

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**“MEJORAMIENTO GENÉTICO DE KIWICHA (*Amaranthus caudatus*) MEDIANTE INDUCCIÓN DE MUTACIONES CON RAYOS GAMMA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERA AGRÓNOMA**

**MARCELA KRUSKALLA COTILLO QUISPE**

**LIMA - PERÚ**

**2024**

# 16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
  - ▶ Texto citado
- 

## Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
  - 4%  Publicaciones
  - 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)
-

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**“MEJORAMIENTO GENÉTICO DE KIWICHA (*Amaranthus caudatus*) MEDIANTE INDUCCIÓN DE MUTACIONES CON RAYOS GAMMA”**

**MARCELA KRUSKALLA COTILLO QUISPE**

Tesis para optar el Título de:

INGENIERA AGRÓNOMA

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

.....  
Dr. Federico Alexis Dueñas Dávila  
**PRESIDENTE**

.....  
Dra. Luz Gómez Pando  
**ASESOR**

.....  
Dr. Jorge Eduardo Jiménez Dávalos  
**MIEMBRO**

.....  
Ing. Mg. Sc. Isabel Maximiliana Montes Yarasca  
**MIEMBRO**

LIMA – PERÚ

2024

**DEDICATORIA**

A mi amada mamá.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi querida asesora, la Dra. Luz Gómez Pando, por todo el apoyo incondicional a través del desarrollo de este proyecto.

Al Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina por el apoyo financiero a la presente investigación

Al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Proyecto R1a/5/068. 'Aumento del Rendimiento y del Potencial Comercial de los Cultivos de Importancia Económica' (ARCAL CI).

# INDICE GENERAL

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>II. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1. KIWICHA ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) .....                                      | 3         |
| 2.1.1. Importancia y origen .....  | 3         |
| 2.1.2. Ubicación taxonómica.....   | 4         |
| 2.1.3 Descripción botánica .....   | 4         |
| 2.1.4. Fases fenológicas del cultivo.....  | 6         |
| 2.1.5. Diversidad genética de la kiwicha.....  | 7         |
| 2.2. LA MEJORA DE CULTIVOS .....   | 8         |
| 2.3. MUTACIONES.....   | 8         |
| 2.3.1. Tipos de mutaciones.....  | 9         |
| 2.4. INDUCCIÓN DE MUTACIONES .....   | 9         |
| 2.5. RAYOS GAMMA .....   | 11        |
| 2.5. DOSIS LETAL MEDIA .....   | 11        |
| 2.6. ANTECEDENTES DEL USO DE INDUCCION DE MUTACIONES EN<br><i>Amaranthus sp.</i> ..... | 12        |
| <b>III. MATERIALES Y METODOS.....</b>  | <b>14</b> |
| 4.1. UBICACIÓN.....  | 14        |
| 4.2. MATERIALES .....  | 14        |
| 4.3. METODOLOGÍA .....   | 15        |
| 4.3.1. Generación M <sub>1</sub> .....   | 15        |
| 4.3.2. Generación M <sub>2</sub> .....   | 17        |
| 4.3.3. Generación M <sub>3</sub> .....   | 21        |
| 4.3.4. Diseño Experimental .....   | 21        |
| 4.3.5. Frecuencia de Mutaciones .....  | 22        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>      | <b>23</b> |
| <b>V. CONCLUSIONES.....</b>                 | <b>51</b> |
| <b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>            | <b>52</b> |
| <b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>53</b> |
| <b>VIII. ANEXOS .....</b>                   | <b>61</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Dosis Letal 50 considerando el Porcentaje de germinación de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. ....  | 29 |
| Figura 2: Dosis Letal 50 considerando el Porcentaje de supervivencia de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. ....                                      | 29 |
| Figura 3. Mutaciones de clorofila: A. Tigrina, Xantha, Chlorina y Lutescens .....   | 32 |
| Figura 4A: Mutaciones de Hojas observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma. A. Hojas bifurcadas Tipo 1. B. Hojas bifurcadas Tipo 2. C. Hojas bifurcadas Tipo 3. D. Hojas con apéndice. .... | 35 |
| Figura 4B. Mutaciones en hojas. A. Formación anormal de hojas. B. Hojas corrugadas C. Hojas corrugadas y coloreadas.....  | 35 |
| Figura 4C: Mutaciones en hojas: A. Forma lanceolada. B. Forma Ovales. C. Oval con bordes ondulados .....  | 35 |
| Figura 4D. Mutaciones en hojas. A. Hojas marmoleadas con sectores blancos. B. Hojas con sectores xantha.....  | 36 |
| Figura 4E. Mutaciones en hojas. A. hojas marmoleadas y bordes ondulados. B. Hojas marmoleadas y lanceoladas .....   | 36 |
| Figura 5. Mutación de tallo (grosor y ramificación) observada en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima. A. Grosor de tallo. B. Ramificación de tallo. ....            | 38 |
| Figura 7. Mutaciones de características agronómicas observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima. A. Altura planta. B. Ciclo de vida. ....                     | 42 |
| Figura 8. Mutaciones de hojas observadas en plantas seleccionadas como mutantes en la generación M3 de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 9. Mutaciones de tallo observadas en plantas seleccionadas como mutantes en la generación M3 de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....            | 45 |
| Figura 10. Mutaciones de inflorescencia observadas en plantas seleccionadas como mutantes en la generación M3 de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima. .... | 46 |
| Figura 11. Agrupamiento por similitud de plantas mutantes de kiwicha de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima. ....  | 47 |
| Figura 12. Mapa de agrupamiento de mutantes de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....  | 47 |
| Figura 13. Peso de granos panoja/planta en plantas mutantes en la generación M3 kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....                       | 48 |
| Figura 14. Peso de 1000 granos (g) de plantas mutantes en la generación M3 kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....                            | 49 |
| Figura 15. Contenido de proteínas de granos (%) de plantas mutantes en la generación M3 kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....               | 50 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Descripción de tipos de mutaciones de clorofila – Adaptado de Gustafson (1969) .....  | 18 |
| Tabla 2. Caracteres morfológicos de <i>Amaranthus</i> – Adaptado Descriptores del IPGRI (1981). .....  | 20 |
| Tabla 3. Análisis de varianza del porcentaje de germinación de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. ....  | 23 |
| Tabla 4. Valores medios y prueba de significación Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) del porcentaje de germinación de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.....   | 24 |
| Tabla 5. Análisis de varianza del porcentaje de supervivencia de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. ....  | 25 |
| Tabla 6. Valores medios y prueba de significación Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) del porcentaje de supervivencia de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas..... | 25 |
| Tabla 7. Estadístico de prueba Kruskal Wallis para longitud de raíz (cm) de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. ....                                   | 26 |
| Tabla 8. Estadístico de prueba Kruskal Wallis para la altura de plántula (cm) de la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con 2 dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.....                                 | 27 |
| Tabla 9. Cuadrado medio del ANOVA del rendimiento de planta en la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma .....   | 28 |
| Tabla 10. Valores Medios y Prueba de significación Tukey ( $\alpha=05$ ) del rendimiento de planta en la generación M1 de kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma .....                                      | 28 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 11. Tipos y frecuencia de mutaciones de clorofila observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima..... | 32 |
| Tabla 12. Tipos de mutación en hojas de observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.....                       | 34 |
| Tabla 13. Tipos de mutación de hojas observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima .                             | 34 |
| Tabla 14. Mutación de tallo observada en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima.....                                    | 37 |
| Tabla 15. Tipos de mutaciones en inflorescencia observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima.....         | 39 |
| Tabla 16. Mutaciones de características agronómicas observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima.....     | 41 |
| Tabla 17. Mutaciones de características de calidad observadas en la Generación M <sub>2</sub> de <i>Amaranthus caudatus</i> var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima.....      | 43 |

