz Varela, Eulogio de la Cruz Torres, Aureliano Peña Lomelí y la doctora Ma. del Carmen Mendoza Castillo, que conforman el consejo particular por su valiosa cooperación, disponibilidad y asesoría durante el desarrollo del proyecto de investigación, también por sus consejos y amistad brindada durante mi estancia en la institución.

A mis amigos y trabajadores del CP: Dr. Juan Elías, Sra. Laura, Luis, Eleazar, Darío y a mi gran amigo y compañero Eliud, por su amistad y apoyo brindado para concluir con esta meta.

DEDICATORIA

A mi esposa e hijo:

Antonia; Kenneth

A mi familia:

Silvia; Naú; José; Alfredo; Isabel; Claudia; Arminda; Aurora; Blanca, Benita

Por darme su amor, apoyo, consejos y motivación para alcanzar mis metas.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Género <i>Physalis</i>	5
Aspectos generales de la morfología del género <i>Physalis</i>	5
Importancia de <i>Physalis peruviana</i> L. y <i>Physalis ixocarpa</i> Brot.	8
Origen y distribución de <i>Physalis peruviana</i> L. y <i>Physalis ixocarpa</i> Brot.....	9
Variedades y usos de <i>Physalis peruviana</i> L. y <i>Physalis ixocarpa</i> Brot.....	9
Variedades de <i>Physalis peruviana</i> L.....	9
Variedades de <i>Physalis ixocarpa</i> Brot.....	11
Usos.....	12
Mejoramiento genético de <i>Physalis peruviana</i> L.	14
Mejoramiento genético de <i>Physalis ixocarpa</i> Brot.....	14
Inducción de mutaciones en plantas por radiación ionizante	16
Mutagénesis.....	17
Investigaciones sobre el uso de mutaciones artificiales en las plantas.....	21
CAPÍTULO I. VARIABILIDAD INDUCIDA EN CARACTERES FISIOLÓGICOS DE <i>Physalis peruviana</i> L. MEDIANTE RAYOS GAMMA ⁶⁰Co APLICADOS A LA SEMILLA	27
1.1. RESUMEN	27
1.2. INTRODUCCIÓN.....	28
1.3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31

Porcentaje de germinación, días al 50 % de emergencia y supervivencia de plantas	31
Altura y diámetro de tallo de la plantas	34
Número de hojas por planta y lecturas SPAD.....	37
Longitud del primer entrenudo y longitud de la raíz de la planta.....	38
1.5. CONCLUSIONES.....	40
1.6. LITERATURA CITADA	40
CAPÍTULO II. DINÁMICA DEL CRECIMIENTO DE CARACTERES MORFOLÓGICOS Y REPRODUCTIVOS DE PLANTAS M₁ DE <i>Physalis peruviana</i> L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON RAYOS GAMMA ⁶⁰Co	45
2.1. RESUMEN	45
2.2. INTRODUCCIÓN.....	45
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	48
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
Dosis de radiación	50
Muestreos	53
Interacción dosis de radiación x muestreos	55
2.5. CONCLUSIONES.....	57
2.6. LITERATURA CITADA	57
CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS CUANTITATIVAS DEL FRUTO DE PLANTAS M₁ DE <i>Physalis peruviana</i> L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co	61
3.1. RESUMEN	61
3.2. INTRODUCCIÓN.....	61
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	63
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
3.5. CONCLUSIONES.....	68
3.6. LITERATURA CITADA	68

CAPÍTULO IV. VIGOR DE PLÁNTULAS Y RASGOS MORFOLÓGICOS DE PLANTAS M₁ DE <i>Physalis ixocarpa</i> Brot. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co	72
4.2. INTRODUCCIÓN.....	72
4.3. MATERIALES Y MÉTODOS	74
4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
Dosis de radiación	77
Variedades.....	81
Dosis x Variedades.....	83
4.5. CONCLUSIONES.....	85
4.6. LITERATURA CITADA	85
DISCUSIÓN GENERAL	90
CONCLUSIONES GENERALES	94
LITERATURA CITADA	95

LISTA DE CUADROS

REVISIÓN DE LITERATURA

Cuadro 1. Variedades cultivadas de tomate de cáscara (<i>Physalis ixocarpa</i> Brot.) en México (Santiaguillo y Peña, 1997).	12
Cuadro 2. Usos de las especies de <i>Physalis</i> en México (Santiaguillo y Blas, 2009). ...	13
Cuadro 3. Mutágenos físicos comúnmente utilizados para la inducción de mutaciones en los organismos (Mba <i>et al.</i> , 2010; Wani <i>et al.</i> , 2014).	19
Cuadro 4. Efectos estimulantes de la radiación por rayos gamma, X y ultravioleta en diferentes características del crecimiento y rendimiento de cultivos agrícolas (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Aladjadjiyan, 2007; Oladosu <i>et al.</i> , 2016).	25

CAPÍTULO I. VARIABILIDAD INDUCIDA EN CARACTERES FISIOLÓGICOS DE *Physalis peruviana* L. MEDIANTE RAYOS GAMMA ⁶⁰Co APLICADOS A LA SEMILLA

Cuadro 1.1. Media de las dosis de radiación para la altura y diámetro de tallo de la plántula de <i>Physalis peruviana</i> L.	36
--	----

CAPÍTULO II. DINÁMICA DEL CRECIMIENTO DE CARACTERES MORFOLÓGICOS DE PLANTAS M₁ DE *Physalis peruviana* L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON RAYOS GAMMA ⁶⁰Co

Cuadro 2.1. Significancia estadística de las fuentes de variación para los caracteres morfológicos de plantas M ₁ de <i>Physalis peruviana</i> L.	49
Cuadro 2.2. Días transcurridos para la primera flor en plantas M ₁ de <i>Physalis peruviana</i> L provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma ⁶⁰ Co. ...	52

CAPÍTULO IV. VIGOR DE PLÁNTULAS Y RASGOS MORFOLÓGICOS DE PLANTAS M₁ DE *Physalis ixocarpa* Brot. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co

Cuadro 4.1. Significancia estadística de las fuentes de variación para caracteres de vigor de la plántula M ₁ de <i>Physalis ixocarpa</i> Brot. sometidas a seis dosis de radiación.	76
Cuadro 4.2. Significancia estadística de las fuentes de variación para los caracteres morfológicos de las plantas de <i>Physalis ixocarpa</i> Brot.	77

Cuadro 4.3. Media de las variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)
para los caracteres de vigor de la semilla y plántula. 81

Cuadro 4.4 Medias de los caracteres de crecimiento y reproductivos de la planta por
variedad de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)..... 82

LISTA DE FIGURAS

REVISIÓN DE LITERATURA

- Figura 1. Morfología de las plantas de tomate de cáscara (lado izquierdo) y uchuva (lado derecho)..... 6
- Figura 2. Tomate de cáscara: a) Tallo y b) Hojas; Uchuva: c) Tallo y d) Hojas. 6
- Figura 3. Uchuva: a) Flor, b) Fruto inmaduro, c) Fruto maduro y d) Fruto y semillas. Tomate de cáscara: e) Flor, f) Fruto inmaduro, g) Fruto maduro y h) Fruto y seimllas. 7
- Figura 4. Aspectos generales de algunas técnicas de mejoramiento vegetal. 18
- Figura 5. Proceso de inducción de mutaciones en especies de reproducción asexual. 20
- Figura 6. Proceso de inducción de mutaciones en especies de reproducción sexual. 21

CAPÍTULO I. VARIABILIDAD INDUCIDA EN CARACTERES FISIOLÓGICOS DE *Physalis peruviana* L. MEDIANTE RAYOS GAMMA ⁶⁰Co APLICADOS A LA SEMILLA

- Figura 1.1. Efecto de dosis de rayos gamma ⁶⁰Co aplicados a semillas de *Physalis peruviana* L. sobre los días a 50 % de emergencia. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: 1.60; C.V.: 5.77 %..... 32
- Figura 1.2. Efecto de dosis de rayos gamma ⁶⁰Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. sobre el porcentaje de supervivencia de plantas. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: 7.96; C.V.: 3.76 %..... 33
- Figura 1.3. Efecto de dosis de rayos gamma ⁶⁰Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. en las variables altura y diámetro de tallo de la planta. Valores con letras iguales en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH (altura): 1.93; C.V. (altura): 6.95 %; DSH (diámetro): 0.47; C.V. (diámetro): 11.16 %..... 35
- Figura 1.4. Efecto de dosis de rayos gamma ⁶⁰Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. sobre el número de hojas y lecturas SPAD por

planta. Valores con letras iguales en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH (hoja): 1.01; C.V. (hoja): 9.10 %; DSH (SPAD): 5.98; C.V. (SPAD): 8.42 %..... 38

CAPÍTULO II. DINÁMICA DEL CRECIMIENTO DE CARACTERES MORFOLÓGICOS DE PLANTAS M1 DE *Physalis peruviana* L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON RAYOS GAMMA ⁶⁰Co

Figura 2.1. Respuesta a las dosis de radiación de la altura de la planta (a; n = 7), el diámetro de tallo (b; n = 7), el número de tallos basales (c; n = 7), el número de botones florales (d; n = 5), el número de flores (e; n = 5) y el número de frutos verdes (f; n = 4) de plantas M1 de *Physalis peruviana* L. Cada punto representa el promedio de n muestreos..... 51

Figura 2.2. Comportamiento de la altura de la planta (a), diámetro de tallo (b), número de tallos basales (c), número de botones florales (d), número de flores (e) y número de frutos verdes (f) de plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. en el tiempo (ddt). Cada punto corresponde al promedio de 14 dosis de radiación aplicadas a la semilla..... 54

Figura 2.3. Ejemplos de interacción muestreos x dosis de rayos gamma ⁶⁰Co en las variables: número de tallos basales (i); flores (ii) y frutos verdes (iii) por planta M₁ de *Physalis peruviana* L. Las barras con la misma letra pequeña para cada rasgo de crecimiento (días después del trasplante) no son significativamente diferentes (Tukey, P = 0.05). 56

CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS CUANTITATIVAS DEL FRUTO DE PLANTAS DE *Physalis peruviana* L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co

Figura 3.1. Características del fruto de plantas M₁ de *Physalis peruviana* L.: i) Diámetro ecuatorial; ii) Diámetro polar; iii) Vida de anaquel. VPT= Valor promedio Tukey. VMín= Valor mínimo. VMáx= Valor máximo. Valores VPT con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). 65

Figura 3.2. Características del fruto de plantas M₁ de *Physalis peruviana* L.: a) Peso con cáliz; b) Peso sin cáliz; c) Concentración de sólidos solubles totales;

d) Firmeza. VPT= Valor promedio Tukey. VMín= Valor mínimo. VMáx= Valor máximo. Valores VPT con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)..... 67

CAPÍTULO IV. VIGOR DE PLÁNTULAS Y RASGOS MORFOLÓGICOS DE PLANTAS M1 DE *Physalis ixocarpa* Brot. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co

Figura 4.1. Comportamiento de la supervivencia (a), altura (b), diámetro de tallo (c), longitud de la raíz (d) de plántulas M₁ de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. Cada punto corresponde al promedio de tres variedades de tomate de cáscara. Medias con letras iguales en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05..... 78

Figura 4.2. Dinámica del crecimiento para las características vegetativas y reproductivas: a) altura, b) diámetro de tallo, c) ramas a la primera bifurcación, d) flores autofecundadas en plantas M₁ de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. Cada punto corresponde al promedio de tres variedades de tomate de cáscara. * = significativo (P ≤ 0.05). Medias con letras iguales en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05..... 80

Figura 4.3. Interacción dosis de rayos gamma ⁶⁰Co × variedades en las variables supervivencia (i); altura a los 85 ddt (ii); número de ramas (iii) de plantas M₁ de tres variedades *Physalis ixocarpa* Brot. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). 84

INTRODUCCIÓN GENERAL

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) y el tomate de cascara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm) pertenecen al género *Physalis*, cuyos frutos son bayas que se forman y permanecen dentro del cáliz durante su desarrollo, al madurar son de color amarillo-anaranjado y sabor agridulce o dulce en la primera especie, mientras que, en la segunda son amarillos, morados y verdes con sabor agridulce. La planta de *P. peruviana* L. es perene y crece silvestre en zonas altas (1500 a 3000 msnm) de Chile y Colombia (Rodríguez *et al.*, 2009; Fischer *et al.*, 2011), en cambio, la de *P. ixocarpa* Brot. es anual y se distribuye en todo México desde los 8 hasta los 3350 msnm (Santiaguillo *et al.*, 2010), pero ambas son herbáceas, con hábito de crecimiento rastrero a semirastrero. Los frutos se consumen frescos o procesados y tienen alto contenido de fibra, provitamina A y C, hierro, fósforo y antioxidantes (Fischer, 2000).

Estas especies se propagan por semilla, pero *P. peruviana* L. también puede reproducirse mediante estaca (reproducción asexual); la vía sexual es más común pues la germinación de las semillas es mayor de 90 %; sin embargo, el vigor de las plantas, rendimiento y la calidad de fruto es variable (Fischer, 2000). Por ejemplo, el 54 % de las flores de *P. peruviana* L son polinizadas por insectos o el viento (alogamia) y el resto de las flores se autopolinizan (autógama) (Lagos *et al.*, 2008); en cambio, la polinización de las flores de *P. ixocarpa* Brot. es totalmente alógama por la autoincompatibilidad gametofítica que presenta, la cual es determinada por dos loci con alelos múltiples (Pandey, 1957). Este comportamiento origina poblaciones heterogéneas y heterocigóticas en estas especies, por lo que se dificulta obtener variedades comerciales uniformes (Peña *et al.*, 2011; Santiaguillo *et al.*, 2012).

La inducción de mutaciones es una alternativa para generar variabilidad genética (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Lemus *et al.*, 2002) o para obtener genotipos que pueden emplearse como progenitores en programas de fitomejoramiento, al producir nuevas combinaciones genéticas o al incrementar la variabilidad en una población (Rangaiah, 2006). Los mutágenos físicos más utilizados son los rayos X y gamma porque producen alteraciones de tipo estructural, fenotípico y de comportamiento, en células, tejidos, órganos y plantas completas; además, radioestimulan los procesos fisiológicos de las plantas (Ramírez *et al.*, 2006; Iglesias-Andreu *et al.*, 2010). Por consiguiente, esta

herramienta tiene el potencial de mejorar las características fenotípicas y reproductivas de las plantas; así como, la calidad de los frutos (Fuchs *et al.*, 2002; Honda *et al.*, 2006).

En México no se produce ni comercializa el fruto de *P. peruviana* L. y sólo se reportan algunas investigaciones realizadas por la Universidad Autónoma Chapingo y el Colegio de Postgraduados sobre su manejo agronómico. En el caso de *Physalis ixocarpa* que es una especie nativa de México, su mejoramiento genético es limitado; solamente la Universidad Autónoma Chapingo tiene un programa de mejoramiento genético del que se han derivado variedades como Rendidora y CHF1-Chapingo; sin embargo, existen otras especies silvestres de *P. ixocarpa* Brot. con características sobresalientes y frutos de sabor agridulce; que se comercializan en mercados rurales (Mora-Aguilar *et al.*, 2006), las cuales los productores conservan y que presentan poca pureza genética y bajos rendimientos (12 t ha^{-1}) en comparación con las variedades mejoradas (40 t ha^{-1}) (Peña, 2001).

Por lo anterior y ante la limitada información sobre mejoramiento genético en estas especies; se consideró necesario realizar la presente investigación enfocándose en la respuesta de variables fisiológicas y genéticas de las plantas de uchuva y tomate de cáscara a la aplicación de radiación gamma.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de la radiación en la calidad fisiológica de la semilla y en la dinámica de crecimiento de los rasgos morfológicos, reproductivos y características del fruto de las plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. y *Physalis ixocarpa* Brot. provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma ⁶⁰Co.

Objetivos particulares

- i) Determinar el efecto de los rayos gamma ⁶⁰Co en la germinación de semillas y el vigor de plántulas de *Physalis peruviana* L.
- ii) Evaluar la cinética de crecimiento de las plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma.
- iii) Mejorar el peso y la calidad del fruto de plantas de *Physalis peruviana* L. por medio de la irradiación de las semillas.
- iv) Analizar la respuesta fisiológica de las plántulas provenientes de semillas de *Physalis ixocarpa* Brot. irradiadas con rayos gamma ⁶⁰Co.
- v) Identificar plantas mutantes de *Physalis ixocarpa* Brot. que presenten frutos con semilla provenientes de autofecundación.

HIPÓTESIS

Hipótesis general

La radiación gamma influye positivamente en el crecimiento de los rasgos morfológicos y reproductivos de las plantas de *Physalis peruviana* L. y *Physalis ixocarpa* Brot.; además, favorece la obtención de variantes con mejores características de rendimiento y calidad de frutos de *Physalis peruviana* L.

Hipótesis particulares

- i) La germinación de la semilla y el vigor de las plántulas de *Physalis peruviana* L. se incrementa con la aplicación de rayos gamma ^{60}Co .
- ii) La irradiación de semillas con rayos gamma ^{60}Co favorece el crecimiento vegetativo y la fructificación de las plantas M₁ de *Physalis peruviana* L.
- iii) El peso y la calidad del fruto es mayor en las plantas provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma.
- iv) El vigor de plántulas de *Physalis ixocarpa* Brot. se afecta por la radiación a la semilla con rayos gamma.
- v) Las plantas M₁ de *Physalis ixocarpa* Brot. presentan alteración en la autoincompatibilidad de esta especie.

REVISIÓN DE LITERATURA

Género *Physalis*

Este género lo forman entre 70 y 90 especies, las cuales pueden ser hierbas perennes y anuales, comestibles, cultivadas y silvestres.

Entre las especies más conocidas de *Physalis* se encuentran el tomate de cáscara verde o tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm) y la uchuva o aguaymanto (*Physalis peruviana* L) originarias de México y Sudamérica respectivamente (Whitson y Manos, 2005; Peña *et al.*, 2008). Estas dos especies se caracterizan por tener su fruto carnoso de tipo baya cubierto por un cáliz pubescente que lo protege de insectos y hongos, así como de las condiciones ambientales adversas como la lluvia y granizo. Los frutos maduros de *P. ixocarpa* Brot. presentan diversos colores, los más comunes son el verde, amarillo y morado; mientras que, los de *P. peruviana* L. son anaranjados. El sabor de éstos puede ser agrídulce o dulce, con alto contenido de antioxidantes, vitaminas A, B y C, hierro y fósforo, lo que les confiere propiedades nutricionales y medicinales (Ramadan, 2011; Fischer *et al.*, 2014).

Aspectos generales de la morfología del género *Physalis*

Las plantas pueden ser herbáceas anuales o perennes, arbustivas con hábito de crecimiento erecto, rastrero y semirastrero (Figura 1). En la mayoría de las especies la altura de la planta varía de 0.20 a 2 m; el tallo es herbáceo, quebradizo, pero algunas como *P. peruviana* L. lo presentan lignificados desde la base; las hojas son pecioladas, alternas y en algunas especies parecen opuestas y la forma del limbo foliar en su mayoría es oval con márgenes irregularmente dentados; tanto el tallo y las hojas pueden ser glabras o pubescentes (Figura 2); en el caso de *P. ixocarpa* Brot. la pubescencia desaparece a medida que la planta crece (Saray y Loya, 1977; Fischer, 2000).



Figura 1. Morfología de las plantas de tomate de cáscara (lado izquierdo) y uchuva (lado derecho).

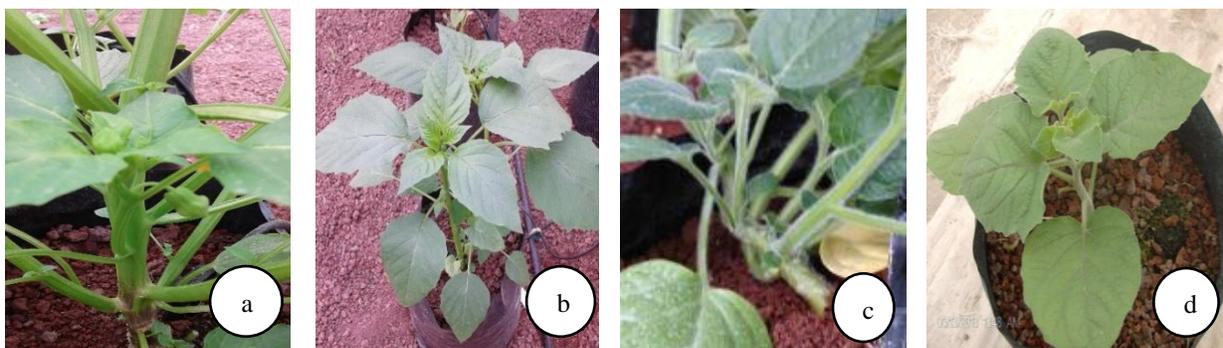


Figura 2. Tomate de cáscara: a) Tallo y b) Hojas; Uchuva: c) Tallo y d) Hojas.

Por otro lado, en general las flores pueden ser pediceladas, axilares y péndulas (Figura 3). En *P. ixocarpa* Brot. las flores son individuales, axilares, hermafroditas pero presentan autoincompatibilidad no específica, los pétalos son de color amarillo con un diámetro de 2.5 cm en promedio, asimétricas en la base; es decir, con la corola en forma de estrella, el tubo polínico es muy corto, el ovario es súpero con pistilo ligeramente corto y de estigma pequeño (Saray y Loya, 1977). En *P. peruviana* L. las flores son axilares, individuales, acampanadas, pedunculares y hermafroditas con cinco pétalos amarillos

soldados y puntos morados en su base; la autofecundación es común en esta especie (Fischer *et al.*, 2011).

El fruto es una baya carnosa y succulenta, en su mayoría sésil, de color verde, naranja, amarilla o con tonos púrpuras, llega a medir de 0.8 a 1.5 cm de diámetro (hasta 4 cm en el tomate cultivado). El cáliz que se elonga después de la fecundación de la flor es inflado vesicular, cubre por completo a la baya durante la fructificación, el tamaño varia de 1 a 6 cm de largo y 1 a 2.5 cm de ancho, en la mayoría de las especies. El color del cáliz del fruto de *P. ixocarpa* Brot. y *P. peruviana* L. en estado inmaduro es verde, pero en el caso de los frutos maduros de la primera especie presentan coloraciones de verde amarillo o verde morado (Figura 3); los frutos maduros de *P. peruviana* L. pierden su clorofila (a partir de los 40 a 45 días después de fecundación) volviéndose totalmente de color amarillo (Fischer y Lüdders, 1997). Las semillas son de color café dorado o amarillas, reniformes, con un diámetro entre 1.2 y 2 mm (Fischer, 2000).

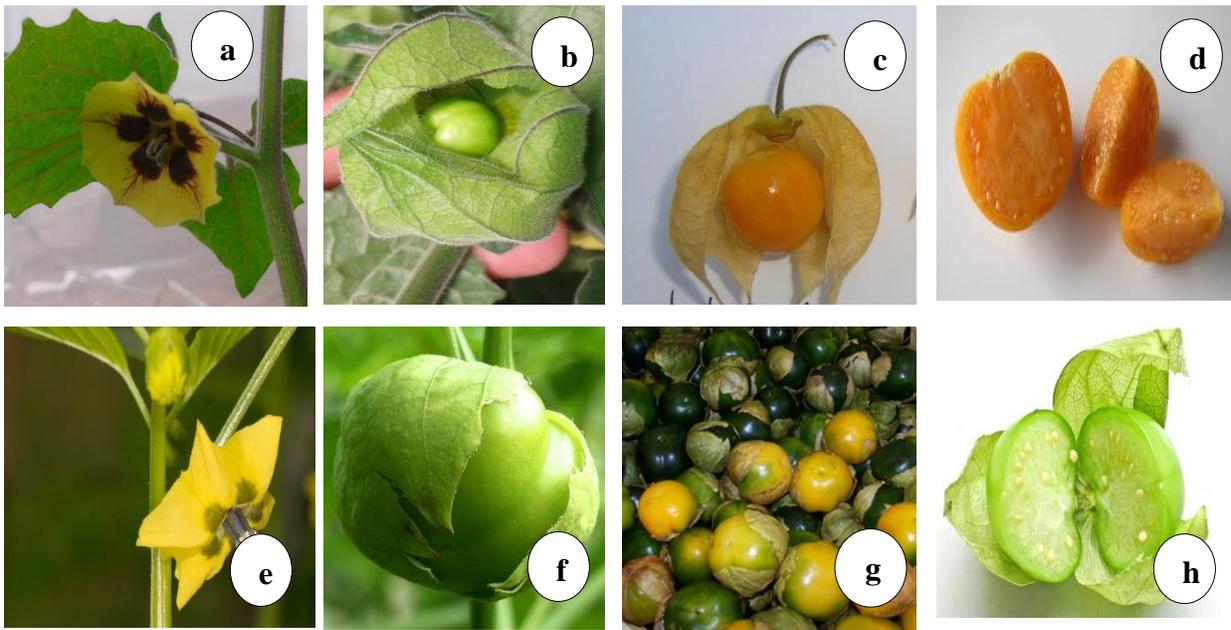


Figura 3. Uchuva: a) Flor, b) Fruto inmaduro, c) Fruto maduro y d) Fruto y semillas. Tomate de cáscara: e) Flor, f) Fruto inmaduro, g) Fruto maduro y h) Fruto y semillas.

Importancia de *Physalis peruviana* L. y *Physalis ixocarpa* Brot.

El fruto de *P. peruviana* L., por su sabor agridulce, textura, aroma y color se consume en fresco o se utiliza como ingrediente en diversos guisos en Inglaterra, Alemania, Francia, Holanda, Canadá y Estados Unidos donde se considera un fruto exótico. En la industria alimenticia de Colombia por su alto contenido de pectinas, se utiliza para elaborar conservas, pasas, bebidas, yogurts y mermeladas (Ramadan, 2011); siendo este país el principal productor y exportador de este fruto a Europa y Norte América (Fischer *et al.*, 2014). Además, se ha reportado que el fruto, cáliz y hojas de esta especie tienen propiedades medicinales por el alto contenido de antioxidantes (Wu *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2008), flavonoides y fenólico, compuestos naturales benéficos para la salud humana, así como efectos antiinflamatorios (Rop *et al.*, 2012; Licodiedoff *et al.*, 2013); también, presenta altos niveles de fibra, hierro, fósforo y vitaminas A, B y C (Ramadan, 2011). Debido a lo anterior y al creciente interés de los mercados europeos por frutos exóticos con propiedades benéficas para la salud humana, diversas instituciones han realizado investigaciones enfocadas a incrementar la producción del cultivo y el procesamiento de esta fruta (Fischer *et al.*, 2000).

En México, el consumo de los frutos de *P. ixocarpa* Brot. se inició desde tiempos precolombinos por los Mayas y Aztecas, quienes los consideraban elementos importantes en las tradiciones culinarias. También, se utilizaban las hojas, raíz y el cáliz del fruto en la medicina popular (Santiaguillo y Blas, 2009) por sus cualidades carminativas y antidiarreicas, para aliviar cólicos por indigestión o trastornos gastrohepáticos (Montes, 1991) y por su alto contenido de fenoles y antioxidantes (González-Mendoza *et al.*, 2011). La importancia del tomate de cáscara es que acompañan otras especies como cebolla (*Allium cepa* L.) y chile (*Capsicum* sp.) en la elaboración de salsas, así como para preparar purés o picadillos que se agregan como base de salsas o complemento en la preparación de diversos guisos (Morton y Russell, 1954).

El tomate cáscara se cultiva en México, Estados Unidos y Centro América. La superficie sembrada en México entre los años 2011 y 2015 fue en promedio de 44.258 ha, con rendimiento medio nacional de 14.82 t·ha⁻¹, ubicándose entre las cinco principales

especies hortícolas (SIAP, 2015). Por otro lado, Estados Unidos y Canadá son los principales consumidores de esta hortaliza por ser un sustituto del jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Ramírez *et al.*, 2015).

Origen y distribución de *Physalis peruviana* L. y *Physalis ixocarpa* Brot.

Las especies de este género se distribuyen principalmente en Estados Unidos, México, Centroamérica, Sudamérica y las Antillas y muy pocas en Europa y Asia (Whitson y Manos, 2005). El centro de origen de *P. peruviana* L. es los Andes Peruanos, pero también es reportada como nativa en Brasil y Chile, donde los frutos son poco consumidos y comercializados; mientras que, Colombia es el principal productor y exportador de este fruto (Fischer y Miranda, 2012). Esta especie fue introducida por los españoles en Sudáfrica hace más de 200 años como especie antiescorbuto y distribuida a Kenia, California, Gran Bretaña, Australia, Zimbabwe, Nueva Zelanda, Hawai y la India (Fischer y Almanza, 1993).

En México existen más de 50 especies de *P. ixocarpa* Brot., por tal razón se considera el centro de origen y diversidad del taxón (Santiaguillo *et al.*, 2010). El estado de Jalisco cuenta con la mayor distribución de especies de *Physalis* con 39 (42 % del total a nivel mundial); seis de las cuales son endémicas (Vargas *et al.*, 2003); mientras que, Oaxaca, cuenta con 29 especies, de las cuales cuatro son endémicas (Rodríguez, 2004) y Durango con 20 especies identificadas. Estos estados concentran la mayoría de especies por su gran variedad de condiciones fisiográficas y climáticas (González *et al.*, 2007).

Variedades y usos de *Physalis peruviana* L. y *Physalis ixocarpa* Brot.

Variedades de *Physalis peruviana* L.

En esta especie no se han registrado variedades, sólo se han seleccionado genotipos en diferentes países donde se les conoce como ecotipos, los cuales están adaptados a los diferentes climas de las regiones de cada país. Estos se diferencian por el porte de la planta, el tamaño, color y sabor del fruto, así como por la forma del cáliz. Los más

conocido son Colombia (originaria de Colombia), Kenia y Sudáfrica (originarios de África) (Fisher *et al.*, 2005; Flores *et al.*, 2000); estos últimos genotipos presentan frutos más grandes, debido a un mayor número de cromosomas (*i.e.*, Kenia $2n = 48$, Colombia $2n = 32$); además, tienen una menor concentración de sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) y ácido cítrico (Rodríguez y Bueno, 2006). A continuación, se mencionan algunas características de los ecotipos más comercializados:

a) Kenia

Se caracteriza por presentar marcas longitudinales en el tallo y en las ramas laterales, el tamaño de las hojas y el área foliar son menores que los ecotipos Sudáfrica y Colombia. Los frutos son grandes y de forma alargada de color amarillo intenso con menor concentración de ácido cítrico en comparación con los demás materiales además, presenta mayor rendimiento por planta (Narváez, 2003; Fischer *et al.*, 2007).

b) Colombia

El crecimiento vegetativo (grosor de tallo, número de ramas y área foliar) de la planta es similar al ecotipo Sudáfrica, pero produce mayor número de frutos por planta. Los frutos tienen forma de globos, son grandes y al madurar son de color amarillo intenso con un alto contenido de azúcares; pero, con menor concentración de ácido cítrico similar al ecotipo Kenia. Estas características hacen que sea el fruto más comercializado para exportación (Narváez, 2003; Fischer *et al.*, 2007).

c) Sudáfrica

Los frutos presentan mayor diámetro y peso, así como el mayor peso de semillas por fruto; el fruto y cáliz son achatados (Fischer *et al.*, 2007).

d) Ambateño

El tamaño del fruto es mediano con una coloración entre verde y amarillo, contienen una alta cantidad de sustancias que le dan un sabor agridulce y aroma que destaca sobre el resto de ecotipos (Narváez, 2003).

e) Ecuatoriano

Este ecotipo produce frutos más pequeños que los anteriores; tienen un color amarillo intenso y un aroma agradable (dulce), así como un alto contenido de vitaminas A y C (Narváez, 2003).

