

Dosis altas de radiación gamma (Cobalto⁶⁰) disminuyen la expresión fenotípica de caracteres en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.)

High doses of gamma radiation (Cobalt⁶⁰) decrease the phenotypic expression of characters in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)

DOI: 10.34188/bjaerv5n4-021

Recebimento dos originais: 06/05/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

Roberto de la Cruz Díaz-Juárez

Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Institución: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatepec
Dirección: Carretera Zacatepec-Galeana km 0.5, Colonia Centro, Zacatepec, Morelos, México - CP. 62780
E-mail: diaz.roberto@inifap.gob.mx

Marianguadalupe Hernández-Arenas

Doctora en Ciencias en Fitopatología por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Institución: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatepec
Dirección: Carretera Zacatepec-Galeana km 0.5, Colonia Centro, Zacatepec, Morelos, México - CP. 62780
E-mail: hernandez.marian@inifap.gob.mx

Amalio Santacruz-Varela

Doctor of Philosophy, Major in Plant Breeding, Iowa State University
Institución: Colegio de Postgraduados Campus Montecillo
Dirección: Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México - CP. 56264
E-mail: asvarela@colpos.mx

Edison Gastón Silva-Cifuentes

Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Institución: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE)
Dirección: Carretera Durán-Tambo km 49.5, El Triunfo, Provincia del Guayas, Ecuador
E-mail: esilva@cincae.org

Eulogio De la Cruz-Torres

Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México Campus "El Cerrillo", Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México.
Institución: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Departamento de Biología.
Dirección: Carretera México-Toluca km 36.5, La Marquesa, Ocoyoacac, México - CP. 52750
E-mail: eulogio.delacruz@inin.gob.mx

Edwin Javier Barrios-Gómez

Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Institución: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatepec
Dirección: Carretera Zacatepec-Galeana km 0.5, Colonia Centro, Zacatepec, Morelos, México - CP. 62780
E-mail: barrios.edwin@inifap.gob.mx

Viridiana Trejo-Pastor

Doctora en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Institución: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo Cuatro, Departamento de Ciencias Agrícolas
Dirección: Carretera Cuautitlán-Teoloyucan km 2.5, San Sebastián Xhala, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México - CP. 54714
E-mail: trejopastor@cuautitlan.unam.mx

Abel Muñoz-Orozco†

Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Institución: Colegio de Postgraduados Campus Montecillo
Dirección: Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México - CP. 56264
E-mail: amunozo@colpos.mx

RESUMEN

La mutagénesis inducida es una técnica para crear variabilidad genética de manera rápida, directa y fácil en plantas de propagación vegetativa. A través de un agente mutagénico se provocan cambios en una o varias características morfológicas y fisiológicas que se transmiten a su progenie. En México no existe información sobre mutagénesis inducida en el cultivo de caña de azúcar. Por tal motivo, el objetivo del trabajo fue determinar el efecto de la radiación gamma a base de Cobalto⁶⁰ en la expresión de caracteres fenotípicos en dos variedades comerciales de caña de azúcar. Fueron irradiadas 100 yemas de cada variedad, CP 72-2086 y MEX 69-290, con seis diferentes dosis de radiación gamma: 0, 50, 70, 80, 90 y 100 Grey con Cobalto⁶⁰. Se sembraron en maceta bajo malla sombra y después se trasplantaron a campo. Los caracteres evaluados fueron emergencia de yemas, caracteres morfológicos y componentes de rendimiento. En general, a mayor dosis de radiación gamma, mayor afectación en la expresión fenotípica de las variables evaluadas, resultando diferentes interacciones entre los factores involucrados. Las dosis de 90 y 100 Grey causaron mayor efecto en la disminución de la expresión fenotípica de los caracteres y demoraron el crecimiento de las plantas. En las interacciones, la variedad CP 72-2086 fue más sensible en la emergencia de yemas, altura de planta, número de macollos y longitud del entrenudo, y la MEX 69-290 en área foliar, lo que nos indica que, existe diferente grado de sensibilidad en los caracteres y las variedades evaluadas. Por lo tanto, las dosis altas de radiación gamma causan disminución en diferente proporción en la expresión fenotípica de caracteres y demora el crecimiento de las plantas en caña de azúcar. De igual manera, existe diferente grado de sensibilidad a la radiación gamma en los caracteres y genotipos.

Palabras clave: *Saccharum officinarum* L., caracteres morfológicos, componentes de rendimiento, emergencia de yemas, mutagénesis.

ABSTRACT

Induced mutagenesis is a technique to create genetic variability quickly, directly, and easily in vegetatively propagated plants. A mutagenic agent causes changes in one or more morphological and physiological characteristics that are transmitted to their progeny. In Mexico, there is no information on induced mutagenesis in sugarcane cultivation. For this reason, the objective of this study was to determine the effect of gamma irradiation-based Cobalt⁶⁰ on the expression of phenotypic characteristics in two commercial varieties of sugarcane. One hundred buds of each variety, CP 72-2086 and Mex 69-290, were irradiated with six different doses of gamma irradiation: 0, 50, 70, 80, 90 and 100 Grey with Cobalt⁶⁰. They were planted in pots under mesh shade and then transplanted to the field. The characters evaluated were bud emergence, morphological characters, and yield components. In general, the higher dose of gamma irradiation greater than the effect on the phenotypic expression of the variables evaluated, resulting in different interactions between the factors involved. The doses of 90 and 100 Grey caused a greater effect in the decrease of phenotypic expression of the characters and slowed down the plant growth. In the interactions, CP-72-2086 was more sensitive in bud emergence, plant height, number of tillers and internode length, and Mex 69-290 in leaf area, which indicates that there is a different degree of sensitivity in the characters and varieties evaluated. Therefore, high doses of gamma radiation cause a decrease in different proportions in the phenotypic expression of characters and slowed down plant growth in sugarcane. Similarly, there is a different degree of sensitivity to gamma radiation in characters and genotypes.