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar una nueva población de mutantes de la variedad “Centenario” de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) para contribuir a su producción sostenible en condiciones de Perú. Se inicio con irradiación de semillas secas con dosis de 400 Gy y 600 Gy de radiación gamma y las plantas provenientes de este material fueron evaluadas siguiendo un protocolo establecido durante tres generaciones (M1, M2 y M3) en condiciones de La Molina. En la generación M1 se determinó que la dosis letal media para la germinación fue 404.9 Gy y la dosis letal media para la supervivencia fue 535 Gy y se observó una reducción en germinación, supervivencia, longitud de parte aérea, longitud de raíz y esterilidad en las plantas siendo significativamente más marcada con el incremento de la dosis de irradiación. En la generación M2, se observaron mutaciones clorofílicas y mutaciones morfológicas y de calidad en ambas dosis evaluadas (400 Gy y 600 Gy) con una mayor frecuencia en la dosis más alta. En la generación M3, se evaluó solo la población derivada del tratamiento de 400 Gy y se identificaron mutaciones de hoja, tallos e inflorescencia seleccionándose plantas con caracteres diferentes al material parental. Dentro del material seleccionado destacan cuatro mutantes por cambios marcadamente diferentes al material parental en varios caracteres y que se mencionan a continuación: Mutante MKCENT-31 presento: la hoja lanceolada, tallo ramificado, tallo con pubescencia e inflorescencia compacta. El mutante MKCENT-66 presento tallo ramificado, inflorescencia verde/rosada y de posición decumbente. El mutante MKCENT-82 presento diferencias como hojas con pigmentación, tallo rosado, estrías en el tallo de color purpura y panoja de densidad laxa, de color rosado y decumbente. El mutante MKCENT-84 presento pigmentación en hojas, estrías en el tallo de color purpura y panoja tipo intermedia de color rosado, de densidad laxa y decumbente.

