



**Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, A.C.**

**VARIABILIDAD INDUCIDA CON RADIACIÓN GAMMA ^{60}Co
EN ATRIBUTOS AGRONÓMICOS, QUÍMICOS Y
BIOQUÍMICOS DE JAMAICA (*Hibiscus sabdariffa* L.)**

Por:

Juan Angel Rivera Quilez

TESIS APROBADA POR LA

COORDINACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS DE
ZONAS TROPICALES Y SUBTROPICALES

Como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

APROBACIÓN

Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Juan Ángel Rivera Quilez, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias.



Dra. María Dolores Muy Rangel
Directora de Tesis



Dr. Cesar San Martín Hernández
Co-director de tesis



Dr. José Basilio Heredia
Integrante del comité de tesis



Dra. Josefina León Félix
Integrante del comité de tesis

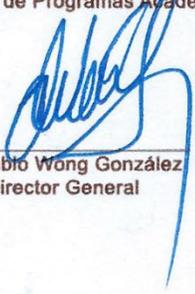
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis “Variabilidad Inducida con Radiación Gamma ^{60}Co en Atributos Agronómicos, Químicos y Bioquímicos de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.)” es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor Juan Ángel Rivera Quilez, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director(a) de tesis.



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.**
Coordinación de Programas Académicos



Dr. Pablo Wong González
Director General

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., CIAD - Coordinación Regional Culiacán, por permitirme realizar mis estudios de posgrado en sus instalaciones.

A mi directora de tesis la Dra. María Dolores Muy Rangel, por adoptarme como parte de su equipo y por su apoyo en la realización de esta investigación, al Dr. Cesar San Martín por siempre estar al pendiente en el trabajo realizado y ayudarme en todo momento a pesar de encontrar lejos de la institución, al Dra. Josefina León Felix y al Dr. José Basilio Heredia por sus conocimientos y esfuerzo en el desarrollo del trabajo.

A los Maestros en Ciencias de los diferentes laboratorios que participaron en la realización de este trabajo: Laura Contreras Angulo, por el apoyo en el Laboratorio de Alimentos Funcionales y Nutraceúticos, gracias por su tiempo y conocimientos y a Eduardo Sánchez Sánchez, del Laboratorio de Tecnología de Alimentos por sus aportes técnicos y crear un ambiente divertido.

A la Dra. Jeny Hinojosa por toda la ayuda y conocimientos que me brindo desde el primer momento hasta al final, gracias por estar batallándome en todo momento.

A Luis y Axel, por su amistad y apoyo en los días soleados en las mallas sombras.

A todos mis compañeros de generación en especial a Cesar Sosa, Juan Luis e Ignacio, gracias por sus comentarios, sugerencias y apoyo.

A todas aquellas personas que compartieron un poco de su tiempo conmigo y por sus conocimientos.

A todas las personas del CIAD, A.C. que hicieron posible la realización de este proyecto e hicieron más amena mi estancia, muchas gracias.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres, quienes siempre me han apoyado en cada uno de mis logros de mi vida, en especial a mi madre que a pesar de que ya no te encuentras conmigo en este momento, sé que estaría muy feliz de lo que estoy logrando.

A mis amigos, compañeros, profesores y a todos aquellos que fueron parte de otra gran meta en mi vida.

CONTENIDO

APROBACIÓN	2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL	3
AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	5
CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE CUADROS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. ANTECEDENTES	17
2.1. Origen y Distribución de la Jamaica	17
2.2. Taxonomía y Morfología de la Jamaica	17
2.3. Requerimientos Edafoclimáticos de la Jamaica	19
2.4. Requerimientos Nutricionales	19
2.5. Producción de Jamaica	20
2.6. Usos Generales de la Jamaica.....	21
2.6.1. Propiedades Medicinales del Cáliz de Jamaica	21
2.7. Composición Nutricional y Componentes Bioactivos del Cáliz de Jamaica	21
2.7.1. Antocianinas	22
2.7.2. Capacidad Antioxidante.....	24
2.8. Mutaciones	25
2.8.1. Mutagénesis	25
2.8.2. Rayos Gamma.....	26
2.8.3. Mejoramiento Genético por Mutagénesis.....	27
2.8.4. Mutagénesis en Jamaica.....	28
3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	29
4. HIPÓTESIS	30
5. OBJETIVOS	31
5.1. Objetivo General.....	31
5.2. Objetivos Específicos	31
6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	32
7. MATERIALES Y MÉTODOS	33
7.1. Periodo Experimental	33
7.2. Establecimiento del Cultivo.....	34

CONTENIDO (Continuación)

7.2.1. Germinación de Semillas	34
7.2.2. Aplicación de Plaguicidas.....	34
7.2.3. Preparación del Sustrato	35
7.2.4. Sistema de Riego	35
7.2.5. Trasplante.....	36
7.2.6. Diseño Experimental.....	36
7.3. Variables de Respuesta Analizadas	37
7.3.1. Variables agronómicas.....	37
7.3.1.1. Rendimiento húmedo	37
7.3.1.2. Rendimiento seco.....	37
7.3.1.3. Tasas de crecimiento.....	37
7.3.1.4. Análisis de color.....	38
7.3.2. Variables Proximales	38
7.3.2.1. Determinación de la humedad.....	38
7.3.2.2. Determinación de cenizas.. ..	39
7.3.2.3. Determinación de grasas.. ..	40
7.3.2.4. Determinación de proteínas	40
7.3.2.5. Determinación de fibra total dietaria	41
7.3.2.6. Determinación del contenido de carbohidratos.....	43
7.3.3. Variables Minerales	43
7.3.4. Variables de Potencial Antioxidante.....	44
7.3.4.1. Determinación del contenido de fenoles totales.	44
7.3.4.2. Determinación de antocianinas totales.....	44
7.3.4.3. Determinación de la capacidad antioxidante.....	45
7.4. Análisis Estadístico	45
8. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	46
8.1. Rendimiento	46
8.1.1. Rendimiento Húmedo.....	46
8.1.2. Rendimiento Comercial	48
8.2. Color de Cáliz Seco	50
8.3. Diámetro y Longitud de Cáliz de Jamaica.....	53
8.4. Tasas de Crecimiento Relativo en Altura del Cultivo de Jamaica	54
8.5. Tasas de Crecimiento Relativo del Diámetro de Tallo.....	57
8.6. Resultados Proximales.....	60
8.6.1. Cenizas.....	61
8.6.2. Proteína	62
8.6.3. Fibra Dietaria Total.....	65
8.6.4. Grasa	66
8.6.5. Carbohidratos.....	68
8.7. Minerales	70
8.8. Potencial Antioxidante	74

CONTENIDO (Continuación)

9. CONCLUSIONES	78
10. RECOMENDACIONES	79
11. REFERENCIAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Superficie sembrada de jamaica en México en los últimos 18 años.....	20
2	Entidades federativas productoras de jamaica en México.....	20
3	Estructura química de antocianina.....	23
4	Rendimiento de cáliz húmedo en los cultivares de jamaica 4Q4 y criolla Huajicori. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	47
5	Rendimiento de cáliz húmedo de jamaica según el nivel de radiación gamma ^{60}Co (Gy). Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	47
6	Rendimiento húmedo de cáliz, según las combinaciones entre cultivar y la dosis de radiación gamma ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	48
7	Rendimiento de cáliz seco en los cultivares de jamaica 4Q4 y criolla Huajicori. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	49
8	Rendimiento de cáliz seco por las dosis de radiación ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	49
9	Rendimiento de cáliz seco según la combinación entre el cultivar y los niveles de radiación gamma ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	50
10	Valores generados por el modelo de Tasas de crecimiento relativo en altura en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘criolla Huajicori’ tratado con radiación gamma ^{60}Co	56
11	Valores generados por el modelo de Tasas de crecimiento relativo en altura en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘4Q4’ tratado con radiación gamma ^{60}Co	56
12	Valores generados por el modelo de Tasas de crecimiento relativo en diámetro del tallo de planta en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘4Q4’ tratado con radiación gamma ^{60}Co	59
13	Valores generados por el modelo de tasas de crecimiento relativo en diámetro del tallo de planta en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘criolla Huajicori’ tratado con radiación gamma ^{60}Co	60

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
14	Contenido de cenizas del cáliz por las dosis de radiación ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	61
15	Contenido de cenizas (%) en el cáliz seco, según las combinaciones del cultivar y las dosis de radiación γ ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$)	62
16	Concentración de proteína en cáliz seco en los cultivares de jamaica 4Q4 y criolla Huajicori. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	63
17	Concentración de proteína en el cáliz seco por las dosis de radiación ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	63
18	Concentración de proteína en el cáliz seco, según las combinaciones probadas entre el cultivar y las dosis de radiación γ ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$)	64
19	Concentración de fibra dietaria total en el cáliz seco por las dosis de radiación ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	65
20	Concentración de fibra dietaria total en el cáliz seco, según las combinaciones probadas entre el cultivar y de las dosis de radiación γ ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$)	66
21	Concentración de grasa en el cáliz seco por las dosis de radiación ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	67
22	Concentración de grasa en el cáliz seco, según las combinaciones probadas entre el cultivar y las dosis de radiación γ ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$)	67
23	Contenido de carbohidratos en el cáliz seco por las dosis de radiación ^{60}Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)	68

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
24	Concentración de carbohidratos en el cáliz seco, según las combinaciones probadas entre el cultivar y las dosis de radiación γ ⁶⁰ Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$)	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Distribución de tratamientos.....	33
2	Calendario de aplicación de plaguicidas.....	34
3	Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y la interacción de ambos en el rendimiento húmedo y comercial del cáliz de jamaica.....	46
4	Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y la interacción de ambos en luminosidad, cromaticidad y °Hue del cáliz seco de jamaica.....	51
5	Atributos de color (luminosidad, cromaticidad y °Hue del cáliz seco de jamaica por efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y su combinación aplicada.....	52
6	Efectos de diámetro y longitud de cálices de jamaica.....	53
7	Diámetro y longitud promedio de cáliz de jamaica por efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y su combinación aplicada en jamaica.....	54
8	Tasas de crecimiento relativo en altura de planta por efecto del tiempo de cultivo en dos cultivares de jamaica expuesto a la radiación gamma ⁶⁰ Co...	55
9	Tasas de crecimiento relativo en diámetro del tallo de la planta por efecto del tiempo de cultivo en dos cultivares de jamaica expuestos a la radiación gamma ⁶⁰ Co.....	58
10	Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y la interacción de ambos en los atributos proximales del cáliz de jamaica.....	60
11	Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y su interacción, en los minerales del cáliz seco de jamaica.....	71
12	Minerales (N, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn) del cáliz seco por efecto de la combinación del cultivar y la radiación gamma aplicada en jamaica...	72
13	Efecto de las combinaciones entre el cultivar y la radiación gamma ⁶⁰ Co aplicada al cultivo, en la concentración de minerales del cáliz seco de jamaica.....	72
14	Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y su interacción, en los atributos antioxidantes del cáliz seco de jamaica.....	74
15	Potencial antioxidante (fenoles totales, antocianinas totales y capacidad antioxidante) del cáliz seco de jamaica por efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰ Co y su combinación.....	75

RESUMEN

Hibiscus sabdariffa L. popularmente conocida en México, como jamaica, es una de las plantas medicinales e industriales más importantes y populares. En virtud del bajo rendimiento del cultivo, la producción de jamaica es insuficiente para abastecer la demanda del país, además es una planta con baja variabilidad genética al ser una especie autopolinizante y como nuestro país no es centro de origen, son pocos los cultivares producidos, generando la oportunidad de explorar métodos para aumentar su variabilidad genética y seleccionar fenotipos con características sobresalientes de interés agronómico. La mutagénesis por cobalto-60 (^{60}Co) es una de las técnicas más utilizadas para aumentar la variabilidad genética en vegetales. El objetivo de esta investigación fue analizar atributos morfológicos, nutricionales y nutraceuticos en cultivos de plantas de jamaica de segunda generación (M2) en función de los tratamientos obtenidos por la exposición de rayos gamma ^{60}Co de 0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy, aplicados en semillas de los cultivares 4Q4 y criolla Huajicori. Los tratamientos se establecieron bajo un esquema completamente al azar en condiciones de malla sombra e hidroponía. Los resultados indican que los cultivares de jamaica tratados con radiación gama ^{60}Co no conservan la misma tendencia en cada dosis de radiación, según los resultados de los diferentes parámetros de calidad evaluados. Las tasas de crecimiento en diámetro de tallo y altura de planta muestran una tendencia cuadrática en el crecimiento del cultivo de jamaica; además, se observó que hay una tendencia de reducción en el diámetro del cáliz por la exposición a la radiación gamma. El mayor rendimiento comercial se encontró en criolla Huajicori con radiación gamma 300 Gy ($1.7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) superior 38% en comparación con las muestras no irradiadas. El color de cáliz seco evidenció efectos significativos en luminosidad, cromaticidad y °Hue. Las variables proximales (proteína, fibra dietaria total, grasa, carbohidratos y cenizas) y minerales exhibieron cambios positivos como negativos en los cultivares de jamaica bajo las diferentes dosis de radiación gamma. Las radiaciones gamma en la jamaica favorecieron el potencial antioxidante (fenoles totales, antocianinas y capacidad antioxidante) del cáliz. De manera general, se concluye que los resultados en rendimientos, potencial antioxidante y proximal de cáliz de jamaica pueden aumentar el aprovechamiento de la jamaica mediante el desarrollo de nuevo material genético de interés agronómico.

Palabras clave: *Hibiscus sabdariffa*, variabilidad, mutagénesis, rayos gamma.

ABSTRACT

Hibiscus sabdariffa L., popularly known as jamaica in Mexico, is one of the most important and popular medicinal and industrial plants. Due to the low yield of the crop, the production of roselle is insufficient to supply the country's demand. Furthermore, it is a plant with low genetic variability because it is a self-pollinating species, and since México is not the center of origin, few cultivars are produced, generating the opportunity to explore methods to increase its genetic variability and select phenotypes with outstanding characteristics of agronomic interest. Cobalt-60 (^{60}Co) mutagenesis is one of the exceptional techniques to increase genetic variability in plants. The objective of this research was to analyze morphological, nutritional, and nutraceutical attributes of the second generation (M2) roselle plants as a function of the treatments obtained by exposure to 0, 100, 200, 300, 400, 500 and 600 Gy of ^{60}Co gamma rays applied to seeds of 4Q4 and Criolla Huajicori jamaica cultivars. The treatments under a completely randomized scheme in the greenhouse and hydroponic conditions were established. The results indicate that the jamaica cultivars treated with ^{60}Co gamma radiation do not conserve the same tendency in each dose of radiation based on the results from the different quality parameters evaluated. The growth rates in stem diameter and plant height show a quadratic trend in the growth of the roselle crop; in addition, it was observed that there is a tendency of reduction in the calyx diameter by exposure to gamma radiation. The highest commercial yield was found in criolla Huajicori with gamma radiation 300 Gy (1.7 t ha^{-1}), with over 38% as compared to non-irradiated samples. Dry calyx color showed significant effects on luminosity, chromaticity and °Hue. Proximate variables (protein, total dietary fiber, fat, carbohydrate and ash) and minerals exhibited both positive and negative changes in the roselle cultivars under the different combinations of gamma irradiation. The antioxidant potential (total phenols, anthocyanins and antioxidant capacity) of the gamma irradiated calyces was improved. In general, it is concluded that the results on yields, antioxidant potential and proximal calyx of roselle can contribute to increase the utilization of roselle through the development of new genetic material of agronomic.

Keywords: *Hibiscus sabdariffa*, variability, mutagenesis, gamma rays.

1. INTRODUCCIÓN

Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) es una especie de la familia Malvaceae que crece en las regiones tropicales y subtropicales, originaria de África, se produce para consumo de semillas, hojas y cálices. Esta especie es conocida como una de las plantas medicinales más famosas para el tratamiento de diversas enfermedades como cardiovasculares, hipertensión, hiperlipidemias, obesidad, efecto diurético, protección contra hepatotoxicidad y presenta propiedades quimiopreventivas (Caro Velarde *et al.*, 2012). Una de las principales características de la jamaica es su actividad antioxidante; además, la jamaica se utiliza como materia prima en las industrias farmacéutica y cosmética, por lo que su consumo ha aumentado en los últimos años. En México, la producción de jamaica apenas abastece el 50% del consumo de la población, el resto es importado de países como China, India y Sudan (Rodríguez 2019).

La jamaica tiene una baja variabilidad genética debido a que es una planta autopolinizante por lo que se requieren diversos métodos para aumentar su variabilidad; además, se ha reportado que tiene una barrera de cruzabilidad para lograr las combinaciones de genes deseados, presentando los métodos convencionales un gran desafío (Vaidya, 2000; Kwofie *et al.*, 2017). Por tanto, el mejoramiento genético puede ser asistido por distintas técnicas, entre las cuales se encuentra la inducción de mutagénesis mediante el uso de rayos gamma ^{60}Co . La aplicación de la mutagénesis con rayos gamma en el mejoramiento genético y en la producción agrícola se inició a mediados del siglo XX en cultivos como el maíz (Hernández-Muñoz *et al.*, 2019).

La inducción de mutaciones es una alternativa para generar variabilidad genética no presente en la naturaleza (Shu *et al.*, 2012). Se ha reportado que la mutagénesis ha mejorado muchos rasgos importantes en plantas, tales como el tamaño, tiempos de floración, color, rendimiento, entre otros caracteres de interés (Atúnez-Ocampo *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2018; Ulakapi y Ozmen, 2018). Por lo que la radiación con rayos gamma es un método atractivo para inducir la expresión de genes recesivos y generar nuevas variaciones genéticas con caracteres de interés. En jamaica se han comparado efectos favorables obtenidas a través del fitomejoramiento por los rayos gamma, mejorando rendimientos (Hanafiah *et al.*, 2017), la calidad, nutrición de la planta (El-Sherif *et al.*, 2011), adaptaciones al medio ambiente y además de cambios morfológicos (Shukla *et al.*, 2016). También, Syahputra *et al.* (2017) mostraron que la exposición de rayos gamma de 150, 300 y 450 Gy provocaron de manera favorable cambios en el color en cálices de *Hibiscus sabdariffa*; mientras

que para tomatillo (*Solanum pimpinellifolium*) de plantas M2 se necesitaros dosis de 600 Gy (Nunoo *et al.*, 2014) y 150 y 300 Gy en ornamentales (Schum, 2003). Dado a los resultados favorables de la radiación gamma sobre algunas variables de calidad en diversos vegetales, es importante estudiar el comportamiento agronómico y las características de calidad físicas, químicas y bioquímicas de los cálices de plantas de jamaica generadas a partir de semillas irradiadas con rayos gamma ^{60}Co .

2. ANTECEDENTES

2.1. Origen y Distribución de la Jamaica

Hibiscus sabdariffa L. es una planta anual perteneciente a la familia Malvaceae; se cultivan más de 300 especies distribuidas ampliamente en muchos países. Esta planta nativa de África se cultiva en regiones tropicales y subtropicales de países como Arabia Saudita, China, Egipto, Filipinas, India, Indonesia, Malasia, México, Nigeria y Vietnam (Morton, 1987; Ali *et al.*, 2003). Esta especie, es conocida como “roselle”, “sorrel”, “karkadé” (Ali *et al.*, 2003), “mesta” (Rao, 1996) y “jamaica” en México (Carvajal-Zarrabal *et al.*, 2005).

El origen de la jamaica es África Subsahariana, el cual es el centro de la biodiversidad genética del género *Hibiscus*, donde se han reportado nueve de los trece genomas conocidos de este género; solo *H. sabdariffa* L. es el único tetraploide, se cree que esta variedad no se encuentra en estado silvestre (Wilson, 1994). Tanto la evidencia citológica como la morfología del polen apuntan a *H. asper* y *H. mechowii* como donantes del genoma de *H. sabdariffa* además de que son morfológicamente muy similares (Wilson, 1994).

Esta especie probablemente fue traída al hemisferio occidental en el siglo XVII por esclavos africanos; en el año 1707 llegó a la isla de Jamaica y se nombró considerando el nombre de este país (Vaidya, 2000). Alrededor de 1840 la jamaica comenzó a cultivarse en Guatemala, en México se introdujo por los españoles durante la colonización (Galicia-Flores *et al.*, 2008).

2.2. Taxonomía y Morfología de la Jamaica

De acuerdo con la base de datos Integrated Taxonomic Information System (ITIS) la clasificación taxonómica de la jamaica es la siguiente:

Reino: Plantae

División: Tracheophyta

Clase: Dicotyledoneae

Orden: Malvales

Familia: Malvaceae

Género: *Hibiscus*

Especie: *sabdariffa* L.

La jamaica es una planta de tipo arbustiva, anual de rápido crecimiento, con alturas desde 2 a 3.5 m con forma de cuña, se cubre de hojas empezando en la copa, así como en las ramas y soporta grandes axilas con flores. Dispone de un sistema radical desarrollado y profundo, por lo que muestra gran adaptabilidad bajo condiciones restrictivas de humedad en el suelo. La raíz de la planta es pivotante, coriácea, grisácea e inodora. Es un arbusto, sub-leñoso, con tallo rojizo, ramoso, cuyo color también se ve en la nervadura de las hojas, en los cálices y en los botones de las flores. El tallo encierra una médula verdosa ácida y sin color. Las hojas son verdes por arriba y amarillentas por abajo; alternas, lisas, con pecíolos largos y erguidos, llevan una glándula pequeña en el nacimiento de la nervadura dorsal provisto de estípulas filiformes. Están compuestas de tres a cinco lóbulos oval-lanceolados, siendo el centro mucho más largo. Las hojas situadas en la parte interior del tallo son simples, ovales y más pequeñas. Todas son flexibles, dentadas con la nervadura principalmente de carmín y su sabor es ligeramente astringente (Caro *et al.*, 2012).

Las flores de la planta de jamaica son bisexuales, axilares de color amarillo claro, solitarias y casi sésiles y los cálices son casi persistentes, rojizos, el interior del cáliz es de color púrpura. La corola es campanulada, de color rosado o amarillo rojizo, compuesta de cinco pétalos provisto de una mancha de color oscuro en la parte inferior; en el centro de la flor hay una columna estaminal que contiene numerosos estambres en la parte superior, los cuales tienen pequeños filamentos libres que llevan anteras reniformes. El ovario es súpero, coronado con un estilo filiforme y situado en medio de la columna estaminal, la parte superior está dividida en cinco partes provistas de estigmas globosos (Caro *et al.*, 2012).

La corola después de cierto tiempo se marchita y desaparece quedando solo el cáliz con sépalos unidos de color rojizo que se vuelve carnoso y toma color oscuro y sabor ácido, consta de cinco a siete sépalos vellosos, epicáliz unido a su base y añadido al cáliz. El producto de esta unión es el objeto de interés económico para los productores de jamaica. La longitud de los cálices varía desde 26.60 mm hasta 33.83 mm, con un diámetro desde 24.65 mm hasta 33.05 mm y una abertura de cáliz de 1.0 a 1.52 mm, dependiendo de la variedad (Caro *et al.*, 2012).

2.3. Requerimientos Edafoclimáticos de la Jamaica

La planta de jamaica se desarrolla bien en suelos con buen drenaje, pero prefiere suelos francos arenosos para su óptimo desarrollo de raíz llegando entre 50-150 cm de profundidad, con salinidad de menos de 4.0 dS/m de conductividad eléctrica y un rango de pH de 6.0 a 7.8 (Mccaleb, 1996; Contreras *et al.*, 2009).

La producción óptima para la jamaica requiere climas tropicales o subtropicales con lluvias estacionales de 100 a 250 mm mes⁻¹ durante 3-4 meses que dura su etapa de crecimiento, tolera altitud del nivel del mar hasta 900 m, además requiere temperaturas entre 10 y 35°C (Mccaleb, 1996; Contreras *et al.*, 2009). Es un cultivo fotoperiódico por lo que requiere una iluminación óptima de 13 h diarias para promover su desarrollo vegetativo, pero se obtiene un desarrollo con al menos 10 h de luz (Duke, 1983), con un fotoperiodo menores de 10 h se induce la floración y se detiene el crecimiento (Morton, 1987; Contreras *et al.*, 2009).

2.4. Requerimientos Nutricionales

La jamaica crece bien en suelos con fertilidad moderada, en suelos con baja fertilidad se requiere fertilización química, pero las recomendaciones son bajas en comparación con otros cultivos; las dosis de fertilizantes pueden variar de acuerdo a diferentes autores. Según Larios (1995), con aplicaciones de 60-40 kg·ha⁻¹ de nitrógeno y fósforo es suficiente. Morton (1987), recomienda dosis de 20-20-10 kg·ha⁻¹ de nitrógeno, fósforo y potasio aplicados todo junto al momento de la siembra. Mientras que Contreras *et al.* (2009) recomienda dosis de 18-46 kg·ha⁻¹ de nitrógeno y fósforo distribuidas en dos aplicaciones, la primera después de la germinación y la segunda de 30 a 40 días después de la primera aplicación.

2.5. Producción de Jamaica

En el año 2000, en México, el cultivo de jamaica ocupó una superficie de 18,540 ha y en el 2016 fue el año con la mayor superficie sembrada con 20,061 ha (Figura 1). Los principales productores de jamaica son Guerrero con 14,079 ha, Michoacán 1,714 ha, Oaxaca 1,605 ha, representando el 92% de la superficie cultivada en el país y el otro 8% por los estados de Puebla, Campeche y Nayarit (Figura 2) (SIAP,2020).