Keywords: *Saccharum officinarum* L., morphological characters, yield components, bud emergence, mutagenesis.

1 INTRODUCCIÓN

México no es centro de diversidad genética de la caña de azúcar, razón por la cual tiene limitada variabilidad genética para uso en el mejoramiento genético y desarrollo de nuevas variedades; por lo que es necesario encontrar una forma alternativa para generar variabilidad genética de manera directa, rápido y fácil. Una opción para generar variabilidad genética en plantas de propagación vegetativa es mediante el uso de mutágenos, es decir, la mutagénesis inducida. La inducción de mutaciones es una tecnología viable, sostenible, eficiente, flexible, no regulada, no peligrosa y de bajo costo para el mejoramiento de los cultivos (Lagoda, 2009).

La mutagénesis es el cambio en una o varias características morfológicas y fisiológicas de una especie causado por un agente mutagénico, que se transmiten a su progenie (De La Loma, 1973). Aunque la gran mayoría de mutaciones inducidas son recesivas y perjudiciales desde el punto de vista del mejorador, pero con una adecuada selección es posible encontrar genotipos deseables en poblaciones mutadas (Maluszynski *et al.*, 2009). Los agentes mutágenos producen cambios similares a las mutaciones naturales, en un tiempo relativamente corto y en mayor cantidad (Donini y Sonnino, 1998). Los mutágenos físicos o químicos provocan cambios aleatorios en el ADN nuclear o en orgánulos citoplasmáticos, lo que da como resultado mutaciones genéticas, cromosómicas o genómicas (Datta, 2009). Los mutágenos físicos como los rayos ultravioleta, rayos-X y rayos gamma son muy útiles para inducir mutaciones en cultivos de propagación vegetativa y

en cultivos *in vitro*. La radiación con rayos gama ha sido el tratamiento más utilizado para inducir mutaciones en plantas, debido a la simplicidad del tratamiento (Maluszynski *et al.*, 2009). El uso directo es útil cuando se desea mejorar uno o pocos caracteres, y en el caso de plantas propagadas vegetativamente se puede cambiar uno o algunos caracteres de un cultivar sin alterar el genotipo (Patade y Suprasanna, 2008), pero combinado con el cultivo *in vitro*, se puede acelerar el proceso de mejoramiento genético, así como la eficiencia en la selección y rápida multiplicación de nuevos genotipos (Maluszynski *et al.*, 1995).

En caña de azúcar se ha utilizado la mutagénesis, desde la década de los 60's, pero se detuvo y recientemente se le está dando nuevo auge como herramienta para la producción de variabilidad genética como materia prima de algunos programas de mejoramiento genético alrededor del mundo. En México no existe información sobre mutagénesis inducida con radiación ionizante en yemas de caña de azúcar. En general, los trabajos de radiación en caña de azúcar con radiación ionizante *in vitro* se centraron en determinar dosis y tiempos de exposición para producir el mayor número de mutaciones, sin causar la muerte (Rutherford *et al.*, 2014). Algunas características estudiadas son: selección para salinidad, sequía y caracterización de los mutantes seleccionados vía mutagénesis *in vitro* (Patade *et al.*, 2006; Suprasanna *et al.*, 2009), resistencia a la podredumbre roja, anegamiento y retraso en la floración (Majid *et al.*, 2001; Samad *et al.*, 2001), tolerancia a la salinidad (Saif *et al.*, 2001), para mejorar el diámetro del tallo (García *et al.*, 2001), estrés por sequía (Hartati *et al.*, 2022), para resistencia a diferentes enfermedades como pudrición roja (Rao *et al.*, 1966; Ali *et al.*, 2007), virus del mosaico de la caña de azúcar (Fuchs *et al.*, 2002), carbón (Nasiru and Ifenkwe, 2004), roya (Valdez *et al.*, 2004; Oloriz *et al.*, 2012) y Rutherford *et al.* (2014) al realizar una revisión mencionan diferentes características agronómicas como el peso y rendimiento de la caña, el número de macollos, diámetro del tallo, altura del tallo, entre otras, obtenido de callos, meristemo apical y brotes de caña irradiados.

La generación de variabilidad genética a través de mutagénesis inducida es una técnica prometedora para la obtención de nuevos genotipos de variedades comerciales de caña de azúcar para tratar de mejorar el valor agronómico y/o encontrar algún mutante sobresaliente. Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue estudiar el efecto de diferentes dosis de rayos gamma con Cobalto⁶⁰ (Co⁶⁰) aplicados en dos variedades comerciales de caña de azúcar para determinar la sensibilidad de los genotipos en la expresión de la emergencia de yemas, caracteres morfológicos y componentes de rendimiento.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El experimento se realizó en el Campo Experimental Zacatepec (CEZACA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en Zacatepec, Morelos, en las coordenadas 18° 39' 16" N, 99° 11' 54" O que se encuentra a 910 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una precipitación pluvial promedio de 800 mm y una temperatura promedio anual de 24 °C (García, 2004). El experimento inició en el año 2015 y culminó en el año 2016.

Material vegetal

Las variedades utilizadas fueron MEX 69-290 y CP 72-2086 de 12 meses de edad, proporcionadas por el CEZACA. Se utilizaron tallos con yemas completamente desarrolladas y sanas, desechando las basales y apicales. Se cortaron rodajas de tres centímetros de espesor con una yema, se desinfectaron con Captan (5 g L⁻¹) durante 2 minutos y se colocaron en papel aluminio en forma de tacos, se etiquetaron y guardaron en un recipiente con tapa para evitar la deshidratación.