Existen accesiones de *P. peruviana* L. en bancos de germoplasma de Corpoica y universidades de Colombia. Por ejemplo, Herrera *et al.* (2011) reportaron 54 accesiones de esta especie en el nororiente de Colombia, donde determinaron que los materiales silvestres presentaron un alto contenido de °Brix, pero alta incidencia de rajado de fruto; mientras que, los cultivados tuvieron un mayor rendimiento. Asimismo, Ligarreto *et al.* (2005) realizaron y establecieron colecciones en Brasil, Chile, Perú, Ecuador, Guadalupe, Guatemala, Costa Rica y México; además, indican que en estas regiones se encontraron materiales silvestres y tradicionales con gran variabilidad genética. Por otro lado, Estados Unidos tiene los cultivares Peace, Giant Groundcherry, Goldenberry, Giallo Grosso, Giant, Giant Poha Berry, Golden Berry y Golden Berry-Long Ashton, mientras que, Australia registra los cultivares Golden Nugget o New Sugar Giant (Fischer, 2000).

Variedades de *Physalis ixocarpa* Brot.

En la mayoría de los estados de México se ha reportado la existencia de múltiples variantes genéticas de tomate de cáscara (*Physalis* spp.), distribuidas en forma silvestre, cultivada o domesticada y adaptadas a gran diversidad de condiciones ambientales y edáficas (Santiaguillo *et al.*, 2010). Investigaciones realizadas con base en caracteres morfológicos y evolutivos, han agrupado a las diversas poblaciones de *P. ixocarpa* Brot. en ocho razas: Rendidora, Salamanca, Tamazula, Verde Puebla, Manzano o Amarillo, Arandas, Milpero cultivado, Milpero no cultivado (Peña *et al.*, 2011). En el SNICS se encuentran registradas once variedades de tomate de cáscara: CHF1-Chapingo, Diamante, Manzano Tepetliltla, Milpero Tetela, Potrero, Puebla SM3, Rendidora, Salamanca, Tamazula SM3, Tecozautla 04 y Yema de Huevo (Peña *et al.*, 2011; SNICS, 2018).

Entre las características que diferencian ambas especies se encuentran el hábito de crecimiento; ciclo reproductivo; rendimiento; color, tamaño y firmeza del fruto; rasgos del cáliz y número de semillas por fruto (Cuadro 1) (Santiaguillo y Peña, 1997).

Cuadro 1. Variedades cultivadas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en México (Santiaguillo y Peña, 1997).

Variedad	Hábito de crecimiento	Ciclo	Color de fruto
Imperial	Semierecto	Precoz	Verde morado
Rendidora	Rastrero	Precoz	Verde limón
Salamanca	Erecto	Tardío	Verde intenso
Tamazula	Erecto	Precoz	Morado
Verde Puebla	Rastrero a semirastrero	Precoz	Verde con nervaduras moradas
Manzano o Amarillo	Rastrero a semirastrero	Tardío	Anaranjado verde
Arandas	Erecto	Precoz	Verde a morado
Milpero cultivado	Rastrero a erecto	Tardío	Verde a morado
Milpero no cultivado	Rastrero a semirastrero	Tardío	Verde amarillo, morado
SHF1 Chapingo	Rastrero a semirastrero	Muy precoz	Verde limón

Usos

Santiaguillo y Blas (2009) registraron ocho usos generales para el género *Physalis*: comestible, industrial, medicinal, trampa vegetal, ornamental, forraje, entretenimiento (juguete) y ceremonial (Cuadro 2). Por el número de especies involucradas, destacan el uso comestible y medicinal (11 especies).

Cabe señalar que las especies comestibles o utilizadas como fuente de alimento en la dieta popular mexicana, se consumen de diferentes maneras según la especie y la región

en la que ésta se desarrolle o localice. Por ejemplo, los frutos de *Physalis gracilis* Miers se consumen frescos, como fruta, por su sabor dulce en Veracruz y Puebla; mientras que, en Sudamérica y Europa, los frutos de *P. peruviana* L., originaria del Perú, se consumen frescos por su sabor agridulce (Santiaguillo *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Usos de las especies de *Physalis* en México (Santiaguillo y Blas, 2009).

Uso	Especie
Como fruta	<i>Physalis gracilis</i> Miers, <i>Physalis peruviana</i> L:
En salsas	<i>Physalis angulata</i> L., <i>Physalis ixocarpa</i> Brot. (= <i>P. philadelphica</i> Lam.), <i>Physalis nicandroides</i> Schltld., <i>Physalis pruinosa</i> L. <i>Physalis peruviana</i> L.
Quelite	<i>Physalis gracilis</i> Miers, <i>Physalis sancti-josephii</i> Dunal
Culinario	<i>Physalis ixocarpa</i> Brot. (= <i>P. philadelphica</i> Lam.), <i>Physalis coztomatl</i> Mociño & Sessé ex Dunal. <i>Physalis peruviana</i> L:
No especificado	<i>Physalis cinerascens</i> (Dunal) Hitchc., <i>Physalis greenmannii</i> Waterf., <i>Physalis lagascae</i> Roem. & Schult., <i>Physalis pubescens</i> L.
Medicinal	<i>Physalis arborescens</i> L., <i>Physalis chenopodifolia</i> Lam., <i>Physalis cinerascens</i> (Dunal) Hitchc., <i>Physalis gracilis</i> Miers, <i>Physalis hederifolia</i> A. Gray, <i>Physalis ixocarpa</i> Brot., <i>Physalis nicandroides</i> Schltld., <i>Physalis orizabae</i> Dunal, <i>Physalis patula</i> Mill., <i>Physalis sancti-josephii</i> Dunal, <i>Physalis pubescens</i> L.
Industrial	<i>Physalis cinerascens</i> (Dunal) Hitchc. <i>Physalis peruviana</i> L:
Trampa vegetal	<i>Physalis nicandroides</i> Schltld.
Ornamental	<i>Physalis gracilis</i> Miers, <i>Physalis alkekengii</i> L.
Juguete	<i>Physalis cordata</i> Mill
Forraje	<i>Physalis sancti-josephii</i> Dunal
Ceremonial	<i>Physalis nicandroides</i> Schltld., <i>P. máxima</i> .

Mejoramiento genético de *Physalis peruviana* L.

A pesar del potencial genético de *P. peruviana* L. existe limitado desarrollo agronómico-tecnológico y en mejoramiento genético debido a la poca demanda de materiales mejorados para sustituir a los existentes en los mercados. En Colombia se ha investigado la variabilidad genética de esta especie, incluyendo una caracterización a escala morfo-agronómica y molecular (Bonilla *et al.*, 2008; Garzón-Martínez *et al.*, 2012) para características vegetativas y de fruto de los ecotipos regionales (Trillos *et al.*, 2008; Herrera *et al.*, 2012). En cuanto a estudios citogenéticos, se ha hecho la caracterización cariotípica y la inducción de cambios en el número de cromosomas en cruzamientos naturales entre *P. peruviana* L. (silvestre y cultivada) y *P. philadelphica* Lam. (Rodríguez y Bueno, 2006), reportándose variación en el número de cromosomas en los ecotipos silvestres ($2n = 24$ hasta $2n = 48$ con un número básico probable de $X = 12$); sin embargo, mucho de este germoplasma ha desaparecido o está en peligro de erosión genética (Bonilla *et al.*, 2008).

Las investigaciones enfocadas al mejoramiento genético en esta especie son de Caro-Melgarejo *et al.* (2012) quienes evaluaron los cambios morfológicos (viabilidad, enraizamiento, cantidad de hojas, longitud de tallos y endurecimiento de plantas regeneradas) y citogenéticos (cromosomas rezagados) de yemas axilares de microtallos de *P. peruviana* irradiadas con dosis de 50 a 300 Gy. Ellos reportaron que las dosis entre 100 y 200 Gy causaron el mayor número de cambios morfológicos y citogenéticos y que las dosis superiores a 200 Gy tuvieron un efecto negativo. También, en *P. peruviana* L. y *P. angulata* L. se evaluó la influencia de rayos gamma (200, 400 y 500 Gy) aplicados a semillas observándose que la dosis de 200 Gy favoreció el crecimiento de las plantas M_1 y las dosis mayores a 400 Gy lo inhibieron (Raghava y Raghava, 1989).

Mejoramiento genético de *Physalis ixocarpa* Brot.

El tomate de cascara tiene gran variabilidad genética debido a que es una especie alógama obligada por la autoincompatibilidad gametofítica que presenta, la cual es determinada por dos loci con alelos múltiples (Pandey, 1957), esto origina poblaciones

heterogéneas y heterocigóticas difíciles de clasificar; así como, la presencia de poblaciones intermedias con diferente estado evolutivo (silvestres, domesticadas y cultivadas) (Santiaguillo *et al.*, 2012); sin embargo, esta variabilidad no se ha aprovechado eficientemente por los programas de mejoramiento genético en México, ya que sólo se han reportan ocho razas y registrado 11 variedades ante el SNICS. De estas últimas CHF1-Chapingo, Diamante, Manzano Tepetliltla, Puebla SM3, Rendidora Precoz, Tamazula SM3, Tecozautla 04 son resultado del programa de mejoramiento genético de la Universidad Autónoma Chapingo (Peña *et al.*, 2011; SNICS, 2018). En el caso de las razas, éstas se distribuyen en México en altitudes que van de los 8 a los 3 350 m (Santiaguillo *et al.*, 2010), siendo las más importantes Rendidora, Salamanca y Tamazula (Peña y Márquez, 1990); la raza Puebla ha cobrado gran importancia en el mercado mexicano por el tamaño del fruto, que es muy atractivo incluso para el mercado internacional. Es importante mencionar que existen numerosos materiales nativos que los productores usan y conservan y otros que las compañías semilleras han incrementado y comercializado (Peña *et al.*, 2011).

Los métodos genotécnicos de selección más utilizados son la selección masal visual estratificada, familiar de medios hermanos y combinada de medios hermanos y cruzamientos planta a planta (Santiaguillo *et al.*, 2004); pero también existe la formación de híbridos mediante el uso de líneas dihaploides obtenidas por cultivo de anteras (Moreno *et al.*, 2002; Peña *et al.*, 2008).

La problemática del cultivo del tomate de cáscara es compleja y la investigación que se realiza en esta especie es aún escasa; particularmente la relacionada con el conocimiento del germoplasma existente en el país, los métodos genotécnicos para su fitomejoramiento y la obtención e incremento de variedades mejoradas (Peña *et al.*, 2002). Como ya se mencionó, el rendimiento promedio en México es bajo en relación con el potencial productivo del cultivo, debido al uso de variedades con bajo potencial productivo, técnicas de producción ineficientes; problemas de comercialización derivados de sobreoferta del producto en algunas épocas del año, producción de semilla de baja

calidad física, fisiológica, genética (pureza varietal) y fitosanitaria y un control ineficiente de las plagas y enfermedades (Peña *et al.*, 2011).

Inducción de mutaciones en plantas por radiación ionizante

El rendimiento de los cultivos y la sustentabilidad de la agricultura son afectados por diversos factores como plagas, enfermedades y sequía; asimismo, la baja fertilidad y alta salinidad de los suelos son un grave problema (De la Cruz, 2010; González *et al.*, 2005). Al respecto, una alternativa a estos problemas, es el desarrollo de variedades vegetales tolerantes o resistentes a factores bióticos y abióticos del ambiente, las cuales se pueden lograr mediante selección e inducción de mutaciones espontáneas, ya que la naturaleza proporciona a todas las especies vegetales el potencial de desarrollar nuevas características para crecer, desarrollarse y reproducirse en ambientes distintos y contrastantes (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; De la Cruz, 2010). Los programas de mejoramiento genético que se basen en la selección e hibridación de especies vegetales requieren de siete a diez años (Ortiz *et al.*, 2008; Valdez *et al.*, 2004), para obtener individuos con mejores características fenotípicas, mayor rendimiento y calidad de fruto, resistentes a plagas, enfermedades, sequía, salinidad, fotoperiodo, heladas, estrés, entre otros, según la especie en estudio (Garza *et al.*, 2012). Igualmente, cabe señalar que en estos métodos no siempre se logran obtener resultados positivos, debido a la expresión y fijación del gene (dominante o recesivo) en la población, requiriendo más ciclos de selección.

La radiación ionizante es una herramienta que permite generar variabilidad genética no presente en la naturaleza, al provocar mutaciones aleatorias en el ADN de los individuos (Ramírez *et al.*, 2006; Lemus *et al.*, 2002). El cambio biológico por radiación puede manifestarse directamente en el individuo o en su progenie. Por lo tanto, si la modificación se manifiesta en el individuo irradiado se trata de un cambio somático aunque los genes de una célula somática pueden producir cambios a la célula hija, pero es un efecto somático no hereditario; en contraste, cuando el cambio ocurre en las células

germinales habrá un efecto en la descendencia del individuo, o sea, el cambio será heredable (Lagoda, 2011).

En el caso de las plantas, la radiación ionizante afecta los procesos fisiológicos y bioquímicos de éstas; mientras que la irradiación de semillas, interrumpe la síntesis de proteínas, alterando el equilibrio hormonal, intercambio de gases y agua y la actividad enzimática. Los cambios morfológicos, estructurales y funcionales dependerán de la fuerza y la duración del estrés inducido por la radiación, también del estado fisiológico y la composición genética del material tratado. Así pues, la aplicación de dosis bajas (estrés moderado) puede influir en la adaptabilidad de las plantas y ser reversibles. En cambio, las consecuencias biológicas de dosis altas de radiación pueden aparecer en varias etapas del desarrollo del individuo; es decir, división celular anormal, muerte celular, mutación, falta o fallas de tejidos y órganos y reducción del crecimiento de la planta. Por otra parte, la germinación de las semillas, el crecimiento y la reproducción de las plantas correlacionan inversamente con la dosis de irradiación (Lagoda, 2011).

Por lo anterior, la inducción de mutaciones artificiales es una técnica segura, probada y económica que permite obtener genotipos que pueden emplearse como progenitores en programas de fitomejoramiento, al producir nuevas combinaciones genéticas o al incrementar la variabilidad en una población y contribuir a la generación de variedades comerciales sobresalientes (Rangaiah, 2006).

Mutagénesis

La aplicación de la mutagénesis en el mejoramiento genético y en la producción agrícola se inició a principios del siglo XX en cultivos como el maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum* sp.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), algodón (*Gossypium* sp.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y en plantas ornamentales (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Chopra, 2005). En el año 2017 se reportaron 2 252 variedades generadas por mutagénesis (por cruza de variedades mutadas o líneas mutantes) en 59 países, principalmente Asia (1 142), Europa (847) y América del Norte (160), donde el 75 % de estas variedades (1 700) son cultivos y el resto (552) son ornamentales y plantas decorativas (Maluszynski *et al.*, 2009;

Hernández *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2014); los rayos gamma son los más utilizados en estas especies (Maluszynski *et al.*, 2009) (Figura 4).

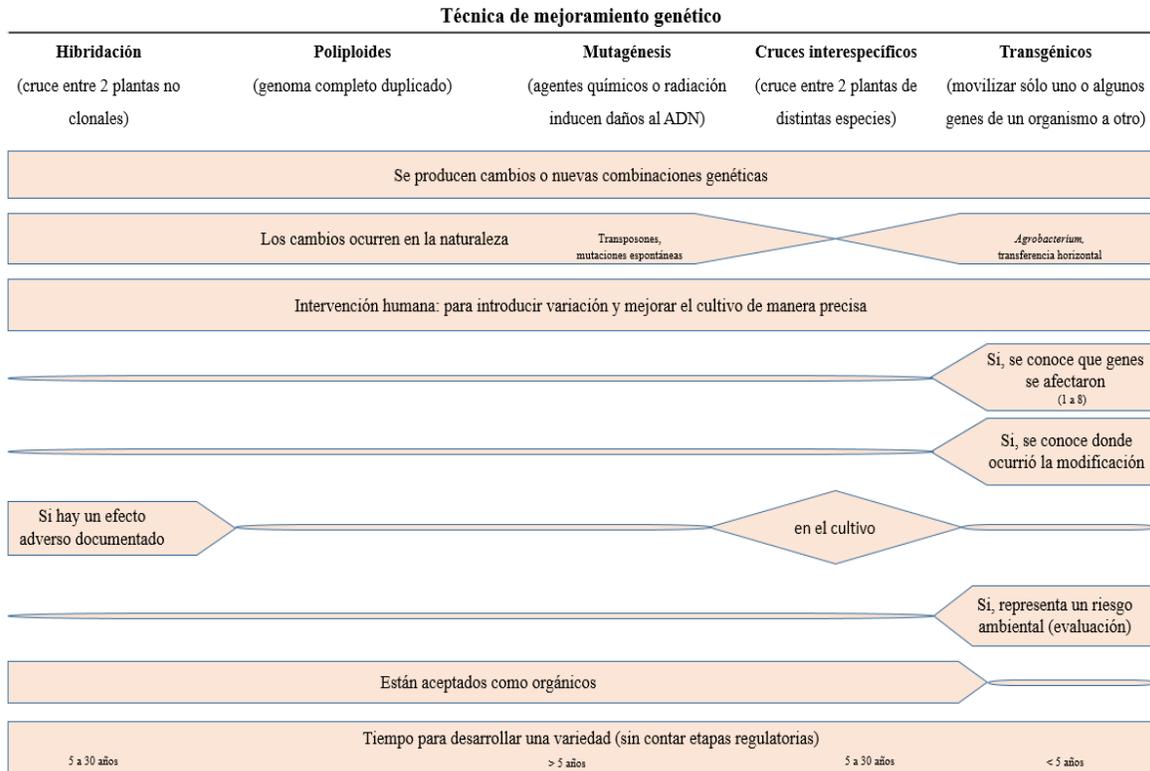


Figura 4. Aspectos generales de algunas técnicas de mejoramiento vegetal.

Los mutágenos pueden ser físicos y químicos; los primeros son los rayos X, gamma (Jain, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2008), ultravioleta (Ahloowalia y Maluszynski, 2001) (Cuadro 3); además, de iones de carbono (Matsumura *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2009). Los mutágenos químicos más comunes son el etil metanosulfonato, sulfato de dimetilo y sulfato de dietilo (Maluszynski *et al.*, 2009). Estos agentes producen alteraciones de tipo estructural, fenotípico y de comportamiento en células, tejidos, órganos e incluso en plantas completas. Las alteraciones drásticas generalmente son mortales, en cambio, las leves pueden ser favorables para algunas características relacionadas con el crecimiento, el desarrollo y la reproducción de la planta (Kim *et al.*, 2005).

Cuadro 3. Mutágenos físicos más frecuentes para inducir mutaciones en los organismos (Mba *et al.*, 2010; Wani *et al.*, 2014).

Mutágeno	Fuente	Características
Rayos X	Máquina de rayos X	Radiación electromagnética; penetra en los tejidos desde unos pocos milímetros hasta varios centímetros. Peligrosos y penetrantes.
Rayos gamma	Radioisótopos y reacción nuclear	Radiación electromagnética producida por radioisótopos y reactores nucleares; muy penetrante en los tejidos; las fuentes son ^{60}Co y ^{137}Cs . Peligrosos y altamente penetrantes.
Neutrones	Reactores nucleares o aceleradores	Hay diferentes tipos (rápido, lento, térmico); son producidos en los reactores nucleares y son partículas sin carga; penetran los tejidos en varios centímetros; la fuente es ^{235}U . Muy peligrosos.
Partículas β	Isótopos radiactivos o aceleradores	Producidos en aceleradores de partículas o radioisótopos; son electrones; pueden ionizar, penetran superficialmente; las fuentes incluyen ^{32}P y ^{14}C . Poco peligrosas.
Partículas α	Radioisótopos	Derivadas de radioisótopos; tienen un núcleo pesado de helio capaz de ionizar; penetran superficialmente. Muy peligrosas.
Protones	Reactores nucleares o aceleradores	Producidos en los reactores nucleares y aceleradores; son derivados del núcleo de hidrógeno; penetran los tejidos hasta varios centímetros. Muy peligrosos.
Haz de iones	Aceleradores de partículas	Los iones son de carga positiva y se aceleran a altas velocidades (alrededor del 20 a 80 % de la velocidad de la luz) depositando alta energía en los materiales impactados. Peligrosos.

La eficiencia de un agente mutagénico para generar variabilidad genética en las plantas dependerá de la dosis y las características físicas del material vegetal, como de su temperatura y contenido de agua, tipo de propagación (asexual o sexual) (Figuras 5 y 6); así como de variables fisiológicas, como el tipo de tejido (en meristemos hay más probabilidad de éxito que en tejidos diferenciados), edad (los tejidos jóvenes son más proclives que los adultos), constitución bioquímica (contenido de nitrógeno, magnesio, potasio, hierro, fósforo, grasas, lípidos y proteínas), el ciclo de división celular (una alta actividad mitótica provoca una mayor sensibilidad a la radiación), el número cromosómico (a mayor número se presenta menor sensibilidad) y el volumen del núcleo de la célula (Cubero, 2002).

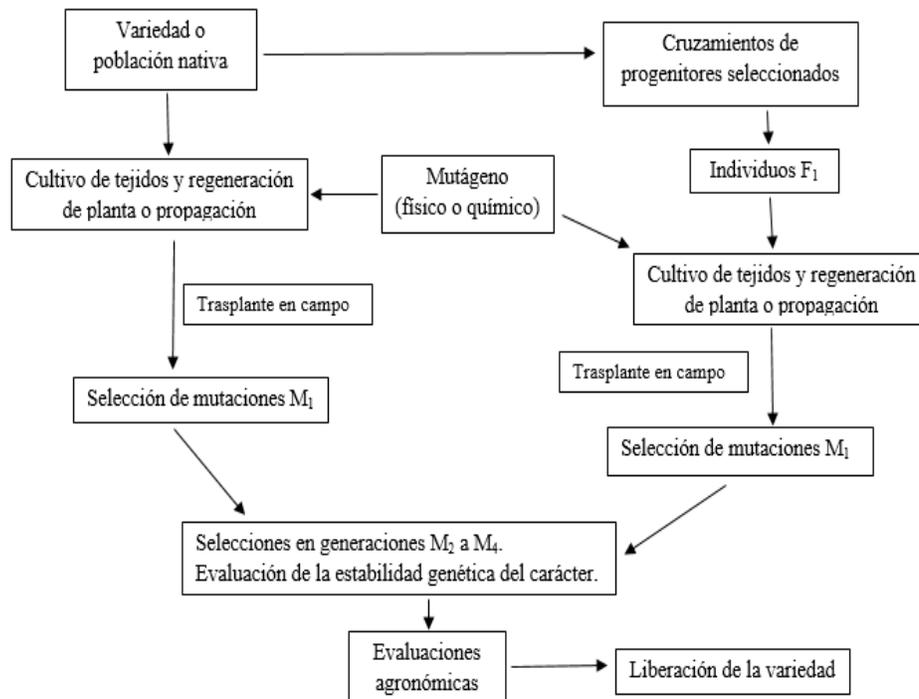


Figura 5. Proceso de inducción de mutaciones en especies de reproducción asexual.

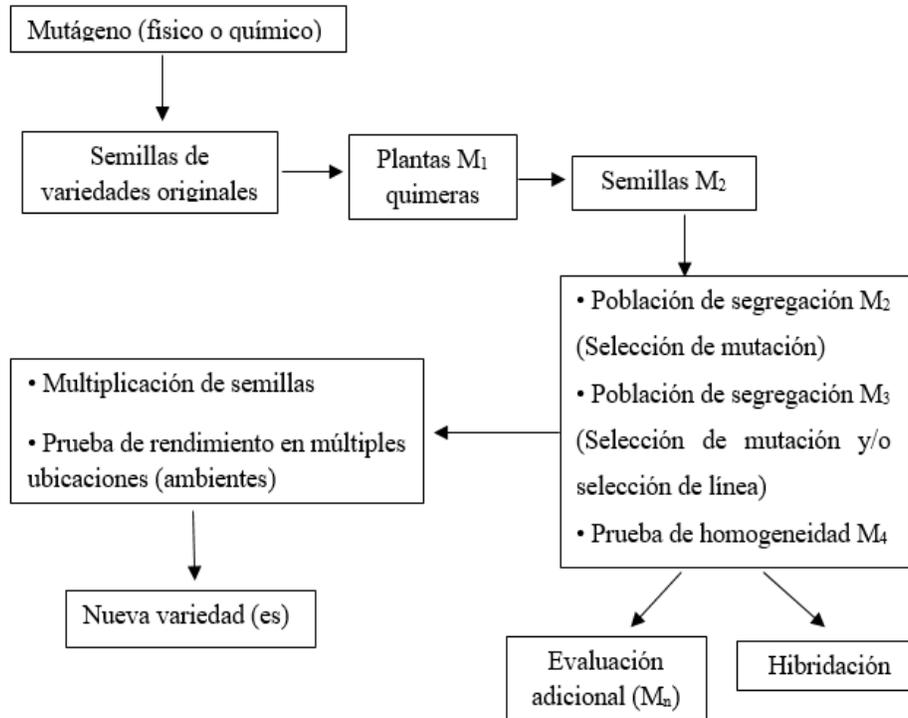


Figura 6. Proceso de inducción de mutaciones en especies de reproducción sexual.

Por lo anterior, la aplicación de dosis altas de radiación inhibe el crecimiento de las plantas (Kumari y Singh, 1996); mientras que, dosis bajas e intermedias pueden tener un efecto estimulador, al incrementar la proliferación celular, la germinación, el crecimiento celular, la actividad enzimática, la resistencia al estrés y el rendimiento (Chakravarty y Sen, 2001; Baek *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005). Cuando la radiación induce mutaciones por célula, existe el riesgo de que una mutación favorable sea acompañada por cambios genéticos no deseables (Otahola-Gómez *et al.*, 2001).

Investigaciones sobre el uso de mutaciones artificiales en las plantas

El láser, los rayos X y gamma son los más utilizados por los fitomejoradores para irradiar semillas y tejidos, pues influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas, al causar inestabilidad genómica de las células y tejidos, lo que origina cambios citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos, mediante la producción de radicales libres en las células (Kim *et al.*, 2004; Wi *et al.*, 2005).

Al respecto, De la Fe *et al.* (2000), Cepero *et al.* (2002), Iglesias-Andreu *et al.* (2010) y Ramírez *et al.* (2006), observaron que con la aplicación de radiación se aumenta el porcentaje de germinación y se disminuye el periodo germinativo de semillas de especies forestales, hortícolas y cereales cuando presentan latencia o las condiciones ambientales (humedad y temperatura) no son adecuadas y retrasan su germinación. Muckerheide (2004) y Mortazavi *et al.* (2002) mencionan que el efecto positivo de la irradiación se basa en cambios fisiológicos, pues la estimulación está relacionada con una serie de efectos en el interior de las membranas. Estos efectos provocan la activación de enzimas como las polifenoloxidasas, catalasas, peroxidasas y esterasas (Álvarez *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2005), las cuales conllevan a la síntesis de sustancias fisiológicamente activas, que a bajas concentraciones aceleran la división celular, conjuntamente con la morfogénesis en mitocondrias y cloroplastos.

No todas las especies responden positivamente a la radiación. Por ejemplo, López-Mendoza *et al.* (2012) no encontraron diferencias estadísticas en la germinación de semillas de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) tratadas y no tratadas con rayos gamma. También, Canul-Ku *et al.* (2012), observaron que dosis menores de 275 Gy de rayos gamma disminuyeron el porcentaje de emergencia (30 a 70 %) de plántulas de nochebuena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) en comparación con el testigo, pero las dosis de 50, 175 y 250 Gy aceleraron de 5 a 20 % la emergencia de plántula a los 4 dds. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por varios autores (Amjad y Akbar Anjum, 2003; Bhargava y Khalatkar, 1987), si se tiene en cuenta que la inhibición de la división celular es una de las reacciones inmediatas a altas dosis de irradiación. Si bien la inhibición de la mitosis por la radiación puede resultar pasajera, la lesión radiológica que la misma produce a nivel génico y cromosómico puede ser letal para las células en división, que en conjunto son sensibles a la radiación (Viccini y Carvalho, 2001).

Las respuestas contrastantes en cada especie puede deberse a que los efectos de la radiación en las semillas pueden continuar tiempo después del período de exposición;

incluso el almacenarlas aumenta la cantidad de daño en el ADN de éstas (Amjad y Akbar Anjum, 2003).

Los efectos de la radiación varían según el carácter morfológico en cada etapa de crecimiento de la planta. En este sentido, la dosis de 50 Gy generó plantas M₁ de *Euphorbia pulcherrima* de mayor altura; en cambio, el mayor diámetro de ciatio y longitud de pedúnculo de la inflorescencia se presentó con la dosis de 250 Gy; el mayor tamaño de semilla ocurrió con las dosis de 100, 250 y 275 Gy; y el mejor peso de semilla con la dosis de 225 Gy (Canul-Ku *et al.*, 2012). En cambio, Aladjadiyan (2007) menciona que las plantas M₁ de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) provenientes de semillas irradiadas con rayos 10 Gy incrementaron en 25 % el grosor del tallo. Por otra parte, Sawangmee *et al.* (2011) indicaron que la dosis de 50 Gy incrementó el número de ramas (14.3) y flores (16.0) de los híbridos entre *T. fournieri* y *T. baillonii*; mientras que, la dosis de 100 Gy disminuyó estos indicadores.

López-Mendoza *et al.* (2012) indican que la floración y fructificación de las plantas M₁ de *C. annuum* L. tratadas con dosis de 0 a 120 Gy, ocurrieron en un periodo similar al testigo, pero con la dosis de 60 Gy las plantas presentaron más frutos (12.0), en cambio, las plantas tratadas con 40 Gy presentaron menos frutos (6.2) que el testigo (9.5). Las dosis entre 5 y 20 Gy incrementaron en 66 y 72 % el número de frutos por planta de *C. annuum* L., pero las dosis mayores de 130 Gy los disminuyeron (Álvarez *et al.*, 2013). En un estudio en el que se evaluaron las generaciones M₂ y M₃ de *Macrotyloma uniflorum* provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma en dosis de 100 a 400 Gy, los días a primera flor de plantas M₂ de todas las dosis (53.0 a 54.8 d) fue similar al testigo (53.3 d); en cambio, en las plantas M₃ con 300 Gy, la floración ocurrió antes (50.9 d) que en el testigo (54.0 d). Además, las plantas M₂ con 200 Gy (78.9 d) y M₃ con 300 Gy (79.1 d) fructificaron antes que las plantas testigo (85.2 y 83.0 d, respectivamente). Asimismo, la dosis de 300 Gy incrementó el número de frutos de plantas M₂ y M₃ (83.8 y 110.3, respectivamente) con respecto al testigo (71.2 y 100.5, respectivamente) (Sadashiv y Kondiram, 2012).