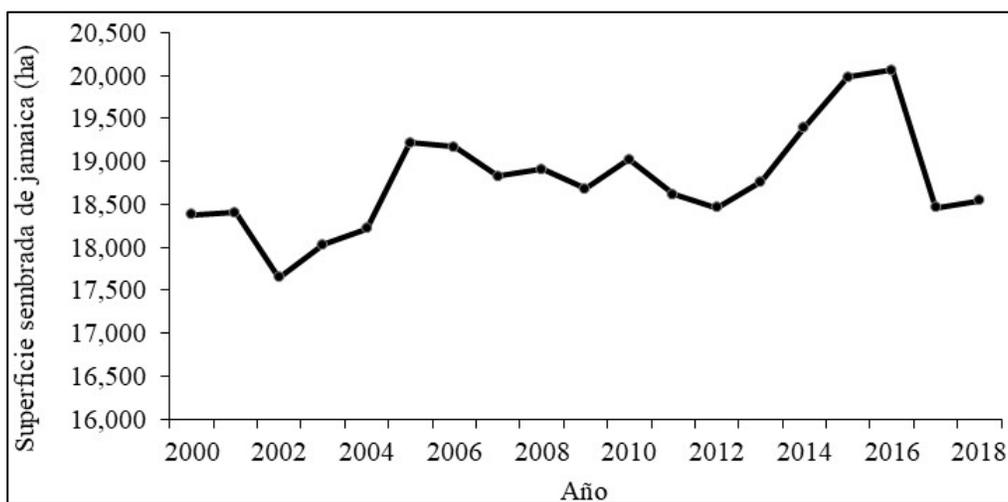


Figura 1. Superficie sembrada de jamaica en México en los últimos 18 años (SIAP,2020).



Figura 2. Entidades federativas productoras de jamaica en México (SIAP, 2020).

Los principales países productores de jamaica a nivel mundial son: China con 27.7%, India 17.9%, Sudán 9.1%, Uganda 8.4%, Indonesia 6.2%, Malasia 5.5%, en séptimo lugar se encuentra México con 5.1% y el 20.1% en el resto del mundo (FAO, 2020).

2.6. Usos Generales de la Jamaica

Desde la época colonial se han utilizado los cálices secos de jamaica en la preparación de bebidas y/o infusiones como planta medicinal por sus beneficios a la salud. Incluso, otras partes de la planta como sus tallos, hojas, semillas son utilizadas recientemente en procesos industriales como materia prima en la elaboración de mermeladas, gelatina, vinos, jarabes, colorante natural o como ingrediente en la elaboración de productos no comestibles (Caro *et al.*, 2012; Riaz *et al.*, 2018).

2.6.1. Propiedades Medicinales del Cáliz de Jamaica

En los extractos de cálices secos se ha reportado propiedades terapéuticas como las relacionadas con la prevención de enfermedades cardiovasculares, hipertensión, hiperlipidemias, obesidad, efecto diurético, protección contra hepatotoxicidad y propiedades quimiopreventivas (Caro Velarde *et al.*, 2012). Así mismo, Castañeda y Cáceres (2014) en una revisión del uso terapéutico de la jamaica, encontraron evidencias medicinales para de *H. sabdariffa* con efectos favorables contra la hipertensión, dislipidemia e hiperuricemia.

2.7. Composición Nutricional y Componentes Bioactivos del Cáliz de Jamaica

Los cálices de jamaica son ricos en carbohidratos, proteínas, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos. De acuerdo a Riaz *et al.* (2018), el contenido nutricional de la planta de jamaica es de:

carbohidratos (68.7 %), seguido por la fibra cruda (14.6 %) y el contenido de cenizas (12.2 %). Mientras que Naturland (2004), reportó que la composición de los cálices secos de esta especie contiene proteínas (15.8 %), grasas (0.79 %) y carbohidratos (80.63 %).

Los cálices de jamaica también son ricos en ácidos orgánicos, ácido cítrico, ácido málico, ácido tartárico y ácidos polifenólicos (ácido hibisco y ácido protocatecúico) (Riaz *et al.*, 2018). Los cuales son los responsables del sabor ácido de las bebidas e infusiones preparadas a partir de los cálices de esta planta (Naturland, 2004). Los extractos acuosos de los cálices secos de *H. sabdariffa* aportan pigmentos de antocianinas con un espectro de transmisión similar al del colorante sintético rojo No. 2 y contiene dos antocianinas principales: la delphinidin-3-sambubiósido reportada también como delphinidin-3-xilosilglucósido o hibiscina y la cianidina-3-sambubiósido reportada como cianidina-3-xilosiglucósido o gopicianina y dos antocianinas menores: delphinidin-3-glucósido y cianidin-3-glucósido (Grandinaru *et al.*, 2003).

Los cálices contienen compuestos fitoquímicos producidos como metabolitos primarios y secundarios responsables del sabor, aroma, color y propiedades antioxidantes reportadas en bebidas, infusiones y extractos obtenidos de los cálices de esta planta. Los cálices de jamaica contienen muchos compuestos fitoquímicos que incluyen ácido L-ascórbico, ácido cítrico, anisaldehído, β -caroteno, β -sitosterol, antocianina-3-glucósido, cianidina-3-rutinósido, delphinidina, galactosa, gosipiacina, hibiscina, mucopolisacáridos, pectinas, ácido protocatecuico, quercetina, ácido esteárico y ceras (Hirunpanich *et al.*, 2006).

2.7.1. Antocianinas

Los dos compuestos de antocianinas (Figura 3) principales en los cálices de jamaica son delphinidina-3-sambubiósido y cianidina-3-sambubiósido, mientras que los dos compuestos menores son delphinidina-3-glucósido y cianidina-3-glucósido (Riaz *et al.*, 2018). Estos compuestos son derivados del metabolismo secundario de las plantas los cuales son responsables de pigmentar de forma natural a los tejidos que los producen; en este grupo de metabolitos secundarios se diferencian entre sí por el grado de oxidación que presentan en el tercer anillo que los conforma, entre estas se encuentran las flavonas, los flavonoides, las flavononas, las isoflavonas y las

antocianinas (Giusti y Jing, 2008). Da-Costa-Rocha *et al.* (2014) reportan el contenido de antocianinas entre 1.5 a 2.5 % del peso seco de cáliz de jamaica.

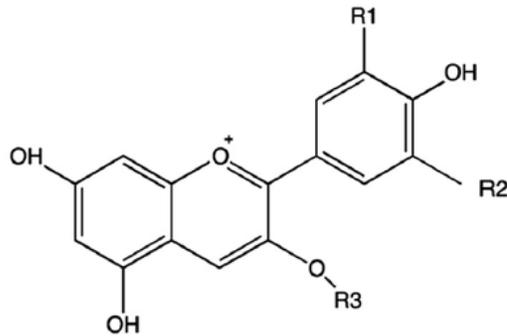


Figura 3. Estructura química de antocianinas: cianidina-3-sambubiósido (R1= OH; R2= H; R3= sambubiósido), delfinidina-3-sambubiósido (R1= OH; R2= OH; R3= sambubiósido), cianidina-3-glucósido (R1=OH; R2=H; R3=glucosa) y delfinidina-3-glucósido (R1=OH; R2=OH; R3= glucosa).

Las investigaciones relacionadas con antocianinas muestran la gran diversidad en sus funciones que aportan, las cuales van desde las más básicas como es su capacidad de actuar como atrayentes de polinizadores, hasta funciones específicas en el metabolismo de las plantas; inclusive, en las últimas décadas se han desarrollado investigaciones enfocadas al estudio de sus propiedades bioactivas (Mateus y Freitas, 2009).

Se ha generado gran interés en las antocianinas debido a sus posibles atributos en la salud tales como: la reducción de enfermedades coronarias, reducción del riesgo de padecer infarto, actividad anticarcinogénica (previene el cáncer, efectos antitumorales), efecto vaso protector, efecto antiinflamatorio, prevención de déficits de memoria, mejora del comportamiento cognitivo (mejora la memoria a corto plazo), función antioxidante, funciones neuro protectoras, efectos citoprotectores e inhibición de daño isquémico cerebral, acción anti-mutagénica y quimiopreventiva que contribuye a la reducción de la incidencia de enfermedades crónicas y la prevención de la obesidad y la diabetes, mejoramiento de la agudeza visual e inclusive puede estimular la producción de insulina y enfrentar problemas de leucemia y linfomas (Soto *et al.*, 2012).

El contenido de sustancias activas, entre ellas los antioxidantes, está controlado genéticamente, pero su expresión fenotípica está condicionada por variables ambientales como la luz, la

temperatura, la humedad o el nivel de fertilización. Las rutas de antocianinas están divididas en genes tempranos como CHS (chalcona sintetasa), CHI (chalcona isomerasa), F3H (flavanona 3-hidroxilasa), F3'H (flavonoide 3'-hidroxilasa) y F3'5'H (flavonoide 3'5'-hidroxilasa) y genes tardíos como DFR (dihidroflavonol 4-reductasa), ANS (antocianidina sintetasa) y UFGT (flavonoide 3-O-glucosyltransferasa) el cual es el encargado de inducir la expresión de antocianinas (Lim *et al.*, 2016).

2.7.2. Capacidad Antioxidante

La capacidad antioxidante es cuando una sustancia neutraliza la acción oxidante de una molécula inestable. Se trata de un grupo de vitaminas, minerales, colorantes naturales y otros compuestos vegetales y enzimas (Rosales, 2004). Esos efectos se han atribuido a una amplia variedad de compuestos que se encuentran de forma natural en las frutas y hortalizas que no han sido considerados como nutrientes; entre los cuales se pueden encontrar los polifenoles y de éstos a los flavonoides. Los efectos benéficos asociados a estas sustancias han promovido la investigación de los factores que pueden estimular su producción o afectar su contenido en las frutas y vegetales, tales como madurez al cosecharse, diferencias genéticas, condiciones de precosecha y postcosecha (Jeon *et al.*, 2006).

Da-Costa-Rocha *et al.* (2018) demostraron que los extractos de calices secos de jamaica tienen un efecto antioxidante notable. La actividad antioxidante del extracto se debe a su capacidad captora de oxígeno reactivo y la inhibición de los radicales libres de la actividad de la xantina oxidasa, a su acción protectora contra hidropéroxido de ter-butilo, protección de la célula contra el daño de peroxidación lipídica, inhibición y formación de sustancias reactivas de ácido tiobarbitúrico, reducción del agotamiento de glutatión, aumento del hígado y disminución de la actividad sanguínea de superóxido dismutasa y catalasa. Todos estos efectos se atribuyen a los extractos de las flores, así como de las semillas u hojas.

2.8. Mutaciones

La evolución ocurre principalmente por mutaciones espontáneas que generan nuevas estructuras genéticas en condiciones ambientales y permiten la supervivencia de la especie mientras se transfieren entre generaciones logrando conservar sus genes (Ulukapi y Nasircilar, 2015).

Además de estos cambios en la naturaleza, la ciencia desarrollo alternativas para inducir mutaciones artificiales mediante el uso de múltiples tecnicismos. Los factores químicos o físicos que conducen a la mutación se denominan mutágenos y los seres vivos que han tenido cambios hereditarios permanentes se denominan mutantes. Ambas mutaciones, espontaneas e inducidas son mecanismos por el cual surgen nuevos caracteres. No hay diferencia clara entre mutaciones espontáneas y las inducidas. Lo que parece ser una mutación espontánea podría ser una mutación inducida, ya que todas las plantas en la naturaleza están sujetas a bajas dosis de radiación natural. Asimismo, podría darse el caso de que después de tratar el material vegetal con un mutágeno, una mutación identificada puede ser una mutación espontánea, y no el resultado del tratamiento con el mutágeno (Gardner *et al.*, 2000).

Las mutaciones pueden clasificarse en función de la extensión de la secuencia de ADN afectada por el evento mutacional como una mutación a pequeña escala que involucra uno o unos pocos nucleótidos, o mutaciones a gran escala donde la estructura cromosómica se ve afectada. Los pequeños cambios en el ADN pueden clasificarse en mutaciones puntuales, deleciones e inserciones, mientras que las mutaciones a gran escala, como las inversiones y las duplicaciones de genes (Shu *et al.*, 2012).

2.8.1. Mutagénesis

La mutagénesis inducida o comúnmente conocida como "inducción de mutación" es el proceso mediante el cual la información genética de un organismo se cambia de manera estable. Las investigaciones de esta técnica han contribuido al progreso del conocimiento, especialmente en el área de la genética y la fisiología de los organismos procariotas y eucariotas; aportando gran cantidad de información y de material experimental; Además, la mutagénesis inducida ha sido

ampliamente utilizada como herramienta de apoyo para el mejoramiento vegetal (Ulukapi y Nasircilar, 2015). La mutagénesis puede ser inducida por el uso de radiación (agente físico) o mediante algún mutágeno químico y es un proceso que ocurre aleatoriamente en todo el genoma y dentro de cualquier locus o gen. La mutagénesis inducida, proporciona la probabilidad de generar mutaciones para cualquier gen de interés, pero también permite el desarrollo de mutaciones múltiples para cualquier gen objetivo de manera predictiva. Las plantas y organismos mutantes por mutagénesis inducida se denominan mutantes inducidos (Shu *et al.*, 2012).

En la década de 1920, se descubrió que la composición genética es susceptible a cambios por mutagénesis inducida. Desde entonces, se ha aplicado un método para aumentar la variabilidad genética en muchas plantas de cultivo. Los estudios iniciales de mutagénesis se dirigieron principalmente a identificar el mutágeno y la dosis óptima (o combinación de diferentes mutágenos) para lograr altas frecuencias y amplios rangos de mutaciones inducidas. Como producto de estas técnicas, se desarrollaron líneas de cultivo y cultivares con el establecimiento de protocolos adecuados de mutagénesis en varias especies de cultivos, tales como: cereales, forraje, fibra, tabaco, hortalizas y otras especies de interés (FAO/IAEA, 2010). El fitomejoramiento exige variación genética de las características útiles para mejorar los cultivos, el cual se puede promover empleado agentes mutagénicos físicos y químicos, para inducir mutaciones y generar variaciones genéticas de los cuales pueden seleccionarse los mutantes deseados.

2.8.2. Rayos Gamma

Entre los mutágenos físicos se encuentran los rayos X y los rayos gamma (γ) que son los más utilizados en la generación de mutaciones. En los últimos 50 años, el uso de rayos gamma ha incrementado en la inducción de mutaciones mientras que el uso de rayos X se ha reducido significativamente, esto se debe principalmente por su versatilidad (usos médicos, generación de mutaciones en plantas, irradiación de alimentos) y amplia disponibilidad (Shu *et al.*, 2012).

La unidad de medida para la absorción de energía de radiación (emitida por rayos gamma) de acuerdo al sistema internacional de unidades es Gray (Gy), equivalente a $1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, o bien 100 rads (dosis de radiación absorbida), la dosis absorbida (Gy) es independiente de cualquier material

especificado, la irradiación de dos materiales diferentes en condiciones exactamente iguales conducirá generalmente a diferentes dosis absorbidas, esto se debe a los diferentes coeficientes de absorción de los materiales (Spencer-Lopes *et al.*, 2018).

Los rayos gamma son producidos por isotopos radioactivos, cobalto-60 (^{60}Co) y cesio-137 (^{137}Cs). Ambos isotopos cuentan con características diferentes, el ^{137}Cs tiene una vida mucha más larga que ^{60}Co , pero se requiere 13 veces más ^{137}Cs para generar la misma actividad que ^{60}Co , mientras que el ^{60}Co decae 6 veces más rápido que ^{137}Cs (Shu *et al.*, 2012). Para Babaei *et al.* (2010) los rayos gamma son mutágenos físicos que han demostrado ser útiles para la modificación de nuevas variantes de rasgos que pueden dar lugar a la mejora de los cultivos y se puede utilizar como una herramienta complementaria en el mejoramiento genético. Las mutaciones generadas por rayos gamma es uno de los métodos alternativos para los criadores, ya que brinda la posibilidad de obtener algunas características deseadas que no existen en la naturaleza o se perdieron durante la evolución.

2.8.3. Mejoramiento Genético por Mutagénesis

Hasta ahora se han registrado 3,332 mutantes independientes en 210 especies, obtenidas en 70 países con los distintos métodos tradicionales de los cuales el 12.2% son por mutágenos químicos, el 85.9% por mutágeno físico y el 1.3% con combinación de ambos mutágenos, en el caso de los mutágenos físicos, los rayos gamma representan el 55% (IAEA, 2020); China e India encabezan la lista de países con más logros obtenidos a través de esta técnica, seguidos por Japón, Rusia y Alemania (Maluszynski, 2001).

En México, se han registrado mutagénesis inducida en dos cultivares de trigo obtenidas por el Colegio de Posgraduados; dos cultivares de soya obtenidas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y una más de soya, obtenida por el Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CESAEGRO). En la actualidad la investigación sobre mutagénesis radio inducida en México se aplica a diversos cultivos tales como amaranto, huauzontle, frijol, aguacate, limón mexicano, mango, frijol chino, maíz, jatropha, jamaica, así como en ornamentales como heliconia, nochebuena, nardo, entre otras. Ante los desafíos que

afronta la agricultura derivados del cambio climático, es importante considerar al fitomejoramiento por mutagénesis como una herramienta muy importante para generar variabilidad y obtener cultivos con mejores valoraciones agronómicas (Cruz, 2012).

2.8.4. Mutagénesis en Jamaica

En estudios por mutagénesis en jamaica se ha reportado inhibición de la actividad mitótica por cualquier tipo de mutágenos, los rayos gamma ^{60}Co generan un efecto en los perfiles de ADN presentando polimorfismos (Hanafiah *et al.*, 2019). Estos cambios se deben a roturas, transposiciones y eliminaciones en las bases del ADN (Al-Ansary *et al.*, 2016). Las mutaciones generadas por los rayos gamma son la fuente principal de todas las variaciones genéticas que existen en cualquier organismo, de esta manera, surgen formas mutantes que muestran efectos tanto grandes como pequeños en el fenotipo para todo tipo de rasgos que puedan ser hereditarios (Oladosi *et al.*, 2016). Se han reportado mejoras por mutagénesis en caracteres de la jamaica como incrementos en el porcentaje total de antocianinas, aumentos en los compuestos fenólicos y la actividad antioxidante (El-Sherif *et al.*, 2011) Incluso, pueden generar cambios en los caracteres morfológicos como en altura, diámetro de dosel, diámetro de tallo, número de hojas y área foliar (Shukla *et al.*, 2016). En dosis muy altas de rayos gamma ^{60}Co se ha reportado que provocan una morfología foliar diferente, la interrupción del equilibrio hormonal y la actividad de las enzimas en la célula vegetal (Chandrashekar *et al.*, 2013); en otros casos las irradiaciones no provocan efectos significativos en los caracteres de jamaica (Hanafiah *et al.*, 2017). En general, la mutagénesis inducida tiene un efecto en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Schum, 2003; Moghaddam *et al.*, 2011), además de que ha encontrado un efecto radio estimulador al acelerar la emergencia de las plántulas. Por lo tanto, se pueden generar variación a nivel molecular con tratamiento de radiación produciendo una gran cantidad de variación genética (Atúnez-Ocampo *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2018; Ulakapi y Ozmen, 2018).

3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1.- ¿Cómo es el patrón de crecimiento y rendimiento del cáliz de plantas de jamaica '4Q4' y 'criolla Huajicori', resultantes de semillas tratadas con rayos gamma en dosis de 0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy?
- 2.- ¿Cuál es el efecto del cultivar y las distintas dosis de rayos gamma evaluadas sobre el contenido de proteína, grasa, fibra, cenizas, carbohidratos y mineral del cáliz de jamaica '4Q4' y 'criolla Huajicori'?
- 3.- ¿Cuál es la respuesta en el potencial antioxidante del cáliz de jamaica '4Q4' y 'criolla Huajicori' procedentes de semillas sometidas a dosis de rayos gamma de 0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy?

4. HIPÓTESIS

1. La dinámica de crecimiento del cultivo de jamaica '4Q4' y 'criolla Huajicori' presenta un comportamiento cuadrático y el rendimiento del cáliz se aumenta un 10% por la exposición de sus progenitores a dosis crecientes de rayos gamma 100, 200, 300, 400, 500, 600 Gy con respecto a plantas no irradiadas.
2. El contenido de proteínas, carbohidratos y minerales del cáliz de jamaica '4Q4' y 'criolla Huajicori' es favorecido por las dosis de rayos gamma aplicados en las semillas progenitoras.
3. El cultivar y los rayos gamma generan cambios que resultan en un aumento de al menos 5% en el potencial antioxidante en el cáliz de plantas de jamaica '4Q4' y 'criolla Huajicori' procedentes de semillas irradiadas en dosis de 0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Evaluar la influencia del cultivar y la irradiación de rayos gamma aplicados en la semilla progenitora sobre parámetros agronómicos de la planta, características químicas, físicas y bioquímicas del cáliz de jamaica ‘4Q4’ y ‘criolla Huajicori’ cultivada en condiciones de malla sombra e hidroponía.

5.2. Objetivos Específicos

1. Estudiar la dinámica de crecimiento y el rendimiento de cáliz de dos cultivares (4Q4 y criolla Huajicori) de jamaica procedentes de semillas expuestas a rayos gamma de 0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy bajo condiciones de malla sombra e hidroponía.
2. Evaluar el efecto del cultivar de jamaica (4Q4 y criolla Huajicori) y de los niveles de rayos gamma (0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy) estudiados, en el contenido proximal, minerales y color del cáliz de jamaica.
3. Cuantificar la influencia del cultivar de jamaica (4Q4 y criolla Huajicori) y los niveles rayos gamma (0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy) aplicados en la semilla parental, sobre el contenido antocianinas, fenoles totales y la capacidad antioxidante del cáliz de jamaica.

6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mutagénesis inducida es una técnica de gran interés para generar diversidad genética en jamaica. La jamaica es planta autopolinizante, característica que condiciona e influye en una serie de desventajas como: caracteres indeseados que no se pueden eliminar, presentan menor resistencias o adaptación al cambio climático, plagas y enfermedades patógenas, no desarrollan nuevos caracteres, no hay evolución por lo que se produce una reducción de diversidad genética lo que provoca una limitación en la variedad. Se ha demostrado que la jamaica tiene un bajo porcentaje (0.20 a 0.68%) de cruzamiento natural lo cual no genera la suficiente variabilidad genética, esto se debe al hecho de que los estigmas de la flor no crecen lo suficiente y el cierre de las flores impiden el intercambio de genes (Vaidya, 2000). Además, se ha encontrado que *Hibiscus sabdarriffa* tiene una aparente barrera de cruzabilidad para lograr combinaciones de genes útiles, por lo que los métodos convencionales presentan un desafío (Kwofie *et al.*, 2017). La mutagénesis inducida es una de las técnicas que ayuda a promover cambios morfológicos, además de la variabilidad en cuanto al contenido nutricional, adaptación al medio ambiente, entre otros. Por lo tanto, mediante esta técnica es posible generar fenotipos nuevos que pueden ser empleados en programas de mejoramiento genético con el enfoque al incremento en rendimiento y contenido de pigmentos en los cálices de jamaica.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Periodo Experimental

El estudio se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD), Unidad Culiacán, durante el periodo de octubre del 2019 a abril del año 2021; se estableció el cultivo de jamaica en condiciones de malla sombra. En esta investigación se evaluó el contenido nutrimental y potencial antioxidante de dos cultivares de jamaica (criolla Huajicori y 4Q4) de segunda generación (M2) desarrollados a partir de semillas tratadas con rayos gamma (γ) ^{60}Co (0, 100, 200, 300, 500, 600 Gy), generando los tratamientos que se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución de tratamientos

Tratamiento	Radiación γ (Gy)	Cultivar
T1	0	4Q4
T2	100	4Q4
T3	200	4Q4
T4	300	4Q4
T5	400	4Q4
T6	500	4Q4
T7	600	4Q4
T8	0	criolla Huajicori
T9	100	criolla Huajicori
T10	200	criolla Huajicori
T11	300	criolla Huajicori
T12	400	criolla Huajicori
T13	500	criolla Huajicori
T14	600	criolla Huajicori

7.2. Establecimiento del Cultivo

7.2.1. Germinación de Semillas

El 14 de octubre del 2019 se realizó la siembra de semillas (M2) de los dos cultivares de jamaica (4Q4 y criolla Huajicori), previamente tratadas con rayos gamma (γ) ^{60}Co (0, 100, 200, 300, 500, 600 Gy). La germinación se realizó en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades, que se llenaron con una mezcla de sustrato empleando turba de Sphagnum sp. número 3 (Peat Moss[®], Canadá) y perlita en la proporción 80:20, v/v. Para cubrir la semilla, se adicionó una capa delgada de vermiculita en la parte superior al terminar la siembra para obtener una mayor retención de agua. La germinación emergencia se observó a los 2 días. Inicialmente las charolas de germinación se extendieron y se regaron con agua de la llave. Posteriormente, al aparecer y desarrollar el primer par de hojas verdaderas y hasta los 28 días se aplicó solución nutritiva al 25 % por subirrigación.

7.2.2. Aplicación de Plaguicidas

Durante el ciclo de cultivo se aplicaron plaguicidas como se indican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Calendario de aplicación de plaguicidas.