Irradiación de yemas

Las yemas se irradiaron en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Se aplicaron seis dosis de radiación gamma: 0, 50, 70, 80, 90 y 100 Grey (Gy) a base de Cobalto 60 (Co⁶⁰) con el irradiador LGI-01 Transelektro, cada dosis se aplicó a 100 yemas de cada variedad.

Siembra de yemas y trasplante de plántulas

Las yemas irradiadas se sembraron en un invernadero tipo malla sombra. Se sembraron individualmente colocándolas de manera vertical en vasos de unicel No. 12. El sustrato utilizado fue peat moss Suchine[®] Mix. Las plantas permanecieron dos meses para aclimatarse. Posteriormente, se trasplantaron a campo en surcos de 1.2 m de ancho y 40 cm entre plantas.

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental en la siembra de las yemas irradiadas fue bloques completos al azar con 20 repeticiones en arreglo factorial 6x2, resultado de la combinación de seis dosis de radiación y dos variedades. La unidad experimental consistió de cinco yemas.

El diseño experimental en el trasplante fue completamente al azar en arreglo factorial 6x2. La unidad experimental constó de 10 plantas. Se utilizó este diseño experimental y establecieron

diferente número de repeticiones, en virtud de que el número de plantas emergidas varió según la dosis de radiación aplicada.

Variables evaluadas

Para determinar el efecto de las diferentes dosis de radiación gamma, se evaluó lo siguiente:

Emergencia de yemas. Se calculó la emergencia en porcentaje de acuerdo con Fakorede y Ojo (1981) y Fakorede y Ayoola (1980).

Caracteres morfológicos. Se realizaron cuatro muestreos a los 3, 6, 9 y 12 meses después del trasplante y se midió: altura de planta (AP en cm), desde la base del tallo al entrenudo visible más joven; contenido de clorofila (CL en unidades Spad) en la hoja más joven con lígula visible; número de macollos por cepa (NM); longitud del entrenudo medio (LE en cm), ancho del entrenudo medio (AE en mm) y número total de entrenudos del tallo (NE). AP y CL se midieron en los cuatro muestreos, mientras que el resto de las variables solo a los 9 y 12 meses.

Componentes de rendimiento. En la cosecha, 12 meses después del trasplante, se seleccionaron 5 tallos al azar y se midió: altura del tallo moledero (ATM en cm), LE; AE; NE y el contenido de sólidos solubles totales (SST en °Brix) con un refractómetro Pocket Refractometer PAL-1 Atago, en el entrenudo medio del tallo. Finalmente se determinó el peso de tallos por parcela (PT en g) y el número de tallos molederos por cepa (NTM).

Características de hojas. A los 10 meses después del trasplante, se hizo un conteo de estomas del envés de las hojas usando la técnica de impresión. Se hicieron cinco conteos al azar en la impresión de estomas del número de estomas (NEs) por campo con un objetivo de 40X, con un microscopio óptico. En la cosecha se midió la longitud de la hoja (LH en cm) y el ancho en la última hoja ligulada (AH en cm), con esos datos se calculó el área foliar (AF en cm²) multiplicando LH x AH x factor de corrección 0.7.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza combinados e individuales y pruebas de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) con el paquete estadístico SAS[®] versión 9.0. En las variables en que se hicieron dos y cuatro muestreos, se realizaron análisis combinados. La variable porcentaje de emergencia se transformó a grados angulares (arcoseno).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emergencia de yemas

En el Cuadro 1 se muestran los cuadrados medios del análisis de varianza de la emergencia de yemas. Hubo diferencias altamente significativas en las variedades, en las dosis y en la interacción de ambos factores. El efecto de las variedades aportó mayor variación en la emergencia de yemas. Lo que nos indica que hay un efecto diferencial por efecto de las variedades, de las dosis de radiación y la interacción de ambos factores en la emergencia de yemas.

Cuadro 1. Cuadros medios del análisis de varianza y significancia para la emergencia de yemas de caña de azúcar irradiadas con rayos gamma (Co^{60}).

Factor de variación	Grados libertad	Emergencia
Bloques	19	1.9 ns
Variedades (V)	1	135.0 **
Dosis (D)	5	37.9 **
V × D	5	13.2 **
Error	209	1.1

V × D=interacción variedades × dosis de radiación gamma. Coeficiente de variación (%) = 34.7.
ns=no significativo, **Significativo al 0.01.

En el Cuadro 2 se muestra la emergencia de yemas por cada dosis de radiación gamma. Las dosis de radiación causaron disminución de la emergencia de yemas. Las dosis de 90 y 100 Gy redujeron en mayor grado la emergencia de yemas, mientras que la dosis de 50 Gy no difirió con el testigo (0 Gy). Lo que nos indica que a mayor dosis de radiación menor emergencia, pero en diferente proporción, causando un efecto negativo. Además, la emergencia se retrasó en las dosis de radiación gamma más altas.

Cuadro 2. Emergencia de yemas de caña de azúcar irradiadas con rayos gamma (Co^{60}).

Dosis	Emergencia (%)	Disminución de la emergencia (%)
0 Grey	65.0 a*	0
50 Grey	61.0 a	6.2
70 Grey	45.5 b	30
80 Grey	38.5 bc	40.8
90 Grey	31.5 cd	51.5
100 Grey	18.0 d	72.3

*Medias con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$).