Por lo descrito, la principal ventaja de la mutagénesis con respecto a los otros métodos de mejoramiento es su acción aleatoria en el genoma, ya que a partir de una misma población irradiada se pueden obtener varios genotipos con alteraciones en distintos genes (Ahloowalia y Maluszynski, 2001); produciendo así variabilidad a diferentes dosis de radiación (Santos *et al.*, 2012) y cada planta puede transmitir a la próxima generación una o más mutaciones espontáneas (Valdez *et al.*, 2004). Al respecto, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)/OIEA señala que hasta el año 2017 existían 3 222 variedades mutantes con características agronómicas sobresalientes en planta y alto valor nutricional en fruto en especies de potencial agrícola (Cuadro 4).

Se han generado mutantes con resistencia a diferentes patógenos; por ejemplo, el mutante de tomate (*S. esculentum* L.) resistente a la marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum*); colza (*Brassica napus* L.), resistente a la pudrición del tallo (*Sclerotinia sclerotiorum*), manzano (*Malus domestica* L.), tolerante al mildiu polvoriento (*Podosphaera leucotricha*) y la costra de manzana (*Venturia inaequalis*); garbanzo (*Cicer arietinum* L.), resistente a la plaga de *Ascochyta* y *Fusarium* (Oladosu *et al.*, 2016).

Cuadro 4. Efectos estimulantes de la radiación por rayos gamma, X y ultravioleta en características del crecimiento y rendimiento de cultivos agrícolas (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Aladjadjiyan, 2007; Oladosu *et al.*, 2016).

Cultivo	Características
Trigo	Se incrementó el rendimiento fresco en 20 %; el peso y la longitud de grano de 3 a 14 %; además, se presentaron cambios en su color, se incrementó la velocidad de la fotosíntesis y el contenido de clorofila <i>a</i> y <i>b</i> en las hojas.
Remolacha	Aumentó la germinación de la semilla en 12 % y el rendimiento de 6 a 118 %.
Maíz	El rendimiento aumentó de 5 a 100 %; la germinación de la semilla y longitud de mazorca en 25 %.
Papa	Aumentó el rendimiento de 7 a 23 %.
Girasol	El rendimiento aumentó de 5 a 19 % y se mejoró la calidad de aceite.
Tomate	La velocidad de germinación y la fotosíntesis aumentaron; así como la fitomasa de 5.7 a 7.6 % y el rendimiento de 5 a 25 %.
Chícharo, frijol y okra	Se generaron aberraciones cromosómicas y una disminución del crecimiento vegetativo entre 36 y 46 %; el rendimiento aumentó de 8 a 48 %.
Soya	La germinación de la semilla aumentó de 8 a 37 %; la longitud de vaina en 37 % y el peso de grano en 172 %; además, se mejoró la calidad del aceite; pero se disminuyó el contenido de ácido fítico.
Rábano	El peso aumentó en 80 %.
Tulipán	La germinación de la semilla y longitud de la planta se incrementaron.
Pimienta	La germinación de la semilla y el peso de la semilla aumentaron de 3 a 14 %.
Alfalfa y trébol	El peso fresco se incrementó en 4 %; el contenido de proteína de 3 a 7 % y la longitud de planta en 8%.
Linaza	Se incrementó el peso de grano.

Cuadro 5. Continuación.

Pepino	Se obtuvieron plántulas con mayor vigor, se incrementó el rendimiento de 11.7 a 15.4 %; el peso del fruto en 42.4 %; el contenido de clorofila en 13.5 % y la fitomasa de 5.7 a 7.6 %.
Zanahoria	Se aumentó en 5% la germinación de la semilla y el peso fresco en 7%.
Arroz	La germinación de la semilla se incrementó en 18 % y el rendimiento de 4 a 6%; se redujo el porte de la planta en 20 %, se obtuvieron mutantes estériles y embriones gigantes (con mayor contenido de aceite); granos con bajos contenidos de amilosa pero con altos contenidos de almidón de alta resistencia.
Tabaco	La germinación de la semilla se incrementó en 68 %.
Cebada	Se obtuvieron mutantes con mayor altura de planta y rendimiento.
Algodón	Se tuvieron plantas con mayor rendimiento, tolerancia a calor y al gusano bellotero.
Yuca	Se aumentó el contenido de amilosa.
Cacahuete	Se modificó el color de las hojas por un verde oscuro; se aumentó el tamaño de la semilla, el rendimiento y contenido de aceite y proteína; así como, la resistencia a enfermedades.
Aguacate	Se obtuvo mutantes enanos.
Plantas ornamentales	El porte de la planta disminuyó; además, se generaron cambios en el color la flor y hojas (variegado).

CAPÍTULO I. VARIABILIDAD INDUCIDA EN CARACTERES FISIOLÓGICOS DE *Physalis peruviana* L. MEDIANTE RAYOS GAMMA ⁶⁰Co APLICADOS A LA SEMILLA

Escrito según las normas de la Revista Fitotecnia Mexicana. Publicado en la Revista Fitotecnia Mexicana Vol. 40 (2): 211 - 218, 2017

1.1. RESUMEN

La inducción de mutaciones es una alternativa para generar variabilidad genética en la naturaleza, o para incrementar la variabilidad genética en una población y obtener genotipos que pueden emplearse como progenitores en programas de fitomejoramiento. La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una Solanacea cuyo fruto es una baya de sabor agridulce; cuyas semillas presentan germinación tardía. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de los rayos gamma ⁶⁰Co sobre características de germinación de la semilla y vigor de las plantas de *P. peruviana*. El estudio se realizó en invernadero con cubierta de plástico UVII720, de agosto a octubre de 2015. Los tratamientos fueron 16 dosis de rayos gamma ⁶⁰Co (Gy): 0, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 y 350. El experimento se realizó en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. La radiación no afectó el porcentaje de germinación, ni el número de hojas, pero las plántulas de semillas irradiadas emergieron 8 d antes que el testigo; con 300 y 350 Gy la supervivencia fue menor a 50 %. Las plantas de semillas irradiadas con 125, 150, 200 y 225 Gy presentaron la mayor altura y diámetro de tallo. La mayor lectura SPAD y longitud de la raíz se observaron en las plantas testigo. La mayor longitud de entrenudo se tuvo con 125, 150, 175 y 200 Gy. Mediante la aplicación de rayos gamma ⁶⁰Co pueden modificarse las características de la velocidad de germinación y algunas variables relacionadas con el establecimiento y vigor de las plantas de uchuva.

Palabras clave: *Physalis peruviana*, germinación, mutagénesis, uchuva, variabilidad genética, baya dorada.

1.2. INTRODUCCIÓN

La inducción de mutaciones es una alternativa para generar variabilidad genética no presente en la naturaleza (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Lemus *et al.*, 2002), o para obtener genotipos que pueden emplearse como progenitores en programas de fitomejoramiento, al producir nuevas combinaciones genéticas o al incrementar la variabilidad en una población (Rangaiah, 2006).

Los mutágenos pueden ser físicos y químicos. Entre los agentes mutagénicos físicos están los rayos X, gamma (Jain, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2008), ultravioleta (Ahloowalia y Maluszynski, 2001), además de iones de carbono (Matsumura *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2009). Los mutágenos químicos más comunes son el etil metanosulfonato, sulfato de dimetilo y sulfato de dietilo (Maluszynski *et al.*, 2009).

La aplicación de la mutagénesis en el mejoramiento genético y en la producción agrícola se inició a principios del siglo XX en cultivos como el maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum* sp.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), algodón (*Gossypium* sp. L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), y en plantas ornamentales (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Chopra, 2005); los rayos gamma son los más utilizados en estas especies (Maluszynski *et al.*, 2009).

La eficiencia de un agente mutagénico para generar variabilidad genética en las plantas dependerá de la dosis y las características físicas del material vegetal, como su temperatura y contenido de agua, así como de variables fisiológicas, como el tipo de tejido (en meristemas hay más probabilidad de éxito que en tejidos diferenciados), edad (los tejidos jóvenes son más proclives que los adultos), constitución bioquímica (contenido de nitrógeno, magnesio, potasio, hierro, fósforo, grasas, lípidos y proteínas), el ciclo de división celular (una alta actividad mitótica provoca una mayor sensibilidad a la radiación), el número cromosómico (a mayor número se presenta menor sensibilidad) y el volumen del núcleo de la célula (Cubero, 2002).

Al respecto, Ramírez *et al.* (2006) observaron que con la aplicación de radiación disminuyó el periodo (días) a germinación de semillas de diversas especies hortícolas y cereales cuando presentan latencia o las condiciones ambientales (humedad y temperatura) no son adecuadas y retrasan su germinación. Se sabe que dosis bajas de radiación (Akshatha y Chandrashekar, 2014) estimulan el interior de las membranas de

las células (Mortazavi *et al.*, 2002; Muckerheide, 2004), incrementan la actividad enzimática polifenoloxidasas, catalasas, peroxidasas y esterasas (Álvarez *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2005), lo que conlleva a la síntesis de sustancias fisiológicamente activas que a bajas concentraciones aceleran la división celular, conjuntamente con la morfogénesis en mitocondrias y cloroplastos.

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) pertenece a la familia Solanaceae, es una planta perenne, de hábito indeterminado, herbácea y arbustiva, el fruto que se asemeja a un fruto miniatura de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*), es una baya casi redonda de 1.25 a 2.5 cm de diámetro, está envuelta en un cáliz, cuando madura es de color amarillo-anaranjado y sabor agridulce y contiene entre 150 y 300 semillas. Es originaria de Sudamérica, principalmente de Perú, Ecuador y Colombia (Fischer, 2000), siendo este último el principal productor, seguido de Sudáfrica (Marín *et al.*, 2010). En México no hay información sobre su producción o comercialización, pero existen otras especies silvestres de *Physalis* con frutos de sabor agridulce.

El fruto se consume principalmente en EE.UU., Inglaterra, Francia y Alemania (Salazar *et al.*, 2008) de manera fresca y en productos procesados como mermeladas, dulces, almíbares, deshidratados, vinos y yogures. Este contiene fibra, proteínas, vitaminas A y C, hierro, calcio y fósforo (Fischer *et al.*, 2014); además, se le atribuyen propiedades medicinales como purificar la sangre, disminuir la albúmina de los riñones, aliviar problemas de la garganta y próstata, y prevenir la osteoporosis (Marín *et al.*, 2010; Ramadan, 2011).

Esta especie se propaga por vía sexual o asexual. La propagación sexual es la más común; sin embargo, las semillas presentan una germinación tardía y poco uniforme, debido al reducido tamaño de la semilla (2 mm) (Fischer, 2005). Por otra parte, Jaramillo y Montoya (1980) observaron que la latencia de las semillas de *P. peruviana* se relaciona directamente con el contenido de humedad de éstas al momento de almacenarlas. En cambio, Almanza (2000) menciona que el almacenamiento y secado de la semilla no influyó en la germinación; sin embargo, el estado de madurez del fruto cosechado afectó la madurez del embrión de la semilla (Criollo e Ibarra, 1992). Adicionalmente, Magnitskiy y Plaza (2007) indican que las semillas de la familia Solanaceae presentan latencia

fisiológica, morfofisiológica y física, por lo que se requiere aplicar tratamientos que promuevan el desarrollo del embrión y reduzcan las limitaciones germinativas, para lograr uniformidad y aumentar la germinación.

En literatura reciente, Caro-Melgarejo *et al.* (2012) aplicaron varias dosis (50, 100, 200 y 300 Gy) de rayos gamma en yemas vegetativas de *P. peruviana* L., y reportaron que con las dosis de 100 a 200 Gy se obtuvo mayor porcentaje de viabilidad, enraizamiento de microtallos, cantidad de hojas por explante, longitud de tallos, porcentaje de endurecimiento y de cromosomas rezagados en la célula. Las dosis mayores a 200 Gy aumentaron la frecuencia de alteraciones y disminuyeron la viabilidad, el enraizamiento, la cantidad de hojas por explante, la longitud de tallos y el endurecimiento de las plantas regeneradas.

El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la aplicación de rayos gamma ^{60}Co sobre características de germinación y vigor de plantas de *P. peruviana* L.

1.3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el experimento se utilizaron semillas almacenadas durante un año, provenientes de plantas de dos años de edad de la variedad comercial “Ecotipo Colombia”, proveniente de Colombia. Los tratamientos consistieron en aplicar dosis crecientes de rayos gamma de ^{60}Co : 0, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 y 350 Gy, sobre 5 g de semilla (aprox. 2550 semillas) que tenían 13 % de humedad. La irradiación de las semillas se efectuó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), ubicado en el Estado de México, en un irradiador LGI-01 Transelektro. Las semillas irradiadas (400 semillas por tratamiento) se sembraron en agosto de 2015 en el Colegio de Postgraduados, Estado de México, en un invernadero tipo túnel, con cubierta de polietileno UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral. Los 16 tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar, con cuatro repeticiones (100 semillas por repetición).

La siembra se realizó en charolas de unicel de 200 cavidades en las que se depositaron dos semillas por cavidad que contenía turba humedecida con agua con pH 7.5 y conductividad eléctrica de 0.65 dS m⁻¹. Las condiciones ambientales que prevalecieron durante los meses de agosto a octubre (mes en que concluyó el experimento) fueron: intensidad luminosa de 653.43 μmol m⁻² s⁻¹, temperatura máxima de 39 °C y mínima de 9 °C.

Para determinar el efecto de los tratamientos se registraron las siguientes variables: porcentaje de germinación, días al 50 % de emergencia, porcentaje de supervivencia de plantas a los 60 d después de la siembra (dds). A partir de esta variable se seleccionaron seis plantas al azar por unidad experimental, en las cuales se midió la altura (cm) del tallo (a partir del cuello de la raíz hasta el ápice del tallo), la longitud (cm) de la raíz (desde el cuello hasta el extremo de la raíz primaria), el grosor de tallo (mm) (a 1 cm de distancia entre la base de la raíz y la primera hoja de la plantas), la longitud (cm) del primer entrenudo, el número total de hojas presentes y el contenido de clorofila en las dos primeras hojas, mediante el medidor del grado de verdor SPAD 502 (Konica Minolta, Osaka, Japan).

Mediante el paquete estadístico SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2002) se realizó un análisis de varianza para cada variable y la comparación de medias de los tratamientos mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentaje de germinación, días al 50 % de emergencia y supervivencia de plantas

El análisis de varianza no detectó diferencias significativas en el porcentaje de germinación ($P \geq 0.05$); en contraste, el porcentaje de emergencia y de supervivencia de plantas fueron afectados significativamente por las dosis de irradiación.

No se encontraron diferencias significativas porque todas las semillas germinaron al 100 %, lo que concuerda con López-Mendoza *et al.* (2012), quienes tampoco encontraron diferencias significativas sobre la germinación total de semillas de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) irradiadas con rayos gamma (20 a 120 Gy). En otras especies la

radiación de 50 a 500 Gy aumentó el porcentaje de germinación, como en el caso de semillas de soya (*Glycine max* L. Merrill) y de cuatro variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), aunque dosis mayores de 500 Gy la disminuyeron (De la Fé *et al.*, 2000; Ramírez *et al.*, 2006).

En el presente estudio, la irradiación con rayos gamma ^{60}Co tuvo un efecto radioestimulador al acelerar la emergencia de las plántulas, pues cada una de las dosis alcanzaron 50 % de emergencia 8 d antes que el testigo (Figura 1.1).

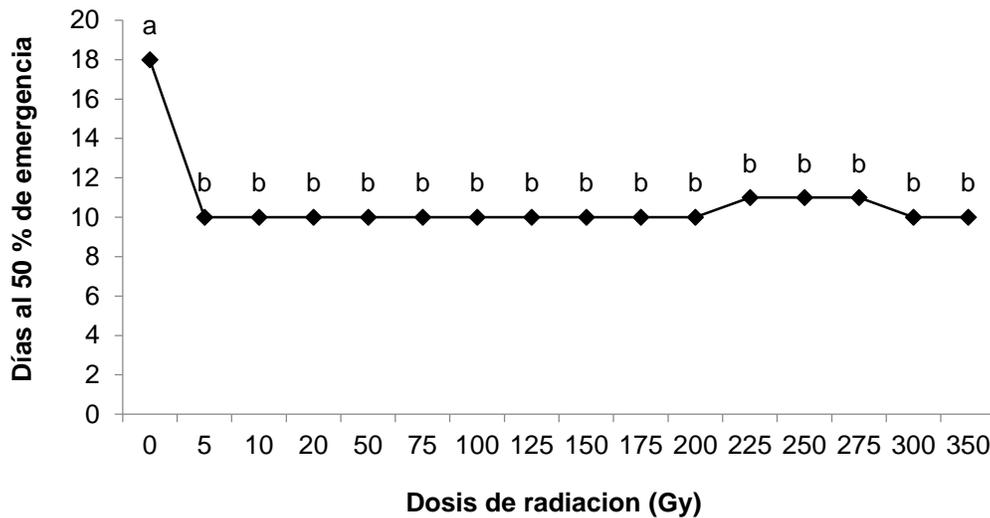


Figura 1.1. Efecto de dosis de rayos gamma ^{60}Co aplicados a semillas de *Physalis peruviana* L. sobre los días a 50 % de emergencia. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: 1.60; C.V.: 5.77 %.

Ramírez *et al.* (2006) señalan que la radiación acelera la germinación de las semillas de diversas especies cuando presentan latencia o están sometidas a condiciones de estrés que retrasan o inhiben su germinación. Al respecto, Akshatha y Chandrashekar (2014) mencionan que bajas dosis de radiación activan los procesos metabólicos que aceleran la germinación de las semillas; sin embargo, en el presente estudio, también las dosis altas aceleraron la germinación de semillas de uchuva. La aceleración de la germinación se debe a que la radiación eleva la actividad metabólica de las células, provoca la des-diferenciación de las células, afecta la síntesis de proteínas, el balance

hormonal, el intercambio gaseoso y la actividad enzimática (Akshatha y Chandrashekar, 2014).

Muckerheide (2004) y Mortazavi *et al.* (2002) mencionan que el efecto positivo de la irradiación se basa en cambios fisiológicos y no genéticos, pues la estimulación está relacionada con una serie de efectos en el interior de las membranas. Estos efectos provocan la activación de enzimas como las polifenoloxidasas, catalasas, peroxidasas y esterasas (Álvarez *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2005), las cuales conllevan a la síntesis de sustancias fisiológicamente activas, que a bajas concentraciones aceleran la división celular, conjuntamente con la morfogénesis en mitocondrias y cloroplastos. El efecto biológico de las radiaciones ionizantes depende del tipo de radiación, la dosis absorbida y el genotipo (De Micco *et al.*, 2011). Aun y cuando la teoría explica el efecto de la irradiación en la velocidad de emergencia, hay casos en que se tiene un efecto contrario.

El porcentaje de supervivencia fue mayor a 70 % con excepción de las dosis mayores de irradiación (300 y 350 Gy) (Figura 1.2).

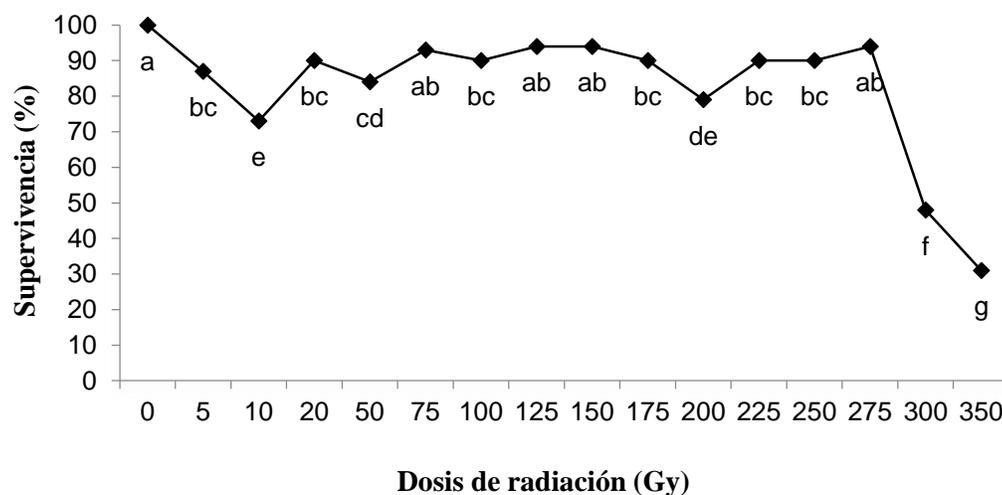


Figura 1.2. Efecto de dosis de rayos gamma ^{60}Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. sobre el porcentaje de supervivencia de plantas. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: 7.96; C.V.: 3.76 %.

Estos resultados concuerdan con lo encontrado por varios autores (Amjad y Akbar Anjum, 2003; Bhargava y Khalatkar, 2004), y con lo esperado, si se tiene en cuenta que la inhibición de la división celular es una de las reacciones inmediatas a altas dosis de irradiación. Si bien la inhibición de la mitosis por la radiación puede resultar pasajera, la lesión radiológica que la misma produce a nivel génico y cromosómico puede ser letal para las células en división, que en conjunto son sensibles a la radiación, especialmente en altas dosis (Viccini y Carvalho, 2001).

Una tendencia similar en este parámetro fue descrita por Ramírez *et al.* (2006), quienes observaron que dosis mayores a los 200 Gy disminuyeron el porcentaje de supervivencia de plántulas de *S. lycopersicum* L., y aunque se produjo emisión de la radícula y aparición de los cotiledones, el efecto de altas dosis de rayos X afectó el desarrollo de las plántulas, pues presentaron coloraciones violáceas a los pocos días de germinadas, con crecimiento lento, las cuales se tornaron débiles y finalmente murieron.

Por su parte, De la Fé *et al.* (2000) mencionaron que de 0 a 360 Gy no se afectó el porcentaje de supervivencia de plántulas de *G. max* L., pero en altos niveles de radiación esta característica disminuyó; la mayor supervivencia (90 %) se obtuvo con 400 Gy; en contraste, con 440 y 580 Gy la supervivencia fue menor a 10 %.

Altura y diámetro de tallo de la plantas

La aplicación de rayos gamma ^{60}Co influyó de manera significativa sobre la altura y diámetro de tallo de la planta ($P \leq 0.05$) (Figura 1.3). Las mayores alturas se presentaron con las dosis intermedias de 125 (13.57 cm), 150 (13.72 cm), 175 (13.35 cm) y 200 Gy (13.42 cm), superiores en 29 % con respecto al testigo, mientras que con dosis altas (300 y 350 Gy) la altura fue menor a 6.27 cm (Cuadro1.1).

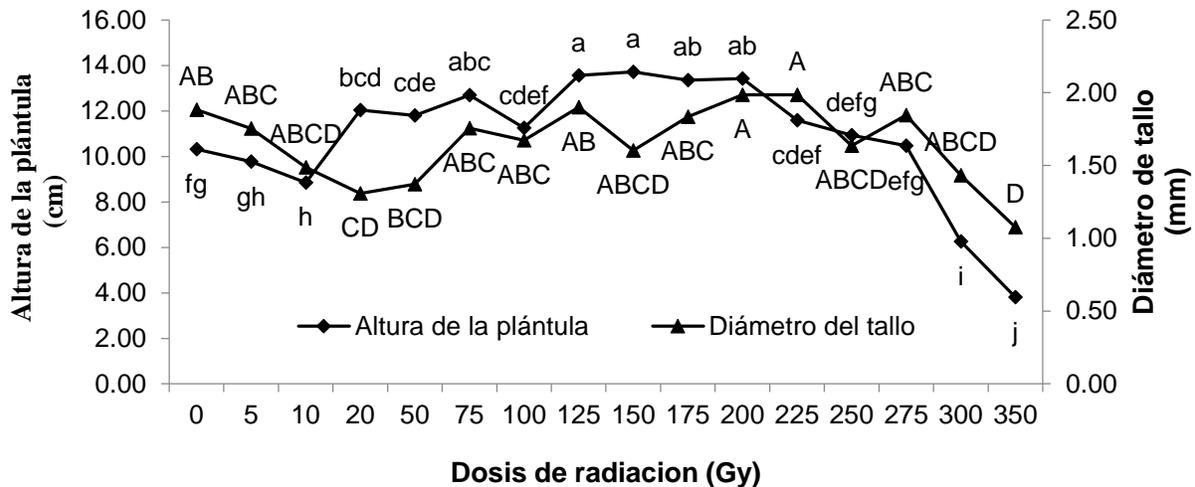


Figura 1.3. Efecto de dosis de rayos gamma ^{60}Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. en las variables altura y diámetro de tallo de la planta. Valores con letras iguales en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH (altura): 1.93; C.V. (altura): 6.95 %; DSH (diámetro): 0.47; C.V. (diámetro): 11.16 %.

En el caso del grosor de tallo, las plantas con 125, 200 y 225 Gy obtuvieron valores superiores a 1.90 mm (Cuadro 1.1), en comparación con los obtenidos en plantas testigo (1.88 mm); en cambio con 20, 50, 300 y 350 Gy el diámetro fue menor a 1.43 mm (Figura 1.3).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Canul-Ku *et al.* (2012) en semillas de nochebuena irradiadas con rayos gamma, donde encontraron que la altura de la planta y el diámetro de tallo fueron afectados de manera significativa. Las dosis de 50 y 150 Gy produjeron la mayor y menor altura, mientras que con 250 Gy se generó el mayor diámetro (24.6 cm), en comparación con los obtenidos en las plantas testigo (18.20 cm) y con la dosis de 125 Gy se obtuvo el menor grosor (11.55 cm).

Álvarez *et al.* (2012) encontraron que la altura de la planta de *S. lycopersicum* L. aumentó 15 % y el diámetro de tallo 23 % en relación al control, las dosis de 5 y 20 Gy presentaron los máximos valores para estos indicadores. Al respecto, De la Fé *et al.* (2000), al aplicar diferentes dosis de rayos gamma ^{60}Co sobre semillas de soya,

observaron un comportamiento variable en altura de la planta a los 10, 20 y 50 dds. En la evaluación realizada a los 10 dds, las dosis de 50 a 320 Gy produjeron un efecto estimulador sobre la altura de la planta, mientras que a los 20 y 50 dds, las dosis favorables fueron las de 100 y 200 Gy. En cambio, las plantas provenientes de semillas irradiadas con 480 Gy mostraron una reducción del 50 % de la altura.

Cuadro 1.1. Media de las dosis de radiación para la altura y diámetro de tallo de la plántula de *Physalis peruviana* L.

Dosis	Altura de la plántula (cm)	Diámetro del tallo (mm)
0	10.31 fg	1.88 ab
5	9.77 gh	1.76 abc
10	8.85 h	1.49 abcd
20	12.03 bcd	1.31 cd
50	11.80 cde	1.37 bcd
75	12.70 abc	1.76 abc
100	11.25 cdef	1.67 abc
125	13.57 a	1.90 ab
150	13.72 a	1.60 abcd
175	13.35 ab	1.84 abc
200	13.42 ab	1.99 a
225	11.58 cdef	1.99 a
250	10.93 defg	1.64 abcd
275	10.47 efg	1.85 abc
300	6.27 i	1.43 abcd
350	3.82 j	1.08 d
DMS	1.93	0.47
C.V. (%)	6.95	11.16

DMS = Diferencia mínima significativa. C.V. = Coeficiente de variación. Valores con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Este comportamiento en los indicadores de crecimiento (altura y diámetro de planta) puede ser atribuido a que las dosis inferiores de 225 Gy actúan como mecanismo disparador que intensifica la actividad de las enzimas hidrolíticas, y causa un incremento en la velocidad de conversión de los sustratos respiratorios en pequeñas moléculas, a partir de las cuales se forman los nuevos constituyentes celulares que dan origen a la plántula (Álvarez *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2005).

Existen evidencias que indican que las aplicaciones de dosis bajas de radiación favorecen a diversas especies donde los radicales libres, iones y moléculas excitadas que se forman por su efecto contribuyen a una mayor eficiencia en la utilización de las vías bioquímico-metabólicas, las cuales se reflejan sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas (Álvarez *et al.*, 2012). Por otro lado, los efectos negativos de dosis altas de radiación se deben a daños en el proceso de división y elongación celular (Akgün y Tosun, 2004).

Número de hojas por planta y lecturas SPAD

El número de hojas por planta varió entre 4 y 5, sin diferencias significativas entre dosis. En contraste, las lecturas SPAD (verdor de la hoja) sí fueron afectadas de manera significativa (Figura 1.4) ($P \leq 0.05$) pues en las hojas de plantas testigo se registraron las mayores lecturas SPAD con 39.48, mientras que en todos los tratamientos de irradiación el valor fue menor a 31.00 y con las dosis entre 5 a 125 Gy se obtuvieron lecturas inferiores a 25.25.

La ausencia de diferencias significativas entre dosis de irradiación para el número de hojas de las plantas no tiene semejanza con estudio alguno. Por ejemplo, De la Fé *et al.* (2000) observaron un rango de radioestimulación a los 10 y 20 dds en la altura y la emisión de hojas de soya con dosis de 50 a 280 Gy, con dosis mayores a 280 Gy el número de hojas por planta disminuyó. Las semillas de *Abies religiosa* (Kunth) Schltd. et Cham. son muy sensibles a la irradiación pues con dosis de 2 a 10 Gy el número de hojas por planta fue menor a 6.8, valores inferiores al control que presentó 27.7 hojas por planta (Iglesias-Andreu *et al.*, 2010). La interacción entre dosis de irradiación y genotipos fue

evidenciada por Lemus *et al.* (2002) en frijol chino (*Vigna unguiculata* (L) Walp) ya que el cv. A-4 mostró el menor número de hojas por planta al aplicársele dosis de 43 a 75 Gy, mientras que en el cv. Tc 9-6 el número de hojas no fue afectado por la irradiación.

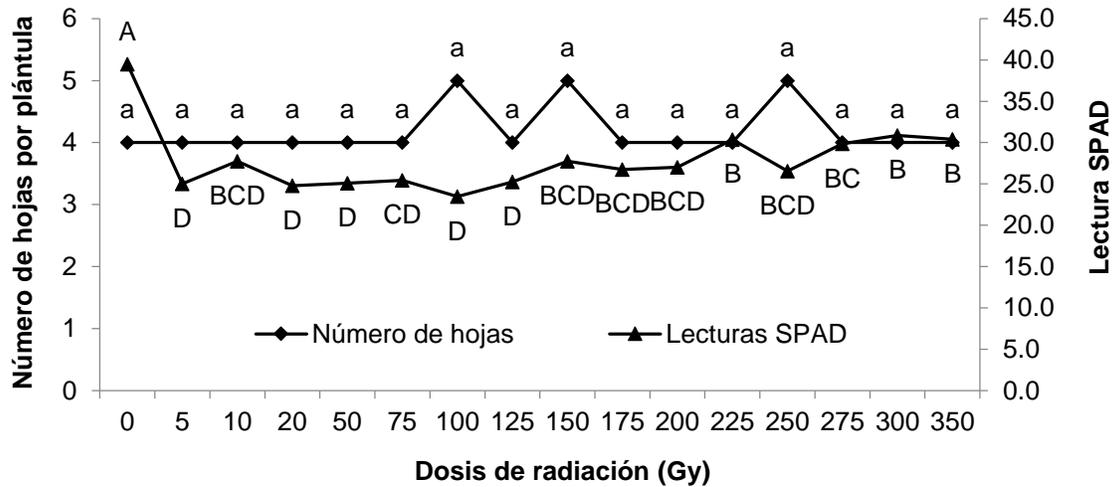


Figura 1.4. Efecto de dosis de rayos gamma ^{60}Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. sobre el número de hojas y lecturas SPAD por planta. Valores con letras iguales en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH (hoja): 1.01; C.V. (hoja): 9.10 %; DSH (SPAD): 5.98; C.V. (SPAD): 8.42 %.