DDT ¹	Producto	Ingrediente Activo	Dosis	Método de aplicación
	Previcur	Fosetil-Al + propamocarb	1ml·l ⁻¹	Inmersión
	Fungimycin	estreptomicina: Oxitetraciclina: Sulfato de cobre	2g·l ⁻¹	Inmersión
6	Fungimycin	estreptomicina: Oxitetraciclina: Sulfato de cobre	2g·l ⁻¹	Drench
14	Fitosick	Triadimefón	1g·l ⁻¹	Drench
23	Fungimycin	estreptomicina: Oxitetraciclina: Sulfato de cobre	2g·l ⁻¹	Drench
27	Tecto60	Tiabendazol	0.16g·l ⁻¹	Drench
27	Tecto60	Tiabendazol	1g·l ⁻¹	Foliar
30	Imidacloprid	Imidacloprid	2ml·l ⁻¹	Drench
32	Previcur	Fosetil-Al + propamocarb	2ml·l ⁻¹	Drench
38	Ridomil Gold	metoxiacetil + clorotalonil	4g·l ⁻¹	Drench
40	Halcón	mancozeb + cymoxanil	2.5g·l ⁻¹	Foliar

55	Halcón	mancozeb + cymoxanil	5g·l ⁻¹	Drench
60	Imidacloprid	Imidacloprid	1.5ml·l ⁻¹	Foliar
66	Imidacloprid	Imidacloprid	1.5ml·l ⁻¹	Foliar
67	Fungimycin	estreptomicina: Oxitetraciclina: Sulfato de cobre	2g·l ⁻¹	Drench
80	Ridomil Gold	metoxiacetil + clorotalonil	2ml·l ⁻¹	Drench
94	Tecto60	Tiabendazol	1g·l ⁻¹	Foliar
98	Tecto60	Tiabendazol	1g·l ⁻¹	Foliar
103	Ridomil Gold	metoxiacetil + clorotalonil	2ml·l ⁻¹	Foliar
108	Ridomil Gold	metoxiacetil + clorotalonil	2ml·l ⁻¹	Foliar

¹DDT: Días después del trasplante

7.2.3. Preparación del Sustrato

Como sustrato para la preparación de las macetas se utilizó una mezcla del 50% de fibra de coco con chip y 50% de piedra pómez también conocido como “jal”. El acondicionamiento inicial de la fibra de coco fue mediante lavados para disminuir su conductividad eléctrica (CE) el cual tenía CE mayores a 5 a 8 dS·m⁻¹ que representa un problema para el óptimo desarrollo de la jamaica. Para esto se realizaron entre 3 y 4 lavados hasta disminuir la CE a <1 dS·m⁻¹, seguido de una sustitución iónica mediante Ca(NO₃)₂ para reemplazar al sodio (Na) por calcio (Ca), pero este lavado aumento la CE >1 dS·m⁻¹ por lo que se realizaron otra vez entre uno a dos lavados para disminuir la CE <1 dS·m⁻¹. El agua que se utilizó para realizar los lavados contaba con pH entre 6.5 a 7 por lo que el pH se ajustó entre 5.6 y 5.8, permitiendo reposar el sustrato por 30 minutos.

7.2.4. Sistema de Riego

El riego con solución nutritiva Steiner (1984), se realizó mediante un sistema de riego por goteo aplicando inicialmente 8 riegos de 40 ml por maceta. Inmediato al trasplante, la solución nutritiva se aplicó al 50 % considerando 16 riegos de 30 ml por evento; después a los 36 días la concentración de la solución incrementó al 75 % (aplicando 16 eventos de 35 ml por evento) y por último, al 100 % a partir de los 21 días después del trasplante, hasta los 122 días que duró el ciclo de cultivo.

7.2.5. Trasplante

El 14 de diciembre del 2019 se realizó el trasplante de jamaica en una casa sombra (70%) de CIAD Culiacán. Las plántulas se colocaron individualmente en contenedores, usando bolsas de plástico negro del número 40, empleando 10 litros de mezcla de sustrato por maceta.

7.2.6. Diseño Experimental

Los datos obtenidos de las variables respuesta, se analizaron usando un modelo de dos factores con arreglo al azar. El factor uno fue el cultivar de jamaica en sus dos niveles (4Q4 y criolla Huajicori) y el factor dos, la radiación de rayos gamma a las semillas progenitoras, empleando dosis de 0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy. La combinación de ambos factores generó 14 tratamientos y se usaron tres repeticiones para cada uno, obteniendo un total de 42 unidades experimentales. La unidad experimental fueron tres plantas. La ecuación del modelo es la siguiente:

$$Y_{Ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ijk}$$

Donde:

A_i = Factor A (Cultivar) Niveles de A: $i = 2$ (criolla Huajicori y 4Q4)

B_j = Factor B (radiación gamma) Niveles de B: $j = 7$ (0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy)

$(AB)_{ij}$ = Interacción de los factores AxB (Cultivar y radiación gamma) Niveles de $ij =$ (Criolla Huajicori y 4Q4) x (0, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy)

μ = media general

E_{ijk} = Error experimental

Y_{ijk} = Variable aleatoria que representa la respuesta obtenida

7.3. Variables de Respuesta Analizadas

Para realizar las determinaciones analíticas, el fruto se cosechó en madurez comercial (en fase de apertura de la cápsula que hace visible las semillas) entre los 115 a 122 días después del trasplante. Los cálices se separaron manualmente de la cápsula y se tomaron muestras para todos sus respectivos análisis.

7.3.1. Variables agronómicas

7.3.1.1. Rendimiento húmedo. El rendimiento húmedo ($\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$) se evaluó mediante el peso de los cálices de jamaica recién cortados y sin cápsulas, que se recolectaron en un solo corte; para el peso se utilizó una balanza analítica.

7.3.1.2. Rendimiento seco. El rendimiento seco ($\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$) se determinó en los cálices de jamaica deshidratados hasta un peso seco constante en una estufa secadora (NAHITA 631[®], Francia) a 80°C por 24 h y posteriormente se registró el peso en una balanza analítica.

7.3.1.3. Tasas de crecimiento. Durante la etapa vegetativa y reproductiva del cultivo, cada siete días se registró la altura (cm) y diámetro de tallo (cm) para determinar las tasas de crecimiento ($\text{cm}\cdot\text{día}^{-1}$). La tasa de crecimiento relativo en altura del cultivo (TCRA) y la tasa de crecimiento relativo en diámetro de tallo (TRCDT) se evaluaron según Parson y Hunt (1981), de la siguiente manera:

$$TCRA \left(\frac{AT_2 - AT_1}{t_2 - t_1} \right)$$

$$TCRDT = \left(\frac{DT_2 - DT_1}{t_2 - t_1} \right)$$

Donde:

AT₁ = Altura de tallo inicial

AT₂ = Altura de tallo final

DT₁ = Diámetro de tallo inicial

DT₂ = Diámetro de tallo final

t₁ = Tiempo inicial

t₂ = Tiempo final

Con base a la tendencia de los datos de las tasas de crecimiento, se especificaron modelos de regresión lineal para TCRA y TCRDT. El menor cuadrado medio del error (CME) y la R² fueron los criterios para determinar los modelos de mejor ajuste en ambas tasas de crecimiento. En este análisis estadístico, se utilizó el Software SAS 9.4 (2012, SAS[®] Institute Inc., U.S.A.).

7.3.1.4. Análisis de color. La medición de los atributos de color se realizó en la escala CIELCH (CIE, 1976). El color se obtuvo a través de muestras molidas de cálices secos de jamaica. Con un espectrofotómetro (CM-700d[®]; Konica Minolta) se registraron las lecturas L, a, b. La luminosidad (L) se obtuvo directamente, mientras que el ángulo de tono Hue ($^{\circ}Hue = \tan^{-1} a/b$) ó $^{\circ}Hue = \arctan b/a$ y la cromaticidad ($C = \sqrt{[a^2 + b^2]}$) fueron calculados utilizando el software OnColor QC[®] versión 5.

7.3.2. Variables Proximales

7.3.2.1. Determinación de la humedad. Este método se basa en una medición indirecta del agua eliminada del alimento, se calculó como porcentaje de agua, o humedad, por pérdida de peso que existe en la muestra debido a su evaporación por calentamiento (Pearson, 1993). Se pesaron

aproximadamente 2 gramos de muestra en un crisol de porcelana previamente tarado. Posteriormente, se colocaron dentro de una estufa de calor seco a una temperatura de 80 °C, durante 24 horas hasta llegar a peso constante. El porcentaje de humedad se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{(P_i - P_f) \times 100}{P_i}$$

Donde:

%H= Porcentaje de humedad

P_i= Peso inicial

P_f= Peso final

7.3.2.2. Determinación de cenizas. En este método la materia orgánica se oxida en ausencia de flama a una temperatura que fluctúa entre los 500-550 °C; el material inorgánico que no se volatiliza a esa temperatura se conoce como ceniza (Nollet, 1996).

Para cuantificar el porcentaje de cenizas se colocaron las muestras que se emplearon para la determinación de humedad en la mufla modelo AR-340® a una temperatura de 550 °C durante 16 horas o hasta completar la conversión a cenizas blancas. Una vez transcurrido ese tiempo se colocaron las muestras en un desecador durante 30-40 minutos. Se pesaron las cenizas y se determinaron mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Peso muestra calcinada}}{\text{Peso muestra fresca}} \times 100$$

7.3.2.3. Determinación de grasas. En esta metodología se mide la fracción del alimento que es soluble en disolventes de lípidos. Es una extracción continua por disolvente donde a la muestra se le hace pasar por vapor de disolvente y la grasa se cuantifica por la cantidad removida.

Para determinar el porcentaje de extracto etéreo se pesaron aproximadamente 2-3 gramos de muestra de cáliz de jamaica seca en un papel filtro #1 y se introdujo en un dedal de extracción, el cual se colocó en un extractor de grasa previamente tarado, posteriormente se adicionaron 150 ml de hexano y se colocó en el extractor de grasa durante 3 horas. Finalizado el proceso de extracción, se recuperó el hexano por 20 min, el vaso con residuo de hexano se colocó en una estufa de calor seco a 70°C por 24 horas. Una vez transcurrido ese tiempo se colocaron las muestras en un desecador durante 30-40 minutos. Se pesaron los vasos secos obtenidos al final de la extracción. El contenido de grasa se determinó con la siguiente ecuación:

$$\%E.E = \frac{P_{e.e} \times 100}{P_m}$$

Donde:

%E. E= porcentaje extracto etéreo

$P_{e.e}$ = Peso del extracto (peso del vaso seco al final de la extracción-peso del vaso seco)

P_m = Peso de muestra.

7.3.2.4. Determinación de proteínas. Mediante este método se cuantifica el nitrógeno total orgánico, posteriormente se multiplica por un factor de dilución para calcular el contenido proteico en la muestra de cáliz de jamaica. Este método consta de tres fases digestión, destilación y titulación. La primera fase que es la digestión, primeramente, se pesaron aproximadamente 0.2 gramos de muestra de cáliz de jamaica de cada tratamiento seca y se colocaron en un matraz MicroKjeldahl, donde se le agregó 1.5 g de mezcla catalizadora (sulfato de potasio y sulfato de cobre), junto con 5 ml de ácido sulfúrico concentrado, donde se llevó a cabo una digestión ácida. Posteriormente, los matraces con la muestra se colocaron en el digestor (Labconco 60300[®], Kansas

City, MS) y se realizó una digestión ácida con calor hasta obtener una solución azul-verde, esta coloración indica que el nitrógeno orgánico presente en la muestra se ha convertido en amoníaco y para medirlo fue necesario una titulación. Antes de titular la muestra, es necesario destilarla y para ello se dejarla enfriar y se diluye con 10 ml de agua destilada para llevar a cabo su destilación. Se calentó a baño María donde se hace reaccionar la muestra digerida con hidróxido de sodio al 40% produciendo vapores de amonio y agua que son destilados y recibidos en 15 ml de una solución de ácido bórico al 4% con 2-3 gotas de indicador (rojo de metileno y azul de metileno). El último proceso de recolección fue de 5 min, posteriormente la muestra fue titulada con una solución de HCl a 0.1 N. el contenido de proteína se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{H \times N \times 0.01401 \times 100}{\text{g de muestra}}$$

Donde:

H= Volumen de HCl gastado

N= Normalidad del HCl

0.01401= Mili equivalentes de nitrógeno

Factor de conversión = 6.25

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrógeno} \times \text{factor de corrección}$$

7.3.2.5. Determinación de fibra total dietaria. Para la determinación de fibra dietaria se utilizó una combinación de enzimas y temperaturas con la finalidad de digerir y eliminar el almidón y proteínas presentes en la muestra de cáliz de jamaica; quedando el material no digerible (fibra) el cual fue filtrado y pesado. El residuo fibroso fue corregido por proteína residual y contaminación por cenizas.

Se pesó 2 g por duplicado muestra de cáliz de jamaica seca en matraces de 400 ml, se le

adicionaron 50 ml de solución amortiguadora de fosfato (pH 6.0) a cada matraz y se verificó que las muestras presentaran el pH a 6.0; posteriormente se agregaron 50 µl de solución α-amilasa termostable, se taparon los matraz con papel aluminio y se colocaron en el baño María a una temperatura de 100°C con agitación continua por 30 min, lo que provocó que el almidón presente en la muestra sufra una gelatinización, hidrólisis y despolimerización. Una vez transcurrido el tiempo se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se ajustó el pH a 7.5 con solución de NaOH 0.275 N. Después de ajustar pH se le adicionó 100 µl de solución proteasa, la muestra fue hidrolizada con esta para solubilizar las proteínas, se colocó nuevamente el papel aluminio en el matraz y se incubó a 60°C con agitación constante por 30 min, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se ajustó el pH a 4.5 con HCl 0.325N, se adicionaron 200 µl de amiloglucosidasa para hidroliza los fragmentos del almidón a glucosa, se cubrió con papel aluminio y se incubó durante 30 min con agitación continua y después se agregaron aproximadamente 300 ml de alcohol precalentado al 60°C, se dejó precipitar durante 2 horas. Después de transcurrir el tiempo, la muestra se filtró en un crisol con celita (previamente tarado y humedecido con alcohol) en un equipo Fibertec® (modelo 1023), se lavó el residuo tres veces con 20 ml de alcohol al 80% y después con 2 lavados de alcohol al 96% y por último con un lavado de acetona. Finalmente, el residuo se secó en una estufa (NAHITA 631®, Francia) durante 24 horas a 70°C y se midió el contenido de proteína y cenizas al igual como se determinó en la fibra dietaria insoluble. El contenido de fibra dietaria insoluble y soluble se determinó mediante la siguiente ecuación

$$\% \text{ de fibra dietaria total} = \frac{P_r - C - P}{M} \times 100$$

Dónde:

P_r = Peso del residuo

C = Cenizas

P = Proteína

M = Peso de la muestra

7.3.2.6. Determinación del contenido de carbohidratos. El carbohidrato en las muestras se determinó por diferencia, restándole al 100% la suma del porcentaje de humedad, cenizas, proteínas, grasas y fibra. El resultado se reportó en porcentaje y después se realizó la conversión a $g \cdot kg^{-1}$.

7.3.3. Variables Minerales

Los minerales K, Na, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y Mn se determinó por el método 955.06, AOAC, 1998. La determinación de minerales se realizó mediante digestión seca de 2 g de cáliz de jamaica seco y molido, el cual se calcinó en una mufla a 550 °C por 12 h. Las cenizas se solubilizaron con 5 ml de HCl concentrado y se aforó a 100 ml con agua destilada. La solución ácida se filtró usando papel Whatman® 42 y se almacenó hasta su análisis empleando una alícuota para la determinación de los minerales.

La concentración de K, Na, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y Mn se determinó empleando un espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES, Agilent® 725-ES, Agilent Technologies Inc., Mulgrave, Australia). El instrumento se calibró con soluciones estándar y fue operado de acuerdo a los procedimientos del manual del instrumento.

Los resultados se expresaron en $mg \cdot kg^{-1}$ de cáliz seco para Na, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu, Fe y Mn y se calcularon mediante la ecuación siguiente:

$$E \text{ mg kg} = \frac{C \times V}{P}$$

E= Elemento a cuantificar (Na, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu, Fe y Mn)

C= Concentración del mineral en la muestra (ppm)

V= Volumen aforado

P= Peso de la muestra seca

7.3.4. Variables de Potencial Antioxidante

7.3.4.1. Determinación del contenido de fenoles totales. La determinación de fenoles totales se realizó por el método de Folin-Ciocalteu (Swain y Hillis, 1959). Para la realización del extracto se pesó 0.5 g de cáliz de jamaica molida (previamente liofilizada) la muestra se colocó en tubos cónicos, se adicionó 10 ml de etanol al 80 %, se agitó a 200 rpm por 2 h a temperatura ambiente, posteriormente se centrifugó a 10000 rpm por 15 min a 4 °C, se colocó el sobrenadante en tubos de microcentrífuga y se refrigeró para su posterior análisis. Para la determinación del contenido de fenoles totales se realizó la mezcla de 1 ml, el cual consistió en 100 μ l del extracto en 900 μ l de etanol al 80%, se tomó una alícuota de 10 μ l de la dilución y se colocó en una microplaca de 96 pozos (Costar®, EEUU), se agregó 230 μ l de agua destilada, además de 10 μ l de Folin-Ciocalteu 2N, se incubó por 3 min y se añadió 25 μ l de carbonato de sodio (Na_2CO_3) 4N, posteriormente se incubó por 2 h y se midió la absorbancia a 725 nm usando un lector de microplatos Synergy HT® (BioTek, Inc, EEUU), como blanco se usó alcohol al 80%. Para la cuantificación de fenoles totales se utilizó una curva estándar de ácido gálico a concentraciones de 0 a 0.4 $\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ y los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico $\cdot 100\text{g}^{-1}$ (EAG 100g^{-1}) de cáliz seco (ms).

7.3.4.2. Determinación de antocianinas totales. La determinación de antocianinas totales se realizó por el método de Abdel-Aal y Hucl (1999). La extracción se realizó en 0.5 g de cáliz de jamaica molida (previamente liofilizada), la muestra se colocó en tubos cónicos, se agregó 10 ml de solución etanólica acidificada (80 ml de etanol más 20 ml de HCl 1N), se agitaron los tubos a 200 rpm por 30 min y posteriormente se centrifugaron a 10000 rpm a 4°C durante 15 min. Se colectó el sobrenadante en tubos de microcentrífuga y se realizó una dilución de 5 μ l del extracto en 195 μ l de la solución etanólica acidificada y se colocó la dilución en una microplaca de 96 pozos (Costar®, EEUU), posteriormente se midió la absorbancia a 535 nm usando un lector de microplatos Synergy HT® (BioTek, Inc, EEUU) con alcohol al 80% como blanco. Se utilizó una curva estándar de cianidina 3-glucósido a concentraciones de 0 a 0.4 $\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ y los resultados se expresaron como mg de cianidina-3-glucósido por cada 100 g ($\text{mg C3G}\cdot 100\text{g}^{-1}$) de peso seco (ms).

7.3.4.3. Determinación de la capacidad antioxidante. La determinación de la capacidad antioxidante se realizó por el método ORAC (Huang et al., 2002). Para la realización del extracto se pesó 0.5 g de cáliz de jamaica molida (previamente liofilizada) y se adicionó 10 ml de etanol al 80%, se agitó a 200 rpm por 2 h a temperatura ambiente, posteriormente se centrifugó a 10000 rpm por 15 min a 4 °C, se colocaron 2 ml del sobrenadante en tubos de microcentrífuga. Para la determinación de la capacidad antioxidante se realizó una dilución de 10 μ l del extracto en 990 μ l de buffer de fosfato 75 mM, se tomó una alícuota de 25 μ l de la dilución, 25 μ l del blanco (buffer de fosfato) y 25 μ l de la curva estándar de Trolox y se colocaron en una microplaca de 96 pozos con paredes oscuras y fondo claro (Costar®, EEUU). Posteriormente, la placa se colocó en un lector de microplatos modelo Synergy HT® (BioTek, Inc, EEUU) a 37°C de incubación, donde se dispensó a cada pozo con muestra la cantidad de 200 μ l de fluoresceína 0.96 μ M y 75 μ l de 2,2-azobis,2-amidino-propano dihidrocloro (AAPH) 95.8 μ M.

Se midió la fluoresceína por 70 min en intervalos de 70 s a una longitud de onda para excitación de 485 nm y para emisión de 580 nm. Los cálculos se realizaron usando la ecuación de regresión lineal de una curva estándar de Trolox de siete puntos (12.5, 25, 50, 75, 100, 125 y 150 μ M) y el área bajo la curva de la pérdida de fluorescencia. Los resultados se expresaron en μ mol equivalentes de Trolox \cdot g⁻¹ (uM ET \cdot g⁻¹) de cáliz seco (ms).

7.4. Análisis Estadístico

Los datos se analizaron empleando el Software Minitab® 17 (Minitab Inc.; Pennsylvania, EE. UU.) y las comparaciones de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) a excepción de los análisis de tasas relativas de crecimiento de altura y diámetro de tallo en donde se utilizó el Software SAS® 9.4 (2012, SAS Institute Inc., U.S.A.).

8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1. Rendimiento

El rendimiento húmedo y comercial del cáliz de jamaica fueron afectados tanto por el cultivar, como por el nivel de radiación gamma y su interacción (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto del cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y la interacción de ambos en el rendimiento húmedo y comercial del cáliz de jamaica.

Fuente de variación	Rendimiento húmedo	Rendimiento comercial
	P-valor	
Cultivar	0.001	0.001
Radiación gamma	0.000	0.007
Cultivar*radiación gamma	0.000	0.000

8.1.1. Rendimiento Húmedo

Para el rendimiento húmedo de las jamaicas, se encontraron diferencias significativas entre cultivares ($P=0.001$). El rendimiento húmedo promedio fue de $9.02 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ para 4Q4, sobresaliendo el cultivar criolla Huajicori con más del 21.6% ($10.98 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Figura 4). Los niveles de radiación evaluados mostraron un comportamiento diferencial en el rendimiento húmedo con valores máximos con $12.9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la dosis de radiación gamma de 300 Gy, el cual fue estadísticamente superior con 49, 42, 51 y 56% cuando se aplicaron dosis de radiación de 100, 400, 500 y 600 Gy (Figura 5).

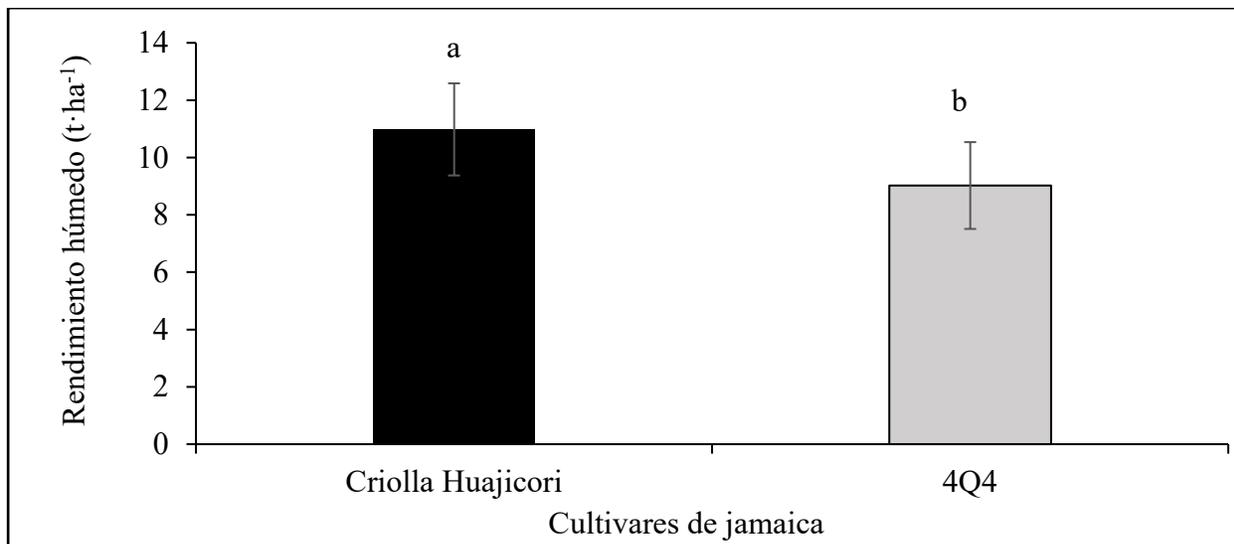


Figura 4. Rendimiento de cáliz húmedo en los cultivares de jamaica 4Q4 y Criolla Huajicori. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

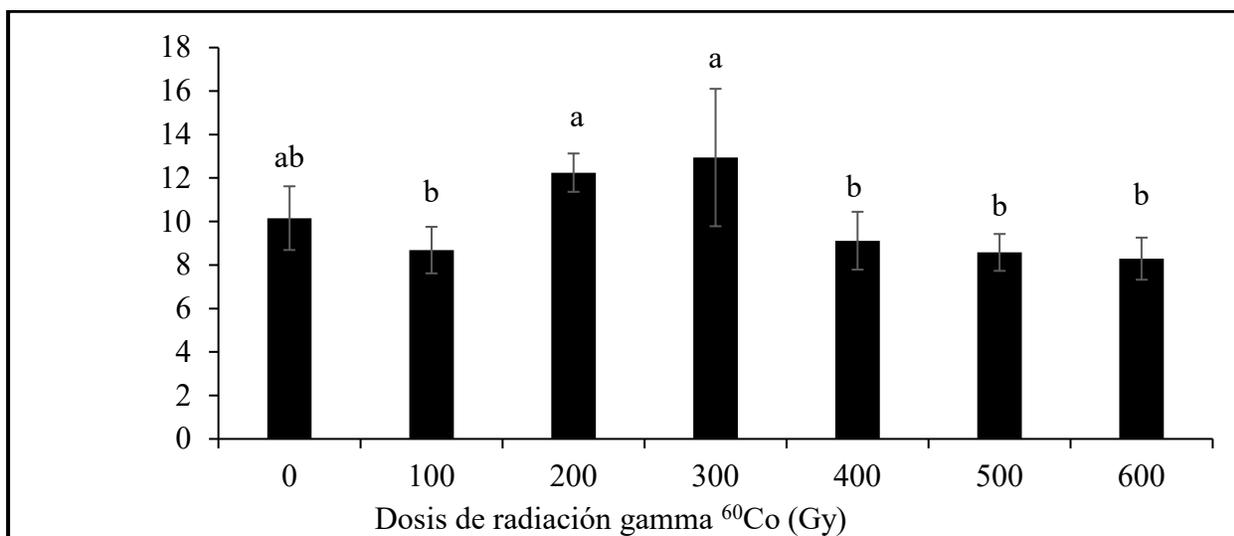


Figura 5. Rendimiento de cáliz húmedo de jamaica según el nivel de radiación gamma ⁶⁰Co (Gy). Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

La combinación de cultivar de jamaica y dosis de irradiación mostró efecto significativo en el rendimiento húmedo del cáliz de jamaica (Cuadro 3). Donde se observó que el rendimiento de cáliz húmedo de los cultivares no siguen la misma tendencia en cada nivel de radiación gamma estudiada. La combinación de jamaica criolla Huajicori con radiación gamma 300 Gy presentó el

mayor rendimiento húmedo del cáliz con 18.6 t ha⁻¹, siendo estadísticamente superior a las demás combinaciones hasta un 182 % (Figura 6).