La emergencia de yemas en el tratamiento testigo fue de 65%, mientras que, en las yemas irradiadas a partir de la dosis de 90 Gy, la emergencia disminuyó más del 50%, por lo tanto, la dosis letal media (DL50) se encuentra alrededor de esa dosis. Predierei (2001) menciona que el primer paso, debe ser estimar la dosis adecuada de los mutágenos. En cultivos de propagación asexual, se

recomiendan dosis inferiores a la DL50 que permita un buen crecimiento y propagación del material (Maluszynski *et al.*, 2009). Los resultados indicaron que la emergencia disminuyó conforme aumentó la dosis de radiación gamma, retrasó la emergencia y en las dosis más altas después de la emergencia de los pelillos, algunos murieron. Al respecto, la supervivencia de las plantas depende de la extensión y del daño cromosómico (Kiong *et al.*, 2008), por lo que las yemas irradiadas con dosis altas tuvieron mayor daño y por lo consiguiente menor capacidad de germinación, emergencia, supervivencia y mayor reducción del crecimiento. Los resultados concuerdan con los obtenidos por Nikam *et al.* (2014, 2015), Nasr and Esh (2014), Valdez *et al.* (2004) y Fuchs *et al.* (2002) quienes encontraron resultados similares al irradiar callos y yemas de caña de azúcar. En semillas irradiadas de *Euphorbia fulgens* Karw. ex Klotzsch (Pérez-Nicolás *et al.*, 2022), en semillas de jamaica y girasol (Díaz *et al.*, 2017), en semillas de nochebuena (Canul-Ku *et al.*, 2012). Pero Antúnez-Ocampo *et al.* (2017) mencionan que la radiación gamma aumentó la emergencia de las plántulas de uchuva y en semillas de *Echinocactus platyacanthus* Link y Otto (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2022). Por lo anterior, la radiación gamma, dependiendo de la especie y del material a irradiar, puede disminuir o acelerar el proceso de germinación, emergencia y crecimiento de plántulas.

Caracteres morfológicos

El Cuadro 3 se muestran los cuadrados medios del análisis de varianza y su significancia de los caracteres morfológicos. Hubo diferencias estadísticas en todos los factores de variación y en la mayoría de los caracteres morfológicos evaluados, mientras que en las interacciones hubo pocas diferencias. En altura de planta (AP) y número de macollos (NM) fueron los de mayor variación al presentar diferencias en casi todos los factores de variación. El valor de los cuadrados medios en cada variable, en el factor Dosis, da idea de que los caracteres morfológicos presentan diferente grado de sensibilidad a la radiación. Lo que nos indica que los muestreos, las variedades, las dosis y las diferentes interacciones causan un efecto diferencial en la expresión de los caracteres morfológicos.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado y su significancia para caracteres morfológicos en caña de azúcar irradiadas con rayos gamma (Co⁶⁰).

FV	GL	AP	CL	GL	NM	NE	LE	AE
Muestreo (M)	3	153159.2 **	2338.6 **	1	130.2 **	545.0 **	0.06 ns	67.5 *
Variedad (V)	1	1047.0 ns	160.4 **	1	246.3 **	4.5 ns	38.0 **	41.6 ns
Dosis (D)	5	13480.0 **	2.7 ns	5	14.4 *	29.3 **	47.3 **	149.6 **
M × V	3	2327.9 **	97.4 **	1	138.5 **	7.8 ns	1.3 ns	4.9 ns
M × D	15	676.8 *	11.1 ns	5	16.6 *	5.5 ns	1.9 ns	15.0 ns
V × D	5	915.8 *	26.5 **	5	17.2 **	5.2 ns	11.2 *	5.6 ns
M × V × D	15	193.1 ns	8.1 ns	5	7.5 ns	1.9 ns	2.06 ns	20.5 ns
Error	169	350.4	7.6	84	5.2	3.6	4.4	15.6
CV (%)		16.5	9.1		31.9	20.7	21.8	16.2

FV=factor de variación, GL=grados libertad, AP=altura de planta, CL=clorofila, NM=número de macollos, NE=número de entrenudos, LE=longitud del entrenudo, AE=ancho del entrenudo, M × V= interacción muestreos × variedades, M × D= interacción muestreos × dosis de radiación gamma, V × D=interacción variedades × dosis de radiación gamma, M × V × D=interacción muestreos × variedades × dosis de radiación gamma, CV=coeficiente de variación. ns=no significativo, *Significativo al 0.05, **Altamente significativo al 0.01.

En el Cuadro 4 se muestran las medias de los caracteres morfológicos por cada dosis de radiación gamma. Con excepción del testigo (0 Gy), el resto de las dosis de radiación gamma causaron disminución en casi todos los caracteres morfológicos, excepto en clorofila (CL) que no hubo diferencias estadísticas. Las dosis de 90 y 100 Gy redujeron en mayor grado los caracteres morfológicos, de las cuales AP y el ancho del entrenudo (AE) fueron las variables mayormente afectadas. Lo que nos indica que, a mayor dosis de radiación gamma, se afecta la expresión de los caracteres morfológicos en diferente proporción, causando un efecto negativo. Por lo tanto, los caracteres morfológicos tienen diferente grado de sensibilidad a la radiación gamma.

Cuadro 4. Comparación de medias para los caracteres morfológicos en caña de azúcar irradiadas con rayos gamma (Co⁶⁰).

Dosis	AP (cm)	CL (Spad)	NM	NE	LE (cm)	AE (mm)
0 Grey	137.8 a*	30.7 a	8.8 a	10.4 a	11.9 a	27.0 a
50 Grey	122.4 b	30.1 a	6.9 ab	10.5 a	10.2 ab	26.4 ab
70 Grey	103.5 c	30.4 a	7.4 ab	9.0 ab	8.7 bc	24.6 abc
80 Grey	102.7 c	30.4 a	6.2 b	9.5 ab	8.6 bc	22.4 bcd
90 Grey	82.3 d	29.3 a	5.3 b	6.8 c	7.1 c	19.0 d
100 Grey	95.9 cd	29.8 a	7.1 ab	8.2 bc	8.1 bc	21.1 cd

*Medias con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, P ≤ 0.05). AP=altura de planta, CL=clorofila, NM=número de macollos, NE=número de entrenudos, LE=longitud del entrenudo, AE=ancho del entrenudo.