En cuanto al efecto de las dosis de irradiación en el valor de las lecturas SPAD en las hojas, De la Fé *et al.* (2000) observaron que a los 20 a 30 d después de la emergencia (dde) las plantas de soya presentaron hojas con aspecto moteado (amarillo-verde) con dosis superiores a los 360 Gy, y hojas de color normal con dosis inferiores a los 360 Gy. En este sentido, Micke *et al.* (1987) concluyeron que dosis altas provocan mayores daños, como mutaciones clorofílicas y malformaciones en hojas.

Longitud del primer entrenudo y longitud de la raíz de la planta

Ambas variables fueron afectadas significativamente por la aplicación de rayos gamma ^{60}Co ($P \leq 0.05$) (Figura 1.5). La longitud de entrenudo del testigo fue 2.27 cm, en contraste con las dimensiones de las plantas provenientes de semillas tratadas con 175 (3.60 cm) y 200 Gy (3.70 cm) en las que hubo un estímulo en el crecimiento del entrenudo, mientras

que con 300 y 350 Gy el efecto fue negativo pues los entrenudos fueron cortos (2.02 y 1.63 cm, respectivamente).

La longitud de la raíz fue una variable altamente sensible a la irradiación pues en todas las dosis la longitud de este órgano varió entre 3.84 y 6.00 cm, mientras que las plantas testigo presentaron las raíces más largas (11.84 cm).

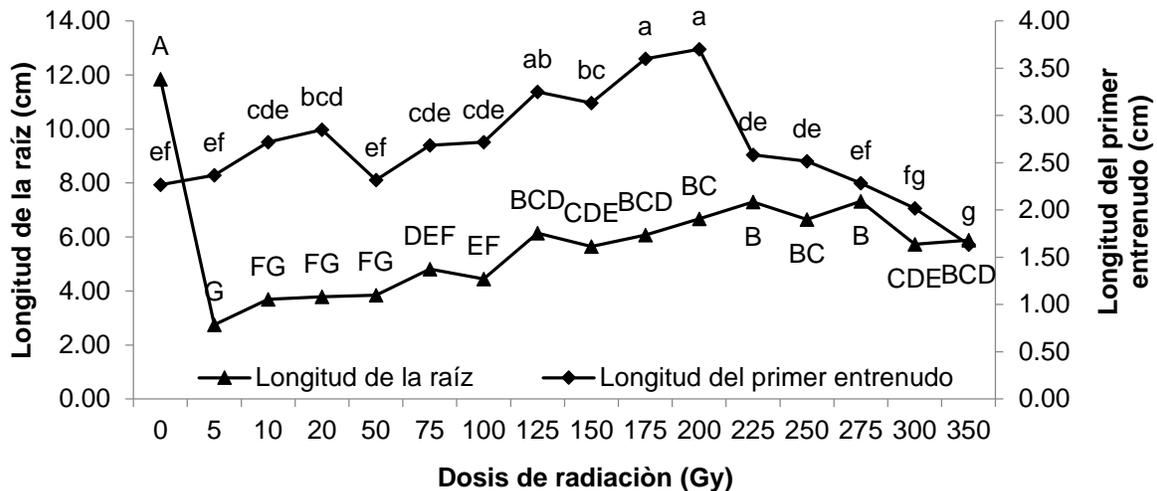


Figura 1.5. Efecto de dosis de rayos gamma ^{60}Co aplicados a las semillas de *Physalis peruviana* L. sobre la longitud del primer entrenudo y la raíz de la plantas. Valores con letras iguales en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH (entrenudo): 0.54; C.V. (entrenudo): 7.91 %; DSH (raíz): 1.60; C.V. (raíz): 10.85 %.

Cepero *et al.* (2001) también encontraron que la longitud de la raíz de plantas de *Leucaena leucocephala* cultivar Cunningham provenientes de semillas irradiadas fue sensible a la radiación. Las dosis de 20, 80 y 100 Gy inhibieron el crecimiento de la raíz desde 5 hasta 10 % respecto al control, mientras que 150 y 180 Gy indujeron un efecto de estimulación (5 a 10 %). En cambio, dosis superiores a los 200 Gy inhibieron el crecimiento de la raíz, resultados que apoyan la conclusión que la longitud de la raíz puede considerarse como un indicador de radiosensibilidad.

Similarmente Ramírez *et al.* (2006), al aplicar dosis crecientes de rayos gamma sobre cuatro variedades de *S. lycopersicum* L., observaron que las dosis de 5 y 20 Gy incrementaron la longitud de la raíz, y que dosis superiores a los 100 Gy disminuyeron el

crecimiento. Por lo tanto, en esta investigación la radiosensibilidad de la raíz se expresó con todas las dosis (5 a 350 Gy), pero la dosis de 5 Gy provocó la mayor severidad, disminuyó 83 % la longitud de la raíz.

1.5. CONCLUSIONES

La emergencia al 50 % se aceleró con todas las dosis aplicadas de radiación gamma. El porcentaje de supervivencia, la altura y diámetro de la planta, lecturas SPAD y la longitud de la raíz disminuyeron con el incremento de las dosis de radiación; en contraste, la longitud de entrenudos aumentó con dosis intermedias (125, 175 y 200 Gy). Las dosis de rayos gamma ^{60}Co no afectaron el porcentaje de germinación de la semilla; tampoco se afectó el número de hojas por planta de *Physalis peruviana* L.

1.6. LITERATURA CITADA

Ahloowalia B. S. and M. Maluszynski (2001) Induced mutations: a new paradigm in plant breeding. *Euphytica* 118:167-173.

Akgün I. and M. Tosun (2004) Agricultural and cytological characteristics of M_1 perennial rye (*Secale montanum* Guss.) as effected by the application of different doses of gamma rays. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 7:827-833.

Akshatha and K. R. Chandrashekar (2014) Gamma sensitivity of forest plants of Western Ghats. *Journal of Environmental Radioactivity* 132:100-107.

Almanza M. P. J. (2000) Propagación. In: Producción, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.). V. J. Flórez, G. Fischer y A. D. Sora R. (eds.). Unibiblos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 27-40.

Álvarez A., L. Chávez S., R. Ramírez F., R. Pompa B. y W. Estrada P. (2012) Indicadores fisiológicos en plántulas de *Solanum lycopersicum* L., procedentes de semillas irradiadas con rayos X. *Biotecnología Vegetal* 12:173-177.

Álvarez A., R. Ramírez, L. Chávez, Y. Camejo, L. Licea, E. Porras y B. García (2011) Efecto 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* 107:290-299.

Amjad M. and M. Akbar Anjum (2003) Effect of post-irradiation storage on the radiation-induced damage in onion seeds. *Asian Journal of Plant Sciences* 2:702-707.

Bhargava Y. R. and A. S. Khalatkar (2004) Improve performance of *Tectona grandis* seeds with gamma irradiation. *Acta Horticulturae* 215:51-54.

Canul-Ku J., F. García-Pérez, E. Campos-Bravo, E. J. Barrios-Gómez, E. De la Cruz-Torres, J. M. García-Andrade, F. J. Osuna-Canizalez 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.

Caro-Melgarejo D. P., S. Y. Estupiñán-Rincón, L. Y. Rache-Cardenal y J. C. Pacheco-Maldonado (2012) Efecto de rayos gamma sobre yemas vegetativas de *Physalis peruviana* L. *Acta Agronómica* 61:305-314.

Cepero L., A. R. Mesa, G. Lajonchere y M. Prieto (2001) Estimulación del crecimiento de *Leucaena leucocephala* cv. Cunningham con rayos gamma ^{60}Co . *Pastos y Forrajes* 24:235-240.

Chen Y. P., Y. J. Liu, X. L. Wang, Z. Y. Ren and M. Yue (2005) Effect of microwave and He-Ne laser on enzyme activity and biophoton emission of *Isatis indigotica* Fort. *Journal Integrative Plant Biology* 47:849-855.

Chopra V. L. (2005) Mutagenesis: investigating the process and processing the outcome for crop improvement. *Current Science* 89:353- 359.

Criollo H. y V. Ibarra (1992) Germinación de la uvilla (*Physalis peruviana* L.) bajo diferentes grados de madurez y tiempo de almacenamiento. *Acta Horticulturae* 310:183-187.

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

De la Fé C., M. Romero, R. Ortiz y M. Ponce (2000) Radiosensibilidad de semillas de soya (*Glycine max* L.) a los rayos gamma ^{60}Co . *Cultivos Tropicales* 21:43-47.

- De Micco V., C. Arena, D. Pignalosa and M. Durante (2011)** Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants. *Radiation and Environmental Biophysics* 50:1-19.
- Fischer G. (2000)** Crecimiento y desarrollo. *In: Producción, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (Physalis peruviana L.)*. V. J. Flórez, G. Fischer y A. D. Sora (eds). Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp:9-26.
- Fischer G. (2005)** El problema del rajado del fruto de la uchuva y su posible control. *In: Avances en Cultivo, Postcosecha y Exportación de la Uchuva (Physalis peruviana L.) en Colombia*. G. Fischer, D. Miranda, W. Piedrahita y J. Romero (eds.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp:55-82.
- Fischer G., P. S. Almanza M. y D. Miranda (2014)** Importancia y cultivo de uchuva (*Physalis peruviana L.*). *Revista Brasileira de Fruticultura* 36:1-15.
- Fuentes J. L., L. Santiago, Y. Valdés, M. Guerra, I. M. Ramírez, E. F. Prieto, N. N. Rodríguez and B. Velázquez (2004)** Mutation induction in zygotic embryos of avocado (*Persea americana* Mill). *Biotechnología Aplicada* 21:82-84.
- Iglesias-Andreu L. G., L. R. Sánchez-Velásquez, Y. Tivo-Fernández, M. Luna-Rodríguez, N. Flores-Estévez, J. C. Noa-Carrazana, C. Ruiz-Bello y J. L. Moreno-Martínez (2010)** Efecto de radiaciones gamma en *Abies religiosa* (Kunth) Schlttd. et. Cham. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16:5-12.
- Jain S. M. (2006)** Mutation-assisted breeding for improving ornamental plants. *Acta Horticulturae* 714:85-98.
- Jaramillo V. y L. Montoya (1980)** Estudios preliminares sobre germinación y almacenamiento de semillas de uchuva. *Tropical Agriculture* 32:45-49.
- Lemus Y., J. R. Méndez-Natera, J. R. Cedeño y V. Otahola-Gómez (2002)** Radiosensibilidad de dos genotipos de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) a radiaciones gamma. *Revista Científica UDO Agrícola* 2:22-28.
- López-Mendoza H., J. C. Carrillo-Rodríguez and J. L. Chávez-Servia (2012)** Effects of gamma-irradiated seeds on germination and growth in *Capsicum annum* L. plants grown in a greenhouse. *Acta Horticulturae* 947:77-81.

- Magnitskiy S. y G. A. Plaza (2007)** Fisiología de semillas recalcitrantes de árboles tropicales. *Agronomía Colombiana* 25:96-103.
- Maluszynski M., I. Szarejko, C. R. Bhatia, K. Nichterlein and P. Lagoda (2009)** Methodologies for generating variability. Part 4: Mutation techniques. *In: Plant Breeding and Farmer Participation*. S. Ceccarelli, E. P. Guimarães and E. Weltzien (eds.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp:159-194.
- Marín A. Z. T., M. Cortés R. y O. I. Montoya C. (2010)** Uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia, mínimamente procesada inoculada con la cepa nativa *Lactobacillus plantarum* LPBM10 mediante la técnica de impregnación a vacío. *Revista Chilena de Nutrición* 37:461-472.
- Matsumura A., T. Nomizu, N. Furutani, K. Hayashi, Y. Minamiyama and Y. Hase (2010)** Ray florets color and shape mutants induced by $^{12}\text{C}^{5+}$ ion beam irradiation in chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* 123:558-561.
- Micke A. B., B. Donini and M. Maluszinsky (1987)** Induced mutations for crop improvement. *Tropical Agriculture* 64:259-278.
- Mortazavi S. M. J., M. Ghiassi- Nejad and T. Ikushima (2002)** Do the findings on the health effects of prolonged exposure to very high levels of natural radiation contradict current ultra conservative radiation protection regulations? *International Congress Series* 1236:19-21.
- Muckerheide J. (2004)** There has never been a time that the beneficial effects of low dose ionizing radiation were not known. Center for Nuclear Technology and Society at WPI. Radiation, Science, and Health. Worcester, MA. USA, 4 p.
- Ramadan M. F. (2011)** Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): an overview. *Food Research International* 44:1830-1836.
- 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.

- Rangaiah S. (2006)** Induced genetic variation for days to flowering and maturity following hybridization and mutagenesis in chilli (*Capsicum annum* L.). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* 19:382-384.
- Salazar M. R., J. W. Jones, B. Chaves, A. Cooman and G. Fischer (2008)** Base temperature and simulation model for nodes appearance in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura* 30:862-867.
- SAS Institute (2002)** SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1-7. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Viccini L. F. and C. R. Carvalho (2001)** Analysis of gamma radiation-induced chromosome variations in maize (*Zea mays* L.). *Caryologia* 54:319-327.
- Wu D. L., S. W. Hou, P. P. Qian, L. D. Sun, Y. C. Zhang and W. J. Li (2009)** Flower color chimera and abnormal leaf mutants induced by $^{12}\text{C}^{6\pm}$ heavy ions in *Salvia splendens* Ker-Gawl. *Scientia Horticulturae* 121:462-467.
- Yamaguchi H., A. Shimizu, K. Degi and T. Morishita (2008)** Effects of dose and dose rate of gamma ray irradiation on mutation induction and nuclear DNA content in chrysanthemum. *Breeding Science* 58:331-335.

CAPÍTULO II. DINÁMICA DEL CRECIMIENTO DE CARACTERES MORFOLÓGICOS Y REPRODUCTIVOS DE PLANTAS M₁ DE *Physalis peruviana* L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON RAYOS GAMMA ⁶⁰Co

Escrito con base en las normas de la Revista Fitotecnia Mexicana. Una versión de este capítulo está en proceso editorial en Chilean Journal of Agricultural Research

2.1. RESUMEN

Las mutaciones son cambios aleatorios en el DNA que pueden inducirse mediante mutágenos físicos como los rayos gamma. En el presente estudio se evaluó el efecto de 14 dosis de rayos gamma ⁶⁰Co: 0, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, y 275 Gy aplicados a la semilla de uchuva (*Physalis peruviana* L.), en las variables: días a primera flor y en la cinética (de 4 a 7 muestreos) del porte de planta, diámetro del tallo, número de tallos basales y número de estructuras reproductivas (botones florales, flores y frutos verdes) de plantas M₁. El estudio se realizó de octubre de 2015 a febrero 2016, en invernadero. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar con seis repeticiones con una planta por repetición. Hubo efectos significativos de dosis, muestreos y la interacción dosis x muestreos. Todas las variables se incrementaron linealmente con la edad de la planta (R² entre 0.92 y 0.98). En cambio, el efecto de las dosis de radiación en ninguna variable fue lineal. Las dosis de radiación disminuyeron en 79 % el porte; las dosis de 125, 175 y 200 Gy presentaron plantas M₁ con mayor diámetro de tallo, mayor número de tallos basales, botones, flores y de frutos verdes que el testigo. Las plantas M₁ provenientes de semillas irradiadas con 200 Gy fueron más precoces que el testigo. La radiación en dosis intermedias (125, 150, 175 y 200 Gy) tuvo un efecto estimulador, al incrementar el crecimiento vegetativo y la fructificación de las plantas M₁ de uchuva.

Palabras clave: Uchuva; mutagénesis, radiación, rayos gamma; variabilidad; vigor.

2.2. INTRODUCCIÓN

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) también conocida como baya dorada, es una especie perenne que crece en forma silvestre en las tierras altas tropicales (1500 a 3000

m, altitud) de Chile y Colombia (Rodrigues *et al.*, 2009, Fischer *et al.*, 2011). Las frutas maduras son pequeñas (2.5 cm de diámetro), se asemejan a los mini tomates (*Solanum lycopersicum* L.), con colores que varían del amarillo al naranja y un sabor agridulce. Las frutas se consumen frescas y tienen un alto contenido de fibra, provitaminas A y C, hierro, fósforo y antioxidantes (Fischer, 2000). Esta especie puede reproducirse sexualmente, aunque también se pueden utilizar técnicas de propagación vegetativa (esqueje). El método sexual es más común, pero produce características agronómicas y calidad de fruta muy variable (Almanza, 2000), al igual que en vigor de la planta y rendimiento de la fruta (Sandhu *et al.*, 1989). Esta variación fenotípica se atribuye a que el 54 % de las flores son de polinización abierta, lo que favorece la alogamia (Santana y Angarita, 1997). El resto de las flores se autopolinizan, como una especie autógama (Lagos *et al.*, 2008). Este comportamiento dificulta obtener variedades de uchuva comerciales uniformes mediante métodos de reproducción convencionales.

Las mutaciones naturales son cambios aleatorios en el ADN que ocurren en baja frecuencia y espontáneamente. Las mutaciones artificiales son inducidas por mutágenos químicos y físicos. El primer grupo incluye metanosulfonato de etilo, sulfato de dimetilo y sulfato de dietilo (Maluszynski *et al.*, 2009). El segundo grupo se refiere a la aplicación de rayos X, irradiación gamma (Mohan Jain, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2008), rayos ultravioleta (Ahloowalia y Maluszynski, 2001) e irradiación con haz de iones de carbono (Wu *et al.*, 2009, Matsumura *et al.*, 2010). Estos agentes mutagénicos producen alteraciones estructurales, fenotípicas y de desarrollo en células, tejidos y órganos (Cervantes *et al.*, 1996). Las alteraciones drásticas suelen ser letales, mientras que los cambios leves pueden ser favorables para algunos rasgos relacionados con el crecimiento, desarrollo y reproducción de la planta. La inducción de mutaciones se utiliza en el fitomejoramiento para aumentar la variabilidad genética, lo que permite la aplicación posterior de métodos de selección de individuos con características sobresalientes (Fuchs *et al.*, 2002, Honda *et al.*, 2006).

La irradiación con rayos gamma influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, al causar inestabilidad genómica de las células y tejidos, lo que produce cambios citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos a través de la producción de radicales

libres en las células (Kim *et al.*, 2004; Wi *et al.*, 2005). El uso de altas dosis de radiación inhibe el crecimiento de las plantas (Kumari y Singh, 1996); las dosis bajas e intermedias pueden tener un efecto positivo, al aumentar la proliferación celular, mejorar la germinación de las semillas, el crecimiento celular, la actividad enzimática, la resistencia al estrés y rendimiento (Chakravarty y Sen, 2001; Baek *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005). Cuando la radiación induce mutaciones en una célula, existe el riesgo de que una mutación favorable esté acompañada por cambios genéticos indeseables (Otaola-Gómez *et al.*, 2001).

Los resultados de la respuesta de *P. peruviana* a la irradiación gamma son escasos. Caro-Melgarejo *et al.* (2012) analizaron los efectos de las dosis de irradiación de 50 a 300 Gy aplicadas a los brotes vegetativos de esta especie en los rasgos morfológicos y citogenéticos de las plantas regeneradas; observaron que las dosis entre 100 y 200 Gy producían la mayor variabilidad fenotípica, mientras que las dosis superiores a 200 Gy tenían efectos negativos. También hay estudios relacionados con la caracterización cariotípica y la inducción de la variación en el número de cromosomas en cruces naturales entre *P. peruviana* (silvestre y cultivada) y *P. philadelphica* (Rodríguez y Bueno, 2006). En *P. peruviana* y *P. angulata* (L.) se evaluó la influencia de los rayos gamma a 200, 400 y 500 Gy aplicados a las semillas, observándose que la dosis de 200 Gy aumentó el crecimiento de las plantas M₁; mientras que, las dosis superiores a 200 Gy lo inhibió (Raghava y Raghava, 1989). No existen referencias en las que los rasgos de la planta se midieran a lo largo del ciclo biológico de la planta para monitorear el efecto de la aplicación de mutágenos artificiales.

Hay un interés creciente en el desarrollo de cultivares de uchuva adaptados al cultivo en invernadero, como lo hacen otras especies de Solanaceae; por lo tanto, la madurez temprana, el alto rendimiento y la uniformidad de la planta deben ser algunos de los rasgos agronómicos de interés involucrados en un programa de reproducción en esta especie.

El objetivo de la presente investigación fue determinar la dinámica de los rasgos morfológicos y reproductivos de las plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. provenientes de

semillas irradiadas con rayos gamma para identificar las mejores dosis de radiación para cada rasgo y la relación entre las dosis de irradiación y los muestreos de crecimiento de la planta.

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron plantas M_1 de uchuva "Ecotipo Colombia" provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma de ^{60}Co . La irradiación de las semillas se llevó a cabo con un irradiador Transelektro (Modelo LGI-01, Hungría) en el Instituto Mexicano de Investigación Nuclear, ubicado en Ocoyoacac, México. Los tratamientos de irradiación fueron 14 dosis de rayos gamma ^{60}Co (0, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 y 275 Gy). Estos tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar, con seis repeticiones; la unidad experimental fue una planta M_1 . El experimento se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral, ubicado en Montecillo, Estado de México. En agosto de 2015, se sembraron 100 semillas de cada dosis en charolas de poliestireno con turba como sustrato y se regaron con agua potable (pH 7.6). En octubre de 2015, se seleccionaron las seis mejores plántulas de cada dosis. Cada plántula se trasplantó en una bolsa de polietileno negro de 9 L de capacidad con tezontle (roca volcánica) como sustrato; otras características del sustrato fueron: granulometría, 1 a 10 mm; densidad aparente media, 0.82 g cm^{-3} ; porosidad total, 50 %; porosidad de aireación, 45 %; agua fácilmente disponible, 5.4 %; sin capacidad de intercambio catiónico; conductividad eléctrica, cercana a cero (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2011).

Las plantas M_1 se mantuvieron en posición vertical mediante tutoría, con rafia colocada a lo largo de las filas unidas a postes de madera en los extremos de las filas. Se utilizó la solución de Steiner al 50 % de su fuerza iónica original; el pH de la solución se ajustó a 6.0 (Gastelum-Osorio *et al.*, 2013). Las condiciones ambientales mensuales promedio que prevalecieron desde octubre de 2015 hasta febrero de 2016 fueron: intensidad de luz, $652.21 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; temperatura máxima, 37°C ; y temperatura mínima, 8°C .

A los 25 d después del trasplante (ddt) en cada planta M₁ se registró la altura de la planta (AP, cm; desde el sustrato hasta la rama más larga) y el diámetro del tallo (DT, mm; a 2 cm desde la base del tallo); los registros iniciales correspondientes para el número de tallos basales (NTB) fueron a los 31 ddt, 55 ddt para botones florales (NBF) y 70 ddt para flores (NF) y frutos verdes (NFV). Después de estas fechas todos los caracteres se registraron cada 15 d. Además, se registraron los días a la primera flor.

Se aplicó un análisis de varianza combinado para cada variable (excepto por días a la primera flor). Las fuentes de variación fueron: dosis de irradiación, muestreos y interacción de dosis de irradiación x muestreos de crecimiento. La prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) se utilizó para comparaciones de medias. Los análisis se llevaron a cabo con el programa estadístico SAS, versión 9.1 (SAS Institute, 2002). Además, para cada variable de crecimiento se aplicó regresión lineal a los datos de los muestreos; mientras que; la regresión polinomial se aplicó a los datos de dosis de irradiación.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado detectó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para dosis, muestreos y la interacción dosis x muestreos, en todos los caracteres (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Significancia estadística de las fuentes de variación para los caracteres morfológicos de plantas M₁ de *Physalis peruviana* L.

F. V.	Caracteres morfológicos					
	AP	DT	NTB	NBF	NF	NFV
Dosis (D)	*	*	*	*	*	*
Muestreo (M)	*	*	*	*	*	*
D x M	*	*	*	*	*	*
C.V. (%)	17	16	20	35	39	52

F. V.= Fuente de variación; C.V.= Coeficiente de variación; AP=Altura de la planta; DT= Diámetro de tallo; NTB= Número de tallos basales; NBF= Número de botones florales; NF= Número de flores; NFV= Número de frutos verdes. *= Significativo ($P \leq 0.05$).

Dosis de radiación

La aplicación de los rayos gamma ^{60}Co a las semillas induce cambios aleatorios en el ADN. Como la mayoría de estos cambios son recesivos (Prina *et al.*, 2011), la expresión de mutaciones inducidas se detectan en la segunda generación (M_2), cuando las mutaciones recesivas están en condiciones homocigotas. Sin embargo, los cambios fenotípicos se pueden detectar en individuos M_1 como resultado de los efectos fisiológicos de la radiación (Kodym *et al.*, 2011), aunque en una frecuencia baja. Para observar estos cambios específicos con fines de mejora genética, es conveniente evaluar a cada individuo M_1 de la población irradiada (Maluszynski *et al.*, 2009). En nuestro estudio, la información corresponde a las respuestas promedio de 4 a 7 muestreos de crecimiento (según la variable de crecimiento) para cada dosis de irradiación. Esto significa que los datos de 24 a 42 plantas M_1 individuales participaron en cada promedio de muestreo de crecimiento.

En la Figura 2.1 se observa que el efecto de las dosis de irradiación no siguió un modelo de respuesta lineal para ninguno de los rasgos de crecimiento en la uchuva (R^2 de 0.50* a 0.80*). Las plantas M_1 provenientes de semillas expuestas a dosis bajas o altas de radiación generalmente mostraron valores más bajos que las plantas de semillas irradiadas con dosis intermedias. Las dosis más favorables fueron 125, 150, 175 y 200 Gy, ya que produjeron plantas M_1 de menor altura de planta, con mayor número de tallos basales, brotes florales, flores y frutos verdes que las plantas de semillas no irradiadas (Figura 2.1). Estos resultados son alentadores, ya que uno de los propósitos de nuestro programa de reproducción de uchuva es seleccionar los genotipos de floración temprana y de alto rendimiento. En este estudio, las plantas M_1 fueron más precoces pues florecieron a los 53 ddt (dosis de 200 Gy) casi una semana antes que el testigo (Cuadro 2.2). En términos de componentes de rendimiento, las plantas M_1 provenientes de semillas irradiadas a dosis intermedias originaron el doble de brotes florales, flores y frutos verdes que las de las semillas no irradiadas (Figura 2.1).

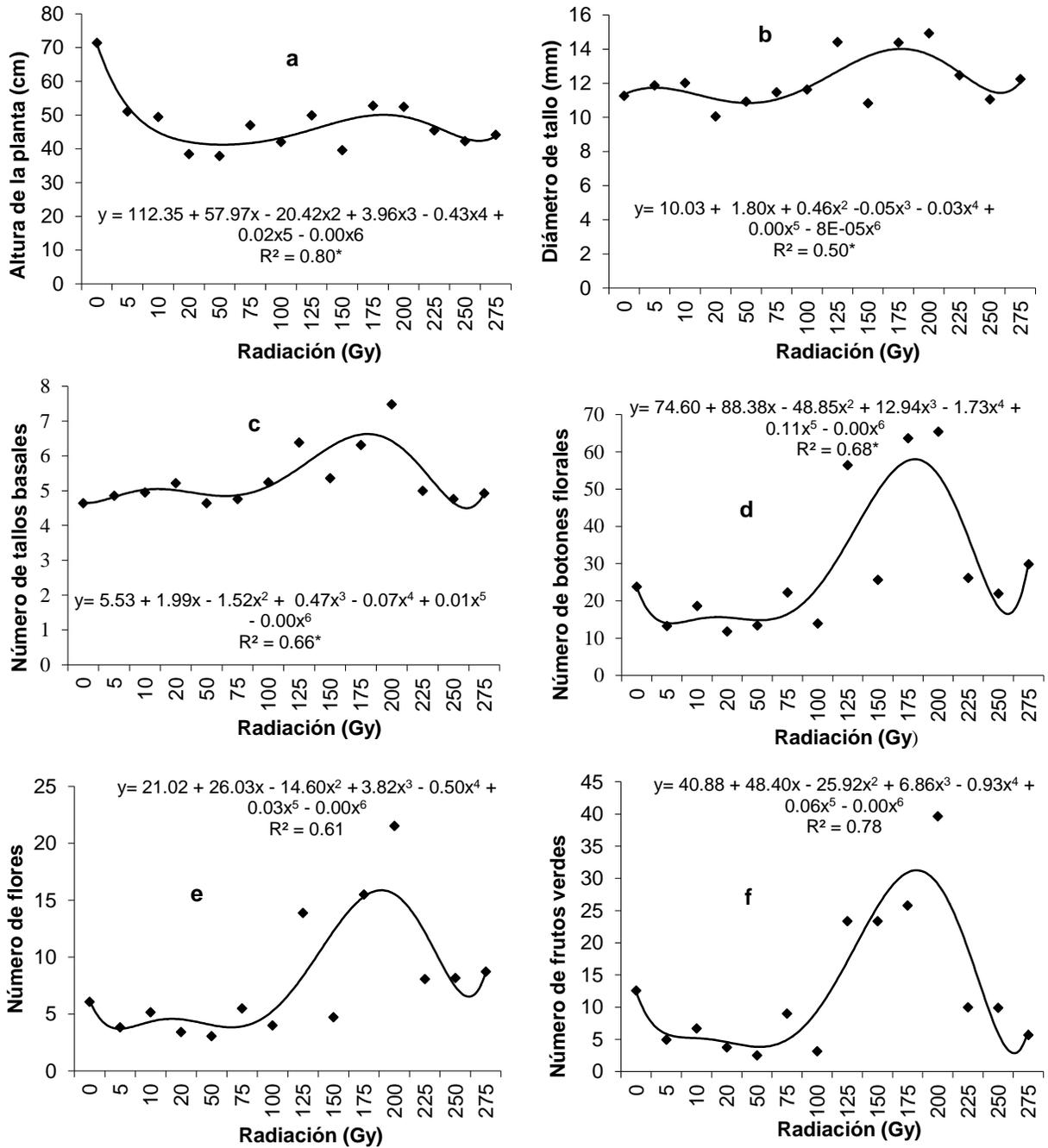


Figura 2.1. Respuesta a las dosis de radiación de a) altura de planta (n = 7), b) diámetro de tallo (n = 7), c) número de tallos basales (n = 7), d) número de botones florales (n = 5), e) número de flores (n = 5) y f) número de frutos verdes (n = 4) de plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. Cada punto representa el promedio de n muestreos.

Cuadro 2.2. Días transcurridos a la primera flor en plantas M₁ de *Physalis peruviana* L provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma ⁶⁰Co.