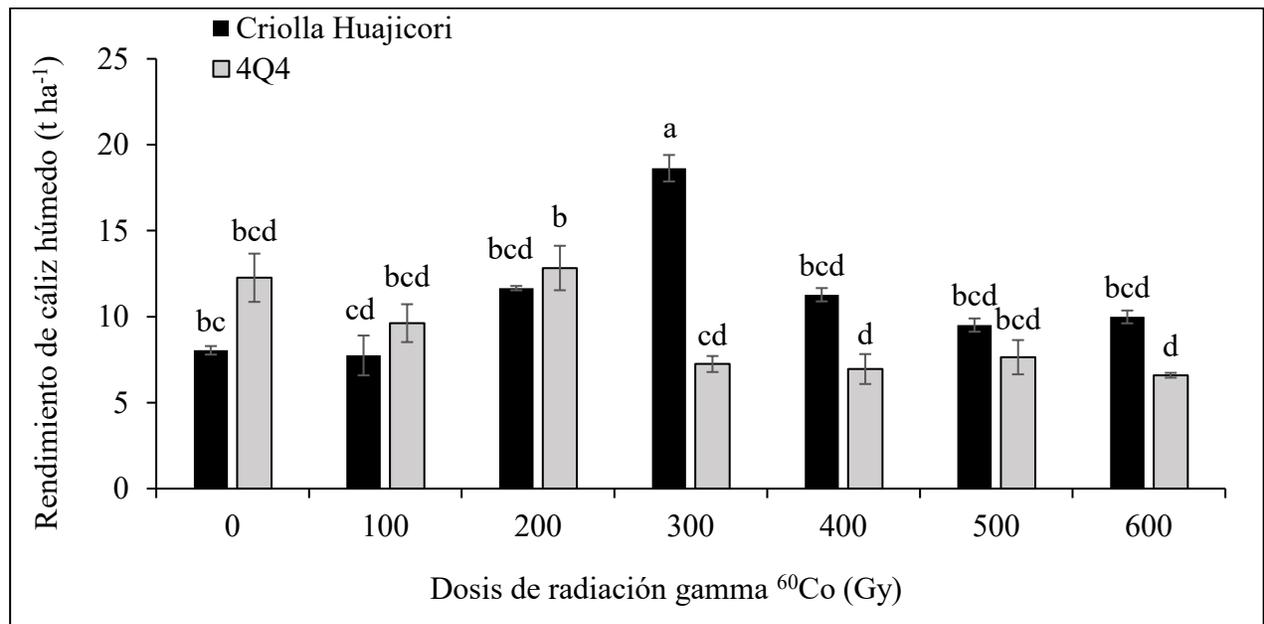


Figura 6. Rendimiento húmedo de cáliz, según las combinaciones entre cultivar y la dosis de radiación gamma ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05).

8.1.2. Rendimiento Comercial

La interacción cultivar y la radiación gamma tuvo respuestas diferenciales en el rendimiento comercial (Cuadro 3), donde se observó que los cultivares de jamaica no conservan la misma tendencia en cada nivel de radiación. El rendimiento comercial promedio fue de 1.29 t·ha⁻¹ para 4Q4, sobresaliendo el cultivar criolla Huajicori con 1.59 t·ha⁻¹, que fue 23% estadísticamente superior a 4Q4 (Figura 7). La dosis de radiación gamma de 200 Gy generó el mayor rendimiento de cáliz seco con 1.7 t·ha⁻¹, aunque solamente se observaron diferencias con los niveles de 100 y 500 Gy, en los cuales la producción de cáliz de jamaica fue menor con 1.2 y 1.3 t·ha⁻¹, respectivamente (Figura 8).

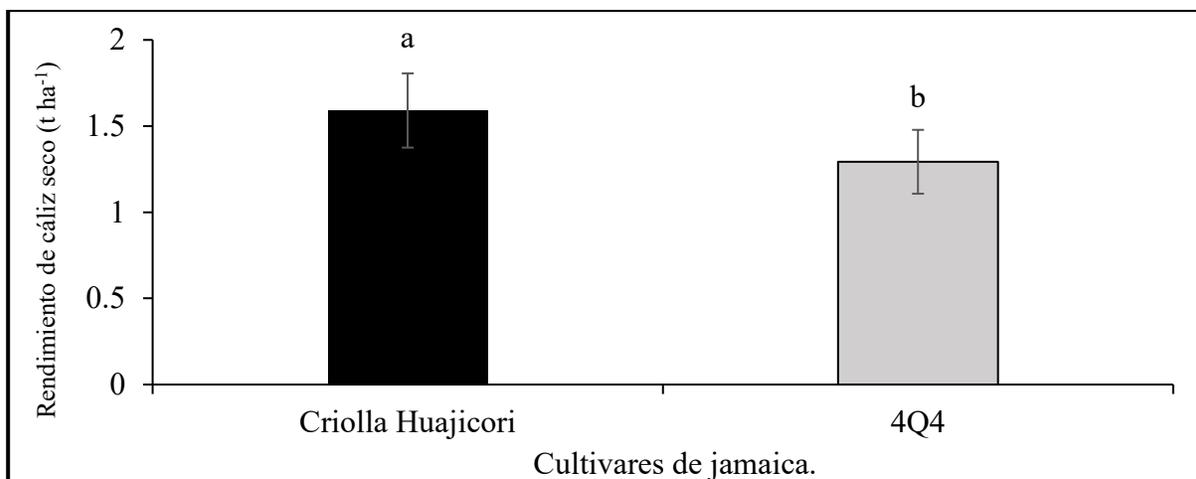


Figura 7. Rendimiento de cáliz seco en los cultivares de jamaica 4Q4 y criolla Huajicori. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

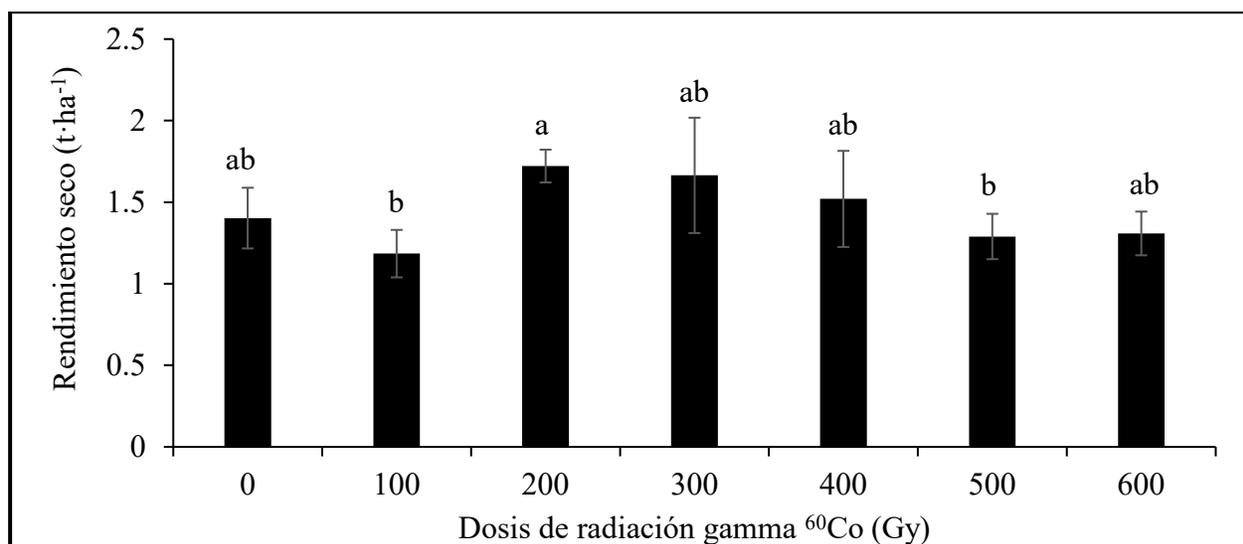


Figura 8. Rendimiento de cáliz seco por las dosis de radiación ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

La combinación criolla Huajicori con radiación gamma 300 Gy mostró el mayor rendimiento de cáliz seco de jamaica (1.7 t ha⁻¹) y fue el tratamiento que mostró diferencias estadísticas con las combinaciones de criolla Huajicori y 4Q4 con radiación gamma de 100 y 500 Gy (Figura 9).

Los valores de rendimiento encontrados en plantas no irradiadas (control, 0 Gy) de 4Q4 y criolla Huajicori son de 1.65 y 1.15 t·ha⁻¹, los cuales mostraron un comportamiento superior a lo reportado

por Hinojosa-Gómez (2019) para los mismos materiales con 0.97 y 0.99 t·ha⁻¹, respectivamente. El aumento de rendimientos en las primeras generaciones de plantas con semillas irradiadas (M1) se puede deber al hecho de que los rayos gamma estimulan el papel de la enzima y la hormona del crecimiento responsables de crecimiento de la planta y el rendimiento, según lo reportado por El-Sheriff *et al.* (2011); mientras en este caso de plantas segunda generación (M2) como la de este estudio, la variabilidad tanto positiva como negativa de los rendimientos se puede debe a cambios genéticos para los rasgos de rendimientos (Pavadai y Dhanavel, 2010). En estudios donde se ha utilizado la radiación gamma en diversas especies de interés agrícola, se han reportado aumentos significativos en el rendimiento en trigo (Singh y Datta, 2010), tomate de cáscara (*Solanum pimpinellifolium*) (Nunoo *et al.*, 2014), maíz, lenteja (Tomlekova, 2010), arroz (Bughio *et al.*, 2010), jamaica (El-Sherif, 2011), entre otros.

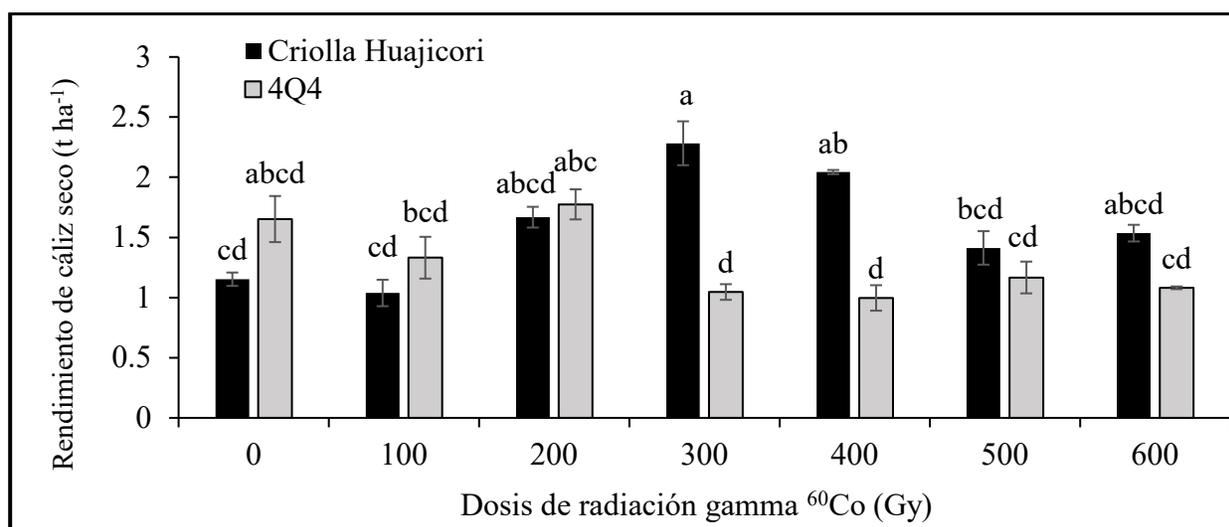


Figura 9. Rendimiento de cáliz seco según la combinación entre el cultivar y los niveles de radiación gamma ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05).

8.2. Color de Cáliz Seco

Los valores de luminosidad, cromaticidad y ángulo de matiz (°Hue) en los factores de cultivar, radiación gamma y su interacción mostraron efectos significativos (Cuadro 4).

Luminosidad. Entre los niveles de radiación gamma probadas, la dosis de 300 Gy generó la mayor luminosidad (45.1) y fue estadísticamente superior 2.3, 2.9, 3.3, 6.1, 6.5 6.6 % a la respuesta obtenida de 100, 0, 400, 600, 300 y 500 Gy, respectivamente. La interacción de los factores de estudio fue significativa, es decir los cultivares no presentan la misma tendencia de luminosidad en cada nivel de radiación gamma evaluado. La combinación de criolla Huajicori expuesta a 200 Gy de radiación gamma, resultó con mayor luminosidad con 47.9, superando estadísticamente al resto de los tratamientos hasta alcanzar la mayor diferencia de 17.5% en la combinación 4Q4 con radiación 300 Gy (Cuadro 5).

Cuadro 4. Efecto del cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y la interacción de ambos en luminosidad, cromaticidad y °Hue del cáliz seco de jamaica.

Fuente de variación	Luminosidad	Cromaticidad	°Hue
	P-valor		
Cultivar	0.000	0.000	0.000
Radiación gamma	0.000	0.000	0.000
Cultivar*radiación gamma	0.000	0.000	0.000

Cromaticidad. Criolla Huajicori exhibió la mayor saturación del color, siendo superior 11.5% a 4Q4. Entre las dosis de radiación gamma aplicadas para las jamaicas, las plantas con 200 Gy mostraron la mayor cromaticidad (8.9) en comparación con las otras dosis de radiación estudiadas. Asimismo, la interacción de ambos factores de estudio, mostró efectos en esta variable, lo que indica que la cromaticidad no conserva la misma tendencia en cada nivel de radiación probada. La exposición de criolla Huajicori a 200 Gy de radiación gamma produjo la mayor cromaticidad con 10.2, el cual fue estadísticamente superior al demás tratamiento hasta alcanzar 49% adicional en esta variable cuando 4Q4 se expuso a 300 Gy (Cuadro 5).

°Hue o ángulo de color (tono). Criolla Huajicori obtuvo el mayor ángulo de tono con 39.7° (ubicado en el color rojo-anaranjado) en el espacio de color CIE L*C*H y fue superior 47.1% a 4Q4. Respecto a los niveles de radiación gamma estudiados, la dosis de 200 Gy ocasionó el mayor tono con 38.6°Hue, aunque únicamente fue estadísticamente superior a los niveles de 500 y 600 Gy. La interacción de ambos factores investigados fue significativa, donde los cultivares no siguen la misma tendencia del tono de color en cada nivel de radiación gamma. Las combinaciones de criolla

Huajicori con radiación gamma de 200 y 300 Gy resultaron estadísticamente similares, pero significativamente diferentes a las demás combinaciones probadas, no obstante, tuvieron una diferencia de 251 y 193% con respecto a la combinación del cultivar 4Q4 más 500 Gy que presentaron 15.3°Hue (Cuadro 5).

Algunos estudios mostraron que la exposición de algunas especies vegetales a la radiación gamma, ha provocado cambios en el color, como en cálices de *Hibiscus sabdariffa* en dosis de 150, 300, 450 y 600 Gy (Syahputra *et al.*, 2017), en frutos de tomatillo (*Solanum pimpinellifolium*) de plantas M2 sometidos a dosis de 150 y 300 Gy (Nunoo *et al.*, 2014) y en ornamentales (Schum, 2003).

Cuadro 5. Atributos de color (luminosidad, cromaticidad y °Hue del cáliz seco de jamaica por efecto del cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y su combinación aplicada.

Fuente de variación	Luminosidad	Cromaticidad	°Hue	
Criolla Huajicori	44.45 ± 0.84 a	8.71 ± 0.39 a	39.77 ± 4.15 a	
4Q4	42.34 ± 0.48 b	7.81 ± 0.36 b	27.03 ± 3.12 b	
0 Gy	43.83 ± 0.19 b	8.51 ± 0.16 ab	35.89 ± 2.36 a	
100 Gy	44.05 ± 0.57 b	8.59 ± 0.17 ab	36.40 ± 2.5 a	
200 Gy	45.10 ± 1.51 a	8.96 ± 0.70 a	38.59 ± 8.32 a	
300 Gy	42.34 ± 0.93 c	7.59 ± 0.43 d	36.11 ± 5.67 a	
400 Gy	43.65 ± 0.64 b	8.34 ± 0.34 abc	34.82 ± 2.17 ab	
500 Gy	42.32 ± 0.39 c	8.11 ± 0.50 bcd	22.45 ± 4.26 c	
600 Gy	42.48 ± 0.21c	7.70 ± 0.18 cd	29.54 ± 1.01 b	
Criolla Huajicori	0	44.07 ± 0.09 bcd	8.32 ± 0.12 bcde	40.06 ± 0.92 bcd
	100	44.96 ± 0.27 b	8.36 ± 0.18 bcde	40.91 ± 0.36 bc
	200	47.86 ± 0.10 a	10.19 ± 0.32 a	53.75 ± 0.58 a
	300	43.96 ± 0.40 bcd	8.36 ± 0.16 bcde	45.01 ± 3.52 ab
	400	44.80 ± 0.20 bc	8.96 ± 0.16 b	38.1 ± 1.62 bcde
	500	42.96 ± 0.05 def	8.93 ± 0.31 bc	29.61 ± 1.53 ef
	600	42.56 ± 0.09 ef	7.88 ± 0.17 cdef	31.01 ± 0.86 def
4Q4	0	43.59 ± 0.41 cde	8.71 ± 0.32 bcd	31.72 ± 0.18 cdef
	100	43.14 ± 0.34 de	8.83 ± 0.06 bc	31.89 ± 0.52 cdef
	200	42.36 ± 0.07 ef	7.74 ± 0.17 def	23.42 ± 0.66 fg
	300	40.72 ± 0.17 g	6.82 ± 0.04 f	27.23 ± 2.98 f
	400	42.52 ± 0.13 ef	7.74 ± 0.05 def	31.55 ± 1.08 cdef
	500	41.68 ± 0.29 fg	7.29 ± 0.17 ef	15.31 ± 2.20 g
	600	42.41 ± 0.15 ef	7.53 ± 0.16 ef	28.08 ± 0.48 f

Promedios en columnas que no comporten misma letra, son significativamente diferentes, (Tukey, $p \leq 0.05$).

8.3. Diámetro y Longitud de Cáliz de Jamaica

El diámetro y la longitud del cáliz evidenciaron efectos significativos por el cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y su interacción (Cuadro 6).

Cuadro 6. Efectos de diámetro y longitud de cáliz de Jamaica.

Fuente de variación	Diámetro	Longitud
	Valor P	
Cultivar	0.000	0.000
Dosis de radiación	0.002	0.006
Cultivar*Dosis de radiación	0.000	0.030

Criolla Huajicori tuvo el mayor diámetro de cáliz (31.1 mm) y fue estadísticamente superior 5% a 4Q4. La exposición de la radiación gamma reduce estadísticamente el diámetro del cáliz por 10%; su valor más alto (32.66 mm) se logró cuando no se aplicó radiación gamma a la semilla de Jamaica. La interacción de ambos factores de estudio, evidenciaron efectos en esta variable, condición que influye en las diferentes tendencias del diámetro tanto por el cultivar, como por el nivel de radiación gamma analizado. La combinación criolla Huajicori sin radiación (testigo) exhibió el mayor diámetro y a pesar de que solamente fue estadísticamente superior a las combinaciones donde se aplicó 100 Gy, con las demás dosis se obtuvieron respuestas similares. Asimismo, a pesar de que hay una tendencia de reducción en el diámetro del cáliz por la exposición de la Jamaica a la radiación gamma, la respuesta no es consistente en todas las dosis probadas (Cuadro 7). Se ha comprobado que los tratamientos con radiación gamma generan modificaciones morfológicas en las plantas, donde Magdy *et al.* (2020) encontraron modificaciones en la longitud de brotes de jengibre en poblaciones M2, así como cambios en número de hojas y longitud de raíz.

La mayor longitud del cáliz se obtuvo en criolla Huajicori (48.35 mm), el cual fue estadísticamente superior 21.9% a 4Q4. La dosis de radiación gamma de 200 Gy causó la mayor longitud del cáliz (47.14 mm), aunque únicamente fue significativamente diferente a las dosis de 0 y 100 Gy (40.8 y 39.66 mm). La interacción de los dos factores de estudio resultó significativa, indicando que las variedades nos tienen la misma tendencia de longitud del cáliz en cada nivel de radiación gamma.

La combinación de criolla Huajicori con radiación gamma de 0 a 600 Gy producen respuestas similares en la longitud del cáliz; pero esta respuesta se modifica cuando se intercambia al cultivar por 4Q4 y se combina con las dosis de radiación gamma de 200 Gy, con él se consigue el valor máximo de esta variable 45.88 mm (Cuadro 7).

Cuadro 7. Diámetro y longitud promedio de cáliz de jamaica por efecto del cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y su combinación aplicada en jamaica.

Fuente de variación		Diámetro	Longitud
		mm	
Criolla Huajicori		31.10 ± 0.96 a	48.35 ± 1.44 a
4Q4		29.61 ± 0.83 b	39.66 ± 1.66 b
0 Gy		32.66 ± 0.84 a	40.08 ± 2.23 c
100 Gy		29.63 ± 0.75 b	41.93 ± 3.19 bc
200 Gy		29.70 ± 0.80 b	47.14 ± 1.41 a
300 Gy		30.32 ± 1.22 b	44.17 ± 2.65 abc
400 Gy		29.94 ± 1.01 b	45.92 ± 3.33 ab
500 Gy		30.00 ± 0.70 b	44.55 ± 2.78 ab
600 Gy		30.22 ± 0.88 b	44.25 ± 2.79 ab
Criolla Huajicori	0	34.19 ± 0.09 a	43.77 ± 1.14 bc
	100	28.95 ± 0.97 bc	47.51 ± 0.89 ab
	200	30.63 ± 0.12 abc	47.98 ± 1.8 ab
	300	32.04 ± 0.94 ab	48.80 ± 0.39 ab
	400	31.73 ± 0.22 abc	51.88 ± 0.77 a
	500	31.08 ± 0.47 abc	49.39 ± 0.94 ab
	600	29.07 ± 0.10 bc	48.75 ± 0.66 ab
4Q4	0	31.12 ± 0.12 abc	36.39 ± 0.97 d
	100	30.31 ± 0.34 bc	36.41 ± 1.24 d
	200	28.78 ± 0.97 bc	45.88 ± 0.39 abc
	300	28.61 ± 0.81 bc	39.54 ± 1.00 cd
	400	28.15 ± 0.32 c	39.96 ± 0.72 cd
	500	28.92 ± 0.54 bc	39.71 ± 0.97 cd
	600	31.37 ± 0.97 abc	39.76 ± 1.96 cd

Promedios en columnas con diferente letra, son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

8.4. Tasas de Crecimiento Relativo en Altura del Cultivo de Jamaica

En función del tiempo durante el ciclo de cultivo de jamaica, la velocidad de crecimiento en altura se ajustó a modelos cuadráticos negativos con un R^2 de 0.72 a 0.94 (Cuadro 8), los cuales describen

el patrón de crecimiento desde cero hasta 102 días después del trasplante (DDT) para el cultivar Criolla Huajicori (Figura 10) y hasta 113 DDT para el cultivar 4Q4 (Figura 11).

La mayor TCRA con $2.81 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ se obtuvo a los 30 DDT en criolla Huajicori expuesta a radiación gamma de 100 Gy; mientras que, la velocidad de crecimiento de los demás niveles de radiación gamma en este tiempo, osciló de 2.63 a $1.91 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$, en el cual el valor más bajo se obtuvo en la dosis de 600 Gy (Figura 10).