Componentes de rendimiento y características de hoja

En el Cuadro 5 se muestran los cuadrados medios del análisis de varianza y su significancia en los componentes del rendimiento y características de hoja. En el factor Dosis hubo diferencias en la mayoría de los caracteres evaluados. La longitud del entrenudo (LE) y el ancho de las hojas (AH) fueron las variables de mayor variación ya que presentaron diferencias en todos los factores de variación. De acuerdo con el valor de los cuadrados medios en cada variable, se observa que los componentes de rendimiento y características de hojas presentan diferente grado de sensibilidad a la radiación. Lo que nos indica que existen un efecto diferencial en la expresión de los componentes de rendimiento y características de las hojas por efecto de las dosis de radiación gamma.

Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza y su significancia para los componentes de rendimiento y características de hojas en caña de azúcar irradiadas con rayos gamma (Co⁶⁰).

FV	G	Componentes de rendimiento								Características de hojas							
		L	ATM	NE	LE	AE	SST	PT	NTM	NEs	LH	AH	AF				
Variedad (V)	1	742.7	n s	0.00	n s	17. *	20. *	n s	0. n	70723031	110. *	125. *	35.1	n s	0.7	2293.8	n s
Dosis (D)	5	2640.8	* s	6.1	n s	12. *	19. *	n s	1. n	19631914	10.7	31.8	539.	* s	1.1	20096.	* s
V × D	5	344.4	n s	2.8	n s	3.9	2.3	n s	0. n	2834174.	5.8	11.4	56.2	n s	0.3	3497.6	* s
Error	42	355.4		2.8		1.5	6.9		1. 3	1672783.	2.8	8.9	65.3		0.0	913.7	
CV (%)		18.5		14.8		12. 8	10. 3		5. 2	35.1	28.4	9.4	6.3		9.4	10.5	

FV=factor de variación, GL=grados libertad, ATM=altura del tallo moledero, NE=número de entrenudos, LE=longitud del entrenudo, AE=ancho del entrenudo, SST=sólidos solubles totales, PT=peso de tallos, NTM = número de tallos molederos, NEs=número de estomas, LH=largo de hoja, AH=ancho de hoja, AF=área foliar, V × D=interacción variedades × dosis de radiación gamma, CV=coeficiente de variación.

ns=no significativo, *Significativo al 0.05, **Altamente significativo al 0.01.

Cuadro 6. Comparación de medias de los componentes de rendimiento y características de hoja en caña de azúcar irradiadas con rayos gamma (Co⁶⁰).

Dosis	ATM (cm)	NE	LE (cm)	AE (mm)	SST (°Brix)	PT (g)	NTM	NEs	LH (cm)	AH (cm)	AF (cm ²)
0 Grey	124.0 a*	11.8 a	11.5 a	27.5 a	22.5 a	6234.1 a	8.0 a	29.3 c	136.1 a	3.5 a	333.8 a
50 Grey	108.0 ab	11.9 a	10.0 ab	26.2 ab	22.5 a	3806.8 b	5.9 ab	30.1 bc	131.1 ab	3.3 a	311.1 ab
70 Grey	91.5 bc	10.6 a	9.0 b	25.7 ab	22.7 a	2324.1 b	4.8 b	33.3 abc	119.9 bc	2.8 bc	237.4 cd
80 Grey	98.4 abc	11.6 a	8.6 b	23.9 ab	22.1 a	2534.0 b	5.1 b	31.9 abc	127.5 abc	3.3 a	304.0 ab
90 Grey	72.7 c	9.7 a	8.1 b	23.1 b	21.6 a	2088.1 b	4.3 b	34.1 ab	117.3 c	2.5 c	205.6 d
100 Grey	79.6 bc	10.5 a	8.4 b	24.6 ab	21.6 a	2653.1 b	5.9 ab	35.5 a	121.6 bc	3.1 ab	265.7 bc

*Medias con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, P ≤ 0.05). ATM=altura del tallo moledero, NE=número de entrenudos, LE=longitud del entrenudo, AE=ancho del entrenudo, SST=sólidos solubles totales, PT=peso de tallos, NTM=número de tallos molederos, NEs=número de estomas, LH=largo de hoja, AH=ancho de hoja, AF=área foliar.

En el Cuadro 6 se muestran las medias de los componentes de rendimiento y características de hoja por cada dosis de radiación gamma. Las dosis de radiación gamma causaron disminución de los componentes del rendimiento y en las características de las hojas en diferente proporción en la mayoría de las variables, excepto en el número de entrenudos (NE) y el contenido de sólidos solubles totales (SST) que no causó efecto y que el número de estomas (NEs) en las hojas aumentó. Las dosis de 90 y 100 Gy redujeron en mayor grado a los componentes del rendimiento y las características de hoja. Lo que nos indica que, a mayor dosis de radiación gamma se afecta la expresión de los componentes de rendimiento, las características de hoja y disminuyen en diferente proporción, causando un efecto negativo; por lo tanto, los componentes de rendimiento y características de la hoja tienen diferente grado de sensibilidad a la radiación gamma.