Dosis de radiación (Gy)													
0	5	10	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
Días a emisión de la primera flor, a partir del trasplante													
64	74	71	82	86	70	80	64	77	64	53	71	68	69
de	ad	bd	ab	a	bd	ac	de	ad	de	e	bd	cd	bd

Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Cuando se aplica un amplio rango de dosis de irradiación, la respuesta de las plantas a las dosis de irradiación no siempre es lineal (Yamaguchi *et al.*, 2008); Además, los organismos diploides son más susceptibles que los organismos poliploides (Chopra, 2005). Raghava y Raghava (1989) y Caro-Melgarejo *et al.* (2012) también observaron que las dosis intermedias (100 a 200 Gy) favorecieron el crecimiento de las plantas M₁ de uchuva; mientras que, las dosis superiores a 200 Gy afectaron negativamente el crecimiento de las plantas. En otras especies de Solanaceae, Aladjadjyan (2007) menciona que las plantas M₁ de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) provenientes de semillas irradiadas con rayos X (10 Gy) aumentaron en 25 % el grosor del tallo y demostró que la radioestimulación depende de la longitud de onda, fuente de irradiación y tiempo de exposición. Al respecto, López-Mendoza *et al.* (2012) indican que al irradiar semillas de *C. annuum* L. con dosis de 0 a 120 Gy, la floración y fructificación de las plantas M₁ ocurrieron en un periodo similar al testigo. También, mencionan que con la dosis de 60 Gy las plantas mostraron más frutos que el testigo. Por otro lado, las dosis entre 5 y 20 Gy aumentaron en 66 y 72 % el número de frutos por planta de *C. annuum* L., pero las dosis superiores a 130 Gy lo disminuyeron (Álvarez *et al.*, 2013).

Con respecto al uso de tratamientos mutagénicos en cultivos ornamentales, Canul-Ku *et al.* (2012) observaron una respuesta no lineal en las características de plantas y semillas de Noche Buena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch) provenientes de semillas irradiadas con dosis de 0 a 275 Gy. Por ejemplo, las dosis de 50, 175 y 250 Gy incrementaron la emergencia de plántulas de 5 a 20 %; mientras que

en la etapa fenológica del tercer ciatio abierto, la dosis de 50 Gy produjo las plantas más altas. El diámetro más grande de ciatio y la longitud del pedúnculo de inflorescencia se observaron en plantas de semillas irradiadas a una dosis de 250 Gy; el mayor tamaño de semilla ocurrió con dosis de 100, 250 y 275 Gy, y el mayor peso de semilla se obtuvo con la dosis de 225 Gy. El efecto positivo de algunas dosis de irradiación en estas especies puede deberse a los cambios electroquímicos y bioquímicos causados a la semilla (Muszyński y Gladyszewska, 2008) que posteriormente aumentan la respiración de las plantas por el desarrollo de radicales libres, iones y moléculas excitadas que aumentan la eficiencia de las vías bioquímicas-metabólicas, favoreciendo así el crecimiento y desarrollo de las plantas (Álvarez *et al.*, 2012).

Muestreos

La expresión de todos los caracteres relacionados con la cinética del crecimiento de estructuras vegetativas (altura de la planta, diámetro de tallo y número de tallos basales) y reproductivas (botones florales, flores y frutos verdes) de *P. peruviana* se incrementó según el modelo lineal (R^2 entre 0.92 y 0.98) a medida que la edad de la planta aumentó (Figura 2.2). Esto significa que en promedio de las 14 dosis de radiación, la tasa de crecimiento de estas variables fue constante a lo largo de los muestreos y su mayor expresión ocurrió en el último muestreo, lo que se atribuye al hábito indeterminado y perenne de esta especie (Fischer *et al.*, 2011).

En la literatura no se encontraron referencias de estudios en los que se haya efectuado muestreos a lo largo del ciclo de cultivo para evaluar el efecto de la aplicación de mutágenos artificiales. Generalmente, se registra el valor de alguna variable en una etapa fenológica solamente (e. g. floración o cosecha) y en ocasiones tampoco se menciona esto. Por ejemplo, López-Mendoza *et al.* (2012) y Álvarez *et al.* (2013) evaluaron la altura y fructificación de plantas M_1 de *C. annuum* L. solamente a la cosecha.

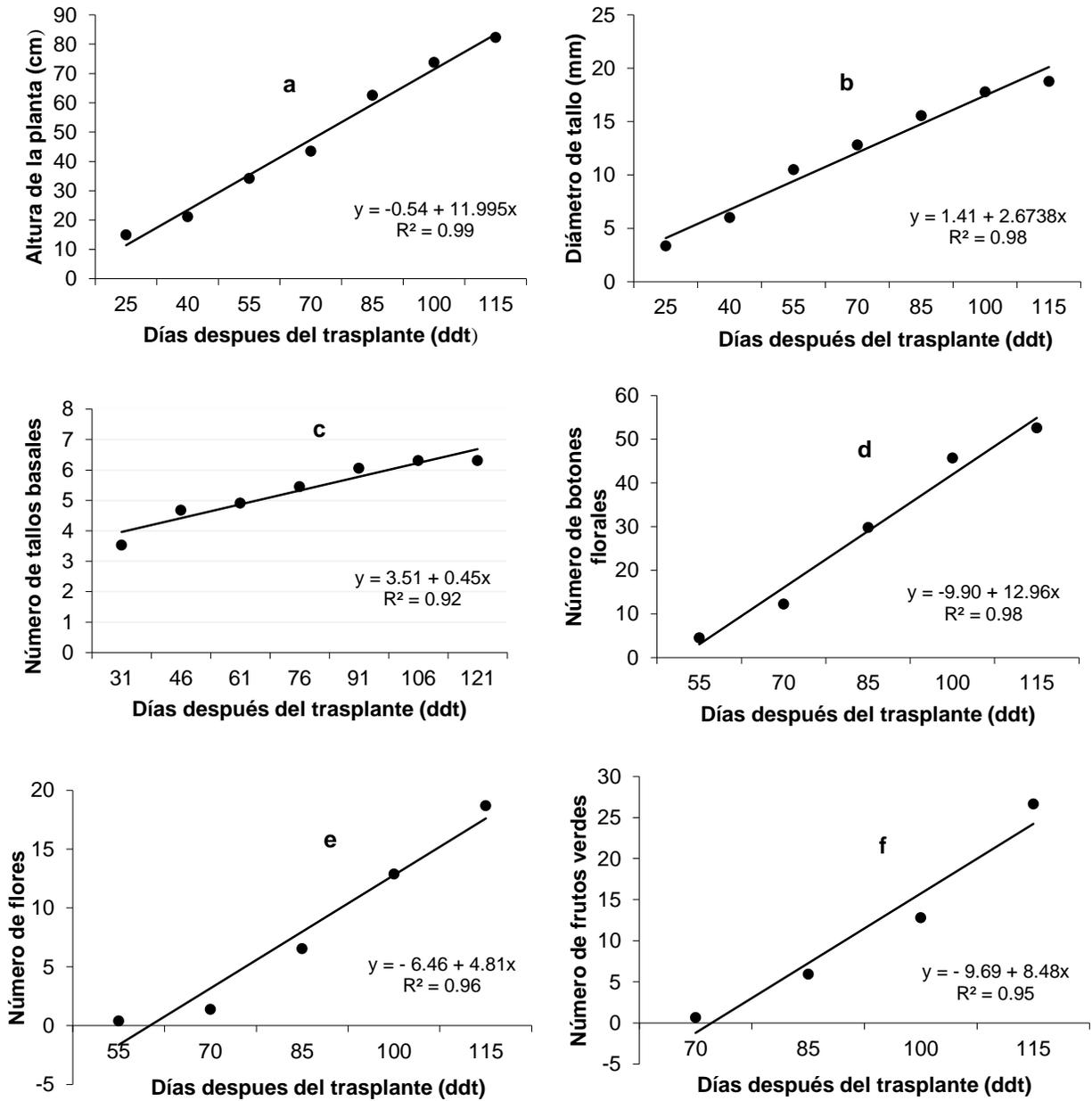


Figura 2.2. Comportamiento de la altura de la planta (a), diámetro de tallo (b), número de tallos basales (c), número de botones florales (d), número de flores (e) y número de frutos verdes (f) de plantas M_1 de *Physalis peruviana* L. en el tiempo (ddt). Cada punto corresponde al promedio de 14 dosis de radiación aplicadas a la semilla.

Interacción dosis de radiación x muestreos

Existen varios factores que influyen en las respuestas de los cultivos a los tratamientos de irradiación. En estos factores se incluyen: la fuente de radiación, la dosis de irradiación y el tiempo de exposición (De Souza *et al.*, 2006), el órgano irradiado (Fuchs *et al.*, 2002 Caro-Melgarejo *et al.*, 2012; Álvarez *et al.*, 2013; Otahola-Gómez *et al.*, 2001), el contenido de agua del material irradiado (Ramírez *et al.*, 2006) y el rasgo agronómico y la etapa fenológica en las que se hacen las mediciones. En el presente estudio, la interacción de las dosis de irradiación x muestreos fue significativa para todos los rasgos, lo que significa que el efecto de la radiación se expresa de una manera particular de acuerdo con la edad de la planta (es decir, la etapa fenológica representada por cada fecha de muestreo) y la dosis de irradiación; por lo tanto, hay una dosis de irradiación óptima para cada rasgo morfológico. Esta interacción se ilustra con las variables más estrechamente relacionados con el rendimiento del fruto de uchuva: es decir, el número de tallos basales y el de las estructuras reproductivas (flores y frutos verdes) en etapas de crecimiento fenológico contrastantes (Figura 2.3).

En promedio de las 14 dosis de irradiación, hubo 4.7 tallos basales por planta a los 46 ddt y 6.3 a los 121 ddt (Figura 2.1c); sin embargo, la interacción dosis de irradiación x muestreos indica que a los 46 d, las plantas provenientes de semillas irradiadas con la dosis de 0 y 50 Gy tenían 4 tallos basales; mientras que, las de dosis de 125, 175 y 200 Gy presentaron 6 tallos basales. En contraste, a los 121 d, las plantas M₁ provenientes de la dosis 200 Gy produjeron 9 tallos basales, significativamente más que los obtenidos en las plantas provenientes de semillas en las que se aplicó cualquier otra dosis (Figura 2.3i). En cuanto al número de botones florales, a los 70 ddt el número por planta en promedio de las 14 dosis fue de 12.3 y 52.6 a los 115 ddt (Figura 2.1d); sin embargo, a los 70 ddt las dosis de 0 y 20 Gy produjeron plantas con 9 y 1 botones, respectivamente, y las dosis de 125, 175 y 200 Gy presentaron plantas con similar número de botones florales; en cambio, a los 115 ddt, las plantas resultado de la dosis de 200 Gy aplicados a semilla destacaron por presentar mayor número de botones florales que todas las otras dosis (Figura 2.1d). Esta superioridad del número de flores y frutos verdes producidos

por las plantas M₁ a partir de semillas irradiadas con 200 Gy fue más evidente en el último muestreo que en los nuestros previos (Figura 2.3ii y 2.3iii).

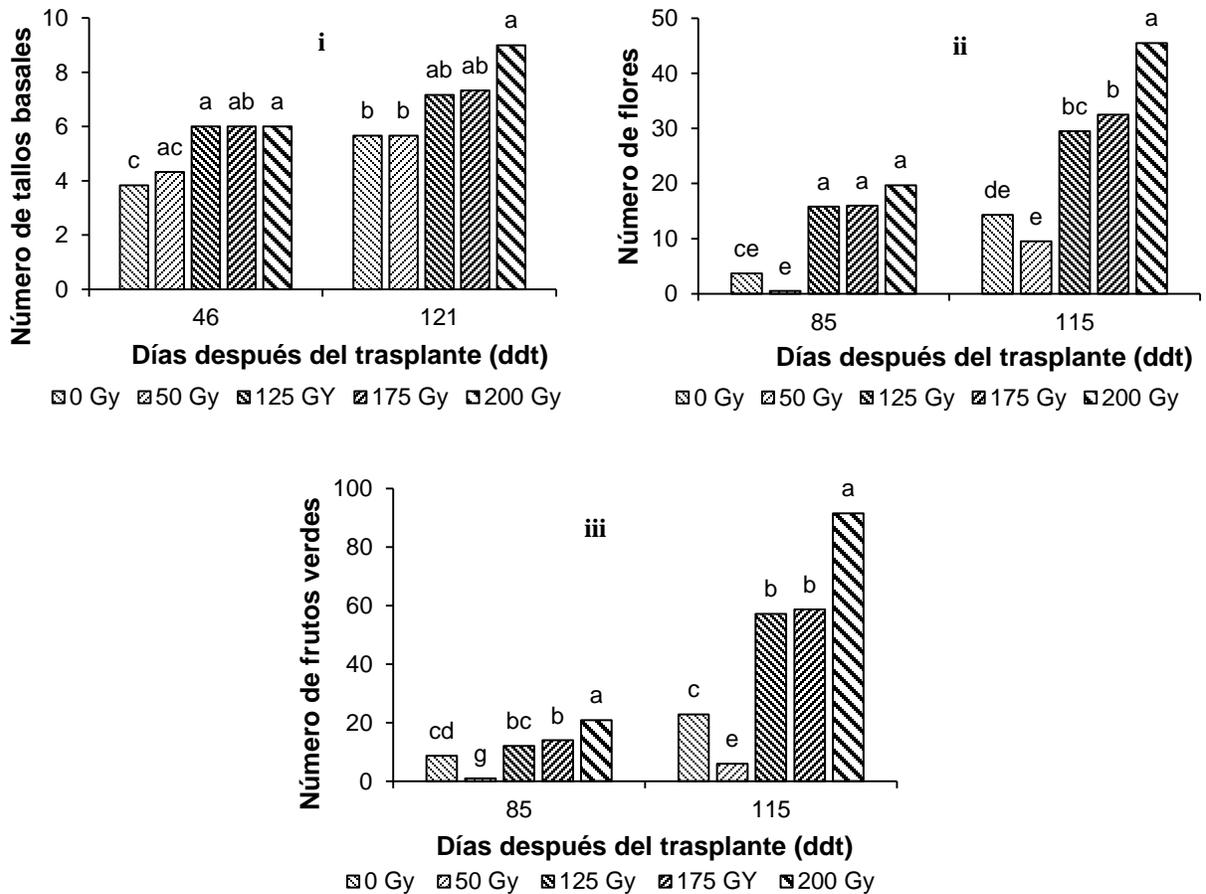


Figura 2.3. Ejemplos de interacción muestreos × dosis de rayos gamma ⁶⁰Co en las variables: número de tallos basales (i); flores (ii) y frutos verdes (iii) por planta M₁ de *Physalis peruviana* L. Las barras con la misma letra pequeña para cada etapa de crecimiento (días después del trasplante) no son significativamente diferentes (Tukey, P = 0.05).

El uso comercial de mutantes en cultivos hortícolas es bien conocido. Esto es particularmente útil cuando el cultivo es adecuado para la propagación vegetativa. Por lo tanto, se realizará una selección de mutantes de uchuva de madurez temprana y alto rendimiento. Los mejores mutantes obtenidos en este estudio se utilizarán para avanzarlos a la siguiente generación (M₂).

2.5. CONCLUSIONES

La aplicación de rayos gamma ^{60}Co (dosis de 5 a 275 Gy) a las semillas de *Physalis peruviana* L. reduce el tamaño de las plantas M₁; mientras que, el diámetro del tallo y la cantidad de tallos basales, brotes florales, flores y frutos verdes por planta aumentan a medida que la planta avanza de edad. Por otro lado, la aplicación de dosis intermedias de rayos gamma (125, 150, 175 y 200 Gy) estimula el crecimiento vegetativo y los rasgos de fructificación de las plantas M₁ de uchuva, particularmente en la dosis de 200 Gy.

2.6. LITERATURA CITADA

- Ahloowalia B. S. and M. Maluszynski (2001)** Induced mutations - A new paradigm in plant breeding. *Euphytica* 118: 167-173.
- Aladjadjiyan A. (2007)** The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria. *Journal of Central European Agriculture* 8: 369-380.
- Álvarez F. A., S.L. Chávez, F. R. Ramírez, P. W. Estrada, L. Y. Estrada y R. A. Maldonado (2013)** Efecto del tratamiento de semillas con bajas dosis de rayos X en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Nucleus* 53: 14-18.
- Baek M. H., J. H. Kim, B. Y. Chung, J. S. Kim and I.S. Lee (2005)** Alleviation of salt stress by low dose γ -irradiation in rice. *Biologia Plantarum* 49: 273-276.
- Canul-Ku J., F. García-Pérez, E. Campos-Bravo, E. J. Barrios-Gómez, E. de la Cruz-Torres, J. M. García-Andrade, F. J. Osuna-Canizalez 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.
- Caro-Melgarejo D. P., S. Y. Estupiñán-Rincón, L. Y. Rache-Cardenal y J. C. Pacheco-Maldonado (2012)** Effect of gamma rays on vegetative buds of *Physalis peruviana* L. *Acta Agronómica* 61: 305-314.
- Chakravarty B. and S. Sen (2001)** Enhancement of regeneration potential and variability by γ -irradiation in cultured cells of *Scilla indica*. *Biologia Plantarum* 44: 189-193.
- Chopra V. L. (2005)** Mutagenesis: Investigating the process and processing the outcome for crop improvement. *Current Science* 89: 353-359.

- De Souza A., D. García, L. Sueiro, F. Gilart, E. Porras and L. Licea (2006)** Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics* 27: 247-257.
- Fischer G. (2000)** Crecimiento y desarrollo. *In*: Flórez, R.V.J., G. Fischer y R.A.D. Sora (ed.). Producción, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. pp: 9-26.
- Fischer G., A. Herrera and P. J. Almanza (2011)** Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *In*: Yahia, E.M. (ed.). Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits. Volume 2. Acai to Citrus. Woodhead Publishing, Cambridge, UK. pp: 374-396.
- Fuchs M., V. González, S. Castroni, E. Díaz y L. Castro (2002)** Efecto de la radiación gamma sobre la diferenciación de plantas de caña de azúcar a partir de callos. *Agronomía Tropical* 52: 311-323.
- Gastelum-Osorio D.A., M. Sandoval-Villa, C. Trejo-Libia y R. Castro-Brindis (2013)** Fuerza iónica de la solución nutritiva y densidad de plantación sobre la producción y calidad de frutos de *Physalis peruviana* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19: 197-210.
- Gutiérrez-Castorena M.C., J. Hernández Escobar, C.A. Ortiz Solorio, R. Anicua Sánchez y M. E. Hernández Lara (2011)** Relación porosidad–retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17: 183-196.
- Honda I., K. Kikuchi, S. Matsuo, M. Fukuda, H. Saito, H. Ryuto, N. Fukunishi and T. Abe (2006)** Heavyion-induced mutants in sweet pepper isolated by M₁ plant selection. *Euphytica* 152: 61-66.
- Kim J. H., B. Y. Chung, J. S. Kim and S. G. Wi (2005)** Effects of *in Planta* gamma-irradiation on growth, photosynthesis, and antioxidative capacity of red pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Journal Plant Biology* 48: 47-56.
- 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 Plant Biology* 47: 314-321.

Kodym A., R. Afza, B. P. Forster, Y. Ukai, H. Nakagawa and C. Mba (2011) Methodology for physical and chemical mutagenic treatments. *In*: Shu Q.Y., B. P. Forster, and H. Nakagawa, (ed.). Plant mutation and biotechnology, Plant Breeding and Genetics Section, Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. pp: 169-180.

Kumari R. and Y. Singh (1996) Effect of gamma rays and EMS on seed germination and plant survival of *Pisum sativum* L. and *Lens culinaris*. *Medicine Neo Botanica* 4: 25-29.

Lagos B. T. C., C. F. A. Vallejo, E. H. Criollo, y F. J. E. Muñoz (2008) Biología reproductiva de la uchuva. *Acta Agronómica* 57: 81-87.

López-Mendoza H., J. C. Carrillo-Rodríguez y J.L. Chávez-Servia (2012) Effects of gamma-irradiated seeds on germination and growth in *Capsicum annum* L. plants growth in a greenhouse. *Acta Horticulturae* 947: 77-81.

Maluszynski M., I. Szarejko, C. R. Bhatia, K. Nichterlein and P.J. L. Lagoda (2009) Methodologies for generating variability. Part 4: Mutation techniques. *In*: Ceccarelli, S., E. P. Guimarães, and E. Weltzien. (ed.). Plant Breeding and Farmer Participation. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp: 159-194.

Matsumura A., T. Nomizu, N. Furutani, K. Hayashi, Y. Minamiyama and Y.Hase (2010) Ray florets color and shape mutants induced by $^{12}\text{C}^{5+}$ ion beam irradiation in chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* 123: 558-561.

Mohan Jain S. (2006) Mutation-assisted breeding for improving ornamental plants. *Acta Horticulturae* 714: 85-98.

Otahola-Gómez V., M. Aray y Y. Antoima (2001) Inducción de mutantes para el color de la flor en crisantemos (*Dendranthema grandiflora* (Ram) Tzvelev) mediante radiaciones gamma. *Revista UDO Agrícola* 1: 56-63.

Prina A. R., A. M. Landau and M. G. Pacheco (2011) Chimeras and mutant gene transmission. *In*: Plant Mutation and Biotechnology. Plant Breeding and Genetics Section. Shu, Q.Y., B.P. Forster, and H. Nakagawa. (ed.). Joint FAO/IAEA Division of

Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. pp: 181-190.

Raghava R. P. and N. Raghava (1989) Effects of gamma irradiation on fresh and dry weights of plant parts in *Physalis* L. *Geobios* 16: 261-264.

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* L.). *Cultivos Tropicales* 27: 63-67.

Rodrigues E., I. I. Rockenbach, C. Cataneo, L. V. Gonzaga, E. S. Chaves and R. Fett (2009) Minerals and essential fatty acids of the exotic fruit *Physalis peruviana* L. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 29: 642-645.

Santana G. y A. Angarita (1997) Regeneración adventicia de somoclonales de Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana* 14: 59-65.

SAS Institute (2004) SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. SAS Institute. Cary, NC, USA. 5121 p.

Wi S. G., B. Y. Chung, J. H. Kim, M. H. Baek, D. H. Yang, J. W. Lee and J. S. Kim (2005) Ultrastructural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stems after gamma irradiation. *Journal Plant Biology* 48: 195-200.

Wu D. L., S. W. Hou, P. P. Qian, L. D. Sun, Y. C. Zhang and W. J. Li (2009) Flower color chimera and abnormal leaf mutants induced by $^{12}\text{C}^{6\pm}$ heavy ions in *Salvia splendens* Ker-Gawl. *Scientia Horticulturae* 121: 462-467.

Yamaguchi H., A. Shimizu, K. Degi and T. Morishita (2008) Effects of dose and dose rate of gamma ray irradiation on mutation induction and nuclear DNA content in chrysanthemum. *Breeding Science* 58: 331-335.

CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS CUANTITATIVAS DEL FRUTO DE PLANTAS M₁ DE *Physalis peruviana* L. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co

Escrito según las normas de la Revista Fitotecnia Mexicana

3.1. RESUMEN

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es originaria de los Andes, su fruto se consume en fresco por su alto contenido de vitaminas y propiedades nutraceuticas y medicinales; sin embargo, su mejoramiento genético es incipiente. La aplicación de mutágenos físicos a semillas u otros órganos de propagación de plantas permite generar variabilidad genética en la morfología, rendimiento, adaptabilidad y resistencia a factores bióticos y abióticos del ambiente. Se evaluó el efecto de la irradiación de la semilla en las características del fruto de plantas M₁ de *P. peruviana* L. El experimento se realizó en invernadero en el año 2016. Los tratamientos fueron 14 dosis de rayos gamma ⁶⁰Co que se distribuyeron en un diseño completamente al azar con seis repeticiones. El peso del fruto con y sin cáliz se redujo de 29 a 32 % con las mayores de 200 Gy. La dulzura de los frutos se redujo con las dosis mayores de 100 Gy, excepto la dosis de 200 Gy. La firmeza aumentó de 1 a 9 % con las dosis de 100 y 75 Gy, respectivamente. El tamaño y la vida de anaquel del fruto no fueron afectados. La irradiación de las semillas con rayos gamma ⁶⁰Co no altera negativamente todas las características del fruto de las plantas mutantes de uchuva.

Palabras clave: *Physalis peruviana*, calidad, mutagénesis, rayos gamma, peso.

3.2. INTRODUCCIÓN

Physalis peruviana L. es una especie originaria de los Andes; se le conoce como uchuva, uvilla, goldenberry o capegoseberry; su fruto es una baya jugosa y carnosa, similar a minitomates pero de color amarillo-naranja cuando está maduro (Fischer *et al.*, 2014) y se consume en fresco por sus altos niveles de provitamina A (3.000 UI de β-caroteno por 100 g), vitamina C (20 mg/100 g fruta) y vitaminas del complejo B como tiamina (0.01 mg/100 g), riboflavina (0.17 mg/100 g) y niacina (0.80 mg/100 g); además, tiene altos contenidos de proteína cruda (2.2 g), fósforo (39 mg) y hierro (1.1 mg), su nivel de calcio es bajo (14 mg/100 g PF) (Fischer y Miranda, 2012). En Sudamérica se utiliza

para hacer mermeladas, jugos, dulces, salsas y conservas y en Estados Unidos se consume deshidratado y endulzado. Además, se han comprobado propiedades nutraceuticas y medicinales por su actividad antioxidante, antiinflamatoria y anticancerígena y altos contenidos de ácidos grasos poliinsaturados y fitoesteroles (Puente *et al.*, 2011; Fischer *et al.*, 2014).

Las plantas de uchuva ecotipo Colombia presentan gran variación fenotípica debido a que el 46 % de las flores se autopolinizan (Lagos *et al.*, 2008) y en el resto ocurre polinización libre (alogamia) (Santana y Angarita, 1997). En Nueva Zelanda los productores seleccionan las mejores plantas dentro de la población y las propagan vegetativamente mediante estacas para conservar sus características, pues las plantas provenientes de semillas presentan variación en vigor. Por tal motivo, se requiere establecer un programa de mejoramiento genético en esta especie debido a que no se han identificado variedades con características uniformes y sobresalientes tanto en crecimiento vegetativo y calidad de fruto (Fischer, 2000).

La mutagénesis tiene la ventaja de que en ocasiones se provocan cambios sobresalientes en los individuos por combinaciones de genes ya existentes en la especie; por la reorganización de los genes con alta frecuencia de mutación; sin embargo, estas mutaciones pueden ser positivas o negativas (Majeed *et al.*, 2017). El mutágeno físico más utilizado en la agricultura es la radiación ionizante; particularmente los rayos gamma ^{60}Co pues son los más eficaces para irradiar plantas enteras, tejido vegetal, semillas y granos de polen; pero, son altamente peligrosos (Oladosu *et al.*, 2016). Estos rayos influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas, al causar inestabilidad genómica de las células y tejidos, pues ocasionan rompimientos y variaciones en la composición química del ADN, lo que origina cambios citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos mediante la producción de radicales libres en las células (Kim *et al.*, 2004). Los cambios dependerán de la dosis (Lagoda, 2011) y de las características del material vegetal, como el contenido de agua, edad y tipo de tejido y número cromosómico (Cubero, 2002; Lagoda, 2011). En el caso de dosis bajas, los cambios observados en las plantas son reversibles; las dosis altas generan más efectos secundarios en el fenotipo de la

planta, orgánulos celulares (mitocondria y cloroplastos) y componentes bioquímicos (Ali *et al.*, 2015); además, inactivan el mecanismo de defensa de las plantas para hacer frente al daño causado por la radiación. Estos efectos pueden aparecer en varias etapas del desarrollo del individuo (Lagoda, 2011).

Las investigaciones en inducción de mutaciones por radiación se han enfocado en reducir el porte de la planta, la precocidad e incrementar la calidad del fruto (contenido de proteína, aceite y almidón) en maíz (*Zea mays* L), trigo (*Triticum aestivum* L.), soya (*Glycine max* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.) y tomate (*Solanum esculentum* L.) (Ahloowalia y Maluszynski, 2001). Sin embargo, la utilización de radiación en la agricultura es reducida por la poca información de las dosis óptimas de irradiación, ya que difieren entre especies (Cubero, 2002; Ali *et al.*, 2015). Además, existe poco interés de los fitomejoradores por aplicarla en programas de mejoramiento debido al tiempo requerido para estabilizar una mutación de interés; también, influye el temor del uso de las fuentes de radiación por su posible efecto en la salud humana (desarrollo enfermedades cancerígenas).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar las características del fruto (peso; tamaño; dulzura; vida de anaquel) producido por las plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma ⁶⁰Co.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron plantas M₁ provenientes de semillas de uchuva del “Ecotipo Colombia” con dos años de edad. La irradiación de las semillas se efectuó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el Estado de México, en un irradiador LGI-01 Transelektro. Los tratamientos de irradiación fueron 0, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 y 275 Gy de rayos gamma ⁶⁰Co en 5 g de semilla.

Las semillas se sembraron en agosto de 2015, en charolas de unisel con turba como sustrato y se regaron con agua de llave, con pH 7.6. Las plántulas de dos meses de edad se establecieron en octubre del año 2015, en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, en un invernadero tipo túnel, con cubierta de polietileno

UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral. Las plántulas de los 14 tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con seis repeticiones; la unidad experimental consistió de una planta M₁ trasplantada en una bolsa negra de polietileno con capacidad de 9 L, con tezontle como sustrato, 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 *et al.*, 2011).

Las plántulas se mantuvieron en posición vertical mediante tutoreo, utilizando rafia colocada a lo largo de las hileras y sujeta a postes de madera en los extremos de las mismas. La solución nutritiva que se utilizó fue la Steiner a 50 % de su fuerza iónica original con un pH ajustado a 6.0 (Gastelum *et al.*, 2013). Las condiciones ambientales que prevalecieron durante los meses de octubre de 2015 a febrero de 2016 (mes en que concluyó el experimento) fueron: intensidad luminosa, 652.21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; temperatura máxima, 37 °C y mínima de 4 °C.

Para medir el efecto de la irradiación gamma en las características de los frutos de las plantas M₁ de *P. peruviana* L., a la cosecha (170 días del trasplante) se seleccionaron al azar 5 frutos por planta y en cada fruto se registraron las siguientes variables: peso del fruto con y sin cáliz (g), con un báscula digital; diámetro ecuatorial y polar (mm), el primero en la parte media y el segundo desde la base del pedúnculo hasta el ápice, con un vernier digital; concentración de sólidos solubles totales (°Brix), para lo cual se colocó una gota de jugo en un refractómetro digital; firmeza (kg*fuerza), con un penetrómetro en la parte central; vida de anaquel, días transcurridos desde la fecha de cosecha hasta la pérdida de turgencia de la epidermis del fruto sin cáliz.

El análisis de varianza y la comparación de medias de los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$) se realizaron con el programa estadístico SAS (SAS, 2002) versión 9.1. Además, para cada característica del fruto se realizó una regresión polinomial con los valores promedios de las dosis de radiación. Por otra parte, se registró el valor mínimo (VMín) y máximo (VMáx) de cada variable, con base en los datos de los 30 frutos de cada dosis, para identificar y seleccionar individuos idóneos que se avanzarán a la generación M₂.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los resultados de los ANOVAS y sus respectivas comparaciones de medias, hubo variables (diámetro polar, diámetro ecuatorial y vida de anaquel) (Figura 3.1) en las que no hubo diferencias significativas ($P \geq 0.05$) entre los tratamientos; es decir, la radiación no modificó esas variables.