Cuadro 8. Tasas de crecimiento relativo en altura de planta por efecto del tiempo de cultivo en dos cultivares de jamaica expuesto a la radiación gamma ^{60}Co .

Cultivar	Radiación γ (Gy) gamma	Modelo	P-valor
4Q4	0	$Y= 1.12532 + 0.03445\text{DDT} - 0.00043488\text{DDT}^2$ CME= 0.05190 R²= 0.86	<0.0001
	100	$Y= 1.17833 + 0.03217\text{DDT} - 0.000407\text{DDT}^2$ CME= 0.03656 R²= 0.88	<0.0001
	200	$Y= 1.74951 + 0.02485\text{DDT} - 0.0003961\text{DDT}^2$ CME= 0.08328 R²= 0.85	<0.0001
	300	$Y= 1.43143 + 0.02578\text{DDT} - 0.00037665\text{DDT}^2$ CME= 0.12655 R²=0.72	<0.0001
	400	$Y= 1.27158 + 0.02147\text{DDT} - 0.00031145\text{DDT}^2$ CME= 0.04791 R²=0.84	<0.0001
	500	$Y= 1.05445 + 0.04048\text{DDT} - 0.00049943\text{DDT}^2$ CME= 0.06312 R²=0.88	<0.0001
	600	$Y= 1.09782 + 0.02095\text{DDT} - 0.00027107\text{DDT}^2$ CME= 0.03885 R²= 0.77	<0.0001
	Criolla Huajicori	0	$Y= 2.26985 + 0.01861\text{DDT} - 0.00041551\text{DDT}^2$ CME= 0.20590 R²= 0.80
100		$Y= 2.31212 + 0.03776\text{DDT} - 0.0006148\text{DDT}^2$ CME= 0.10921 R²= 0.92	<0.0001
200		$Y= 1.80032 + 0.03608\text{DDT} - 0.00053746\text{DDT}^2$ CME= 0.10478 R²= 0.87	<0.0001
300		$Y= 1.02500 + 0.07463\text{DDT} - 0.00083994\text{DDT}^2$ CME= 0.21747 R²= 0.78	<0.0001
400		$Y= 2.34697 + 0.03010\text{DDT} - 0.0005420\text{DDT}^2$ CME= 0.08754 R²= 0.91	<0.0001
500		$Y= 2.24965 + 0.02780\text{DDT} - 0.00051148\text{DDT}^2$ CME= 0.04666 R²= 0.94	<0.0001
600		$Y= 1.05575 + 0.04045\text{DDT} - 0.00049737\text{DDT}^2$ CME= 0.04789 R²= 0.90	<0.0001

Criterios de bondad de ajuste: CME (cuadrado medio del error) y R². DDT: Días después del trasplante.

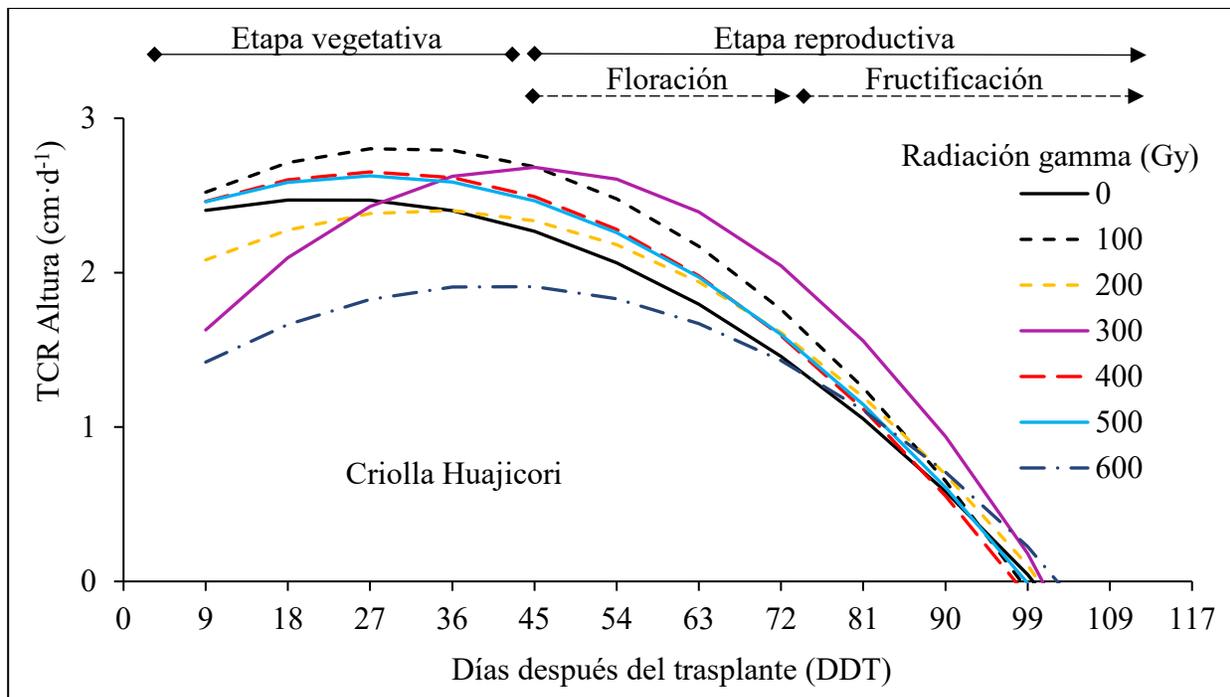


Figura 10. Valores generados por el modelo de tasas de crecimiento relativo (TCR) en altura en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘criolla Huajicori’ tratado con radiación gamma ⁶⁰Co.

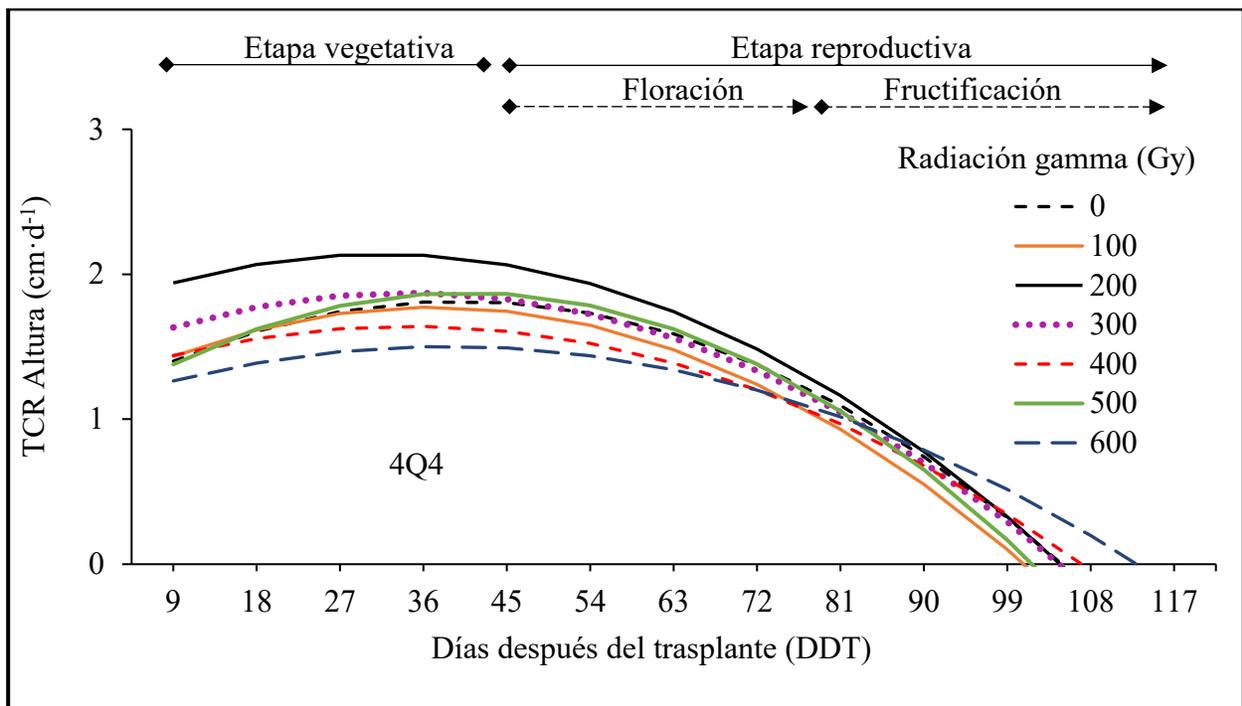


Figura 11. Valores generados por el modelo de tasas de crecimiento relativo (TCR) en altura en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘4Q4’ tratado con radiación gamma ⁶⁰Co.

Por otra parte, en 4Q4 la mayor TCRA ($2.14 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) se obtuvo cuando este cultivar se trató con radiación gamma a 200 Gy; en tanto que, en los demás niveles de radiación probados, las máximas TCRA variaron de 1.8 a $1.5 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$, exhibiendo el menor valor a la dosis de radiación de 600 Gy. (Figura 10). Durante la etapa vegetativa las tasas de crecimiento inicialmente aumentaron hasta alcanzar su máxima expresión, pero después de los 45 DDT tendió a disminuir debido a la formación y de desarrollo de estructuras reproductivas por lo que estos órganos se convierten en la principal demanda fisiológica de recursos de la planta (San-Martín-Hernández *et al.*, 2016), acelerando su desarrollo como plantas deciduas (Hinajosa-Gómez, 2019). Sin embargo, las menores TCRA se observaron cuando ambos cultivares se trataron con radiación gamma de 600 Gy (Figura 10 y 11). Contrario a los resultados de esta investigación, Yasmin *et al.* (2020) reportaron cambios morfológicos como una mayor altura en dosis de 600 Gy en plantas *Vigna mungo*, además se han encontrado plantas mutantes enanas y semienanas de lentejas en dosis de 45, 80 y 130 Gy (Solanki y Sharma, 2002), guisantes con 175, 220, 260 y 350 Gy (Kumar *et al.*, 2016) y *Vigna mungo* en 200 y 400 Gy (Yasmin *et al.*, 2020). Las variaciones en las TCRA indicaron modificaciones morfológicas, de acuerdo con Nasution *et al.* (2020) y Syahputra *et al.* (2017) quienes reportaron efectos del carácter morfológico en *Hibiscus sabdariffa* en las dosis de radiación de rayos gamma en rangos de 150 a 600 Gy.

8.5. Tasas de Crecimiento Relativo del Diámetro de Tallo

Conforme transcurrió el ciclo experimental, el tiempo influyó en el patrón que mejor describen las tasas de crecimiento relativo del diámetro de tallo (TCRDT) del cultivo; 4Q4 con radiación gamma de 0, 300, 400, 500 y 600 Gy y el cultivar criolla Huajicori con dosis de 100, 200, 500 y 600 Gy se ajustaron a un modelo lineal cuadrático negativo; mientras que, 4Q4 expuesta a dosis de 100, 200 Gy y criolla Huajicori a 0, 300 y 400 Gy el ajuste del crecimiento fue a un modelo lineal cuadrático positivo (Cuadro 9).

Cuadro 9. Tasas de crecimiento relativo en diámetro del tallo de la planta por efecto del tiempo de cultivo en dos cultivares de jamaica expuestos a la radiación gamma ⁶⁰Co.

Cultivar	Radiación γ (Gy) gamma	Modelo matemático	Valor P
4Q4	0	Y= 0.33582 - 0.02657 DDT ^{1/2} - 0.00000726DDT ² CME= 0.00033 R ² = 0.96	<0.0001
	100	Y= 0.3316 - 0.00501DDT + 0.0000174DDT ² CME= 0.00049 R ² = 0.96	<0.0001
	200	Y= 0.31203 - 0.00439DDT + 0.00001314DDT ² CME= 0.00106 R ² = 0.91	<0.0001
	300	Y= 0.31675 - 0.02278 DDT ^{1/2} - 0.00000832DDT ² CME= 0.00037 R ² = 0.95	<0.0001
	400	Y= 0.33437 - 0.02618DDT - 0.00000698DDT ² CME= 0.00030 R ² = 0.96	<0.0001
	500	Y= 0.33890 - 0.2248 DDT ^{1/2} - 0.00001125DDT ² CME= 0.00077 R ² = 0.92	<0.0001
	600	Y= 0.31398 - 0.02443 DDT ^{1/2} - 0.00000778DDT ² CME= 0.00040 R ² = 0.95	<0.0001
Criolla Huajicori	0	Y= 0.36836 - 0.00657DDT + 0.00002887DDT ² CME= 0.00114 R ² = 0.92	<0.0001
	100	Y= 0.30309 - 0.02346 DDT ^{1/2} - 0.00000712DDT ² CME= 0.00035 R ² = 0.95	<0.0001
	200	Y= 0.41485 - 0.03025 DDT ^{1/2} - 0.00001265DDT ² CME= 0.00168 R ² = 0.89	<0.0001
	300	Y= 0.33174 - 0.00564DDT + 0.00002322DDT ² CME= 0.00143 R ² = 0.89	<0.0001
	400	Y= 0.2985 - 0.0052DDT + 0.00002239DDT ² CME= 0.00077 R ² = 0.91	<0.0001
	500	Y= 0.28992 - 0.01767 DDT ^{1/2} - 0.00001231DDT ² CME= 0.00061 R ² = 0.92	<0.0001
	600	Y= 0.25214 - 0.01778 DDT ^{1/2} - 0.00000778DDT ² CME= 0.00025 R ² = 0.95	<0.0001

Criterios de bondad de ajuste: CME (cuadrado medio del error) y R². DDT: Días después de trasplante.

En 4Q4, la TCRDT más alta se obtuvo con radiación gamma de 100 Gy con 0.28 mm·dia⁻¹, aunque a partir de los 54 DDT presentó la menor TCRDT, coincidiendo con la floración del cultivo. Sin embargo, cuando este cultivar se trató con la dosis de radiación de 500 Gy, se observó un máximo de 0.27 mm·dia⁻¹, cual se mantuvo por más tiempo con las TCRDT más altas durante una parte de la etapa vegetativa, floración y fructificación. Opuesto a lo anterior, la exposición de 4Q4 a radiación de 600 Gy, resultó con las menores TCRDT durante la etapa vegetativa con un máximo de 0.24 mm·dia⁻¹ (Figura 12). En el caso de criolla Huajicori la mayor TCRDT con 0.32 cm·d⁻¹ se logró al inicio de la etapa experimental a la dosis radiación gamma de 200 Gy, aunque una respuesta similar se conservó en la etapa reproductiva; en tanto que, a la dosis de 600 Gy se observó la menor

tasa de esta variable ($0.19 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) en la misma fecha, manteniendo un comportamiento similar como en la dosis de 200 Gy. Posteriormente a los 9 DDT, conforme transcurrió el ciclo de cultivo, la TCRDT se fue reduciendo gradualmente y en la etapa reproductiva se registraron valores de 0.17 a $0.13 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$, hasta alcanzar las tasas de crecimiento mínimas a los 102 DDT (Figura 13). Los tallos son estructuras biológicas más importantes porque proporcionan funciones múltiples como soporte mecánico, almacenamiento, ayudan a controlar el crecimiento al funcionar como una vía de transporte de agua y nutrientes (Speck y Burgert, 2011). Los tallos de mayor grosor son necesarios para el soporte de ramas y frutos, además de ser un indicador de buena productividad (Moreno-Pérez *et al.*, 2011).

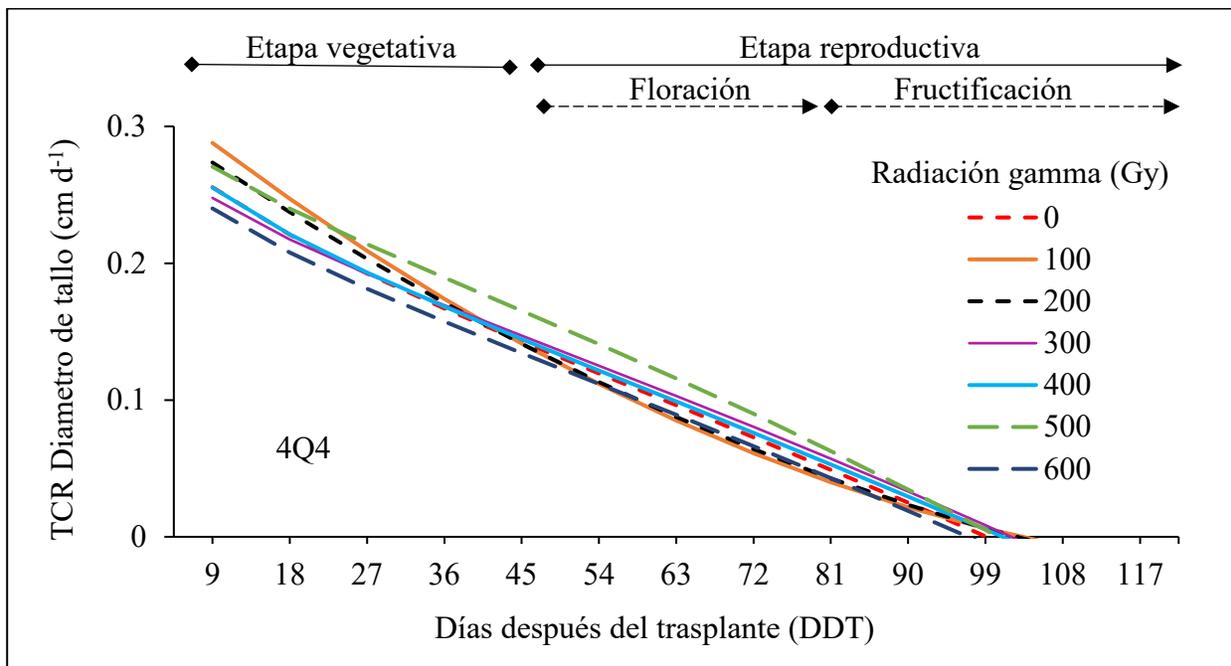


Figura 12. Valores generados por el modelo de tasas de crecimiento relativo (TCR) en diámetro del tallo de planta en función del tiempo de cultivo de jamaica '4Q4' con radiación gamma ⁶⁰Co.

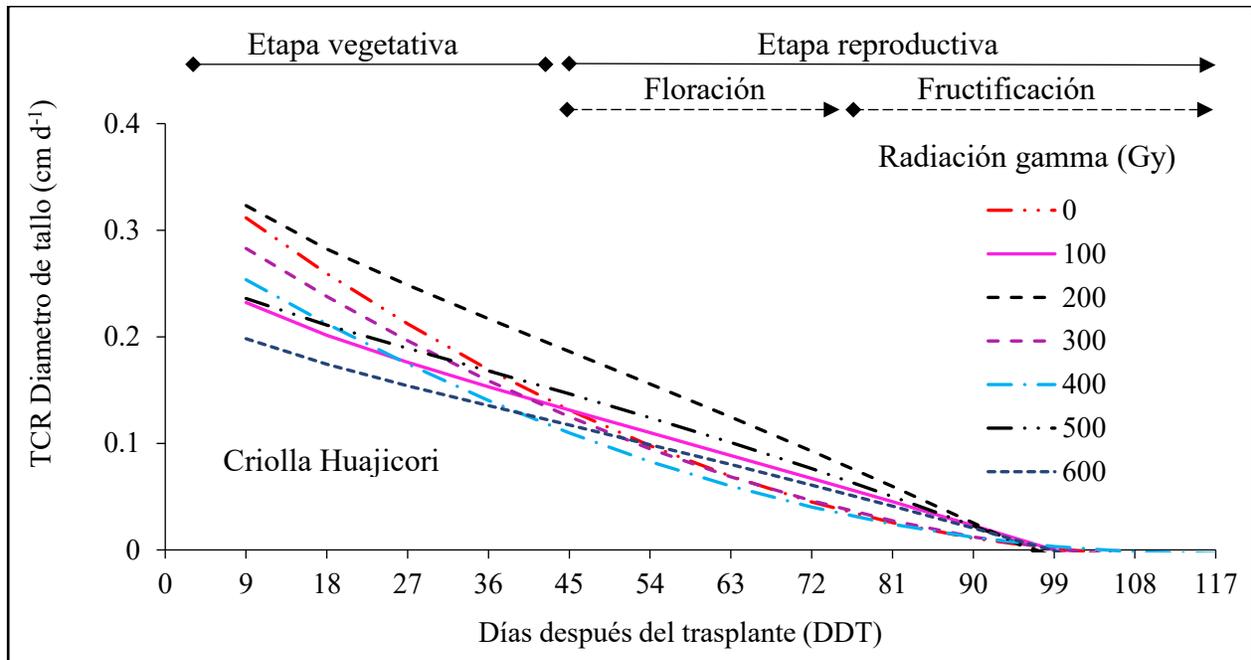


Figura 13. Valores generados por el modelo de tasas de crecimiento relativo (TCR) en diámetro del tallo de planta en función del tiempo de cultivo de jamaica ‘criolla Huajicori’ con radiación gamma ⁶⁰Co.

8.6. Resultados Proximales

La proteína evidencio efectos significativos por el cultivar; con excepción de la humedad, las variables de proteína, fibra dietaria total, grasa carbohidratos y cenizas presentaron efectos significativos por la radiación gamma ⁶⁰Co y su interacción (Cuadro 10).

Cuadro 10. Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰Co y la interacción de ambos en los atributos proximales del cáliz de jamaica.

Fuente de variación	Proteína	Fibra dietaria total	Grasa	Carbohidratos	Cenizas	Humedad
	Valor P- valor					
Cultivar	0.004	0.209	0.918	0.117	0.720	0.559
Dosis de radiación	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
Cultivar*Dosis de radiación	0.000	0.001	0.000	0.000	0.029	0.649

8.6.1. Cenizas

Los niveles de radiación evaluados mostraron un comportamiento diferencial en las cenizas de cáliz de jamaica que fue máximo con 1.12 % en la dosis de radiación gamma de 200 Gy, el cual fue comparativamente superior 24 y 30% cuando se aplicaron dosis de radiación de 100 y 300 Gy, respectivamente (Figura 14).

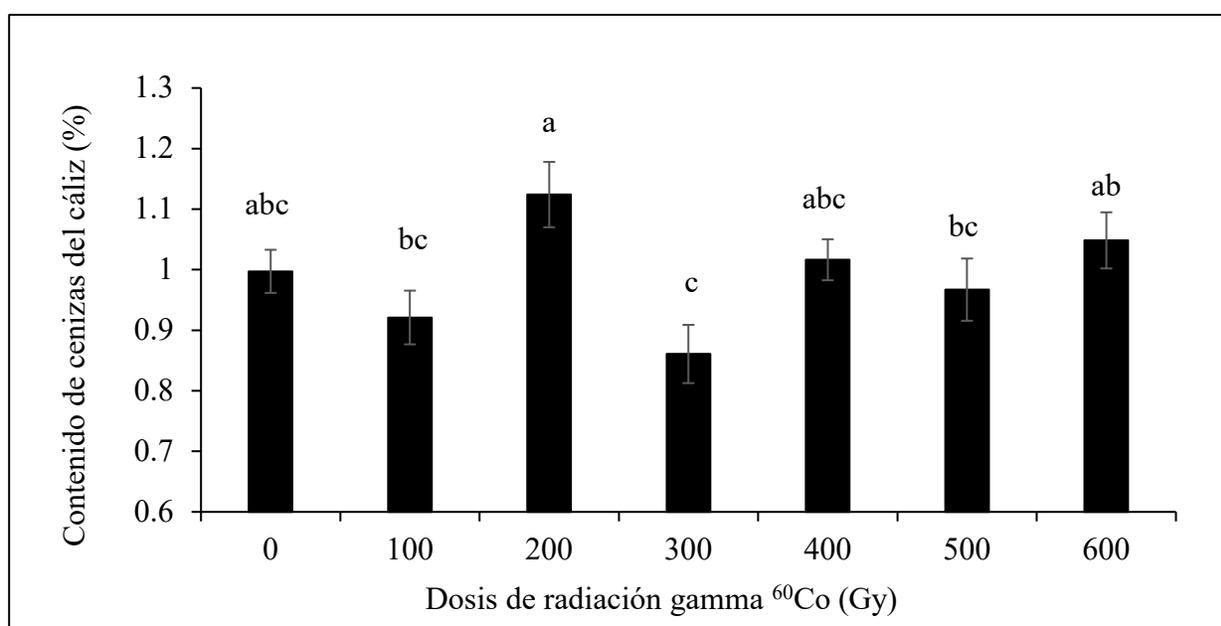


Figura 14. Contenido de cenizas del cáliz por las dosis de radiación ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

El porcentaje de cenizas varió entre 1.21 y 0.78 %, los controles de jamaica criolla Huajicori y 4Q4 presentaron valores de 1.05 y 0.93 %. La combinación de criolla Huajicori con radiación gamma 300 Gy mostró el menor porcentaje de cenizas con 0.77%, siendo estadísticamente inferior a las combinaciones de criolla Huajicori con 0 Gy (1.05%) y 4Q4 con 200 Gy (1.21 %) (Figura 15). Abu *et al.* (2019) revelaron que radiaciones de 150 Gy aumenta el contenido de cenizas en frutos de chile pimiento y Amir *et al.* (2011) también encontraron un aumento en el contenido de cenizas para Okra.