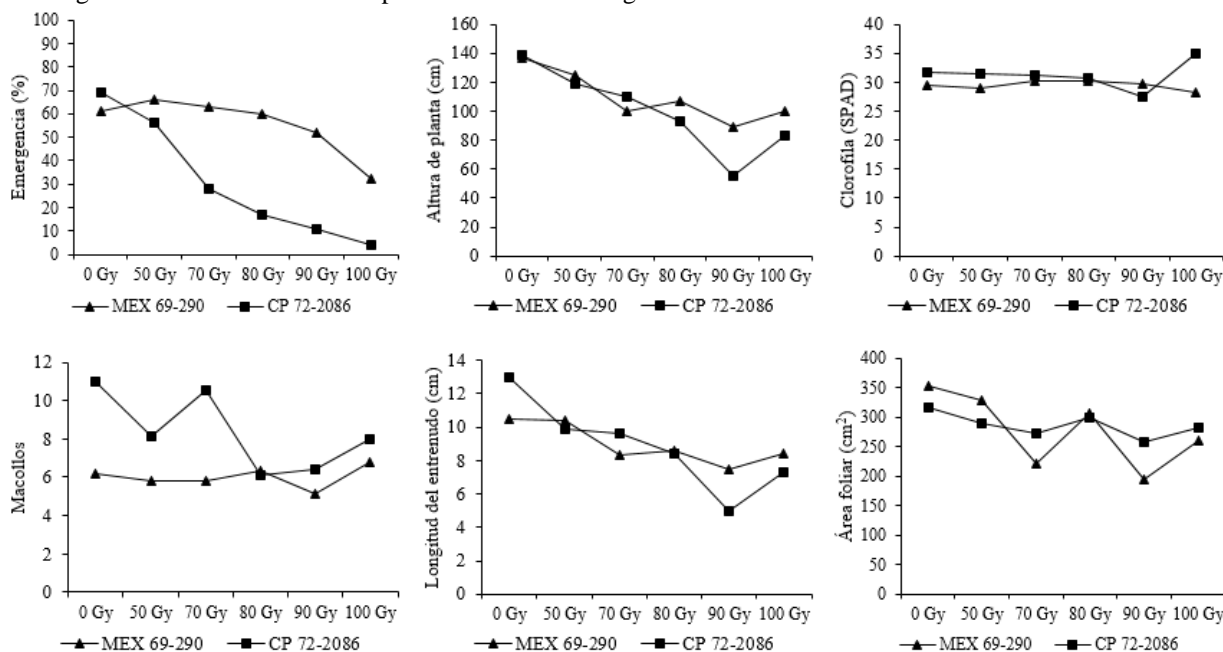
Los resultados muestran que la expresión fenotípica de los caracteres morfológicos, los componentes de rendimiento y las características de la hoja tienen diferente respuesta a la radiación gamma. En los caracteres morfológicos las dosis más altas de radiación causaron mayor disminución de la altura de planta, número de macollos, número de entrenudos, longitud y ancho del entrenudo; mientras que, en el contenido de clorofila en las hojas no hubo efecto. En los componentes de rendimiento y características de hoja las dosis de radiación más altas causaron disminución de la altura del tallo moledero y longitud del entrenudo; mientras que el ancho del entrenudo, el peso de tallos, el número de tallos molederos, la longitud y ancho de la hoja, y el área foliar la tendencia no es clara, ya que en las dosis intermedias y/o altas igualan con el tratamiento testigo; por el contrario, el número de entrenudos y el contenido de sólidos solubles totales no hubo efecto. Únicamente en la variable número de estomas, la radiación gamma tuvo un efecto estimulante, ya que, en las dosis más altas, el número de estomas en las hojas fue mayor. En caña de azúcar, Nikam *et al.* (2014, 2015) encontraron mutantes sobresalientes en componentes de rendimiento, de igual manera Nasr and Esh (2014) en caracteres de calidad, Valdez *et al.* (2005) encontraron mutantes sobresalientes y variación en la vellosoidad de las vainas de la hoja, y Fuchs *et al.* (2005) encontraron subclones mutantes sobresalientes en rendimiento, tolerantes a enfermedades, variación en la pubescencia de la hoja. Además, Nasr and Esh (2014) encontraron variación en el comportamiento del crecimiento, el color, la forma de yemas y los entrenudos. En otros cultivos, como uchuva disminuyó la altura y diámetro de la planta, la longitud de la raíz, pero aumentó la longitud de entrenudos (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2017); en *Echinocactus platyacanthus* Link y Otto aumentó la altura de planta, pero inhibió el crecimiento de la raíz (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2022). Por lo tanto, la radiación gamma puede generar mutantes con características favorables que mejoren el valor agronómico o mutantes con características deletéreas que influyen negativamente el valor agronómico.

Interacción variedades × dosis de radiación gamma

En la Figura 1 se muestran las interacciones de las variedades × dosis de radiación gamma en diferentes caracteres. La interacción de las diferentes dosis de radiación gamma × variedades causó un efecto diferencial en la expresión de los caracteres evaluados. Las dosis de radiación gamma más altas afectaron negativamente la expresión de la emergencia, la altura de planta, la longitud del entrenudo y el área foliar en las variedades, y disminuyen en diferente proporción conforme aumenta la dosis de radiación gamma. Caso contrario ocurrió con el número de macollos, la diferencias entre las variedades fue mayor con el testigo y las dosis más bajas. Lo que nos indica que el efecto de la interacción de las variedades × dosis de radiación gamma en la expresión de los caracteres evaluados es diferente en cada uno y dependen de la dosis y del genotipo a utilizar.

En el presente estudio, de acuerdo con los resultados obtenidos, se muestra amplia gama de variantes en los caracteres evaluados, inducidos por las diferentes dosis de radiación gamma, el efecto del genotipo y la interacción de ambos factores; no obstante, ningún mutante resultó ser de importancia agronómica. En general, el efecto de las diferentes dosis de radiación gamma en caña de azúcar fue causar un efecto negativo, disminuyendo en diferente proporción la emergencia, la expresión de caracteres morfológicos, de los componentes de rendimiento y de las características de hoja, es decir, toda la variación generada por las dosis de radiación fueron mutaciones deletéreas. De igual manera, en la interacción de las variedades × dosis de radiación gamma, la tendencia fue disminuir conforme aumentó las dosis de radiación en ambas variedades con diferente comportamiento. Las dosis altas causan alta frecuencia de mutaciones deseadas, desafortunadamente también alta frecuencia de mutaciones deletéreas en otros loci importantes, afectando el valor agronómico de los mutantes (Maluszynski *et al.*, 2009). Por tal motivo, es necesario evaluar con dosis más bajas y definir la DL50 de cada genotipo, ya que tanto los caracteres como los genotipos tienen diferente grado de sensibilidad a la radiación gamma.