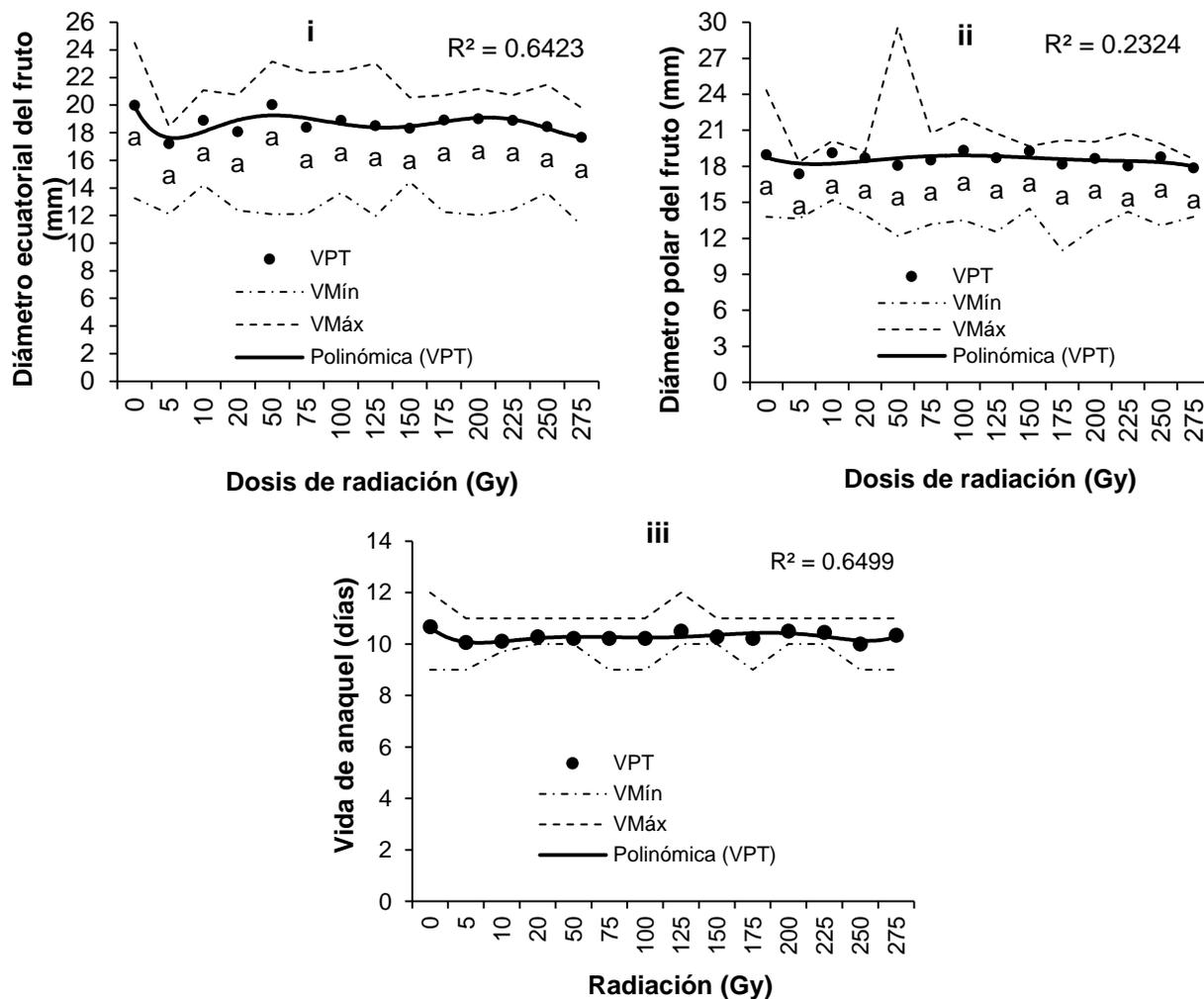


Figura 3.1. Características del fruto de plantas M_1 de *Physalis peruviana* L.: i) Diámetro ecuatorial; ii) Diámetro polar; iii) Vida de anaquel. VPT = Valor promedio Tukey. VMín= Valor mínimo. VMáx = Valor máximo. Valores VPT con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Álvarez *et al.* (2011) no encontraron diferencias en el diámetro polar; pero, si en el diámetro ecuatorial de los frutos de plantas M₁ de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Los frutos de plantas provenientes de semillas tratadas con las dosis de 5 y 20 s incrementaron en 7 % este indicador. Del mismo modo, al irradiar semillas de *C. annuum* L. con dosis de 5 a 30 Gy se originaron plantas M₁ con frutos de mayor diámetro polar, superiores entre 12 y 58 % al testigo (64.0 mm) y el mayor diámetro ecuatorial (75.5 mm) se tuvo en frutos de plantas de semillas tratadas con 20 Gy, superior en 47 % al testigo (51.2 mm) (Álvarez *et al.*, 2013).

La escasa respuesta en la vida de anaquel del fruto es porque son climatéricos, pues conforme avanza la edad del fruto aumenta la producción de etileno disminuyendo su conservación (Trincheró *et al.*, 1999). Al respecto, en líneas mutantes de tomate (*Solanum lycopersicum*), Kosma *et al.* (2010) reportaron cambios en la cutícula del fruto por la radiación y los correlacionaron con la producción de etileno y degradación de la pared celular y el color, pues es importante en la vida de anaquel del fruto.

En las otras variables (peso del fruto con y sin cáliz, concentración de sólidos solubles totales y firmeza), las diferencias entre el testigo y la mayoría de las dosis no fueron significativas y solamente las dosis mayores de 200 Gy presentaron diferencias ($P \leq 0.05$) pero siempre con valores menores al testigo (Figura 3.2). Los resultados se encuentran en el rango de la dulzura (13 a 15 °Brix) y el tamaño (12.5 a 25.0 mm) comercial del fruto (Fischer, 2000; Herrera, 2000). Es importante resaltar que se identificaron individuos M₁ sobresalientes en ciertas características del fruto. Por ejemplo, en diámetro polar con la dosis de 50 Gy; dulzura con las dosis de 10 y 200 Gy; y firmeza con las dosis de 50, 75, 100 y 275 Gy. Por lo tanto, se pueden seleccionar estos individuos con estas características para avanzarlas a la generación M₂ (Figuras 3.1 y 3.2).

El efecto negativo de las dosis altas en el peso del fruto es porque disminuyen el área foliar y biomasa de las plantas (Artik y Pekşen, 2006; Bondada y Oosterhuis, 2003), por la desorientación y daños en los tilacoides del grana o la acumulación de gránulos de almidón dentro de los cloroplastos, así como por los cambios provocados en las células responsables del transporte de los carbohidratos en el floema, que son más sensibles

que las otras células de la planta (Thiede *et al.*, 1995). Por lo tanto, las características del rendimiento se reducen en 50 % (Artik y Pekşen, 2006; Bondada y Oosterhuis, 2003).

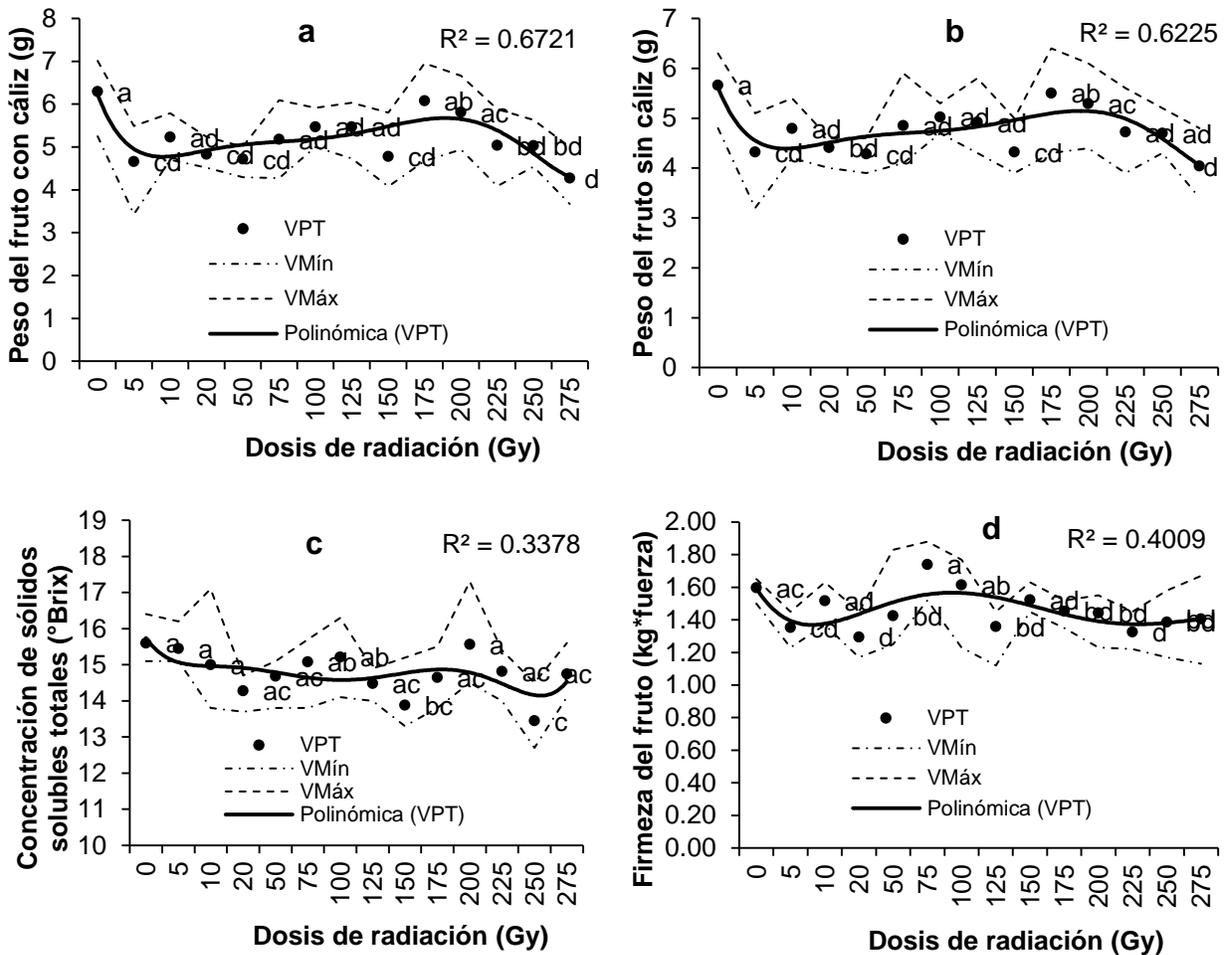


Figura 3.2. Características del fruto de plantas M_1 de *Physalis peruviana* L.: a) Peso con cáliz; b) Peso sin cáliz; c) Concentración de sólidos solubles totales; d) Firmeza. VPT= Valor promedio Tukey. VMín = Valor mínimo. VMáx = Valor máximo. Valores VPT con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Las dosis bajas de radiación no provocan estos cambios en los cloroplastos de células de plantas y su efecto en las características del rendimiento es leve (Wi *et al.*, 2007). El efecto estimulante se deben por cambios reparables en la estructura celular y el metabolismo de las plantas (Kovács y Keresztes, 2002) como la modulación del sistema antioxidante y acumulación de compuestos fenólicos en órganos de la planta (Wi *et al.*,

2005). Por consiguiente, la estimulación dependerá de la variedad o raza vegetal, nutrición y los factores abióticos y bióticos ambientales prevalecientes durante el crecimiento de las plantas M₁ (Álvarez *et al.*, 2011).

En otras investigaciones se han reportan resultados superiores, Álvarez *et al.* (2013), observaron que las plantas M₁ de pimiento (*Capsicum annuum* L.) provenientes de semillas irradiadas con 5 a 30 Gy tuvieron mayor peso de fruto (33.3 a 35.7 g) y que la dosis de 5 Gy fue la mejor, superior en 107 % con respecto a las plantas testigo (30.8 g). Asimismo, Álvarez *et al.* (2011) encontraron que las plantas M₁ de *Solanum lycopersicum* L. de semillas irradiadas con 20 s de rayos X presentaron frutos con pesos superiores en 13 % al testigo. Esta radioestimulación en esta característica se relaciona con el incremento de la intensidad de la fotosíntesis y transpiración de las plantas (Wilczek y Fordonski, 2007).

Ahuja *et al.* (2014) indicaron que existe escasa información e investigaciones del efecto de la radiación en los componentes de la calidad de los frutos; además, los datos disponibles son dispersos y no concluyentes; pues a nivel de planta, los efectos se muestran en cambios morfológicos, bioquímicos, fisiológicos y biofísicos, pero señalaron que la magnitud de los cambios dependerá de la dosis de irradiación, el manejo del cultivo y las condiciones ambientales como la temperatura y humedad atmosférica.

3.5. CONCLUSIONES

La mayoría de las características (peso con y sin cáliz, diámetro ecuatorial y polar, vida de anaquel) del fruto de plantas M₁ de *Physalis peruviana* L. no fueron afectadas negativamente por dosis bajas e intermedias de rayos gamma, pero si con dosis altas; solamente la dulzura y firmeza tuvieron un incrementó con dosis intermedias.

3.6. LITERATURA CITADA

Ahloowalia B. S. and M. Maluszynski (2001) Induced mutations - A new paradigm in plant breeding. *Euphytica* 118: 167-173.

- Ali H., Z.Ghori, S. Sheikh and A. Gul (2015)** Effects of gamma radiation on crop production. *In: Crop Production and Global Environmental Issues*. K. R. Hakeem (ed.). Springer International Publishing. pp: 27-78.
- 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.
- Álvarez F. A., L. Chávez S., R. Ramírez F., W. Estrada P., Y. Estrada L. y A. Maldonado R. (2013)** Efecto del tratamiento de semillas con bajas dosis de rayos X en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Nucleus* 53: 14-18.
- Álvarez A., R. Ramírez, L. Chávez, Y. Camejo, L. Licea, E. Porras y B. García (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: 290-299.
- Artık C. and E. Pekşen (2006)** The effects of gamma irradiation on seed yield and some plant characteristics of faba bean (*Vicia faba* L.) in M₂ generation. *The Journal of Agricultural Faculty of Ondokuz Mayıs University* 21: 95-104.
- Bondada B., R. and D. M. Oosterhuis (2003)** Morphometric analysis of chloroplast of cotton leaf and fruiting organs. *Biologia Plantarum* 47: 281-284.
- Cubero J. I. (2002)** Introducción a la Mejora Genética Vegetal. Mundi-Prensa, Madrid. España. 565 p.
- Fischer G. (2000)** Crecimiento y desarrollo. *In: Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana* L.). Flórez, V. J., Fischer, H., Sora, A. D. (eds). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 9-26.
- Fischer G., P. J. Almanza-Merchán y D. Miranda (2014)** Importancia y cultivo de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Revista Brasileira. Fruticultura* 36: 01-15.
- Fischer G. y D.Miranda (2012)** Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *In: Manual para el Cultivo de Frutales en el Trópico*. R, G. Fischer (ed.). Produmedios. Bogotá, Colombia. pp. 851-873.
- Gastelum-Osorio D. A., M. Sandoval-Villa, C. Trejo-Libia y R. Castro-Brindis (2013)** Fuerza iónica de la solución nutritiva y densidad de plantación sobre la producción y

calidad de frutos de *Physalis peruviana* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19: 197-210.

Gutiérrez-Castorena M. C., J. Hernández-Escobar, C. A. Ortiz-Solorio, R. Anicua-Sánchez y M. E. Hernández-Lara (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: 183-196.

Herrera A. (2000) Manejo poscosecha. *In: Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.)*. Flórez, V. J., Fischer, G., Sora, A. D. (eds). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. p. 109-127.

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 Plant Biology* 47: 314-321.

Kosma D. K., E. P. Parsons, T. Isaacson, S. Lu J. K. C. Rose and A. J. Matthew (2010) Fruit cuticle lipid composition during development in tomato ripening mutants. *Physiology Plantarum* 139:107-117.

Kovács E. and A. Keresztes (2002) Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells. *Micron* 33: 199-210.

Lagoda P. J. L. (2011) Effects of radiation on living cells and plants. *In: Shu Q.Y.; Forster, B. P.; Nakagawa, H. (eds). Plant Mutation and Biotechnology, Plant Breeding and Genetics Section, Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.* p. 123-134.

Lagos B. T. C., F. A. C. Vallejo, H. E. Criollo y J. E. F. Muñoz (2008) Biología reproductiva de la uchuva. *Acta Agronómica*. 57: 81-87.

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. *Biological Research* 2: 30-35.

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

- Puente L. A., C. A. Pinto-Muñoz, E. S. Castro y M. Cortés (2011)** *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: a review. *Food Research International* 44: 1733-1740.
- Santana G. y A. Angarita (1997)** Regeneración adventicia de somoclonales de Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana* 14: 59-65.
- SAS Institute (2002)** SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1-7. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Thiede M. E., S. O. Link, R. J. Fellows and P. A. Beedlow (1995)** Effects of gamma radiation on stem diameter growth, carbon gain and biomass partitioning in *Helianthus annuus*. *Environmental And Experimental Botany* 35: 33-41.
- Trincherro G., G. O. Sozzi, A. M. Cerri, F. Vilella and A. Franschina (1999)** Ripening-related changes in ethylene production respiration rate and cell-wall enzyme activity in golden berry (*Physalis peruviana* L.) a solanaceous species. *Postharvest Biology Technology* 16: 139-145.
- Wi S. G., B. Y. Chung, J. S. Kim, J. H. Kim, M. H. Baek, J. W. Lee and Y. S. Kim (2007)** Effects of gamma irradiation on morphological changes and biological responses in plants. *Micron* 38: 553-564.
- Wi S. G., B.Y. Chung, J. H. Kim, M. H. Baek, D. H Yang, J. W. Lee and J. S. Kim (2005)** Ultrastructural changes of cell organelles in Arabidopsis stems after gamma irradiation. *Journal Plant Biology* 48: 195-200.
- Wilczek M. and G. Fordonski (2007)** Influence of presowing laser stimulation of seeds on photosynthesis and transpiration intensity and on yielding of red clover. *Acta Agrophysica* 9: 517-524.

CAPÍTULO IV. VIGOR DE PLÁNTULAS Y RASGOS MORFOLÓGICOS DE PLANTAS M₁ DE *Physalis ixocarpa* Brot. PROVENIENTES DE SEMILLAS IRRADIADAS CON ⁶⁰Co

Escrito según las normas de la Revista Fitotecnia Mexicana

4.1. RESUMEN

El tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) es originario de México; es una especie alogama obligada, pues las flores presentan autoincompatibilidad, lo que impide la obtención de líneas puras. El objetivo fue evaluar el efecto de seis dosis de rayos gamma ⁶⁰Co (0 a 300 Gy) aplicados a semillas de tres variedades (Manzano, Verde Puebla, San Miguel) en los caracteres de vigor de plántula; rasgos de crecimiento y reproductivos de las plantas M₁. Los 18 tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones para las variables relacionadas con el vigor y 10 repeticiones para las variables morfológicas y reproductivas de las plantas. La germinación de la semilla y supervivencia de plántulas se redujeron de 32 a 57 % por la radiación; la altura de plántula disminuyó de 37 a 58 % y longitud de la raíz de 10 a 22 %. Los rasgos de crecimiento y fructificación fueron mayores en plantas de semillas irradiadas con las dosis de 100 y 300 Gy; pero ninguna de las dosis originó frutos con semillas. Las plantas de las variedades de tomate Manzano y Verde Puebla presentaron las mejores características de vigor y crecimiento y las de San Miguel tuvieron más flores. Las tres variedades de tomate fueron sensibles a la radiación; pero, el crecimiento de las plantas se estimuló con las dosis de 100 y 300 Gy, no así la autofecundación de flores. El tipo de variedad influyó directamente en las características de la planta.

Palabras clave: *Physalis ixocarpa*, radiación; semillas, crecimiento, vigor.

4.2. INTRODUCCIÓN

El tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) también llamado tomate verde es de crecimiento rastrero o erecto, ciclo de vida anual o perenne, su origen y distribución es México. El fruto se cosecha y consume en estado fisiológicamente inmaduro para elaborar salsas, como sustituto del jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Sigala *et al.*,

1994) y se exporta a los Estados Unidos y Canadá (Peña y Santiaguillo, 1999). En el año 2015 esta hortaliza ocupó el quinto lugar en superficie cultivada en México (Ponce *et al.*, 2012; SNCS, 2018). La dinámica agrícola del cultivo de tomate de cáscara demanda la generación de variedades mejoradas que destaquen en hábito de crecimiento, precocidad y rendimiento; así como en color, forma y tamaño del fruto (Santiaguillo *et al.*, 2004; Ponce *et al.*, 2012). Sin embargo, esta especie presenta autoincompatibilidad que impide derivar líneas endogámicas por autofecundación lo que dificulta generar híbridos (Pandey, 1957). En esta condición, el polen generalmente no germina, pero cuando lo hace, el tubo polínico no penetra en el estigma, o bien crece lentamente a lo largo del estilo, pero pocas veces fecunda al óvulo (Inzunza *et al.*, 1999) y entonces la autoincompatibilidad no es absoluta y se producen frutos partenocárpicos y frutos con semilla; ésta puede ser sexual o apomíctica; la sexual permite generar líneas endogámicas, tema que no se ha investigado (Peña *et al.*, 1999; Santiaguillo-Hernández *et al.*, 2005).

Se han formado híbridos intervarietales (CHF1-Chapingo × Verde Puebla) sin emasculación de las flores, los cuales superan el rendimiento de fruto del mejor progenitor en 14.3 % (Peña-Lomelí *et al.*, 1998). Del mismo modo Santiaguillo *et al.* (2004), obtuvieron híbridos de cruce simple entre plantas S_0 de dos variedades (A y B), superiores en rendimiento hasta en 39.2 % al híbrido intervarietal A × B.

Otra forma de generar variabilidad genética no presente en la naturaleza y en menor tiempo es mediante la aplicación de radiación gamma a las semillas, que origina mutaciones aleatorias en el ADN de los individuos (Ramírez *et al.*, 2006); además, estimula los procesos fisiológicos de las plantas (Ramírez *et al.*, 2006; Iglesias-Andreu *et al.*, 2010). Este método de mejoramiento genético permite mejorar las características fenotípicas y reproductivas de las plantas, así como frutos de mayor calidad (Fuchs *et al.*, 2002; Honda *et al.*, 2006).

La principal fuente de radiación son los rayos gamma ^{60}Co los que provocan cambios citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos, y de tejidos, a través de la producción de radicales libres en las células (Kim *et al.*, 2004; Wi *et al.*, 2005). Se ha demostrado que bajas dosis de rayos gamma estimulan la germinación, el crecimiento

celular, la actividad enzimática, la resistencia al estrés y aumentan el rendimiento (Chakravarty y Sen, 2001; Baek et al., 2005); sin embargo, altas dosis altas inhiben el crecimiento de las plantas (Kim *et al.*, 2005). Además, esta herramienta se ha utilizado para hacer compatibles el polen de plantas de petunia (*Petunia inflata*) (Huang *et al.*, 1994) y papa (*Solanum tuberosum* L) (Hernández y Sosa, 1998).

En la presente investigación se plantearon como objetivos: evaluar la influencia de la irradiación con rayos gamma ^{60}Co a la semilla, en el vigor de las plántulas M_1 de tres variedades de tomate de cáscara; determinar la dinámica del crecimiento de algunas variables relacionadas con el crecimiento de las plantas M_1 y cuantificar la cantidad de semilla de frutos provenientes de flores autofecundadas en cada dosis de irradiación en plantas M_1 de las tres variedades de tomate de cáscara.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron semillas de tres variedades de tomate de cáscara; Manzano (amarillo), Verde Puebla y San Miguel (morado) donadas por la Universidad Autónoma Chapingo. La irradiación de las semillas se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en un irradiador LGI-01 Transelektro. Las dosis de irradiación fueron: 0, 100, 150, 200, 250 y 300 Gy. Los tratamientos resultaron de la combinación factorial de las seis dosis de radiación y las tres variedades de tomate de cáscara, los que se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con cinco repeticiones para las características de vigor de plántula y 10 repeticiones en las variables asociadas con el crecimiento de las plantas M_1 . En las variables relacionadas con el vigor de la plántula, la unidad experimental fueron 100 semillas por repetición y una planta M_1 por repetición para las variables relacionadas con el crecimiento.

El experimento se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno UVII-720 y estructura de acero galvanizado, con ventilación lateral, ubicado en Montecillo, Estado de México. La siembra se realizó en marzo de 2016 en charolas de unisel con turba como sustrato (100 semillas por repetición por variedad) y se regaron con agua potable (pH 7.6). En abril de 2016, se seleccionaron las 10 mejores plántulas tratamiento y se trasplantó cada una en bolsa negra de polietileno con capacidad de 9 L, el sustrato

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 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. Se empleó la solución Steiner a 75 % de su fuerza iónica original, con pH de 6.0.

Para evaluar el vigor de la semilla se cuantificó el porcentaje de germinación (Pg) en base en el número de plántulas emergidas con respecto a las semillas sembradas; porcentaje de supervivencia de plántulas (PSp), se registró a los 40 d después de la siembra (dds) en base en el número de plántulas presentes respecto a las emergidas; la altura de la plántula (Ap, cm), del ras del sustrato a la hoja más joven, con un flexómetro; el diámetro de tallo (DTp, mm), a 1 cm de la base de la raíz, con un vernier; la longitud de la raíz (LRp, cm), desde la base a la raíz más larga, con flexómetro.

A los 25 días después del trasplante (ddt) se registraron las variables relacionadas con la dinámica del crecimiento de las plantas: altura (APT, cm), del ras del sustrato a la rama más larga, con un flexómetro y diámetro de tallo (DTP, mm), a 2 cm de la base del tallo, con un vernier. Estas variables continuaron registrándose cada 20 d. El número de ramas a la primera bifurcación (NRB) se cuantificó una sola vez, a los 60 ddt. Además, se envolvieron con bolsa de papel 10 botones florales por planta en cada tratamiento para contabilizar el número de flores autofecundadas (NFA) y de éstas el número de semillas por fruto (NSF) para evaluar el efecto de la irradiación en la autoincompatibilidad.

Se hizo un análisis de varianza combinado para cada variable cuyas fuentes de variación fueron dosis, variedades y la interacción dosis x variedades. 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, para cada variable relacionada con el vigor de plántula, morfológicas y reproductivas de las plantas M_1 se realizó una regresión polinomial con los valores promedios de las dosis de radiación.

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado detectó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las características de vigor de plántula por efecto de la dosis, variedad y la interacción respectiva (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Significancia estadística de las fuentes de variación para caracteres de vigor de la plántula M₁ de *Physalis ixocarpa* Brot. sometidas a seis dosis de radiación.

F. V.	Pg	PSp	Ap	DTp	LRp
Dosis (D)	*	*	*	ns	*
Variedad (V)	*	*	ns	ns	ns
D x V	*	*	ns	ns	ns
C. V. (%)	20	20	23	19	16

F.V.= Fuente de variación. C. V.= Coeficiente de variación. *= Significativo, $P \leq 0.05$. ns= No significativo, $P \geq 0.05$. Pg= Porcentaje de germinación de la semilla. PSp= Porcentaje de supervivencia de plántulas. Ap= Altura de plántula. DTp= Diámetro de tallo. LRp= Longitud de la raíz de la plántula.

Conforme avanzó la edad de las plantas M₁ el análisis estadístico indicó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el crecimiento vegetativo y reproductivo por efecto de la dosis, variedad y la interacción D x V, sin embargo, el efecto de las dosis no fue consistente entre los muestreos (Cuadro 4.2). En el caso del número de flores autofecundadas solamente hubo significancia para variedades; sin embargo, ningún fruto presentó semillas.

Cuadro 4.2. Significancia estadística de las fuentes de variación para los caracteres morfológicos de las plantas de *Physalis ixocarpa* Brot.

F.V.	APT				DTP				NRB	NFA
	Días después del trasplante (ddt)									
	25	45	65	85	25	45	65	85		
Dosis (D)	*	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	*	ns
Variedad (V)	*	*	*	*	ns	*	*	ns	*	*
D x V	*	*	*	*	*	*	ns	ns	*	ns
C. V (%)	18	17	18	17	33	17	18	23	27	49

F.V.= Fuente de variación. *= Significativo, $P \leq 0.05$. ns= No significativo, $P \geq 0.05$. APT= Altura de planta. DTP= Diámetro de tallo de planta. NRB= Número de ramas a la primera bifurcación. NFA= Número de flores autofecundadas.

Dosis de radiación

El porcentaje de germinación de la semilla y la supervivencia de plántulas disminuyeron con todas las dosis de radiación (100 a 300 Gy), pues fueron menores de 76 %; además, las plántulas presentaron menor crecimiento ($P \leq 0.05$); mientras que, las semillas no irradiadas obtuvieron el 91 % de germinación y plántulas vivas con mayor crecimiento vegetativo (altura, diámetro de tallo y longitud de la raíz) (Figura 4.1). Cabe señalar que el porcentaje de germinación de la semilla y la supervivencia de plántulas fueron iguales pues ninguna plántula murió.

Estos resultados variantes por las dosis de rayos gamma se deben al aumento de radicales libres en las células que provocan cambios electroquímicos y bioquímicos en el embrión de las semillas, que posteriormente se ven reflejados en el incremento o disminución de la división celular, intensidad de la respiración y fotosíntesis (De Souza *et al.*, 2006; Muszyński y Gladyszewska, 2008).

López-Mendoza *et al.* (2012), también observaron una respuesta negativa en el porcentaje de germinación de semillas de Chile Agua (*Capsicum annum* L.) con las dosis de 20 a 80 Gy que lo redujeron de 24 a 34 %, mientras que, las dosis de 100 a 120 Gy lo

incrementaron de 41 a 44 %. En otra variedad de Chile, las dosis de 60 a 160 Gy disminuyeron la supervivencia de plántulas de 29 a 84 % (Tomlekova *et al.*, 2007).

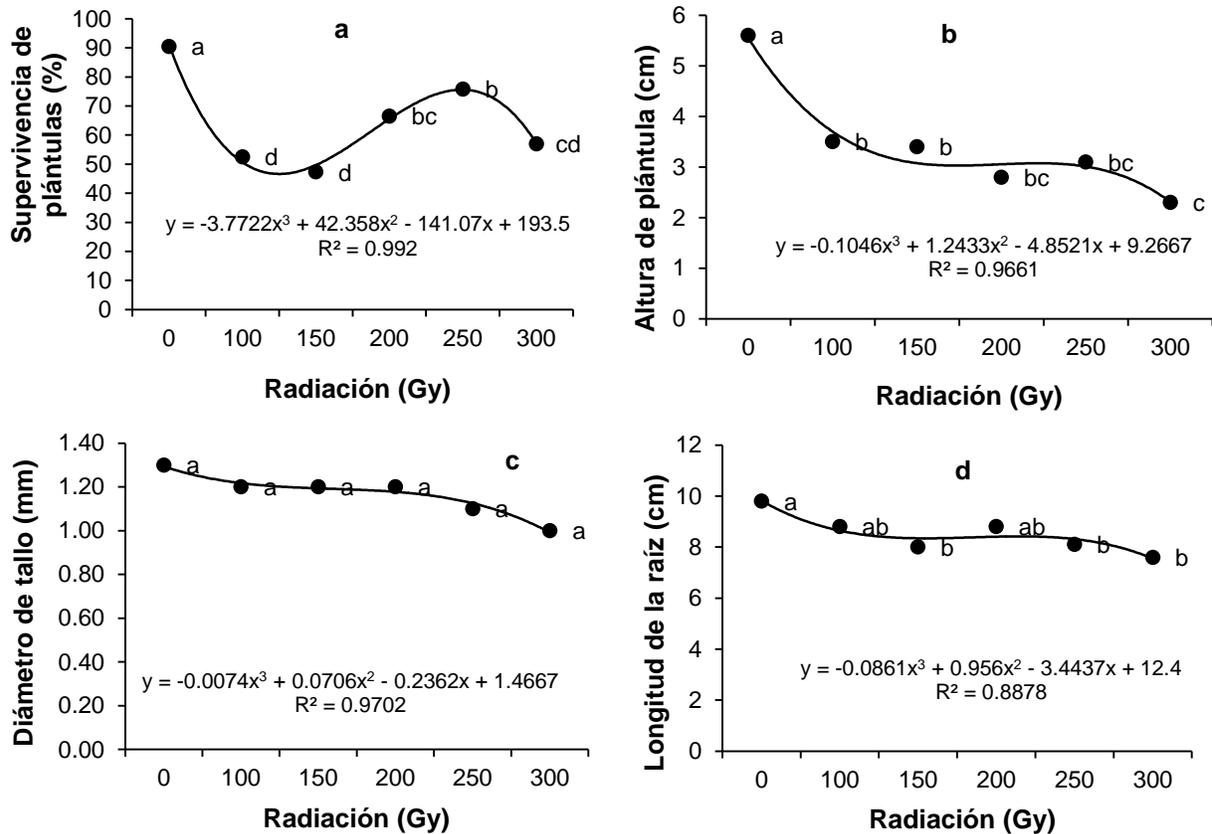


Figura 4.1. Comportamiento de la supervivencia (a), altura (b), diámetro de tallo (c), longitud de la raíz (d) de plántulas M₁ de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. Cada punto corresponde al promedio de tres variedades de tomate de cáscara. Medias con letras iguales en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05.