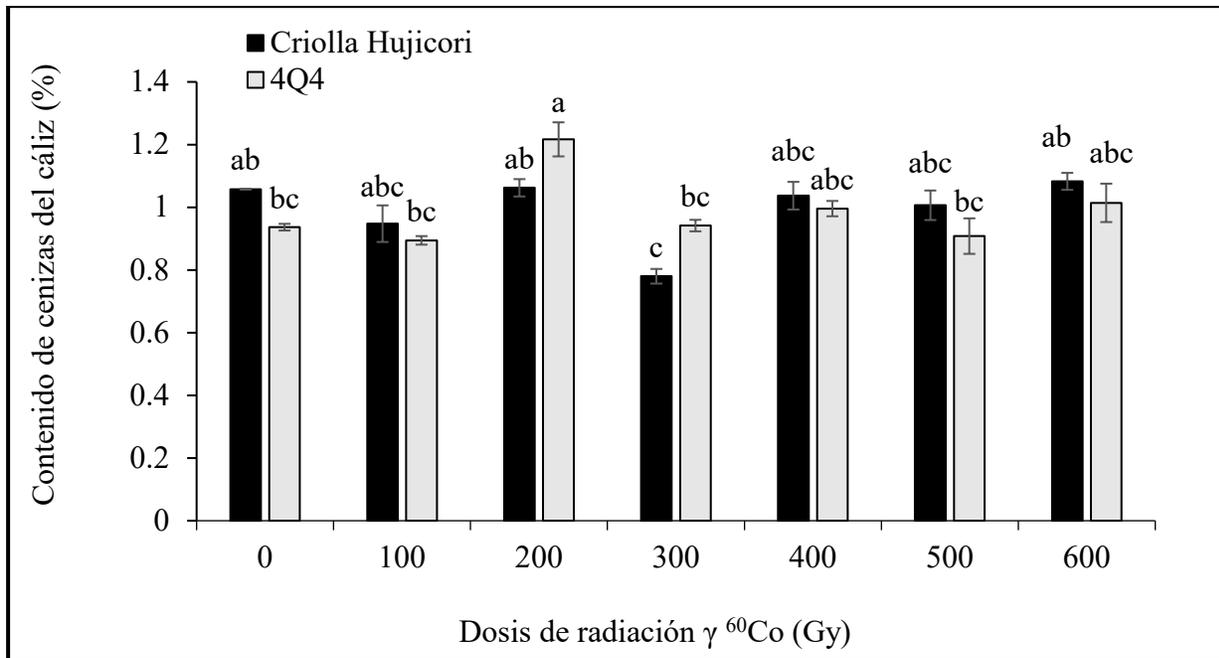


Figura 15. Contenido de cenizas (%) en el cáliz seco, según las combinaciones del cultivar y las dosis de radiación γ ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

8.6.2. Proteína

Entre los cultivares evaluados, la concentración de proteína del cáliz seco de 4Q4 fue estadísticamente superior (4.5%) a criolla Huajicori (Figura 16). La dosis de radiación gamma de 500 Gy generó la mayor concentración de proteína en cáliz seco con $118.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ms}$, aunque solo se observaron diferencias significativas con las dosis de 100 y 200 Gy en los cuales la concentración de proteína fue menor un 21 y 11%, respectivamente (Figura 17).

El contenido de proteína varió entre 81.01 y $127.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ms}$, las combinaciones radiación y cultivar evaluados mostraron un comportamiento diferencial en la concentración de proteína que fue máximo de $127.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ms}$ en la combinación de 4Q4 en la radiación gamma con 200 Gy, el cual fue superior 57, 22 y 55 % de las combinaciones de 4Q4 con 100 Gy y criolla Huajicori con 100 y 200 Gy (Figura 18).

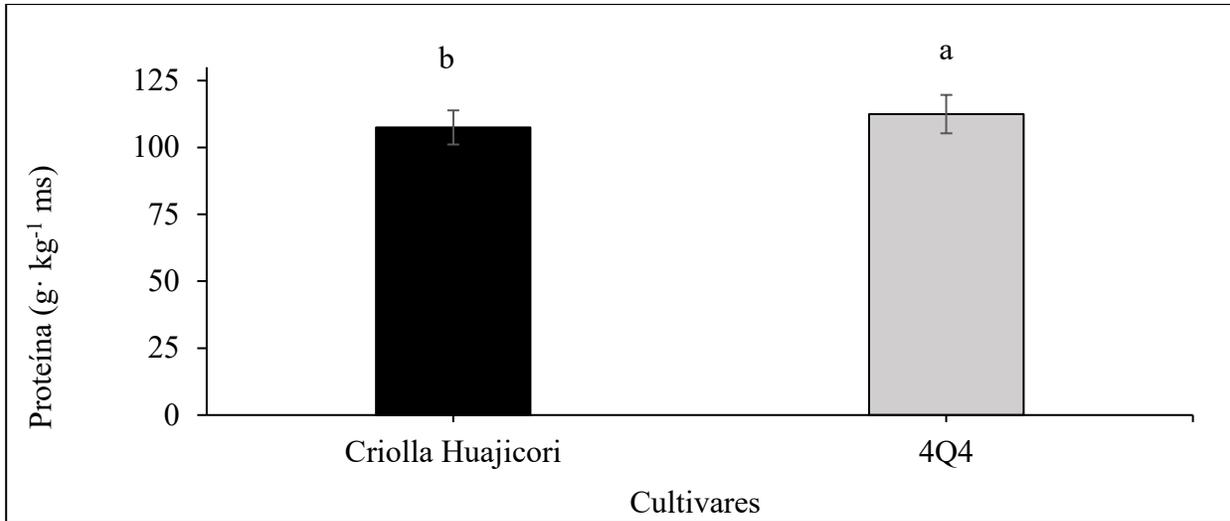


Figura 16. Concentración de proteína en cáliz seco en los cultivares de jamaica 4Q4 y criolla Huajicori. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

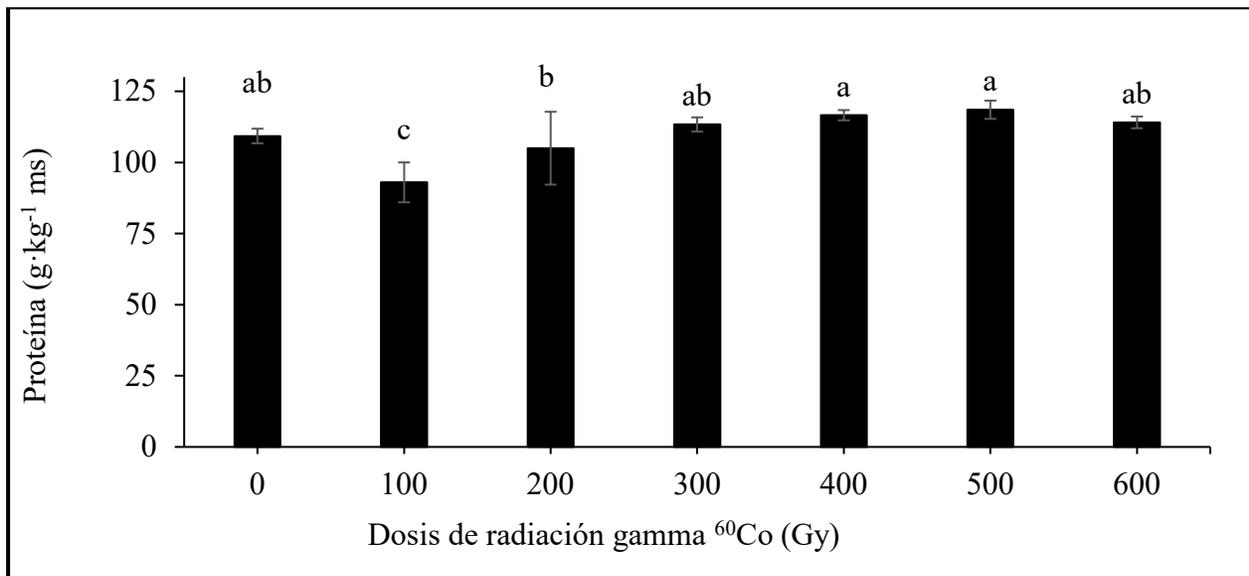


Figura 17. Concentración de proteína en el cáliz seco por las dosis de radiación ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

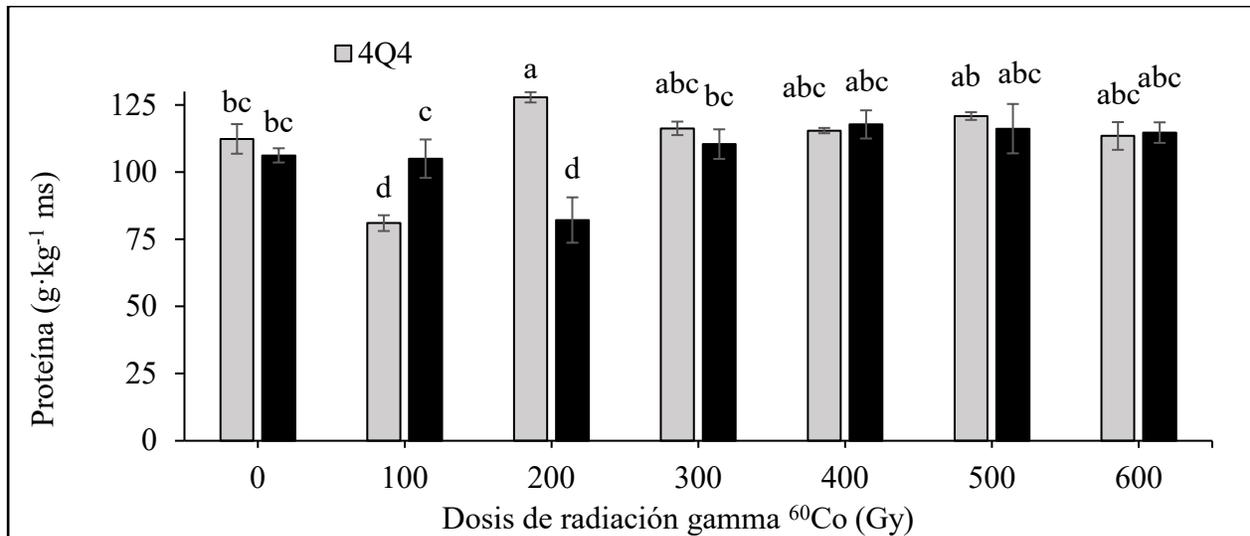


Figura 18. Concentración de proteína en el cáliz seco, según las combinaciones probadas entre el cultivar y las dosis de radiación γ ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Ismail *et al.* (2008) encontraron 122.5 g de proteína·kg⁻¹ de cálices seco de jamaica; de igual manera, Sáyago *et al.* (2014) evaluaron cultivares de jamaica mexicanas logrando cuantificar valores de proteína entre 49.4 a 129.2 g·kg⁻¹ ms. Los datos nutricionales de la USDA informaron un valor diferente a los hallazgos anteriores donde el contenido de proteína es de 71.5 g·kg⁻¹ ms. La variación de los resultados se puede deber a las diferentes variedades, genéticas, ambientales, ecológicas y condiciones de cosecha de la planta. Los valores encontrados para las jamaicas control de criolla Huajicori y 4Q4 son de 106.2 y 112.3 g·kg⁻¹ ms se encuentra dentro de los rangos previamente mencionados.

Mientras que, Amir *et al.* (2018) informaron una disminución en el contenido de proteína en dosis de 200 Gy en Okra y Ulukapi, mientras que Nasircilar (2015) reportó un aumento en proteína en garbanzo. Para este comportamiento, se reporta que la mutagénesis por radiación gamma en vegetales indujo deleciones inserciones en la estructura del ADN causando mutaciones heredables (Hernández-Muñoz *et al.*, 2019), que pueden provocar cambios en el aumento o disminución del contenido de proteínas en la segunda generación (M2) de plantas de semillas irradiadas.

8.6.3. Fibra Dietaria Total

La dosis de radiación gamma de 200 Gy generó el mayor contenido de fibra dietaria total de cáliz seco con 439 g·kg⁻¹ ms, aunque solamente se observaron diferencias con las dosis de 0, 400 y 500 Gy en los cuales la producción de cáliz de jamaica fue menor con 336.7, 343.6 y 341.6 g·kg⁻¹ ms, respectivamente (Figura 19).

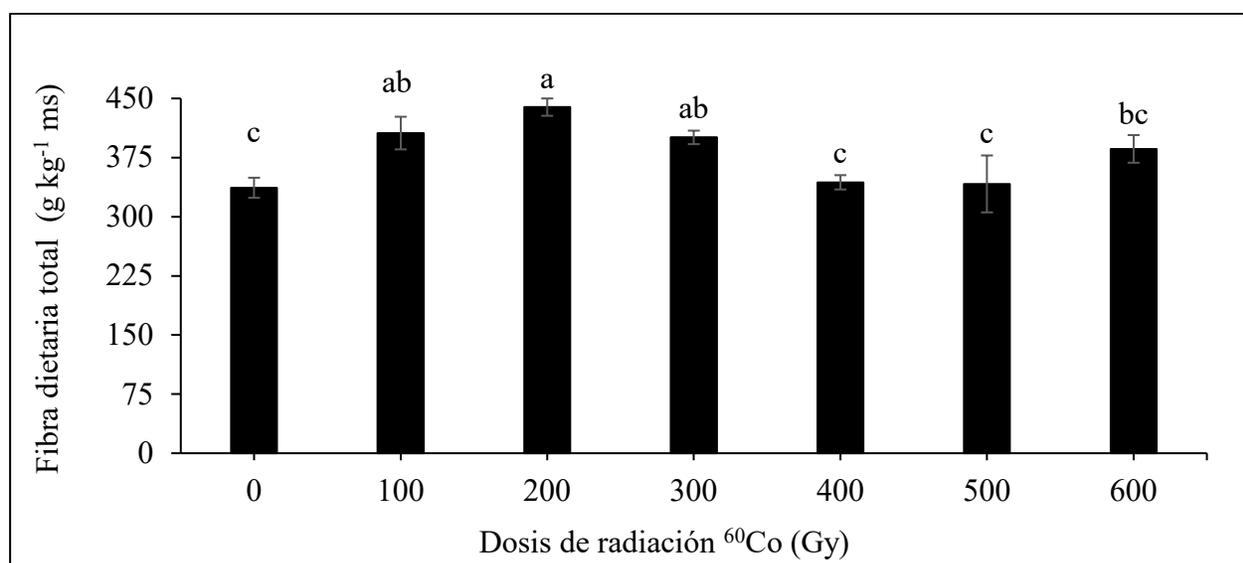


Figura 19. Concentración de fibra dietaria total en el cáliz seco por las dosis de radiación ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05)

El contenido de fibra dietaria total varió entre los tratamientos de 279.80 a 439.82 g·kg⁻¹ ms, los cálices de jamaica criolla Huajicori y 4Q4 sin irradiación presentaron valores similares de 330.9 y 342.7 g·kg⁻¹ ms (Figura 18) estos valores fueron menores a los previamente encontrados por Hinajosa-Gomez *et al.* (2018) con 420 y 390 g de fibra total·kg⁻¹ para criolla Huajicori y 4Q4, menores valores de fibra con 148.3 g de fibra total·kg⁻¹ de cálices seco de jamaica reportan Ismail *et al.* (2008) y Sáyago *et al.* (2014) evaluaron varios cultivares de México en donde el contenido de fibra varió entre 369.6 a 457.0 g·kg⁻¹ ms. La combinación de radiación gamma con los cultivares tuvo respuestas diferenciales en el contenido de fibra dietaria total de cáliz seco, de tal forma que

los cultivares no conservan la misma tendencia en cada dosis de radiación gamma. La combinación de criolla Huajicori con 200 Gy presentó el mayor contenido de fibra dietaria total ($439.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ ms}$), el cual fue superior 28, 25, 57, 33 y 31 % de las combinaciones de 4Q4 con 0, 400, 500 Gy y criolla Huajicori con 0 y 400 Gy, respecto a las dosis de radiación indicadas (Figura 20). En este sentido, Abu *et al.* (2019) encontraron una disminución en el contenido de fibra en dosis de 150 Gy y un aumento en dosis de 100 y 200 en frutos en red peppers.

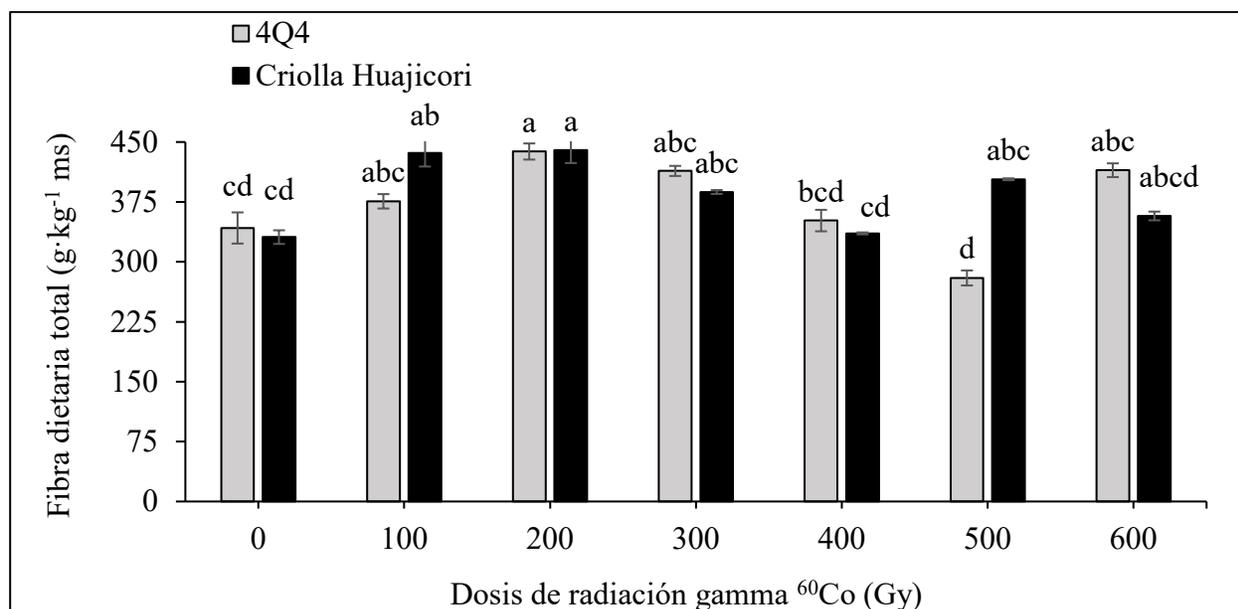


Figura 20. Concentración de fibra dietaria total en el cáliz seco entre el cultivar y dosis de radiación gamma ^{60}Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras \pm D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

8.6.4. Grasa

Las dosis de radiación evaluados mostraron un comportamiento diferencial en el contenido de grasa en los cálices con un máximo de $13.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la dosis de radiación gamma de 100 Gy, el cual fue comparativamente superior 38, 73, 136, 67, 73 y 117 % cuando se aplicaron dosis de radiación de 0, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy, respectivamente (Figura 21).

La interacción de ambos factores de estudio mostró efectos sobre el contenido de grasa en cáliz seco de jamaica la cual varió entre 2.8 y 22.1 g·kg⁻¹ ms. La combinación de criolla Huajicori con radiación gamma 100 Gy tuvo el mayor contenido de grasa en cáliz seco con 22.1 g·kg⁻¹ ms, siendo estadísticamente superior a las demás combinaciones (Figura 22).

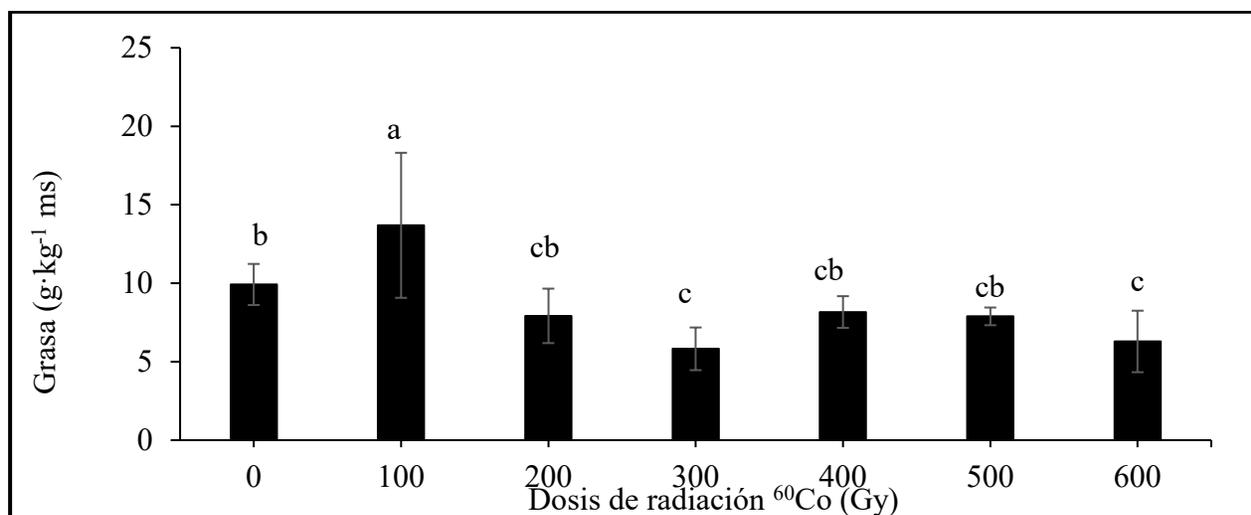


Figura 21. Concentración de grasa en el cáliz seco por las dosis de radiación ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05).

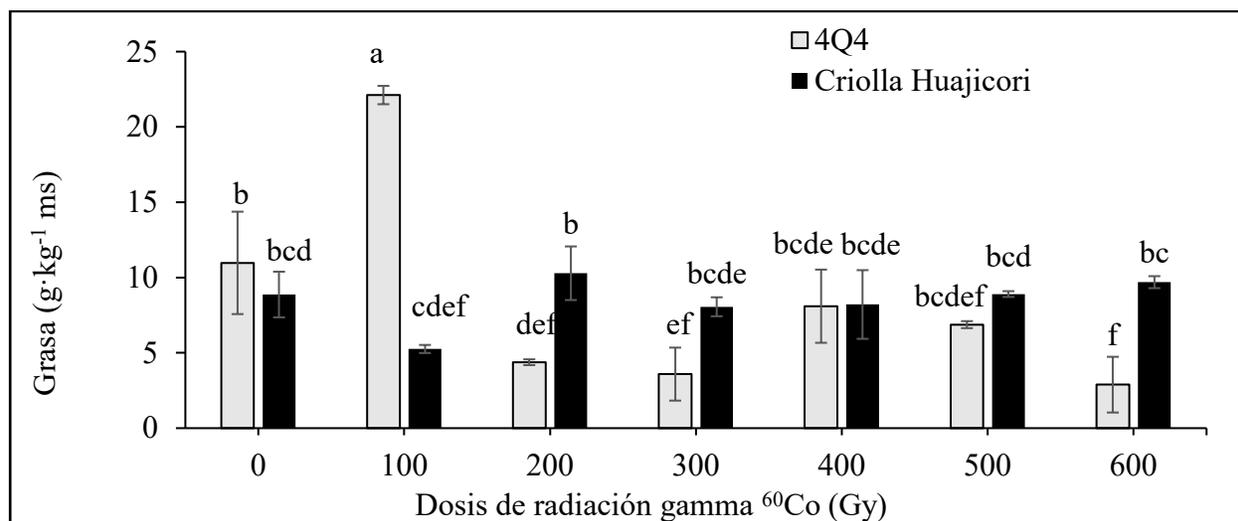


Figura 22. Concentración de grasa en el cáliz seco, según las combinaciones de cultivar y dosis de radiación gamma ⁶⁰Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras ± D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05).

Da-Costa-Rocha *et al.* (2014) encontraron 6.4 g de grasa·kg⁻¹ de cálices seco de jamaica, mientras que Sáyago *et al.* (2014) evaluaron varios cultivares de jamaica mexicanas donde cuantificaron un contenido de grasa entre 8.8 a 14.8 g kg⁻¹ ms. Los datos nutricionales de la USDA reportan un valor diferente a los hallazgos anteriores donde el contenido de grasa para cálices de jamaica es de 47.7 g·kg⁻¹ ms. Los valores encontrados para los controles de criolla Huajicori y 4Q4 son de 8.8 y 12.8 g·kg⁻¹ ms se encuentra dentro de los rangos previamente mencionados de los cultivares de México y debajo de los valores de la USDA. Se informa que los rayos gamma inducen variabilidad en rasgos económicos en diferentes cultivos como mejora de aceites esenciales en manzanilla (Lal *et al.*, 2019) minerales en lentejas (Laskar *et al.*, 2018), azúcar soluble en *Hibiscus sabdariffa* (Al-Ansary *et al.*, 2016), grasa en soya (Ulukapi y Nasircilar, 2015) entre otros.

8.6.5. Carbohidratos

Las dosis de radiación evaluados mostraron un comportamiento diferencial en el contenido de carbohidratos en los cálices de jamaica con un valor máximo de 882 g·kg⁻¹ en la dosis de radiación gamma de 100 Gy, el cual fue superior 1.6, 1.4, 2.2, 2.3 y 1.6 % para muestras con dosis de radiación de 0, 300, 400, 500 y 600 Gy, respectivamente (Figura 23).