Figura 1. Interacción variedad por dosis de radiación gamma en diferentes caracteres en caña de azúcar.



4 CONCLUSIONES

La radiación gamma provoca amplia variabilidad genética en caña de azúcar. Las dosis altas de radiación gamma (90-100 Grey), aplicadas en yemas de caña de azúcar, causan variación en la emergencia de plántulas y en la expresión de caracteres morfológicos, de los componentes del rendimiento y de las características de las hojas en plantas. Los caracteres y genotipos de caña de azúcar tienen diferente grado de sensibilidad a las diferentes dosis de radiación gamma.

La radiación gamma es un método para generar variabilidad genética de manera rápida, pero dada la naturaleza de las mutaciones que son al azar y pueden ser favorables o deletéreas, en próximos trabajos se recomienda explorar la generación M₂ de los mutantes y evaluar dosis más bajas.

REFERENCIAS

- Ali, A.; Naz, S.; Alam, S. S. and Iqbal J. 2007. *In vitro* induced mutation for screening of red rot (*Colletotrichum falcatum*) resistance in sugarcane (*Saccharum officinarum*). Pakistan Journal of Botany 39 (6): 1979-1994.
- Antúnez-Ocampo, O. M.; Castañeda-Zárate, G. A.; Sabino-López, J. E.; Espinosa-Rodríguez, M. and Cruz-Izquierdo, S. 2022. Germinación y aspectos morfológicos de plántulas de *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto tratadas con rayos gamma. Tropical and Subtropical Agroecosystems 25: 101.
- Antúnez-Ocampo, O. M.; Cruz-Izquierdo, S.; Sandoval-Villa, M.; Santacruz-Varela, A.; Mendoza-Onofre, L. E.; De la Cruz-Torres, E. y Peña-Lomelí, A. 2017. Variabilidad inducida en caracteres fisiológicos de *Physalis peruviana* L. mediante rayos gamma ^{60}Co aplicados a la semilla. Revista Fitotecnia Mexicana 40 (2): 211-218.
- Canul-Ku, J.; García-Pérez, F.; Campos-Bravo, E.; Barrios-Gómez, E. J.; De la Cruz-Torres, E.; García-Andrade, J. M.; Osuna-Canizalez, F. de J. y Ramírez-Rojas, S. 2012. Efecto de la irradiación sobre nochebuena silvestre (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) en Morelos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3 (8): 1495-1507. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i8.1316>
- Datta, S. K. 2009. A report on 36 years of practical work on crop improvement through induced mutagenesis. In: Shu, Q. Y. (ed.) Induced Plant Mutations in the Genomics Era. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. pp.: 253-256.
- De la Loma, J. L. 1973. Historia, modalidades, importancia y utilización de las mutaciones. In: I Simposio Mexicano sobre Mutaciones. Trujillo, F. R. (coord.). Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México. pp: 9-15.
- Díaz, L. E.; Morales R., A.; Olivar H., A.; Hernández H., P.; Juárez C., J. A. Leon de la R., J. F.; Francisco F., N.; Santiago S., H.; Bravo D., H. C.; Campos P., J. M.; Bravo D., H. R.; Díaz O., E. T. and Loeza C., J. M. 2017. Gamma irradiation effects of ^{60}Co on the germination of two subtropical species in the Tehucacan-Cuicatlan Valley. International Journal of Advanced Engineering Research and Science 4 (8): 56-61. DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.8.10>
- Donini, P. and Sonnino, A. 1998. Induced mutation in plant breeding: current status and future outlook. In: Somaclonal Variation and Induced Mutations in Crop Improvement. Jain, S. M.; Brar, D. S. and Ahloowalia, B. S. (eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. pp: 255-291.
- Fakorede, M. A. B. and Ojo, D. K. 1981. Variability for seedling vigour in maize. Experimental Agriculture 17: 195-201.
- Fakorede, M. A. B. and Ayoola, O. A. 1980. Relationship between seedling vigor selection for yield improvement in maize. Maydica 25: 135-147.
- Fuchs, M.; González, V.; Rea, R.; Zambrano, A. Y.; De Sousa-Vieira, O.; Díaz, E.; Gutiérrez, Z. y Castro, L. 2005. Mejoramiento de la caña de azúcar mediante la inducción de mutaciones en cultivos de callos. Agronomía Tropical 55 (1): 133-149.
- Fuchs, M.; González, V.; Castroni, S.; Díaz, E. y Castro, L. 2002. Efecto de la radiación gamma sobre la diferenciación de plantas de caña de azúcar a partir de callos. Agronomía Tropical 52 (3): 311-324.

- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 97 p.
- García, R. L.; Orellana, P.; García, L. R.; Pérez P., J. N.; Veitía, N.; Bermúdez-Carballoso, I.; Clavero G., J. and Romero C. 2001. Use of the mutagenesis to improve the girth of the stem in the somaclon IBP 89-169 of sugarcane. *Biocnología Vegetal* 1 (2): 71-75.
- Hartati, R. S.; Suhesti, S. and Yuniyati, N. 2022. Morphological characters of sugarcane mutant (*Saccharum officinarum* L.) from *in vitro* selection for drought stress. AIP Conference Proceedings 2462: 020020. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0075656>
- Kiong, L. P. A.; Lai, A. G.; Hussein, S. and Harun, A. R. 2008. Physiological responses of *Orthosiphon stamineus* plantlets to gamma irradiation. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture* 2 (2): 135-149.
- Lagoda, P. J. L. 2009. Networking and fostering of cooperation in plant mutation genetics and breeding: role of the joint FAO/IAEA division. *In: Shu, Q. Y. (ed.) Induced Plant Mutations in the Genomics Era*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. pp.: 27-30.
- Majid, M. A.; Shamsuzzaman, K. M.; Howlader, M. A. R. and Islam, M. M. 2001. Development of sugarcane mutants with resistance to red rot, water logging and delayed for non-flowering through induced mutations. *IAEA-Tecdoc*. 1227: 31-44.
- Maluszynski, M.; Ahloowalia, B. S. and Sigurbjörnsson, B. 1995. Application of *in vivo* and *in vitro* mutation techniques for crop improvement. *Euphytica* 85: 303-315.
- Maluszynski, M.; Szarejko, I.; Bhatia, C. R.; Nichterlein, K. and Lagoda, P. J. L. 2009. Methodologies for generating variability. Part 4: Mutation techniques. *In: Ceccarelli, S., Guimarães, E. P. and Weltzien, E. (eds.) Plant breeding and farmer participation*. ICRISAT-ICARDA-FAO. Roma. pp.: 159-194.
- Nasiru, I. and Ifenkwe, O. P. 2004. Screening of bi-parental and mutant clones of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) for resistance to smut disease. *Tropicultura* 22 (4): 173-175.
- Nasr, M. I. and Esh, A. M. H. 2014. Effect of gamma irradiation on morpho-agronomic characters of sugarcane (GT54-9). *Green Technologies for Sustainable Growth of Sugar & Integrates Industries in Developing Countries*: 233-238. DOI: 10.13140/2.1.4492.8802
- Nikam, A. A.; Devarumath, R. M.; Ahuja, A.; Babu, H.; Shitole, M. G. and Suprasanna, P. 2015. Radiation-induced *in vitro* mutagenesis system for salt tolerance and other agronomic characters in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *The Crop Journal* 3 (1): 46-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.09.002>
- Nikam, A. A.; Devarumath, R. M.; Shitole, M. G.; Ghole, V. S.; Tawar, P. N. and Suprasanna, P. 2014. Gamma radiation, *in vitro* selection for salt (NaCl) tolerance, and characterization of mutants in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant* 50: 766-776. DOI: 10.1007/s11627-014-9630-4
- Oloriz, M. I.; Gil, V.; Rojas, L.; Veitía, N.; Höffe, M. and Jiménez, E. 2012. Selection and characterization of sugarcane mutants with improved resistance to brown rust obtained by induced mutation. *Crop and Pasture Science* 62 (12): 1037-1044. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP11180>
- Patade, V. Y. and Suprasanna, P. 2008. Radiation induced *in vitro* mutagenesis for sugarcane improvement. *Sugar Tech* 10: 14-19.

Patade, V. Y.; Suprasanna, P.; Bapat, V. A. and Kulkarni, U. G. 2006. Selection for abiotic (salinity and drought) stress tolerance and molecular characterization of tolerant lines in sugarcane. BARC Newsletter 273: 244-257.

Pérez-Nicolás, M.; Colinas-León, M. T.; Alia-Tejacal, I.; Rodríguez-Barbecho, C.; Peña-Ortega, M. G. y De la Cruz-Torres, E. 2022. Variabilidad inducida en caracteres morfológicos de *Euphorbia fulgens* Karw. ex Klotzsch. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 13 (3): 469-482. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2845>

Predieri, S. 2001. Mutation induction and tissue culture in improving fruits. Plant Cell, Tissue and Organ Culture 64: 185-210.

Rao, J. T.; Srinivasan, K. V. and Alexander, K. C. 1966. A red-rot resistant mutant of sugarcane induced by gamma irradiation. Proceedings of the Indian Academy of Science 64: 224-230.

Rutherford, R. S.; Snyman, S. J. and Watt, M. P. 2014. *In vitro* studies on somaclonal variation and induced mutagenesis: progress and prospects in sugarcane (*Saccharum* spp.) – a review. Journal of Horticultural Science & Biotechnology 89 (1): 1-16. DOI: [10.1080/14620316.2014.11513041](https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513041)

Saif, U. R.; Rashid, M.; Asad, S.; Zafar, Y. and Washeed, R. A. 2001. Use of radiation and *in vitro* techniques for development of salt tolerant mutants in sugarcane and potato. IAEA-Tecdoc. 1227: 51-60.

Samad, M. A.; Begum, S. and Majid, M. A. 2001. Somaclonal variation and irradiation in sugarcane calli for selection against red rot, water-logged conditions and delayed or non-flowering characters. IAEA-Tecdoc. 1227: 45-50.

Suprasanna, P.; Patade, V. Y.; Vaidya, E. R. and Patil, V. D. 2009. Radiation induced *in vitro* mutagenesis, selection for salt tolerance and characterization in sugarcane. In: Shu, Q. Y. (ed.) Induced Plant Mutations in the Genomics Era. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. Pp.:145-147.

Valdez, B. A.; Orellana P., P. A. e Izquierdo R., F. 2005. Evaluación en campo de mutantes de caña de azúcar de la variedad SP 70-1284 obtenidos por mutagénesis *in vitro*. Biotecnología Vegetal 5 (1): 3-8.

Valdez, B. A.; Orellana P., A. P.; Veitía R., N. y Torres R., D. 2004. Crecimiento, regeneración y radiosensibilidad de callos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* ssp. híbrido var. SP 70-1284) tratados con radiación gamma fuente ⁶⁰Co. Biotecnología vegetal 4 (3): 165-169.