En semillas de tomate (*L. esculentum* Mill.) irradiadas con dosis de 5 a 500 Gy no se afectó la germinación de la semilla (98 a 100 %), pero si la supervivencia (40 a 100 %); en cambio, las dosis mayores de 550 a 800 Gy disminuyeron de 23 a 60 % la emergencia pero todas las plántulas murieron. Además, se observó que el crecimiento (altura, diámetro de tallo y longitud de la raíz) de la plántula aumentó de 15 a 80 % con las dosis de 5 a 75 Gy (Ramírez *et al.*, 2006).

Álvarez *et al.* (2011), reportaron que irradiaciones de 0 a 60 s de rayos gamma a semillas de *S. lycopersicum* L., no afectaron la germinación de la semilla y supervivencia de plántulas. También, señalaron que exposiciones de 5 a 20 s incrementaron la altura de 10 a 50 %, diámetro de tallo de 5 a 20 % y longitud de la raíz de 5 a 15 %; mientras que, las irradiaciones mayores de 30 s solo afectaron negativamente el porte de la plántula. Del mismo modo, la altura de plántula de pimiento (*Capsicum annuum* L.) aumentó de 2 a 15 %, diámetro de tallo de 5 a 7 % y longitud de la raíz de 4 a 12 % con las dosis de 5 a 30 Gy (Álvarez *et al.*, 2013).

En cuanto a la dinámica del crecimiento de las plantas M₁ el análisis de varianza mostró diferencias significancias a los 25 y 85 ddt en la altura de planta ($P \leq 0.05$) y a los 45 ddt para el diámetro de tallo (Figura 4.2). Las plantas testigo presentaron la mayor altura (14.2 cm) a los 15 ddt en comparación con las plantas de semillas irradiadas (12.0 a 13.5), en cambio a los 75 ddt las plantas de semillas irradiadas con 300 Gy tuvieron la mayor altura (113.53 cm) y mayor grosor de tallo (7.22 mm) con respecto al testigo (6.4 mm) pero a los 55 ddt. Por otro lado, la dosis de 100 Gy produjo las plantas con mayor número de ramas (6) con respecto al testigo (5). El número de flores autofecundadas fue estadísticamente igual en plantas irradiadas y no irradiadas (Figura 4.2).

Los frutos cosechados provenientes de autofecundación en cada dosis fueron partenocárpicos, por consiguiente la autoincompatibilidad no fue alterada, lo que difiere con otras investigaciones. Por ejemplo, en plantas de papa provenientes de semillas irradiadas con dosis de 6 a 10 Krad y plantas de petunia con mutagénesis dirigida (Huang *et al.*, 1994; Hernández y Sosa, 1998) que presentaron frutos con semilla. Los resultados obtenidos en esta investigación permiten sugerir que se realicen cruces de P a P para evaluar las características de los individuos de la siguiente generación (M₂) y observar si alguno de estos tiene frutos con semilla.

Las respuestas observadas en cada indicador del crecimiento se deben a que cada dosis de radiación (100 a 300 Gy) generan diferentes efectos en las células y los tejidos, donde la formación de radicales libres, iones y moléculas excitadas alteran la actividad enzimática (polifenoloxidasas, catalasas, peroxidasas y estererasas) (Chen *et al.*, 2005) y

el balance hormonal, así como pueden acelerar o retardar la división y desdiferenciación de las células, pero, sus efectos positivos contribuyen a una mayor eficiencia en la utilización de las vías bioquímico–metabólicas, las cuales se reflejan sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas (Álvarez *et al.*, 2012).

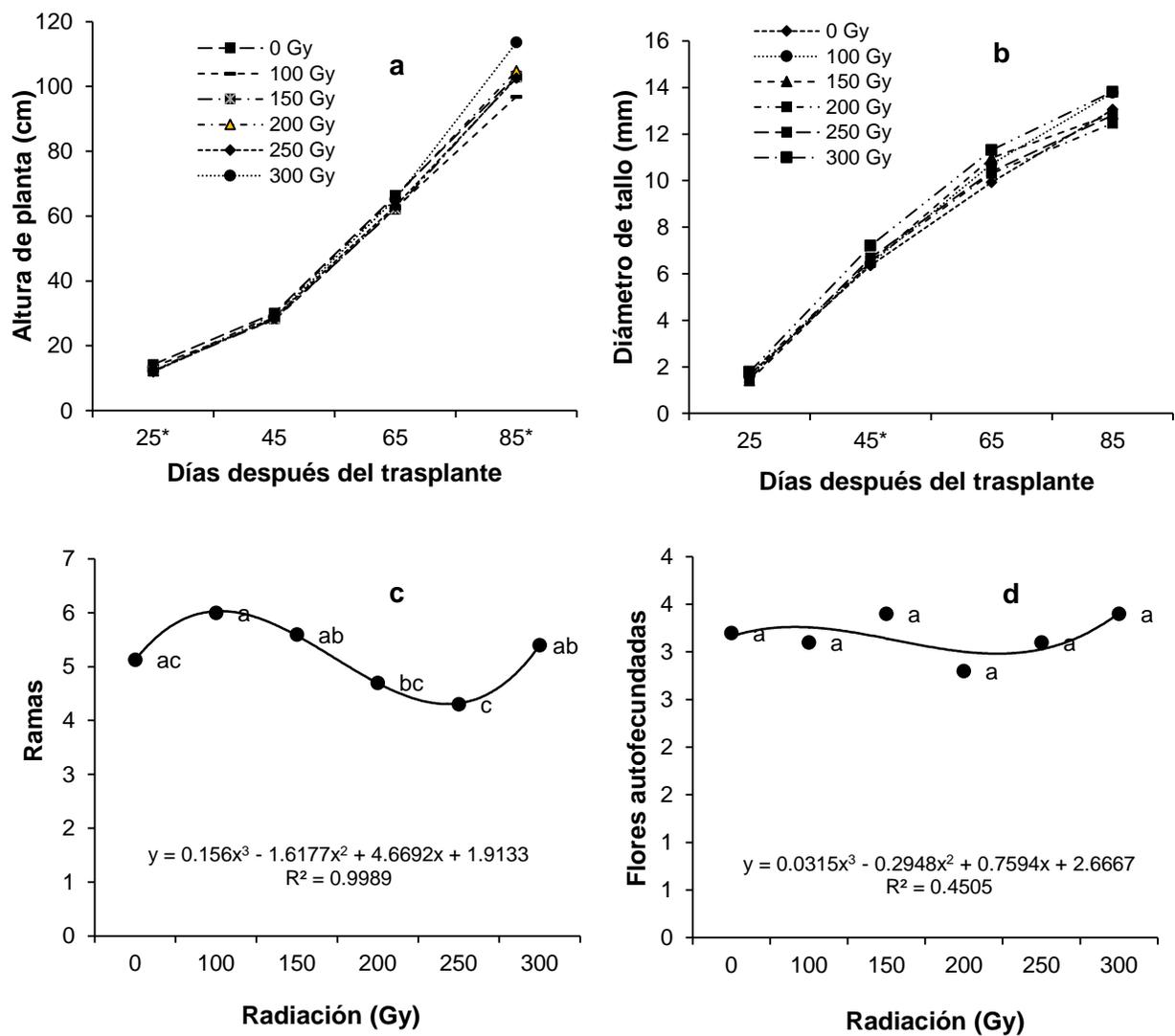


Figura 4.2. Dinámica del crecimiento para las características vegetativas y reproductivas: a) altura, b) diámetro de tallo, c) ramas a la primera bifurcación, d) flores autofecundadas de plantas M_1 de tres variedades de *Physalis ixocarpa* Brot. Cada punto corresponde al promedio de tres variedades de tomate de cáscara. * = significativo ($P \leq 0.05$). Medias con letras iguales en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05.

López-Mendoza *et al.* (2012) observaron que las semillas de *C. annuum* L. irradiadas con 120 Gy originaron plantas más altas (73.3 cm) que la dosis de 100 Gy (61.2 cm). También, irradiaciones de 5 y 20 Gy a semillas de *S. lycopersicum* L., incrementaron de 5 a 20 % la altura y grosor de tallo de la planta; pero las dosis de 75 a 800 Gy disminuyeron estos indicadores (Ramírez *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2011).

Variedades

La variedad Verde Puebla presentó los mayores porcentajes de germinación y supervivencia de plántulas (73 %) y la variedad San Miguel obtuvo los porcentajes más bajos (60 %) (Cuadro 4.3). Destaca que los porcentajes de germinación de semilla y supervivencia de plántulas fueron iguales pues no hubo mortandad de plántulas en el lapso de 60 d. Este comportamiento, también se observó en semillas irradiadas con rayos gamma de dos variedades de frijol chino (*Vigna unguiculata* L. Walp) tuvieron una supervivencia de plántulas de 67 a 86 % (Lemus *et al.*, 2002).

Los caracteres de crecimiento de las plántulas (altura, diámetro de tallo y longitud de la raíz) fueron estadísticamente iguales entre las tres variedades de tomate de cáscara (Cuadro 4.3). La falta de respuesta en el crecimiento se debe a que después de la emergencia hasta un periodo de 32 a 40 dds el crecimiento del eje principal de la plántula es lento (Mulato *et al.*, 1987; Santiaguillo y Peña, 1997).

Cuadro 4.3. Media de las variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) para los caracteres de vigor de la semilla y plántula.

Variedad	Pg (%)	PSp (%)	Ap (cm)	DTp (mm)	LRp (cm)
Amarillo	62.33 b	62.33 b	3.34 a	1.17 a	8.72 a
Verde	72.92 a	72.92 a	3.62 a	1.18 a	8.71 a
Morado	59.58 b	59.58 b	3.36 a	1.10 a	8.12 a

Pg= Porcentaje de germinación de la semilla. PSp= Porcentaje de supervivencia de plántulas. Ap= Altura de plántula. DTp= Diámetro de tallo. LRp= Longitud de la raíz de la plántula. Medias con letra igual en la misma columna no son estadísticamente diferente (Tukey, 0.05). Promedios de seis dosis de radiación.

En otras investigaciones se ha reportado diferencias en el porte de plántulas de *L. esculentum* de semillas irradiadas con rayos X de las variedades Inca 9-1, Lignon, Campbell 28 y Mallac-10 de 15 a 80 % (Ramírez *et al.*, 2006) y plantas de frijol chino (variedades TC9 y A-4) de 0.3 a 1.4 cm provenientes de semillas irradiadas con rayos gamma (Lemus *et al.*, 2002). Este crecimiento diferencial también se observó en plantas de tres variedades (Cabernet Franc, 3309 y Helwani) de uva (*Vitis vinífera* L.) de semillas tratadas con rayos gamma (Charbaji y Nabulsi, 1999).

El crecimiento vegetativo (altura y diámetro de tallo) de las plantas M₁ de las tres variedades de tomate de cáscara aumentó conforme avanzó su edad (15 a 85 ddt) (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4 Medias de los caracteres del crecimiento y reproductivos de la planta por variedad de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.).

Variedad	Días después del trasplante (ddt)				NRB
	25	45	65	85	
APT (cm)					
Amarillo	13.55 a	33.95 a	74.59 a	116.6 a	4.02 c
Verde	11.94 ab	26.87 b	63.15 b	99.63 b	5.13 b
Morado	12.68 b	25.97 b	54.88 c	95.73 b	6.42 a
DTP (mm)					
Amarillo	1.63 a	2.50 b	10.88 a	13.25 a	2.50 b
Verde	1.66 a	2.40 b	11.11 a	13.17 a	2.40 b
Morado	1.52 a	4.58 a	9.82 b	12.97 a	4.58 a

APT= Altura de planta. DTP= Diámetro de tallo. NRB = Número de ramas a la primera bifurcación. NFA = Número de flores autofecundadas. Medias con letras iguales en la misma columna en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05. Promedios de seis dosis de radiación.

La variedad Amarillo presentó las plantas con mayor crecimiento en comparación con las variedades Verde Puebla y Morado; siendo esta última la que produjo plantas de

menor porte y grosor de tallo, pero presentaron el mayor número de ramas y flores autofecundadas (Cuadro 4.4), pues son de tipo erecto y producen más ramas con respecto a las otras variedades, ya que a partir de los 40 dds se producen ramas, pero después de los 80 dds el crecimiento es lento (Santiaguillo y Peña, 1997). Además, las condiciones atmosféricas (temperatura y humedad), disponibilidad de agua, nutrición y manejo agronómico, también influyen en el crecimiento de la plantas, aunque en el presente estudio el sistema de producción fue auxiliado con hidroponía en invernadero.

Los frutos cosechados provenientes de flores autofecundadas fueron partenocárpicas, por consiguiente la autoincompatibilidad no fue alterada. Por lo tanto, es importante evaluar la siguiente generación de plantas (M_2) provenientes de cruza P a P de los individuos sobresalientes.

Dosis x Variedades

En el presente estudio, la interacción dosis x variedad fue significativa en algunas variables del vigor, como la germinación de la semilla y supervivencia de plántulas, y en las características del crecimiento de plantas, como altura, diámetro de tallo y número de ramas (Figura 4.1 y 4.2); estos resultados indican que el crecimiento de las plantas M_1 fue afectado por el tipo de variedad (habito de crecimiento rastrero o erecto) (Cuadro 4.3 y 4.4) y su interacción con las dosis, pues la expresión de la radiación dependerá de la etapa fenológica en la que se encuentre la planta (muestreos) y la dosis de radiación, así como de 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 (Cepero *et al.*, 2002; De Souza *et al.*, 2006). Además, es importante mencionar que cada especie presentará una respuesta particular a la dosis de radiación absorbida (Ramírez *et al.*, 2006). Esta interacción se ilustra con las variables más relacionadas con el vigor y crecimiento de las plantas de tomate de cáscara, es decir, la supervivencia de plántulas, altura de planta y el número de ramas (Figura 4.3).

Las semillas de la variedad Verde Puebla sin irradiar e irradiadas con las dosis de 200 y 250 Gy presentaron el mayor número de plántulas vivas (90.5, 94.5 y 100,

respectivamente), así como las semillas sin irradiar de la variedad Amarillo con 95.5 %; sin embargo, en las demás combinaciones el porcentaje fue menor de 85 % (Figura 4.3i).

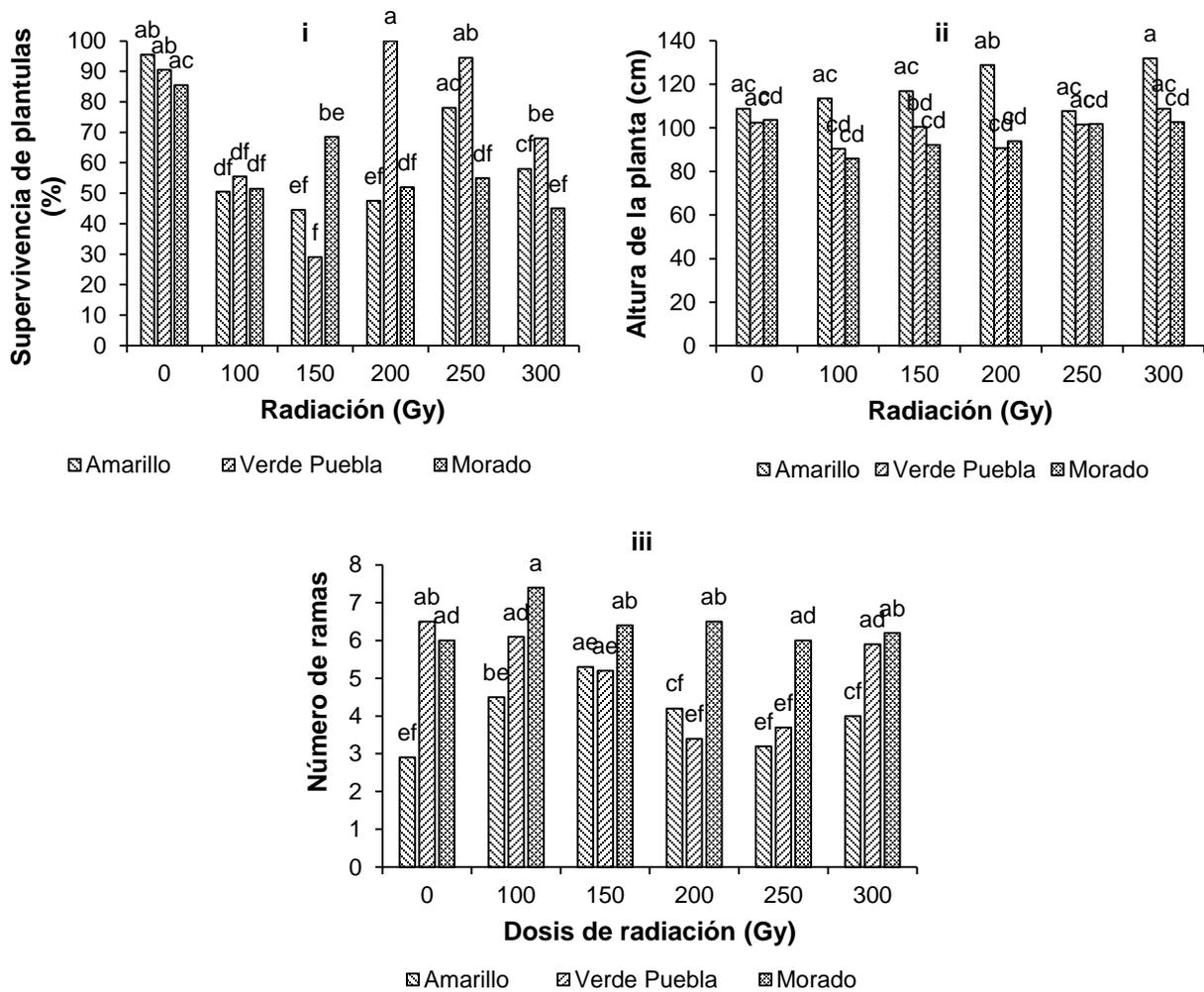


Figura 4.3. Interacción dosis de rayos gamma ^{60}Co x variedades en las variables supervivencia (i); altura a los 85 ddt (ii); número de ramas (iii) de plantas M_1 de tres variedades *Physalis ixocarpa* Brot. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Las plantas de la variedad Amarillo de semillas irradiadas con las dosis de 200 y 300 Gy presentaron las mayores alturas a los 45 y 95 ddt que las plantas de la variedad Verde Puebla tratadas con la dosis de 300 Gy (110.40 cm); mientras que, el resto de las plantas presentaron alturas menores de 105.00 cm (Figura 4.3ii). Sin embargo, las plantas

provenientes de semillas de irradiadas con 100 Gy de la variedad Morado presentaron mayor número de ramas (7) después las plantas de tomate Amarillo de semillas no irradiadas y Morado de semillas irradiadas con 150 y 200 Gy (6, 6 y 6, respectivamente); mientras que, el resto de las plantas produjeron menos de 6 ramas (Figura 4.3iii).

4.5. CONCLUSIONES

La germinación de la semilla y supervivencia de plántulas se redujo con las dosis de radiación y por tipo de variedad de tomate de cáscara.

La variedad no influyó en el vigor de la plántula, sin embargo, dosis mayores de 200 Gy redujeron la altura y longitud de la raíz de la plántula.

La altura y diámetro de tallo fueron afectados inconsistentemente por la variedad y las dosis de radiación; mientras que las dosis de bajas aumentaron el número de ramas. La variedad Morado originó las plantas con más ramas y flores autofecundadas.

La autoincompatibilidad no fue alterada por las de diferentes dosis de rayos gamma ^{60}Co .

4.6. LITERATURA CITADA

Álvarez F. A., L. Chávez S., R. Ramírez F., R. Pompa B. y W. Estrada P. (2012)

Indicadores fisiológicos en plántulas de *Solanum lycopersicum* L., procedentes de semillas irradiadas con rayos X. *Biotecnología Vegetal* 12:173-177.

Álvarez A., R. Ramírez, L. Chávez, Y. Camejo S., L. Licea C., E. Porras y B. García

(2011) Efecto 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* 107:290-299.

Álvarez F. A., L. Chávez S., R. Ramírez F., W. Estrada P., Y. Estrada L. y A.

Maldonado R. (2013) Efecto del tratamiento de semillas con bajas dosis de rayos X en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Nucleus* 53: 14-18.

Baek M. H., J. H. Kim, B. Y. Chung, J. S. Kim and I. S. Lee (2005) Alleviation of salt

stress by low dose γ -irradiation in rice. *Biología Plantarum* 49: 273-276.

Cepero A., R. Mesa, M. García y J. Suárez (2002) Efecto de la radiación láser en

semillas de *Albizia lebleck*. I Fase de semillero. *Pastos y Forrajes* 25: 181-187.

- Chakravarty B. and S. Sen (2001)** Enhancement of regeneration potential and variability by γ -irradiation in cultured cells of *Scilla indica*. *Biologia Plantarum* 44: 189-193.
- Charbaji T. and I. Nabulsi (1999)** Effect of low doses of gamma irradiation on in vitro growth of grapevine. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 57: 129-132.
- Chen Y. P., Y. J. Liu, X. L. Wang, Z. Y. Ren and M. Yue (2005)** Effect of microwave and He-Ne laser on enzyme activity and biophoton emission of *Isatis indigotica* Fort. *Journal of Integrative Plant Biology* 47:849-855.
- De Souza A., D. García, L. Sueiro, F. Gilart, E. Porras and L. Licea (2006)** Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics* 27: 247-257.
- Fuchs M., V. González, S. Castroni, E. Díaz y L. Castro (2002)** Efecto de la radiación gamma sobre la diferenciación de plantas de caña de azúcar a partir de callos. *Agronomía Tropical* 52: 311-324.
- Gutiérrez-Castorena M. C., J. Hernández E., C. A. Ortiz-Solorio, R. Anicua S. y M. E. Hernández L. (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: 183-196.
- Hernández A. M. y R. C. Sosa (1998)** Uso de mutagenos en el mejoramiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Latinoamericana de la Papa* 1: 104-119
- Honda I., K. Kikuchi, S. Matsuo, M. Fukuda, H. Saito, H. Ryuto, N. Fukunishi and T. Abe (2006)** Heavyion-induced mutants in sweet pepper isolated by M_1 plant selection. *Euphytica* 152: 61-66.
- Huang S., H. S. Lee., B. Karunanandaa and T. H. Kao (1994)** Ribonuclease activity of *Petunia inflata* S proteins is essential for rejection of self-pollen. *The Plant Cell* 6:1021-1028.
- Iglesias-Andreu L. G., L. R. Sánchez-Velásquez, Y. Tivo-Fernández, M. Luna-Rodríguez, N. Flores-Estévez, J. C. Noa-Carrazana, C. Ruiz-Bello y J. L. Moreno-Martínez (2010)** Efecto de radiaciones gamma en *Abies religiosa* (Kunth) Schldt. et Cham. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16:5-12.

- Inzunza C. J. F., A. García V., A. Carballo C. y A. Peña L. (1999)** Viabilidad, tamaño del pólen y de la semilla en genotipos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Agricultura Técnica en México* 25: 69-77.
- Kim J. H., B. Y. Chung, J. S. Kim and S. G. Wi (2005)** Effects of *in Planta* gamma-irradiation on growth, photosynthesis, and antioxidative capacity of red pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Journal of Plant Biology* 48: 47-56.
- 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 Plant Biology* 47: 314-321.
- Lemus Y., J. R. Méndez-Natera, J. R. Cedeño y V. Otahola-Gómez (2002)** Radiosensibilidad de dos genotipos de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) a radiaciones gamma. *Revista UDO Agrícola* 2:22-28.
- López-Mendoza H., J. C. Carrillo-Rodríguez y 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: 77-81.
- Mendel Y. M. (1951)** The Cytotaxonomy and Genetics of *Physalis*. *Proceedings of the American Philosophical Society* 95: 132-183.
- Mulato B. J., V. M. Fernández O. y S. Jankiewicz L. (1987)** Tomate de cáscara: desarrollo y fenología. *Revista Chapingo* 56-57: 44-47.
- Muszyński S. and B. Gladyszewska (2008)** Representation of He-Ne laser irradiation effect on radish seeds with selected germination indices. *International Agrophysics* 22: 151-157.
- Pandey K. K. (1957)** Genetics of self incompatibility in *Physalis ixocarpa* Brot: a new system. *American Journal of Botany* 44: 879-887.
- Peña L. A y J. F. H. Santiaguillo (1999)** Variabilidad genética de tomate de cáscara en México. Boletín Técnico Núm. 2. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 26 p.

- Peña L. A., J. D. G. Molina, F. S. Márquez, J. C. Sahagún, J. C. Ortiz y T. S. Cervantes (1999)** Heterosis intravarietal en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 22: 199-213.
- Peña-Lomelí A., J. D. Molina-Galán, T. Cervantes-Santana, F. Márquez-Sánchez, J. Sahagún-Castellanos y J. Ortiz-Cereceres (1998)** Heterosis intervarietal en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 4: 31-37.
- Ponce V. J. J., A. Peña-Lomelí, J. E. Rodríguez-Pérez, R. Mora-Aguilar, R. Castro-Brindis y N. Magaña L. (2012)** Densidad y poda en tres variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) cultivado en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 18: 325-332.
- Ramírez R., L. M. González, Y. Camejo, N. Zaldívar e 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.
- Santiaguillo H. J. F. y A. Peña L. (1997)**. Tomate de cáscara: ¡elija su variedad!. *Agrocultura para el Agricultor Diversificado* 8: 12-14.
- Santiaguillo H. J. F., T. Cervantes S. y A. Peña L. (2004)** Selección para rendimiento y calidad de fruto de cruces planta x planta entre variedades de tomate de cáscara. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:85-91.
- Santiaguillo-Hernández J. F., T. Cervantes-Santana, A. Peña-Lomelí, J. D. Molina-Galán y J. Sahagún-Castellanos (2005)** Polinización controlada en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11:67-71.
- SAS Institute (2002)** SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1-7. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Sigala M. T., C. E. Ramírez B. y A. Peña L. (1994)** Determinación de azúcares simples y acidez en colectas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 1: 141-143.
- SNICS, Servicio nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2018)** Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Ciudad de México.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/401833/CNVV3erTrim18_web_.pdf
(Septiembre 2017).

Tomlekova N., V. Todorova, and S. Daskalov (2007) Creating variation in pepper (*Capsicum annuum* L.) through induced mutagenesis. *Plant Sciences* 44:44-47.

Wi S. G., B. Y. Chung, J. H. Kim, M. H. Baek, D. H Yang, J. W. Lee and J. S. Kim (2005) Ultrastructural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stem after gamma irradiation. *Journal of Plant Biology* 48: 195-200.

DISCUSIÓN GENERAL

Las investigaciones en uchuva y tomate de cáscara se han incrementado debido al interés por estudiar el origen y evolución de esas especies y por las características de sus frutos; pues éstos se consumen como fruto fresco o en ensaladas por su sabor agridulce; se procesan en mermelada o jugos en el caso de la uchuva y en salsas en caso del tomate. Además, tienen propiedades alimenticias y medicinales, ya que son fuente de vitamina A, C, y del complejo B, como tiamina, niacina y vitamina B12; presentan altos niveles de proteína y fósforo; pero bajo contenido de calcio. Por otro lado, tienen la capacidad de mejorar la salud, pues se les atribuyen características inmunoestimulantes, anticancerígenas, antibacterianas, antivirales y diuréticas, entre otras (Fischer *et al.* 20014). La producción de uchuva está destinada a la exportación al ser considerada una fruta exótica por los países de la Unión Europea; mientras que el fruto de tomate es exportado a Estados Unidos y Canadá para la elaboración de salsas al ser sustituto del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Sigala *et al.*, 1994)

A pesar de su importancia, estas especies presentan un mejoramiento genético limitado, por lo que su proceso de producción se sustenta en gran medida en variedades nativas por la falta de variedades mejoradas que a la vez tienen un precio alto. Las semillas son el método de propagación más común en estas especies de *Physalis*; pero, originan plantas con características agronómicas y calidad de fruta muy variable (Almanza, 2000). Esta variación fenotípica se debe a que el 46 % de las flores de uchuva se autopolinizan (Lagos *et al.*, 2008) y el resto de las flores son de polinización libre (Santana y Angarita, 1997). En el tomate de cáscara el 100 % de las flores son de polinización libre (Peña-Lomelí *et al.*, 2008). Este comportamiento más el efecto de las condiciones ambientales y el manejo del cultivo dificultan la obtención de variedades comerciales uniformes mediante métodos de mejoramiento genético convencionales (Fischer, 2000; Mazorra *et al.*, 2006). Por tal motivo, se requiere iniciar programas de mejoramiento genético en uchuva (Fischer, 2000). Por otro lado, en el cultivo de tomate de cáscara, se busca generar híbridos p que requiere de reducir la autoincompatibilidad que presenta la planta para estar en condiciones de desarrollar líneas endogámicas por autofecundación (Peña y Márquez, 1990; Peña *et al.*, 2011).

Las investigaciones en inducción de mutaciones por radiación se han realizado en cultivos básicos como el maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum* spp.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Kharkwal *et al.*, 2011), solanáceas como el tomate (*Solanum esculentum* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.) y leguminosas como el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), soya (*Glycine max* L.) y cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) (Oladosu *et al.*, 2016) donde se han enfocado en reducir el porte de la planta, el tiempo a floración, cambios en el tamaño y características de fruto; este último, con mayor contenido de proteína, aceite y almidón. Sin embargo, su aplicación en la agricultura es limitada por la escasa información en la selección de las dosis óptimas de irradiación y el agente mutagénico, ya que los efectos difieren entre dosis y cultivos (Ali *et al.*, 2015). Por otro parte, existe poco interés por los fitomejoradores por evaluar la radiosensibilidad de las especies o generar nuevas variedades, pues el tiempo necesario para estabilizar una mutación de interés es mayor de 5 años; además, de la inseguridad en la salud humana (enfermedades cancerígenas) por el uso de las fuentes de radiación.