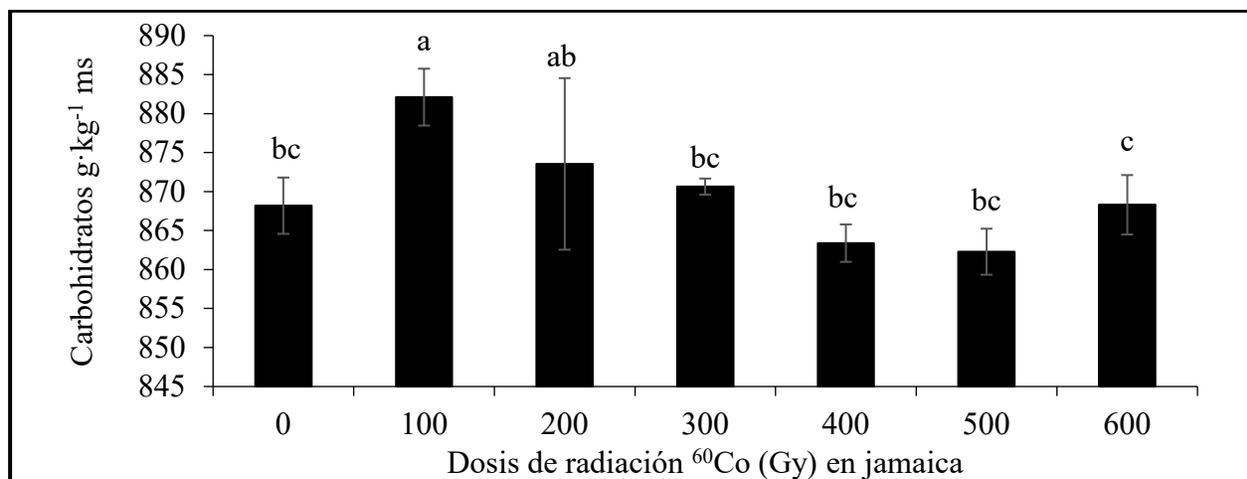


Figura 23. Contenido de carbohidratos en el cáliz seco por las dosis de radiación ⁶⁰Co (Gy) aplicados en jamaica. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05).

El contenido de carbohidratos en los tratamientos varió de 854.6 a 892.4 g·kg⁻¹ ms. Para jamaica 4Q4 se encontró diferencia significativa en las dosis de 100 y 600 Gy (887.9 y 873.5 g·kg⁻¹ ms) donde se observó un incremento en el contenido de carbohidratos; mismo comportamiento se observó en criolla Huajicori con un incremento en carbohidratos para 200 Gy (892.4 g·kg⁻¹ ms) siendo el tratamiento con mayor contenido de carbohidratos (Figura 24).

Los valores encontrados para el contenido de carbohidratos fueron similares para jamaicas 4Q4 y criolla Huajicori no irradiadas con 862.2 y 874.1 g·kg⁻¹ ms (Figura 24). Estos resultados son mayores comparados con los reportados por Da-Costa-Rocha *et al.* (2014) de 793.5 g·kg⁻¹ ms y USDA de 842.6 g·kg⁻¹ ms. Ángeles-Espino *et al.* (2020) demuestran que las inducciones de mutantes mediante la aplicación de rayos gamma pueden generar un efecto positivo o negativo en el contenido de carbohidratos en agave.

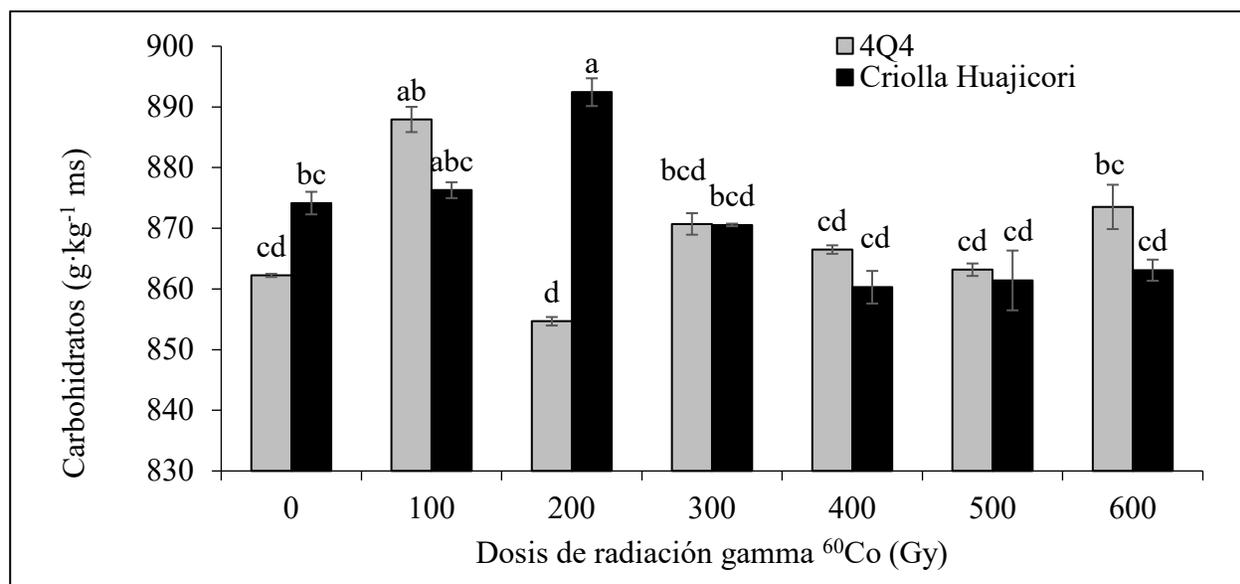


Figura 24. Concentración de carbohidratos en el cáliz seco entre cultivares y las dosis de radiación gamma ⁶⁰Co aplicadas en jamaica. Promedios en barras ± D.S. con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05).

Los cambios que sufren las poblaciones M1 sometidas a dosis de rayos gamma se debe a varios factores, alteraciones metabólicas, daño cromosómico, trastornos fisiológicos y bioquímicos que afectan el desarrollo de la planta. La selección de plantas no se realiza en poblaciones M1, porque las mutaciones causadas por la radiación gamma en su mayoría son recesivas y/o los cambios

favorables que ocurren se pueden confundir con alguna mutación cuando son producto del daño directo por los efectos de la radiación (Fanindi *et al.*, 2019).

La diversidad de caracteres proximales (proteína, grasa, fibra total y carbohidratos) en población M2 de *Hibiscus sabdariffa* puede ser el resultado de la segregación de genes de la irradiación en la población afectada M1 (Syahputra *et al.*, 2017). Estos resultados obtenidos apoyan a la selección de plantas con caracteres deseables a partir de poblaciones mutantes de *Hibiscus sabdariffa*. Algunos estudios dieron como resultado que la irradiación se ha utilizado para aumentar la variación genética, los caracteres cuantitativos, mejorar la nutrición y la calidad de las plantas de *Hibiscus sabdariffa* (El-Sherif *et al.*, 2011; Syahputra *et al.*, 2017; Al-Ansary *et al.*, 2016; Hanafiah *et al.*, 2019).

Wu *et al.* (2018) reportaron que la radiación gamma ^{60}Co a diferentes dosis puede crear variaciones a nivel molecular. Los rayos gamma pueden afectar el reordenamiento estructural del ADN los cuales se pueden observar en los perfiles de ADN polimórfico con apariciones o desapariciones con cambios en su tamaño de pares de bases como señala Al-Ansary *et al.* (2016) y El-Sherif *et al.* (2011) en *Hibiscus sabdariffa*.

8.7. Minerales

Los minerales como el N, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, P, Zn a excepción del K presentaron efectos significativos por el cultivar de jamaica y además todos los minerales mostraron efectos significativos por la dosis de radiación gamma ^{60}Co y su interacción (Cuadro 11).

Entre los cultivares evaluados, los minerales de N y Cu del cáliz seco de 4Q4 fueron estadísticamente superior (5.9 y 19 %) a criolla Huajicori, mientras que para los minerales restantes (Ca, Fe, Mg, Mn, Na, P y Zn) del cáliz seco de criolla Huajicori fueron estadísticamente superior a 4Q4 (Figura 25). La dosis de radiación gamma de 400 Gy generó la mayor concentración de N en cáliz seco con $18692.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ms, aunque solo se observaron diferencias significativas con las dosis de 100 y 200 Gy (26 y 11%), el mayor contenido de Ca se presentó para dosis de 100 Gy con $9457.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ siendo diferente estadísticamente a las dosis de 0, 300, 400, 500 y 600 (32, 51, 45, 70 y 55%), el valor máximo para Cu se encontró en la jamaicas no irradiadas mostrando diferencia

significativas con dosis de 300 y 500, el Fe fue estadísticamente diferente en dosis de 100 Gy en comparación con dosis de 0, 400, 600 Gy, el mayor contenido de K se presentó para dosis de 600 Gy con 23805 g·kg⁻¹ ms observando diferencias significativas con las dosis de 100, 200, 300, 400 y 500 Gy, el valor máximo para Mg fue para la dosis de 100 Gy (2809.8 g·kg⁻¹ ms) observando diferencias significativas con las tratadas con 300 y 600 Gy, el Mn presentó la mayor concentración en dosis de 100 Gy (297.2 g·kg⁻¹ ms) siendo diferentes a todos los tratamientos. La radiación gamma de 100 Gy generó la mayor concentración de Na mostrando diferencias significativas con dosis 0, 200, 300, 500 y 600 Gy. El mayor contenido de P se presentó para dosis de 400 Gy con 3199.1 g·kg⁻¹ ms con diferencia estadística a las dosis 0, 200, 500 y 600 Gy y por último el contenido de Zn presentó su valor máximo en dosis de 100 Gy (34.5 g·kg⁻¹ ms) con diferencias significativas con el resto de las dosis (Cuadro 12).

En el presente experimento de mutagénesis por ⁶⁰Co para jamaica, se encontró que la biodisponibilidad mineral en cálices de jamaica aumentaba significativamente en algunos de los tratamientos de los dos cultivares en la generación M2. Se sabe que los rayos gamma pertenecen a la radiación ionizante que reaccionan con átomos o moléculas generando radicales libres en las células, estos radicales libres pueden cambiar constituyentes esenciales de las células vegetales por lo tanto puede haber cambios a nivel bioquímico, fisiológico, molecular y morfológico (Mohajer *et al.*, 2014). Las plantas sometidas a irradiación gamma sufren un estrés físico, pero solo sucede con generaciones M1, a partir de las generaciones M2 los cambios que se mantienen, son cambios a nivel molecular que se esperan que se hereden a futuras generaciones. La composición mineral de cálices secos de jamaica fue afectada por los cultivares y los niveles de radiación gamma (Cuadro 13), donde se observó el contenido más alto de minerales para el cultivar Criolla Huajicori con dosis de 100 Gy. Sin embargo, el efecto de los rayos gamma indujo cambios significativos en los diferentes minerales de los cálices de jamaica para ambos cultivares.

Cuadro 11. Efecto del cultivar, la radiación gamma ⁶⁰Co y su interacción, en los minerales del cáliz seco de jamaica.

Fuente de variación	N	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Zn
	Valor P									
Cultivar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dosis de radiación	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Cultivar* Dosis de radiación	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 12. Minerales (N, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn) del cáliz seco por efecto de la combinación del cultivar y la radiación gamma aplicada en jamaica

Fuente de variación	N	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Zn
	mg kg ⁻¹									
Criolla Huajicori	17106b	7898a	10b	169a	20410a	2641a	218a	283.2a	2962a	25a
4Q4	17978a	6054b	12a	131b	20808a	2450b	156b	209b	2673b	19b
DHS	414.5	638.7	0.9	12.3	831	114.5	11.2	26.6	124.8	2.3
0	17740ab	7160bc	13a	120c	22301ab	2477ab	169bc	201c	2641c	15bc
100	14751c	9457a	10abc	198a	20292bc	2809a	297a	368a	3082ab	34a
200	16799b	8015ab	12ab	134bc	18358c	2630ab	181b	233cb	2590c	15bc
300	18135a	6222bc	8.2c	164ab	19175c	2349b	143c	227cb	2890abc	32a
400	18692a	6480bc	13a	126c	19576bc	2545ab	193b	293ab	3199a	19bc
500	18388a	5551c	10bc	183a	20756bc	2527ab	144c	217cb	2715bc	24b
600	18086a	6086c	11ab	134bc	23805a	2450b	175bc	160c	2643bc	14c
DHS	1209.5	1858.6	2.7	36.5	2466	335.7	32.9	78.3	366.6	6.8

Promedios en columnas que no comporten misma letra, son significativamente diferentes, (Tukey, $p \leq 0.05$). DHS: Diferencia Honesta significativa.

Cuadro 13. Efecto de las combinaciones entre el cultivar y la radiación gamma ⁶⁰Co aplicada al cultivo, en la concentración de minerales del cáliz seco de jamaica.

Fuente de variación	N	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Zn	Total	
	mg kg ⁻¹											
Cultivar	γ Gy											
0	16996c	7483bc	9ef	117 de	23437ab	2468bcde	201bcd	230bc	2833bcd	16cd	36798	
100	17437bc	14496a	11bcdef	289a	20161bcde	3356a	569a	506a	3987a	69a	43448	
200	13145d	9138bc	11cdef	152bcde	18354de	2511bcde	200bcd	243bc	2276de	13cd	32900	
C.H.	300	17665bc	6868bc	3g	180bc	16929e	2187de	104g	194bc	2657bcde	20cd	29147
400	18839abc	6340bc	15abc	128cde	20046bcde	2766bc	171cde	310b	3241b	24c	33045	
500	17753bc	5754c	7efg	193b	21034abcd	2401bcde	146defg	273bc	2722bcde	24c	32559	
600	18020bc	7165bc	15ab	113de	22909abc	2876ab	201bc	175c	3045bc	13cd	36516	
0	18483abc	6837bc	16a	124cde	21165abcd	2487bcde	149cdefg	172c	2449cde	15cd	33416	
100	12961d	6097bc	10edf	106e	20423bcde	2263cde	115fg	225bc	2177e	11d	31431	
200	20453a	6892bc	14abcd	118de	18363de	2749bc	162cdef	224bc	2904bc	17cd	31445	
4Q4	300	18605abc	5577c	11bcdef	141bcde	21420abcd	2512bcde	171cde	241bc	3124b	50b	33249
400	18472abc	6620bc	11bcdef	124cde	19106cde	2324cde	226b	275bc	3135b	15cd	31840	
500	19339ab	5348c	12abcde	173bcd	20478bcde	2653bcd	138efg	160c	2708bcde	17cd	31689	
600	18152bc	5007c	7fg	154bcde	24700a	2023e	148cdefg	151c	2240de	14cd	34449	
DHS	1996	3056	4.5	60.2	4080	548	54.7	128	603	11.2		
CV %	3.5	14.1	11	11.8	5.5	6.9	8.9	16.1	6.58	15.1		

Promedios en columnas que no comporten misma letra, son significativamente diferentes, (Tukey, $p \leq 0.05$). C.H.: Criolla Huajicori, CV: Coeficiente de variación y DHS: Diferencia Honesta significativa.

El mayor contenido de nitrógeno (N) fue para el cultivar 4Q4 con dosis de 200 Gy y la menor concentración fue para criolla Huajicori a 200 Gy, pero esta última mostró el mayor contenido de calcio (Ca). En Ca, el cultivar 4Q4 no presentó diferencias significativas entre las dosis de rayos gamma. Los resultados de cobre (Cu) mostraron que no hubo efectos favorables para ambos cultivar en las diferentes dosis de rayos gamma, respectivamente en comparación con los controles, en cambio se encontraron disminución del contenido de Cu para el cultivar criolla Huajicori con dosis de 300 Gy y para 4Q4 con dosis de 100, 300, 400 y 600. La proporción de hierro (Fe) aumentó para criolla Huajicori con 100, 300 y 500 Gy en comparación con su control ($117 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en 4Q4 no se reportaron efectos significativos en las diferentes dosis de rayos gamma. El potasio (K) disminuyó para los tratamientos de 200 y 300 Gy para criolla Huajicori, aunque en dosis de 600 Gy para 4Q4 se incrementó el contenido. El tratamiento de 100 Gy para criolla Huajicori presentó un efecto favorable en el contenido de magnesio (Mg) pero, el tratamiento de 600 Gy para 4Q4 el contenido de Mg disminuyó significativamente. La radiación gamma de 100 Gy para el cultivar de criolla Huajicori y 4Q4 a 400 Gy indujo un aumento significativo en el contenido de manganeso (Mn) pero disminuyó para 300 Gy con valores inferiores a la muestra no irradiada. La concentración de sodio (Na) y fósforo (P) aumentó significativamente en criolla Huajicori con 100 Gy en comparación del control, de igual manera en 4Q4 con dosis de 300 y 400 Gy. El contenido de zinc (Zn) en los cálices de jamaica aumentó en criolla Huajicori con 100 Gy y 4Q4 con 300 Gy con respecto a las muestras no irradiadas.

La radiación gamma en vegetales presenta efectos variables en el contenido de minerales en los productos. Laskar *et al.* (2018) reportaron que semillas de lenteja irradiadas resultados favorables en el contenido de hierro, zinc y cobre en comparación con las no irradiadas, en Fe se lograron incrementos de 14.9 y 16.8 % con dosis de 200 y 300 Gy, respecto a su control. Así mismo, dosis de 300 Gy favorecieron el contenido de Zn y Cu. Singh y Datta (2010) encontraron un incremento del contenido de N, K y Cu y niveles más bajos en P, Fe, Zn y Mn en granos de maíz de plantas irradiadas con dosis de 10, 30, 50 y 100 Gy, con respecto al control. Alikamanoglu *et al.* (2011) informaron con éxito el aumento de las concentraciones de micronutrientes (Fe, Zn y Cu) en las variantes de plantas de soja desarrolladas a través de las dosis de radiación gamma (100, 200, 300, 400 y 500 Gy). Tomlekova *et al.* (2017) mostraron que la inducción de mutaciones que produce altas concentraciones de β -caroteno en frutos de pimiento no tiene un efecto perjudicial sobre las concentraciones de elementos minerales y, por el contrario, aumenta la biodisponibilidad de zinc y hierro.

La irradiación gamma induce alteraciones genéticas que pueden modificar la composición química y el valor nutritivo del cultivo (Kugbe *et al.*, 2015), estas alteraciones genéticas pueden variar de acuerdo a la especie y las diferentes dosis de radiación gamma. De acuerdo con los resultados de la composición mineral, las jamaicas irradiadas respondieron de manera diferentes entre cultivares y dosis de irradiación gamma en comparación con sus controles.

8.8. Potencial Antioxidante

Los fenoles totales, antocianinas totales y la capacidad antioxidante evidenciaron efectos significativos por el cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y su interacción (Cuadro 14).

Cuadro 14. Efecto del cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y su interacción, en los atributos antioxidantes del cáliz seco de jamaica.

Fuente de variación	Fenoles Totales	Antocianinas Totales	Capacidad Antioxidante
	Valor P		
Cultivar	0.000	0.000	0.017
Dosis de radiación	0.000	0.000	0.000
Cultivar * Dosis de radiación	0.000	0.000	0.001

Fenoles totales. El contenido de fenoles totales (Cuadro 15) varió de 4,626 a 14,416 mg EAG·kg⁻¹ ms; la interacción entre el cultivar 4Q4 y dosis de 300 Gy (14,416 mg EAG kg⁻¹ ms) presentó los valores más altos siendo estadísticamente diferente del control, para el cultivar criolla Huajicori se encontró diferencias significativas para los tratamientos de 100 Gy (7458 mg EAG·kg⁻¹ ms), 300 Gy (9 529 mg EAG·kg⁻¹ ms), 500 Gy (10 134 mg EAG·kg⁻¹ ms) y 600 Gy (11 263 mg EAG·kg⁻¹ ms) siendo el de mayor incremento para el cultivar. No se encontraron efectos significativos en los fenoles totales de las muestras con niveles de radiación de 100, 200, 400 y 500 Gy para 4Q4 y 200 y 400 Gy para criolla Huajicori.

Cuadro 15. Potencial antioxidante (fenoles totales, antocianinas totales y capacidad antioxidante) del cáliz seco de jamaica por efecto del cultivar, la radiación gamma ^{60}Co y su combinación.

Fuente de variación	Fenoles totales mg EAG·kg ⁻¹ ms	Antocianinas totales mg C3G·kg ⁻¹ ms	Capacidad antioxidante uM ET·g ⁻¹ ms	
Criolla Huajicori	7739.5 b	9948 b	238.1 b	
4Q4	8903.8 a	13583 a	242.9 a	
DHS	34.1	667	3.8	
0 Gy	5954 d	6900.2 e	219 b	
100 Gy	7850.3 c	7706.3 e	250.3 a	
200 Gy	6858.2 d	8650.5 e	239.3 a	
300 Gy	11973.1 a	11357.7 d	245.1 a	
400 Gy	6359 d	13435.5 c	241 a	
500 Gy	9716 b	18393.1 a	240.8 a	
600 Gy	9541 b	15659.5 b	248.2 a	
DHS	98.8	1931.2	11.2	
0 Gy	7281.8 f	8864.9 fg	230.792 c	
100 Gy	8242.2 def	9140.1 efg	250.993 a	
200 Gy	8087 def	13489.4 cd	246.661 abc	
4Q4	300 Gy	14416.2 a	10782.6 def	246.304 abc
400 Gy	7182.8 fg	10771.6 def	238.318 abc	
500 Gy	9297.8 cde	28534.6 a	235.422 abc	
600 Gy	7818.9 ef	13497.4 cd	252.077 a	
0 Gy	4626.2 h	4935.6 h	207.208 d	
100 Gy	7458.5 f	6782.1 gh	249.662 ab	
Criolla	200 Gy	5629.4 gh	3811.6 h	231.995 bc
Huajicori	300 Gy	9529.9 cd	11932.9 de	243.806 abc
400 Gy	5535.2 h	16099.4 bc	243.751 abc	
500 Gy	10134.2 bc	8251.6 fg	246.26 abc	
600 Gy	11263.2 b	17821.7 b	244.459 abc	
DHS	161.3	3151.5	18.13	

Promedios en columnas que no comporten misma letra, son significativamente diferentes, (Tukey, $p \leq 0.05$). DSH: Diferencia honestamente significativa.

Para este estudio, se cuantificaron valores de 7,281 y 4,626 mg EAG·kg⁻¹ ms para fenoles totales en las jamaicas 4Q4 y criolla Huajicori no irradiadas, resultado valores bajos en comparación con lo reportado por Hinojosa-Gómez *et al.* (2018) con 20,000 y 6,000 mg EAG·kg⁻¹ ms para los mismos cultivares desarrollados bajo invernadero, este comportamiento pudo deberse a las diferentes condiciones de desarrollo de las plantas de jamaica.

Ahou-Nadia *et al.* (2020) informaron un incremento de fenoles totales para dosis de 200 y 300 Gy en plantas de maíz, de igual manera Hamideldin y Eliwa (2015) encontraron un aumento del 16% de fenoles totales en maíz para dosis de 60 Gy. En plántulas de *Arjuna terminalia* expuestas a dosis crecientes de radiación hasta 150 Gy mostraron una mayor cantidad de compuestos fenólicos con respecto a los no irradiadas (Alikamanoglu *et al.*, 2007). En plantas de jamaica Al-Ansary *et al.* (2016) reportaron que en cálices secos del cultivar Masri aumentó el contenido de fenoles totales de 29,400 hasta 80,240 mg EAG·kg⁻¹ cuando fueron irradiadas con 320 Gy.

Antocianinas totales. El contenido de antocianinas (Cuadro 15) en los tratamientos varió de 3,811 a 28,534 mg C3G·kg⁻¹ ms; el valor más alto de antocianinas totales fue inducido por dosis de 500 Gy para 4Q4 y 600 Gy para criolla Huajicori (28,534 y 17,821 mg C3G·kg⁻¹ ms). Sin embargo, en dosis de 200 y 300 Gy para 4Q4 y 300 y 400 Gy para criolla Huajicori favoreció significativamente el contenido de antocianinas en comparación con las muestras no irradiadas (0 Gy). Los valores de antocianinas para 4Q4 y criolla Huajicori control, fueron de 8,864 y 4,935 mg C3G·kg⁻¹ ms, estos resultados son similares a los reportados por Hinajosa-Gomez *et al.* (2018) para los mismos cultivares desarrollados bajo invernadero (10,000 y 3,000 mg C3G·kg⁻¹ ms). El incremento de antocianinas concuerda con los reportados por El-Sherif *et al.* (2013) quienes encontraron que dosis creciente hasta 600 Gy tenían la capacidad de aumentar las concentraciones de antocianinas en cálices de jamaica. De igual manera, Al-Ansary *et al.* (2016) cuantificaron un incremento en el contenido de antocianinas para dosis creciente hasta 320 Gy para plantas de jamaica “Sudai” y “Masri” de tercera generación (M3). Aboelseoud *et al.* (1994) encontraron que la radiación gamma ofrece la capacidad de mejorar el contenido de antocianinas en plantas de jamaica.

Capacidad antioxidante. La capacidad antioxidante (Cuadro 15) en las jamaicas mostró un rango de 207 a 252 μmol ET·g⁻¹ ms; donde el mayor valor fue 4Q4 a 600 Gy, además la dosis de 100 también favoreció significativamente el incremento del contenido de antocianinas (250 μmol ET·g⁻¹ ms); para criolla Huajicori se encontraron efectos favorables en la capacidad antioxidante para todas las dosis estudiadas con valores de 231 a 249 μmol ET·g⁻¹ ms, en comparación con los controles (0 Gy). Los resultados obtenidos de la capacidad antioxidante para los controles 4Q4 y criolla Huajicori (230 y 207 μmol ET·g⁻¹ ms) fue similar a los resultados reportados por Hinojosa-Gómez *et al.* (2018) para los mismos cultivares de jamaica en condiciones de invernadero. Al-Ansary *et al.* (2016) indicaron que dosis crecientes hasta 320 Gy incrementó la capacidad antioxidante para el cultivar de jamaica Masri, sin embargo, para el cultivar de "Sundai encontraron

que en dosis de 80 Gy la capacidad antioxidante disminuyó significativamente, pero aumentó a dosis de 240 y 320 Gy, indicando que la radiación de ^{60}Co puede afectar de maneras diferentes para cada cultivar a pesar de ser la misma especie.

Los cambios producidos por las diferentes dosis de radiación son mutaciones que ocurren en el ADN que son cambios hereditarios, cuando se evalúan la M1, los efectos pueden ser hereditarios y somáticos los cuales están relacionados con los daños fisiológicos causados por la radiación ^{60}Co que no son heredables; estos se pueden confundir con mutaciones hereditarias (Lundqvist *et al.*, 2012; Jankowicz-Cieslak *et al.*, 2017). En este estudio, los cambios mostrados en la potencial antioxidante (fenoles totales, antocianinas totales y capacidad antioxidante) puede deberse a que la radiación causó mutaciones en el material genético de la jamaica de la generación M1 y fueron heredados a la segunda generación (M2) de jamaica (Spencer-Lopes *et al.*, 2018).

Estos resultados demostraron que las dosis gamma ^{60}Co (100, 200, 300, 400, 500 y 600 Gy) utilizadas mejoraron el potencial antioxidante de las plantas de jamaica en comparación con las plantas control (0 Gy). Se reporta que la radiación gamma induce estrés oxidativo con sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ROS) como radicales superóxido (O_2^-), radical hidroxilo (OH^-) y H_2O_2 (Apel y Hirt, 2004; Lundqvist *et al.*, 2012), que reaccionan rápidamente con casi todas las moléculas orgánicas estructurales y funcionales, incluidas las proteínas, los lípidos y los ácidos nucleicos, provocan una alteración del metabolismo celular (Jan *et al.*, 2012; Lundqvist *et al.*, 2012). Lo anterior citado sucede con aquellas plantas que fueron directamente sometidas a la radiación gamma con la generación M1 y a partir de la M1 se obtuvieron la M2 donde se evaluaron varias características para conocer el afecto de manera positiva de la radiación gamma; que da lugar a una serie de mutaciones heredables a futuras generaciones. La radiación con ^{60}Co induce alteraciones que pueden ser el intercambio de gases a nivel foliar, el equilibrio hormonal, intercambio de agua y las actividades enzimáticas (El-Sherif *et al.*, 2011; Chandrashekar *et al.*, 2013). Estos efectos incluyen cambios en la estructura celular de la planta y el metabolismo celular como alteración en la fotosíntesis, dilatación de membranas de tilacoides, modulación de los sistemas antioxidantes y acumulación de compuestos fenólicos (Al-Ansary *et al.*, 2016; Chandrashekar *et al.*, 2013).

9. CONCLUSIONES

Los cultivares de criolla Huajicori y 4Q4 en las diferentes dosis de rayos gamma se desarrollaron de manera satisfactoria bajo condiciones de hidroponía e invernadero. Los tratamientos de rayos gamma en M2 de jamaica presentaron comportamientos diferenciales en los parámetros agronómicos y de calidad evaluados.

El rendimiento aumentó 38% en la combinación de jamaica criolla Huajicori con 300 Gy, en comparación con el tratamiento no irradiado (0 Gy). Las dosis de rayos gamma generaron modificaciones favorables en las tasas de crecimiento de altura y diámetro de tallo de la jamaica.

El en análisis proximal, algunas dosis de irradiación de las semillas de jamaica lograron desarrollar plantas con cálices con mayor contenido de proteínas, fibra dietaria y carbohidratos. La biodisponibilidad mineral en cálices de jamaica presentaron efectos variables en los distintos tratamientos de los dos cultivares; mientras que la irradiación favoreció hasta 143% un de fenoles totales en criolla Huajicori y 226 % en el contenido de antocianinas totales con respecto al testigo y la capacidad antioxidante aumentó hasta un 20%.

10. RECOMENDACIONES

El uso de los rayos gamma en el fitomejoramiento es una buena alternativa para generar materiales vegetales con características de interés agrícola, por lo tanto, los resultados de la investigación pueden contribuir para aumentar el aprovechamiento de la jamaica mediante el desarrollo de nuevo material genético de interés agronómico.

Con el propósito de monitorear el comportamiento de las características de calidad nutricional, agronómicas y nutracéuticas analizadas en este trabajo de investigación, se recomienda evaluar las siguientes generaciones de jamaica (M3), para conocer la heredabilidad de las características deseables de interés para la sociedad agrícola y los consumidores.

11. REFERENCIAS

- Aboelseoud, M. A., Hashim, M. F. y Mohamed, F. A. (1994). Combined effect of gamma radiation and potassium fertilization on growth and coloring matter contents of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). Second Arab Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Cairo, 864-874.
- Abu, N. E., Omeke, J. O. y Ojua, E. O. (2019). Effect of different mutagens on some mineral, phytochemical and proximate composition of two red pepper varieties. Annual Research & Review in Biology, 1-13.
- Ahou-Nadia, K., Koutoua, A., Salomé, Y. S. E., Hilaire, K. T. y Justin, K. Y. (2020). Effect of auxin type on the total phenols synthesis and some enzymatic proteins activity in maize callus from seeds irradiated to gamma radiation. World Journal of Advanced Research and Reviews, 6(2), 111-119.
- Al-Ansary, A. M. F., Abd-El Hamied, N. R., Abd-El-Hamid, A. M. y Ottai, E. S. (2016). Cytogenetic changes and genomic DNA assay of Sudani and Masri Roselle varieties affected by different gamma irradiation doses. International Journal ChemTech Research, 9(3), 97-107.
- Al-Ansary, A. M. F., Abd-El Hamied, N. R., Ottai, M. E. S. y El-Mergawi, R. A. (2016). Gamma irradiation effect on some morphological and chemical characters of Sudani and Masri Roselle varieties. International Journal ChemTech Research, 9(3), 83-96.
- Ali, B., Mousa, H. y El-Mougy, S. (2003). The effect of a water extract and anthocyanins of *Hibiscus sabdariffa* L. on paracetamol-induced hepatotoxicity in rats. Phytotherapy Research, 17(1), 56-59.
- Alikamanoglu, S., Yaycili, O. y Sen, A. (2011). Effect of gamma radiation on growth factors, biochemical parameters, and accumulation of trace elements in soybean plants (*Glycine max* L. Merrill). Biological Trace Element Research, 141(1), 283-293.
- Alikamanoğlu, S., Yaycılı, O., Atak, C. y Rzakoulieva, A. (2007). Effect of magnetic field and gamma radiation on *Paulownia tomentosa* tissue culture. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 21(1), 49-53.
- Amir, K., Hussain, S., Shuaib, M., Hussain, F., Urooj, Z., Khan, W. M. y Hussain, F. (2018). Effect of gamma irradiation on okra (*Abelmoschus esculentus* L.). Acta Ecologica Sinica, 38(5), 368-373.
- Ángeles-Espino, A., Dimas-Estrada, H. E., Ramírez-Alvarado, D., Cruz-Rubio, J. M., Palmeros-Suárez, P. A. y Gómez-Leyva, J. F. (2020). Caracterización molecular de mutantes de *Agave tequilana* inducidas con radiación gamma ^{60}Co y su efecto en la acumulación de fructooligosacáridos. Acta Universitaria 30, e2696. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2020.2696>
- 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.

- Apel, K. y Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373-399.
- Babaei, A., Nematzadeh, G., Avagyan, V. y Hashemi H. (2010). Radio sensitivity studies of morpho-physiological characteristics in some Iranian rice varieties (*Oryza sativa* L.) in M1 generation. *African Journal of Agricultura Research*, 5(16), 2124 - 2130.
- Bobadilla-Carrillo, G. I., Valdivia-Reynoso, M. G., Machuca-Sánchez, M. L., Balois-Morales, R. y González-Torres, L. (2016). Factores pre cosecha, cosecha y poscosecha inherentes al cultivo de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Revista Bio Ciencias*, 3(4), 256-268.
- Bughio, H. R., Asad, M. A., Odhano, I. A., Arain, M. A. y Bughio, M. S. (2010). Genetic improvement of an indigenous aromatic variety 'Jajai 77' through mutagenesis. *Plant Mutation Reports*, 2(2), 40-44.
- Bustin, S., Beaulieu, J., Huggett, J., Jaggi, R., Kibenge, F., Olsvik, P., Penning, L. y Toegel, S. (2010). MIQE précis: Practical implementation of minimum standard guidelines for fluorescence-based quantitative real-time PCR experiments. *BMC Molecular Biology*, 11, 74.
- Caro Velarde, F., Machuca Sánchez, M. L. y Flores Berrios, E. P. (2012). El cultivo de jamaica en Nayarit (Segunda ed.). Tepic, Nayarit: Universidad Autónoma de Nayarit, 23-45.
- Carvajal-Zarrabal, O., M., S., Waliszewski, D., Barradas-Dermitz, Zaida, O., Hayward-Jones, P. y Trujillo, P. (2005). The Consumption of *Hibiscus sabdariffa* dried calyx ethanolic extract reduced lipid profile in rats. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60(4), 153-159.
- Castañeda, R. y Caceres A. 2014. Compuestos bioactivos y propiedades terapéuticas de los cálices de rosa de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Revista Científica* 24 (1):7-24.
- Chandrashekar, K. R., Somashekarappa, H. M. y Souframanien, J. (2013). Effect of gamma irradiation on germination, growth, and biochemical parameters of *Terminalia arjuna* Roxb. *Radiation Protection and Environment*, 36(1), 38-43.
- Contreras, J., Soto, J. M. y Huchin, A. (2009). Tecnología para el cultivo de jamaica en Quintana Roo. Centro de investigación Regional Sureste Campo Experimental Chetumal. Folleto Técnico, (3), 1-7.
- Cruz, Izquierdo, S. (2012). Curso Internacional de actualización en fitomejoramiento por mutagénesis asistida por marcadores moleculares. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), 1-2.
- Cubero, Salmerón, J. I. (2005). Introducción a la Mejora Genética Vegetal. MundiPrensa México S.A de C.V., 1-122.
- Da-Costa-Rocha, I., Bonnlaender, B., Sievers, H., Pischel, I. y Heinrich, M. (2014). *Hibiscus sabdariffa* L. a phytochemical and pharmacological review. *Food chemistry*, 165, 424-443.
- Duke, J. A. (1983). *Hibiscus sabdariffa* L. Handbook of Energy Crops. Purdue University, Center. hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Hibiscus_sabdariffa.html.

- El-Sherif, F., Khattab, S., Ghoname, E., Salem, N. y Radwan, K. (2011). Effect of gamma irradiation on enhancement of some economic traits and molecular changes in *Hibiscus sabdariffa* L. *Life Science Journal*, 8(3), 220-229.
- Fanindi, A., Sutjahjo, S. H., Aisyah, S. I. y Purwantari, N. D. (2019). Morphological characteristics and productivity of guinea grass (*Panicum maximum* CV Purple Guinea) irradiated with gamma-ray. *Tropical Animal Science Journal*, 42(2), 97-105.
- Flores Berrios, E., Caro Velarde, F. y Machuca Sánchez, M. (2012). El cultivo de jamaica en Nayarit. Tepic, Mexico: Universidad Autónoma de Nayarit, 1-45.
- Friedman, C., N. Wight, L. Crosson, S. White y Strenge R. (2014). Validation of a quantitative PCR assay for detection and quantification of '*Candidatus xenohalictis californiensis*.' *Diseases of Aquatic Organisms*, 108, 251-259.
- Galicia-Flores, L. A., Salinas-Moreno, Y., Espinoza-García, B. M. y Sánchez-Feria, C. (2008). Caracterización fisicoquímica y actividad antioxidante de extractos de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) nacional e importada. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 14(2), 121-129.
- Gardner, E. J., Simmons, M. J., Snustad, P. D. y Santana Calderón, A. (2000). Principles of Genetics. En: *Principios de Genética*. México. Limusa Wiley, 649-669.
- Giusti, M. y Jing, P. (2008). Analysis of Anthocyanins. En *Food Colorants: Chemical and Functional Properties*. Estados Unidos: CRC Press LLC, 480-497.
- Hamideldin, N. y Eliwa, N. E. (2015). Gamma radiation and sodium azide influence on physiological aspects of maize under drought condition. *Basic Research Journal of Agricultural Science and Review*, 4(1), 5-13.
- Hanafiah, D. S., Rakasiwi, G., Fahreza, M. y Siregar, L. A. M. (2019). Appearance of agronomic characters and genetic parameters estimation on m 3 population of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 260 (1), 012128.
- Hanafiah, D. S., Siregar, L. A. M. y Putri, M. D. (2017). Effect of gamma rays irradiation on M1 generation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *International Journal of Agriculture Research*, 12, 28-35.
- Hernández-Muñoz, S., Pedraza-Santos, M. E., López, P. A., Gómez-Sanabria, J. M. y Morales-García, J. L. (2019). Mutagenesis in the improvement of ornamental plants. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 25 (3), 151-167.
- Hinojosa-Gómez, J. (2019). Estudio agronómico y propiedades funcionales de cultivares de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) con estrés hídrico en invernadero [Tesis de doctorado]. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Sinaloa. México, 1-96.
- Hinojosa-Gómez, J., Martín-Hernández, C. S., Heredia, J. B., León-Félix, J., Osuna-Enciso, T. y Muy-Rangel, M. D. (2018). Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) cultivars calyx produced hydroponically: Physicochemical and nutritional quality. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78(4), 478-485.
- Huang, D., Ou, B., Hampsch-Woodill y Prior, R. (2002). High-throughput assay of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) using a multichannel liquid handling system coupled with the microplate fluorescence reader in 96-well format. *Journal Agriculture Food Chemistry* 50, 4437-4444.

- IAEA. (2020). International Atomic Energy Agency Recuperado de <https://mvd.iaea.org>
- Integrated Taxonomic Information system (2000) Taxonomic Serial No.: 503001 Recuperado de <https://www.itis.gov>
- Ismail, A., Ikram, E. H. K. y Nazri, H. S. M. (2008). Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds nutritional composition protein quality and health benefits. *Food*, 2(1), 1-16.
- Jabeen, N. y Mirza, B. (2004). Ethyl methane sulfonate induces morphological mutations in *Capsicum annuum*. *International Journal. Agric. Biol*, 6, 340-345.
- Jan, S., Parween, T. y Siddiqi, T. O. (2012). Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews*, 20(1), 17-39.
- Jankowicz-Cieslak, J., Tai, T. H., Kumlehn, J. y Till, B. J. (2017). *Biotechnologies for plant mutation breeding: protocols*. Springer Nature, 340.
- Jeong, S., Yamamoto, H. y Esaka, M. (2006). Expression of flavonoid 3' hydroxylase and flavonoid 3'5' hydroxylase genes and flavonoid composition in grape (*Vitis vinifera*). *Plant Science*, 170, 61-69.
- Joint FAO/IAEA. (2010). Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Vienna (Austria). *Plant Mutation Reports*, Vol 2, No 2, June 2010 (INIS-XA--1110997). International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA.
- Kugbe, J. X., Salifu, B. y Opoku, N. (2015). Potential of gamma rays to improve grain yield and nutritional quality of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.): A review. *Elixir Agriculture* 79, 30667-30671.
- Kumar, A., Chaurasia, A. K., Marker, S., Shukla, P. K., Rai, P. K., Verma, P. K. y Bara, B. M. (2016). Effect of gamma radiation of macro mutations, effectiveness and efficiency under M2 generation in pea (*Pisum sativum* L.). *Annales of West University of Timisoara. Series of Biology*, 19(1), 71.
- Kwofie, J., Amoatey, H. M., Nunekpeku, W., Ahiakpa, J. K. y Katsepor, C. (2017). Crossability Studies among Twenty Accessions of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Journal of Agricultural Science*, 9(9), 230-237.
- Lal, R. K., Chanotiya, C. S., Singh, V. R., Dhawan, S. S., Gupta, P., Shukla, S. y Mishra, A. (2019). Induced polygenic variations through γ -rays irradiation and selection of novel genotype in chamomile (*Chamomilla recutita* L.). *International Journal of Radiation Biology*, 95(9), 1242-1250.
- Laskar, R. A., Laskar, A. A., Raina, A., Khan, S. y Younus, H. (2018). Induced mutation analysis with biochemical and molecular characterization of high yielding lentil mutant lines. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 167-179.
- Lim, S. H., Song, J. H., Kim, D. H., Kim, J. K., Lee, J. Y., Kim, Y. M. y Ha, S. H. (2016). Activation of anthocyanin biosynthesis by expression of the radish R2R3-MYB transcription factor gene RsMYB1. *Plant Cell Reports*, 35(3), 641-653.
- López, R., C. Asensio, M. M. Guzman y N. Boonham. (2006). Development of real-time and conventional RT-PCR assays for the detection of potato yellow vein virus (PYVV). *Journal of Virological Methods*, 136, 24-29.

- Lundqvist, U., Franckowiak, J. y Forster, B. (2012). Mutation Categories. *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. CABI, FAO, Oxfordshire, UK, 47–55.
- Magdy, A. M., Fahmy, E. M., Abd EL-Rahman, M. A. A. y Awad, G. (2020). Improvement of 6-gingerol production in ginger rhizomes (*Zingiber officinale* Roscoe) plants by mutation breeding using gamma irradiation. *Applied Radiation and Isotopes*, 162, 109193.
- Maluszynski, M. (2001) Officially released mutant varieties- The FAO/IAEA Database. *Plant CellTissue and Organ Culture*, 65,175-177.
- Mateus, N. y Freitas, V. (2009). Anthocyanins as Food Colorants. En *Anthocyanins: Biosynthesis, functions and applications*. Nueva York: Springer, 283-298.
- Mccaleb, R. (1996). *Manual de la Producción de Roselle*. USA: Herb Research Foundation, 1-92.
- Moghaddam, S. S., Jaafar, H., Ibrahim, R., Rahmat, A., Aziz, M. A., y Philip, E. (2011). Effects of acute gamma irradiation on physiological traits and flavonoid accumulation of *Centella asiatica*. *Molecules*, 16(6), 4994-5007.
- Moreno-Pérez, E. D. C., Avendaño-Arrazate, C. H., Mora-Aguilar, R., Cadena-Iñiguez, J., Aguilar-Rincón, V. H. y Aguirre-Medina, J. F. (2011). Diversidad morfológica en colectas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) del centro-norte de México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 23-30.
- Morton, J. (1987). Roselle. En: *Fruits or Warm Climates*, 281-286. <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/mortonne/roselle.html>.
- Nasution, S. A., Sembiring, M., Siregar, L. A. M. y Hanafiah, D. S. (2020). Individual selection of roselle plant m 4 generation (*Hibiscus sabdariffa* l.) based on anthocyanin, vitamin c and water content. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 454 (1), 012148.
- Nunoo, J., Quartey, E. K., Amoatey, H. M. & Klu, G. P. (2014). Effect of recurrent irradiation on the improvement of a variant line of wild tomato (*Solanum pimpinellifolium*). *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(4), 377-383.
- Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H. A., y Usman, M. (2016). Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 30(1), 1-16.
- Pavadai, P., Girija, M. y Dhanavel, D. (2010). Effect of gamma rays on some yield parameters and protein content of soybean in M2, M3 and M4 generation. *Journal of Experimental Sciences*, 1(6), 8-11.
- Rao, P. (1996). Nutrient composition and biological evaluation of mesta (*Hibiscus sabdariffa*) seeds. *Plant Foods Hum Nutrition*, 49(1), 27-34.
- Raymaekers, M., Smets R., Maes B. y Cartuyvels, R. (2009). Checklist for optimization and validation of real-time PCR assays. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 23, 145-151.
- Rodríguez, Vazquez M. (2019). Análisis de las importancias de flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) ingresada a través del puerto de Veracruz en el periodo 2008-2018. (Tesis de progrado). Universidad Veracruzana, Veracruz, México, 1-95.

- Rosales, López, C. (2004). Optimización del proceso de bioseparación de compuestos fenólicos a partir de dos variedades de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.), maíz azul (*Zea mays* L.) y jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). Instituto Tecnológico de Costa Rica, 14, 46-79.
- San-Martín-Hernández, C., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Volke-Haller, V. H., Escalante-Estrada, J. A., García, P. S. y Saucedo-Veloz, C. (2016). Nitrogen and potassium nutrition differentially affect tomato biomass and growth. *Interciencia*, 41(1), 60-66.
- Sáyago-Ayerdi, S. G., Velázquez-López, C., Montalvo-González, E. y Goñi, I. (2014). By-product from decoction process of *Hibiscus sabdariffa* L. calyces as a source of polyphenols and dietary fiber. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(5), 898-904.
- Schum, A. (2003). Mutation breeding in ornamentals: an efficient breeding method?. In XXI International Eucarpia Symposium on Classical versus Molecular Breeding of Ornamentals-Part I, 612, 47-60.
- Shu, Q. Y., Forster, B. P., Nakagawa, H. y Nakagawa, H. (2012). *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. CAB International, 9-159.
- Shukla, M. S. y Dube, K. G. (2016). Gamma Rays and EMS Induced Morphological Parameters in *Hibiscus sabdariffa*. *International Journal of Science and Research*, 5(11), 1318-1324.
- Singh, B., y Datta, P. S. (2010). Effect of low dose gamma irradiation on plant and grain nutrition of wheat. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(8), 819-825.
- Singh, B., y Datta, P. S. (2010). Gamma irradiation to improve plant vigor, grain development, and yield attributes of wheat. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(2), 139-143.
- Solanki, I. S. y Sharma, B. (2002). Induced polygenic variability in different groups of mutagenic damage in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Indian Journal of Genetics*, 62(2), 135-139.
- Soto, V., Gutierrez, A., Losso, J., Xu, Z. y Finley J. (2012). Evolution of phenolic compounds from color and flavor problems to health benefits. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 48, 5677-5684.
- Speck, T. y Burgert, I. (2011). Plant stems: functional design and mechanics. *Annual Review of Materials Research*, 41, 169-193.
- Spencer-Lopes, M. M., Forster, B. P. y Jankuloski, L. (2018). *Manual on mutation breeding* (No. Ed. 3). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1-319.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solution of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134-154.
- Svec, D., A. Tichopad, V. Novosadova, M. W. Pfaffl y Kubista, M. (2015). How good is a PCR efficiency estimate: Recommendations for precise and robust qPCR efficiency assessments. *Biomolecular Detection and Quantification*, 3, 9-16.
- Syahputra, A., Hanafiah, D. S. y Khardinata, E. H. (2017). Variation of morphological characters on m2 generation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L) induced by gamma irradiation. In *Proceedings of PERIPI-2017 International Seminar*, Bogor, 148-53.
- Tomlekova, N. B. (2010). Induced mutagenesis for crop improvement in Bulgaria. *Plant Mutation Reports*, 2(2), 4-27.

- Tomlekova, N. B., White, P. J., Thompson, J. A., Penchev, E. A. y Nielsen, S. (2017). Mutation increasing β -carotene concentrations does not adversely affect concentrations of essential mineral elements in pepper fruit. *PLoS One*, 12(2), e0172180.
- Ulukapi, K. y Ozmen, S. F. (2018). Study of the effect of irradiation (^{60}Co) on M1 plants of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars and determined of proper doses for mutation breeding. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11(2), 157-161.
- Ulukapi, K., y Nasircilar, A. G. (2015). Developments of gamma ray application on mutation breeding studies in recent years. In International conference on advances in agricultural, biological & environmental sciences (AABES), London, United Kingdom, 31-4.
- USDA (2018). United States Department of Agriculture. Recuperado de <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168170/nutrients>
- Vaidya, K. R. (2000). Natural cross-pollination in roselle, *Hibiscus sabdariffa* L. (Malvaceae). *Genetics and Molecular Biology*, 23(3), 667-669.
- Wilson, F. D. (1994). The genome biogeography of *Hibiscus* L. section *Furcaria* DC. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 41(1), 13-25.
- Wu, B., Zhang, Y., Yan, H., Yang, S., Zhou, S., Zhang, X. y Yan, Y. (2018). Influence of radiation on *Hemarthria compressa*'s genetic variations. *Grassland Science*, 64(4), 252-258.
- Xie, F., Xiao, P., Chen, D., Xu, L. and Zhang Z. (2012). miRDeepFinder: a miRNA analysis tool for deep sequencing of plant small RNAs. *Plant Molecular Biology*, 80, 75-84.
- Yasmin, K., Arulbalachandran, D., E., D. y Vanmathi, S. (2020). Characterization of ^{60}Co γ -ray induced pod trait of blackgram-A promising yield mutants. *International Journal of Radiation Biology*, 1-21.