Existen escasos resultados con respecto a la respuesta de *P. peruviana* a la irradiación gamma y ninguno en *Physalis ixocarpa*. Además, no existen referencias en las que los rasgos de la planta se midieran a lo largo del ciclo biológico para monitorear el efecto de la aplicación de mutágenos artificiales.

Particularmente, en *P. peruviana* la investigación se ha centrado en estudios relacionados con el manejo agronómico (Fischer *et al.*, 2014), la caracterización cariotípica, morfológica, reproductiva y físico-química del fruto de especies silvestres y cultivadas; también, la inducción de variación en el número de cromosomas en cruces naturales con *P. philadelphica* (Rodríguez y Bueno, 2006; Lagos *et al.*, 2008; Mendoza *et al.*, 2012), pero no se reportan otras investigaciones de mejoramiento genético en esta especie. Mientras que, en *P. ixocarpa*, se destacan estudios de caracterización y manejo agronómico de variedades nativas (Santiaguillo *et al.*, 2004) y resultados de métodos de mejoramiento genético como hibridación, selección masal, familiar de medios hermanos y combinada de medios hermanos y dobles haploides (Peña y Márquez, 1990), pero no existe información de su respuesta morfológica y genética a la radiación gamma como método de mejoramiento.

Por lo tanto, los resultados de esta investigación permiten avanzar en el conocimiento de la radiosensibilidad de la semilla de uchuva a diferentes dosis de radiación; pues la germinación de la semilla no fue afectada; pero, el vigor de la plántula si fue estimulado por dosis intermedias, sin embargo, dosis mayores de 275 Gy disminuyen la supervivencia de las plántulas. Por otro lado, el efecto de las dosis de irradiación no siguió un modelo de respuesta lineal para ninguno de los rasgos de crecimiento de las plantas de uchuva (R^2 de 0.50 * a 0.80 *). Las plantas provenientes de semillas expuestas a dosis bajas o altas de radiación generalmente mostraron valores más bajos que las plantas de semillas irradiadas con dosis intermedias. Las dosis más favorables fueron 125, 150, 175 y 200 Gy, ya que produjeron plantas M_1 de menor altura; pero, con el doble de tallos basales, brotes florales, flores y frutos verdes que las plantas de semillas no irradiadas. Además, en este estudio, las plantas M_1 fueron más precoces, pues florecieron a los 53 ddt (con dosis de 200 Gy) casi una semana antes que el testigo. Por otro lado, las características del fruto (peso, dulzura y firmeza) de las plantas M_1 provenientes de semillas irradiadas con dosis bajas e intermedias fueron similares a las de los frutos de plantas de semillas no irradiadas; el tamaño y la vida de anaquel del fruto no fueron alterados. Estos resultados son alentadores, ya que uno de los propósitos de este programa de mejoramiento genético en uchuva es seleccionar los genotipos con floración temprana y de alto rendimiento; por lo tanto, los mutantes sobresalientes de uchuva se utilizarán para la siguiente generación (M_2).

En cuanto, a la respuesta del tomate de cáscara los resultados indicaron que es una especie sensible a la radiación (100 a 300 Gy) pues la germinación de la semilla, supervivencia y el crecimiento (altura, longitud de la raíz) de las plántulas se redujeron entre 32 y 57 %. A pesar del efecto negativo en el vigor de la plántula; en las evaluaciones realizadas durante el ciclo del cultivo se identificaron individuos M_1 sobresalientes en rasgos de crecimiento (altura, grosor de tallo, ramas) y fructificación (flores autofecundadas); específicamente, las plantas provenientes de semillas irradiadas con las dosis de 100 y 300 Gy; sin embargo, ninguna de las dosis de irradiación alteraron la autoincompatibilidad. Por otra parte, el tipo de variedad influyó constantemente en las características del vigor de la plántula y el crecimiento de las plantas adultas, siendo las

variedades Manzano y Verde Puebla las de mayor crecimiento, pero en fructificación fue San Miguel. Al igual manera que en la investigación anterior, el estudio del tomate de cáscara puede ser tomado como base para desarrollar un programa de mejoramiento que contribuya a la formación de genotipos con los estándares exigidos para la producción y comercialización del fruto, puesto que no se cuentan con resultados del empleo de inducción de mutaciones en esta especie. Es por esto que, los individuos más sobresalientes (M_1) se utilizarán en una hibridación para evaluar las características de la siguiente generación.

CONCLUSIONES GENERALES

El estudio de la respuesta de las semillas de uchuva a diferentes dosis de rayos gamma indicó que la germinación de estas no se ve reducida; pero, si estimulada por cualquier dosis de irradiación; así como el vigor de la plántula (altura; diámetro de tallo; longitud de entrenudo) con las dosis intermedias (125, 150, 175 y 200 Gy); sin embargo, el color de las hojas y la longitud de la raíz fue menor con cualquier dosis; pero la supervivencia de las plántulas se redujo con dosis mayores de 300 Gy.

Se identificaron plantas M₁ de uchuva sobresalientes para establecer un programa de mejoramiento genético, pues todas las dosis de radiación originaron plantas de menor tamaño; pero, las dosis intermedias (125, 150, 175 y 200 Gy) estimularon el crecimiento vegetativo (grosor de tallo; tallos basales) y los rasgos de fructificación (botones florales; flores; frutos verdes) de las plantas M₁ de uchuva, particularmente la dosis de 200 Gy que produjo genotipos de floración temprana. Las características de los frutos de las plantas provenientes de semillas irradiadas con las dosis bajas e intermedias no fueron afectadas por la radiación; solamente las dosis mayores de 150 Gy tuvieron un efecto negativo en el peso, dulzura y firmeza.

Con respecto al estudio de la radiosensibilidad, las semillas de tomate de cáscara fueron más sensibles a la irradiación (100 a 300 Gy) pues la emergencia, el crecimiento (altura, longitud de la raíz) y la supervivencia de las plántulas disminuyeron. A pesar de esto, se identificaron plantas M₁ con características sobresalientes en crecimiento (altura, grosor de tallo, ramas) y fructificación (flores autofecundadas), específicamente las plantas provenientes de semillas irradiadas con las dosis de 100 y 300 Gy; sin embargo, la autoincompatibilidad no fue alterada. Cabe señalar que el tipo de variedad influyó constantemente en las características del vigor de la plántula y crecimiento de las plantas adultas.

Finalmente, estas investigaciones serán precursoras para futuras investigaciones sobre programas de mejoramiento genético de uchuva y tomate de cáscara, para identificar nuevos genotipos con madurez temprana y alto rendimiento para su producción en invernadero con fines de exportación del fruto. Esto es particularmente mejorado cuando la especie puede propagarse como la uchuva.

LITERATURA CITADA

- Ahloowalia B. S. and M. Maluszynski (2001)** Induced mutations – a new paradigm in plant breeding. *Euphytica* 118:167-173. doi: 10.1023/A:1004162323428
- Aladjajyan A. (2007)** The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria. *Journal Central European Agriculture* 8: 369-380.
- Ali H., Z. Ghori, S. Sheikh and A. Gul (2015)** Effects of gamma radiation on crop production. *In: Crop Production and Global Environmental Issues*. K. R. Hakeem (ed.). Springer International Publishing. Cham, Switzerland. pp: 27-78. doi: 10.1007/978-3-319-23162-4_2
- Almanza M. P. J. (2000)** Propagación. *In: Producción, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (Physalis peruviana L.)*. V. J. Flórez R., G. Fischer y A. D. Sora R. (eds.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 27-40.
- Álvarez A., R. Ramírez, L. Chávez, Y. Camejo S., L. Licea C., E. Porras y B. García (2011)** Efecto 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: 290-299.
- Álvarez F. A., L. Chávez S., R. Ramírez F., W. Estrada P., Y. Estrada L. y A. Maldonado R. (2013)** Efecto del tratamiento de semillas con bajas dosis de rayos X en plantas de pimiento (*Capsicum annuum L.*). *Nucleus* 53: 14-18.
- Amjad M. and M. A. Anjum (2003)** Effect of post-irradiation storage on the radiation-induced damage in onion seeds. *Asian Journal of Plant Sciences* 2:702-707. doi: 10.3923/ajps.2003.702.707
- Baek M. H., J. H. Kim, B. Y. Chung, J. S. Kim and I. S. Lee (2005)** Alleviation of salt stress by low dose γ -irradiation in rice. *Biology Plantarum* 49: 273-276. doi: 10.1007/s10535-005-3276-3
- Bhargava Y. R. and A. S. Khalatkar (1987)** Improved performance of *Tectona grandis* seeds with gamma irradiation. *Acta Horticulturae* 215:51-54. doi: 10.17660/ActaHortic.1987.215.7

- Bonilla B. M. L., K. Espinosa P., A. M. Posso T., H. D. Vásquez A. y J. E. Muñoz F. (2008)** Caracterización molecular de 43 accesiones de uchuva de seis departamentos de Colombia. *Acta Agronómica* 57: 109-115.
- Bonilla M. y K. Espinosa (2003)** Colección, caracterización fenotípica, molecular de poblaciones de uchuva *Physalis peruviana* L. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Colombia. 94 p.
- Canul-Ku J., F. García-Pérez, E. Campos-Bravo, E. J. Barrios-Gómez, E. De la Cruz-Torres, J. M. García-Andrade, F. J. Osuna-Canizalez y S. Ramírez-Rojas (2012)** Efecto de la irradiación sobre nochebuena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) en Morelos. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 3: 1495-1507.
- Caro-Melgarejo D. P., S. Y. Estupiñán-Rincón, L. Y. Rache-Cardenal y J. C. Pacheco-Maldonado (2012)** Efecto de rayos gamma sobre yemas vegetativas de *Physalis peruviana* L. *Acta Agronómica* 61: 305-314. doi: 10.15446/acag
- Cepero A., R. Mesa, M. García y J. Suárez (2002)** Efecto de la radiación láser en semillas de *Albizia lebbleck*. I Fase de semillero. *Pastos y Forrajes* 25: 181-187.
- Chakravarty B. and S. Sen (2001)** Enhancement of regeneration potential and variability by γ -irradiation in cultured cells of *Scilla indica*. *Biologia Plantarum* 44: 189-193. doi: 10.1023/A:1010282805522
- Chang J. C., C. C. Lin, S. J. Wu, D. L. Lin, S. S. Wang, C. L. Miaw and L. T. Ng (2008)** Antioxidative and hepatoprotective effects of *Physalis peruviana* extract against acetaminophen-induced liver injury in rats. *Pharmaceutical Biology* 46: 724-731. doi: 10.1080/13880200802215768
- Chen Y. P., Y. J. Liu, X. L. Wang, Z. Y. Ren and M. Yue (2005)** Effect of microwave and He-Ne laser on enzyme activity and biophoton emission of *Isatis indigotica* Fort. *Journal of Integrative Plant Biology* 47: 849-855. doi: 10.1111/j.1744-7909.2005.00107.x
- Chopra V. L. (2005)** Mutagenesis: investigating the process and processing the outcome for crop improvement. *Current Science* 89: 353- 359.
- Cubero J. I. (2002)** Introducción a la Mejora Genética Vegetal. Mundi-Prensa. Madrid. España. 565 p.

- De la Cruz, E. (2010)** Aplicación de la radiación al mejoramiento de los cultivos. *In: Actividad Científica y tecnológica en el ININ. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Ocoyoacac, Estado de México. pp: 381-394.*
- De la Fé C., M. Romero, R. Ortiz y M. Ponce (2000)** Radiosensibilidad de semillas de soya (*Glycine max* L.) a los rayos gamma ⁶⁰Co. *Cultivos Tropicales* 21:43-47.
- Fischer G. (2000)** Crecimiento y desarrollo. *In: Producción, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (Physalis peruviana L.). V. J. Flórez R., G. Fischer y A. D. Sora R. (eds.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. pp: 9-26.*
- Fischer G., A. Herrera and P. J. Almanza (2011)** Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *In: Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits. Vol. 2. Açaí to Citrus. E. M. Yahia (ed.). Woodhead Publishing. Cambridge, UK. pp: 374-396.*
- Fischer G., P. J. Almanza-Merchán y D. Miranda (2014)** Importancia y cultivo de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura* 36:1-15. doi: 10.1590/0100-2945-441/13
- Fischer, G. and P. Lüdders (1997)** Developmental changes of carbohydrates in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits in relation to the calyx and the leaves. *Agronomía Colombiana. 14: 95-107.*
- Fischer G. y D. Miranda (2012)** Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *In: Manual para el Cultivo de Frutales en el Trópico. G. Fischer (ed.). Produmedios. Bogotá. Colombia. pp: 851-873.*
- Fischer G. y P. J. Almanza M. (1993)** La uchuva (*Physalis peruviana* L.) una alternativa promisoría para las zonas altas de Colombia. *Agricultura Tropical* 30: 79-87.
- Fischer G., R. Florez, D. Angel y R. Sora (2000)** Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá. Colombia. 175 p.
- Fischer G., G. Ebert and P. Lüdders (2007)** Production, seeds and carbohydrate contents of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits grown at two contrasting Colombian altitudes. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 81: 29-35.

- Fischer G., W. Piedrahita, D. Miranda, y J. Romero (2005)** Avances en Cultivo Poscosecha y Exportación de la Uchuva (*Physalis peruviana* L) en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 220 p.
- Floréz R., G. Fisher y A. Sora. (2000)** Producción, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (*Physalis peruviana*). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 175 p.
- Fuchs M., V. González, S. Castroni, E. Díaz y L. Castro (2002)** Efecto de la radiación gamma sobre la diferenciación de plantas de caña de azúcar a partir de callos. *Agronomía Tropical* 52:311-324.
- Garza G. R., E. De la Cruz T., D. Garza G. y C. Jacinto (2012)** Efecto de varias dosis de rayos gamma sobre genotipos de frijol. Memorias de Resúmenes del XIV Congreso Nacional y IV Internacional de Fitogenética. 24 al 28 de septiembre del 2012. Sociedad Mexicana de Fitogenética. Monterrey, N. L. México. p. 86.
- Garzón-Martínez G. A., Z. I. Zhu, D. Landsman, L. S. Barrero and L. Mariño-Ramírez (2012)** The *Physalis peruviana* leaf transcriptome: assembly, annotation and gene model prediction. *BMC Genomics* 13: 151. doi: 10.1186/1471-2164-13-151
- González L. M., L. Argente, A. Estrada, N. Saldivar y R. Ramírez (2005)** Evaluación de la tolerancia a la sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtenidos en Cuba por inducción de mutaciones. *Cultivos Tropicales* 26: 65-69.
- González E. M. S., M. González E. y M. A. Márquez L. (2007)** Vegetación y Ecorregiones de Durango. Plaza y Valdés-CIIDIR IPN. México, D. F. 165 p.
- González-Mendoza D., D. Ascencio-Martínez, A. Hau P., V. Mendez-Trujillo, O. Grimaldo-Juárez, J. F. Santiaguillo H., L. Cervantes D. and S. M. Aviles M. (2011)** Phenolic compounds and physiochemical analysis of *Physalis ixocarpa* genotypes. *Scientific research and Essays* 6: 3808-3814. doi: 10.5897/SRE11.570
- Hernández S. J., O. Baltazar B., E. De la Cruz T., Ma. C. Mendoza C., R. Paz y J. L. García (2012)** Curva de radiosensibilidad en tres especies de *Heliconia* con radiación gamma cobalto 60. Memorias de Resúmenes del XIV Congreso Nacional y IV Internacional de Fitogenética. 24 al 28 de septiembre del 2012. Sociedad Mexicana de Fitogenética. Monterrey, N. L., México. p. 87.

- Herrera M. A. M., G. Fischer and M. I. Chacón S. (2012)** Agronomical evaluation of cape gooseberries (*Physalis peruviana* L.) from central and north-eastern Colombia. *Agronomía Colombiana* 30: 15-24.
- Herrera M. A. M., J. D. Ortiz A., G. Fischer and M. I. Chacón S. (2011)** Behavior in yield and quality of 54 cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) accessions from North-eastern Colombia. *Agronomia Colombiana* 29: 189-196.
- Honda I., K. Kikuchi, S. Matsuo, M. Fukuda, H. Saito, H. Ryuto, N. Fukunishi and T. Abe, (2006)** Heavyion- induced mutants in sweet pepper isolated by M1 plant selection. *Euphytica* 152: 61-66. doi: 10.1007/s10681-006-9177-5
- Iglesias-Andreu L. G., L. R. Sánchez-Velásquez, Y. Tivo-Fernández, M. Luna-Rodríguez, N. Flores-Estévez, J. C. Noa-Carrazana, C. Ruiz-Bello y J. L. Moreno-Martínez (2010)** Efecto de radiaciones gamma en *Abies religiosa* (Kunth) Schldt. et. Cham. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16:5-12.
- Jain S. M. (2006)** Mutation-assisted breeding for improving ornamental plants. *Acta Horticulturae* 714:85-98, doi: 10.17660/ActaHortic.2006.714.10
- Kharkwal M. C. (2011)** A brief history of plant mutagenesis. *In*: Nakagawa, H. (eds). Plant Mutation Breeding and Biotechnology Q. Y. Shu Q.Y., B. P. Forster and H. Nakagawa. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. pp: 21-30.
- Kim J. H., B. Y. Chung, J. S. Kim and S. G. Wi (2005)** Effects of *in planta* gamma-irradiation on growth, photosynthesis, and antioxidative capacity of red pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Journal Plant Biology* 48: 47-56. doi: 10.1007/BF03030564
- 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 Plant Biology* 47: 314-321. doi.org/10.1007/BF03030546
- Kumari R. and Y. Singh (1996)** Effect of gamma rays and EMS on seed germination and plant survival of *Pisum sativum* L. and *Lens culinaris* Medic. *Neo Botanica* 4: 25-29.

- Lagoda P. J. L. (2011)** Effects of radiation on living cells and plants. *In: Plant Mutation and Biotechnology*. Q. Y. Shu, B. P. Forster and H. Nakagawa (eds.). International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. pp: 123-134.
- Lagos B. T. C., F. A. Vallejo C., H. Criollo E. y J. E. Muñoz F. (2008)** Biología reproductiva de la uchuva. *Acta Agronómica* 57: 81-87.
- Lemus Y., J. R. Méndez-Natera, J. R. Cedeño y V. Otahola-Gómez (2002)** Radiosensibilidad de dos genotipos de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) a radiaciones gamma. *Revista Científica UDO Agrícola* 2:22-28.
- Licodiedoff S., L. A. D. Koslowski and R. H. Ribani (2013)** Flavonol rates of gosseberry fruits *Physalis peruviana* determined by HPLC through the optimization and validation of the analytic method. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering* 3: 1-6. doi: 10.5923/j.food.20130301.01
- Ligarreto G. A., M. Lobo and A. Correa (2005)** Recursos genéticos del género *Physalis* en Colombia. *In: Avances en Cultivo, Poscosecha y Exportación de la Uchuva (Physalis peruviana L.) en Colombia*. G. Fischer, D. Miranda, W. Piedrahíta and J. Romero (eds.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 9-28.
- 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 grown in a greenhouse. *Acta Horticulturae* 947: 77-81. doi: 10.17660/ActaHortic.2012.947.7
- Maluszynski M., I. Szarejko, C. R. Bhatia, K. Nichterlein and P. J. L. Lagoda (2009)** Methodologies for generating variability Part 4: Mutation techniques. *In: Plant Breeding and Farmer Participation*. S. Ceccarelli, E. P. Guimarães and E. Weltzien (eds.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp: 159-194.
- Matsumura A., T. Nomizu, N. Furutani, K. Hayashi, Y. Minamiyama and Y. Hase (2010)** Ray florets color and shape mutants induced by $^{12}\text{C}^{5+}$ ion beam irradiation in chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* 123: 558-561. doi: 10.1016/j.scienta.2009.11.004

- Mazorra M. F., A. P. Quintana, D. Miranda, G. Fischer y M. Chaparro V. (2006)** Aspectos anatómicos de la formación y crecimiento del fruto de uchuva *Physalis peruviana* (Solanaceae). *Acta Biológica Colombiana* 11: 69-81.
- Mba C., R. Afza and S. Bado (2010)** Induced mutagenesis in plants using physical and chemical agents. *In: Plant Cell Culture: Essential Methods*. M. R. Davey, P. Anthony (eds). John Wiley & Sons. Chichester, UK. pp: 111-130.
- Mendoza C. J., A. Rodriguez S. y P. Millán C. (2012)** Caracterización físico química de la uchuva (*Physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 10: 188-196.
- Montes H. S. (1991)** Tomate de cáscara (*Physalis philadelphica* Lam.). *In: Avances en el Estudio de los Recursos Fitogenéticos de México*. R. Ortega P., G. Palomino H., F. Castillo G., V. A. González H. y M. Livera M. (eds.). Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo, Estado de México. pp: 251-259
- Mora-Aguilar R., A. Peña-Lomelí, E. López-Gaytán, J. J. Ayala-Hernández y D. Ponce-Aguirre (2006)** Agrofenología de *Physalis peruviana* L. en Invernadero y Fertirriego. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12: 57-63.
- Moreno M. M., A. L. Peña, C. J. Sahagún, P.J. Rodríguez y A. R. Mora (2002)** Varianza aditiva, heredabilidad y correlaciones en la variedad M1-Fitotecnia de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 231-237
- Mortazavi S. M. J., M. Ghiassi- Nejad and T. Ikushima (2002)** Do the findings on the health effects of prolonged exposure to very high levels of natural radiation contradict current ultra-conservative radiation protection regulations? *International Congress Series* 1236:19-21. doi: 10.1016/S0531-5131(02)00291-1
- Morton J. F. and O. S. Russell (1954)** The cape gooseberry and the Mexican husk tomato. *Florida State Horticultural Society* 67: 261-266.
- Muckerheide J. (2004)** There has never been a time that the beneficial effects of low dose ionizing radiation were not known. Center for Nuclear Technology and Society at WPI. Radiation, Science, and Health. Worcester, MA. USA, 4 p.
- Narváez M. (2003)** Producción SIENA. Editorial AGROAPOYO. Bogotá, Colombia. 165 p.

- Oladosu Y., M. Y. Rafii, N. Abdullah, G. Hussin, A. Ramli, H. A. Rahim, G. Miah and M. Usman (2016)** Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 30: 1-16.
- Ortiz R., C. De la Fe y M. Ponce (2008)** INCASoy-36: variedad de soya obtenida en cuba a partir de la inducción de mutaciones con los rayos gamma de ⁶⁰Co. *Cultivos tropicales* 29: 73.
- Otahola-Gómez V., M. Aray and Y. Antoima (2001)** Inducción de mutantes para el color de la flor en crisantemos (*Dendranthema grandiflora* (Ram) Tzvelev) mediante radiaciones gamma. *Revista UDO Agrícola* 1: 56-63.
- Pandey K. K. (1957)** Genetics of self-incompatibility in *Physalis ixocarpa* Brot.– a new system. *American Journal of Botany* 44: 879-887.
- Peña L. A. (2001)** Situación actual y perspectivas de la producción y mejoramiento genético de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en México. Primer Simposio Nacional. Técnicas Modernas de Producción de Tomate, Papa y otras Solanáceas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 10 p.
- Peña L. A., J. D. Molina-Galán, J. Sahagún C., J. Ortiz-Cereceres, F. Márquez-Sánchez, T. Cervantes-Santana y J. F. Santiaguillo-Hernández (2008)** Parámetros genéticos en la variedad CHF1 Chapingo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14: 5-11.
- Peña L. A., N. Magaña L., S. Montes H., J. Sánchez M., J. F. Santiaguillo H., O. Grimaldo J. y 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. 87 p.
- Peña L. A. y F. Márquez S. (1990)** Mejoramiento genético del tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo* 71-72: 84-88.
- Peña L. A., J. D. Molina G., F. Márquez S., J. Sahagún C., J. Ortiz C., T. Cervante S. (2002)** Respuestas estimadas y observadas de tres métodos de selección en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 171-178.
- Raghava R. P. and N. Raghava (1989)** Effects of gamma irradiation on fresh and dry weights of plant parts in *Physalis* L. *Geobios* 16: 261-264.

- Ramadan M. F. (2011)** Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): an overview. *Food Research International* 44: 1830-1836. doi: 10.1016/j.foodres.2010.12.042
- Ramírez G. F., V. Robledo T., M. H. Reyes V., L. Escobedo B., M. A. Torres T. y H. T. García O. (2015)** Estudio histológico y morfológico de plantas autotetraploides y diploides de tomate de cáscara. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 12: 2291-2299.
- 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.
- Rangaiah S. (2006)** Induced genetic variation for days to flowering and maturity following hybridization and mutagenesis in chilli (*Capsicum annum* L.). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* 19:382-384.
- Ribeiro A. S., L. Ribeiro G., J. C. Pimentel B., R. P. A. Firmino and R. O. Silva (2014)** Discriminating gamma-irradiated soybean seeds by ¹H NMR-based metabonomics. *Food Control* 36: 266-272. doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.08.040
- Rodríguez C. N. C.y M. L. Bueno A. (2006)** Estudio de la diversidad citogenética de *Physalis peruviana* L. (Solanaceae). *Acta Biológica Colombiana* 11: 75-85.
- Rodríguez A. (2004)** Solanáceas. In: Biodiversidad de Oaxaca. A. J. García M., M. J. Ordóñez D. y M. A. Briones S. (coords). Instituto de Biología UNAM-World Wildlife Fund. México, D. F. pp: 297-303
- Rodrigues E., I. I. Rockenbach, C. Cataneo, L. V. Gonzaga, E. S. Chaves and R. Fett (2009)** Minerals and essential fatty acids of the exotic fruit *Physalis peruviana* L. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 29: 642-645.
- Rop O., J. Mlcek, T. Jurikova and M. Valsikova (2012)** Bioactive content and antioxidant capacity of cape gooseberry fruit. *Central European Journal of Biology* 7: 672-679. doi.org/10.2478/s11535-012-0063-y
- Sadashiv N. B. and D. Kondiram N. (2012)** Effect of mutagens on quantitative characters in M₂ and M₃ generation of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc). *International Journal of Scientific and Research Publications* 2: 1-7.

- Santana G. y A. Angarita (1997)** Regeneración adventicia de somoclonales de Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana* 14:59-65.
- Santiaguillo H. J. F., T. Cervantes S. y A. Peña L. (2004)** Selección para rendimiento y calidad de fruto de cruza planta x planta entre variedades de tomate de cáscara. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27: 85-91.
- Santiaguillo H. J. F. y A. Peña L. (1997)** Tomate de cáscara: elija su variedad. *Revista Agricultura* 8: 12-14.
- Santiaguillo H. J. F., E. Cedillo P. y J. A. Cuevas S. (2010)** Distribución Geográfica del *Physalis* spp. en México. UACH-Prometeo Editores. México, D. F. 245 p.
- Santiaguillo H. J. F., O. Vargas P., O. Grimaldo J., N. Magaña L., F. Caro V., A. Peña L. y J. Sánchez M. (2012)** Perfil del Diagnóstico de la Red de Tomate de Cáscara. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 46 p.
- Santiaguillo H. J. F. y S. Blas Y. (2009)** Aprovechamiento tradicional de las especies de *Physalis* en México. *Revista Geografía Agrícola* 43: 81-86.
- Santos U. I., G. Carrillo, E. T. De la Cruz, E. M. Pedraza, T. Torres y R. Lobato (2012)** La radiación gamma (^{60}Co), su efecto e semillas y plántulas in vitro de eustoma. Memoria de Resúmenes XIIV Congreso Nacional y IV Internacional de Fitogenética. 24 al 28 de septiembre del 2012. Sociedad Mexicana de Fitogenética. Monterrey, N. L., México. p. 89.
- Saray M. C. R y J. Loya R. (1977)** Cultivo de tomate de cáscara en el estado de Morelos. CIAMEC. INIA. Zacatepec, Morelos. 12 p.
- Sawangmee W., T. Taychasinpitak, P. Jompuk and S. Kikuchi (2011)** Effects of gamma-ray irradiation in plant morphology of interspecific hybrids between *Torenia fournieri* and *Torenia baillonii*. *Kasetsart Journal-Natural Science* 45: 803-810.
- SNICS, Servicio nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2018)** Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/401833/CNVV3erTrim18_web_.pdf (Septiembre 2017).

- SIAP-SAGARPA (2015)** Resumen Nacional de Avances Agrícolas por Estado. Producción Anual. Cierre de la Producción Agrícola por Cultivo. Sistema de Información Agrícola y Pecuaria. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. www.siap.gob.mx.
- Sigala M. T., C. E. Ramírez B. y A. Peña L. (1994)** Determinación de azúcares simples y acidez en colectas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 1: 141-143. doi: 10.5154/r.rchsh.1993.09.062
- Trillos G. O., J. M. Cotes T., C. I. Medina C., M. Lobo A. y A. A. Navas A. (2008)** Caracterización morfológica de cuarenta y seis accesiones de uchuva (*Physalis peruviana* L.), en Antioquia, Colombia. *Revista Brasileira de Fruticultura* 30: 708-715.
- Valdez B. A., P. A. Orellana, N. Veitia, y D. Torres (2004)** Crecimiento, regeneración y radiosensibilidad de callos de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido var. "SP 70-1284") tratados con radiación gamma fuente ^{60}Co . *Biotecnología Vegetal* 4: 165-169.
- Vargas P., O., M. Martínez D. y P. Dávila A. (2003)** La familia Solanaceae en Jalisco – El Género *Physalis*–. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. 126 p.
- Viccini L. F. and C. R. Carvalho (2001)** Analysis of gamma radiation-induced chromosome variations in maize (*Zea mays* L.). *Caryologia* 54: 319-327. doi: 10.1080/00087114.2001.10589243
- Wani M. R., M. I. Kozgar and N. Tomlekova (2014)** Mutation breeding: a novel technique for genetic improvement of pulse crops particularly Chickpea (*Cicer arietinum* L.). *In: Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes*. A. Parvaiz, M. R. Wani, M. M. Azooz and P.T. Lam-son (eds.). Springer. New York. pp: 217-248.
- Whitson M. and P. S. Manos (2005)** Untangling *Physalis* (Solanaceae) from the Physaloids: a two-gene phylogeny of the Physalinae. *Systematic Botany* 30: 216-230.
- Wi S. G., B.Y. Chung, J. H. Kim, M. H. Baek, D. H Yang, J. W. Lee and J. S. Kim (2005)** Ultrastructural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stems after gamma irradiation. *Journal Plant Biology* 48: 195-200. doi: 10.1007/BF03030408
- Wu D. L., S. W Hou, P. P Qian, L. D Sun, Y. C. Zhang and W. J. Li (2009)** Flower color chimera and abnormal leaf mutants induced by $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions in *Salvia splendens* Ker-Gawl. *Science Horticulturae* 121: 462-467, doi: 10.1016/j.scienta.2009.02.022

Wu S. J., L. T. Ng, Y. M. Huang, D. L. Lin, S. S. Wang, S. N. Huang and C. C. Lin (2005) Antioxidant activities of *Physalis peruviana*. *Biological and Pharmaceutical Bulletin* 28: 963-966. doi: 10.1248/bpb.28.963

Yamaguchi H., A. Shimizu, K. Degi and T. Morishita (2008) Effects of dose and dose rate of gamma ray irradiation on mutation induction and nuclear DNA content in chrysanthemum. *Breeding Science* 58: 331-335.