**Palabras claves:** kiwicha, *Amaranthus caudatus*, rayos gamma, mutaciones

## ABSTRACT

The objective of this research was to develop a new population of mutants of the “Centenario” variety of kiwicha (*Amaranthus caudatus*) to continue improving its sustainable production under Peruvian conditions. It began with irradiation of dry seeds with doses of 400 Gy and 600 Gy of gamma radiation and the plants from this material were evaluated following an established protocol for three generations (M1, M2 and M3) under La Molina conditions. In the M1 generation it was determined that the mean lethal dose for germination was 404.9 Gy and the mean lethal dose for survival was 535 Gy and a reduction in germination, survival, shoot length, root length and sterility in the plants was observed, being significantly more marked with the increase in the irradiation dose. In the M2 generation, chlorophyll mutations and morphological and quality mutations were observed at both doses evaluated (400 Gy and 600 Gy) with a higher frequency at the highest dose. In the M3 generation, only the population derived from the 400 Gy treatment was evaluated and leaf, stem and inflorescence mutations were identified, selecting plants with different traits to the parental material. Within the selected material, four mutants stand out due to changes markedly different from the parental material in several traits and which are mentioned below: Mutant MKCENT-31 presented: lanceolate leaf, branched stem, stem with pubescence and compact inflorescence. Mutant MKCENT-66 presented branched stem, green/pink inflorescence and decumbent position. Mutant MKCENT-82 presented differences such as leaves with pigmentation, pink stem, purple striations on the stem and loosely dense, pink and decumbent panicle. The MKCENT-84 mutant presented leaf pigmentation, purple stem striations and an intermediate panicle of pink color, with loose and decumbent density.

**Keywords:** kiwicha, *Amaranthus caudatus*, gamma rays, mutations

## I. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población y el cambio climático son factores que influyen en la búsqueda de nuevas especies vegetales alimenticias y en el mejoramiento genético para el desarrollo de mejores variedades con capacidad de reducir los impactos negativos. La costa peruana es una región semidesértica con problemas de agua lo que se ira acentuando en el futuro por efecto del cambio climático e irá limitando el uso de las especies tradicionales que requieren dotaciones altas de agua para la producción. Por lo que es importante la identificación de especies con capacidad de prosperar en condiciones marginales y la kiwicha (*Amaranthus caudatus*) es una especie adaptada a ambientes hídricamente restrictivos y con tolerancia al calor por loque podría ser una alternativa importante para contribuir a la producción de alimentos de calidad.

Entre los métodos convencionales de mejoramiento genético de los cultivos, destaca el método de inducción de mutaciones. Dentro de esta metodología, uno de los pasos iniciales es la determinación de la radiosensibilidad de las semillas a la radiación gamma para determinar las dosis de irradiación que generen mutaciones para mejorar las variedades. La radiación gamma origina daños en el ADN que se manifiesta en la generación M1 en daños somáticos tales como disminución de la sobrevivencia, altura de planta, esterilidad y otros y también causa daños genéticos que pueden cambiar la secuencia de ADN generando mutaciones y que se pueden observar en la generación M2 y M3. Las mutaciones pueden ser útiles y dar origen a nuevas variedades mejoradas.

En la actualidad, las variedades sembradas en el Perú generalmente son tardías y arbustivas y/o muy altas. Mediante la inducción de mutaciones se puede desarrollar variedades con características favorables que permitirán la siembra mecanizada de la kiwicha en mayores extensiones y un mejor manejo de las labores agronómicas y de post cosecha en condiciones de baja dotación de agua y alta tecnología. En base a lo señalado se planteó la presente investigación.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Contribuir al desarrollo de variedades mejoradas de Amaranto para su producción sostenible en condiciones marginales.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el nivel de radiosensibilidad de la variedad de kiwicha Centenario.
- Determinar las dosis que originan mutaciones morfológicas y agronómicas.
- Identificar mutantes con características agronómicas y fisiológicas valiosas.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. KIWICHA (*Amaranthus caudatus*)

#### 2.1.1. Importancia y origen

La kiwicha o amaranto es una especie valiosa para la alimentación del ser humano, debido a que sus semillas tienen proteínas de origen vegetal con una mejor composición de aminoácidos que los cereales (Ayala et al., 2016; Pérez, 2010).

La kiwicha fue cultivada y consumida por las culturas precolombinas, como una de las pocas especies productoras de granos y fuente importante de proteínas y carbohidratos. Sin embargo, con la llegada de los españoles en la época colonial, aparentemente se prohibió la siembra y el consumo de este grano andino por estar relacionado a ritos religiosos (Camarena et al., 2014; Roque-Siguas, 2019). Esta prohibición y otros factores relacionados a su uso aparentemente determinaron la reducción significativa del área cultivada y su casi desaparición en muchas regiones de la zona andina (Salazar, 2011).

En el Perú, en la década de los 90, se inicia un movimiento para valorar los cultivos andinos, y como resultado se incrementa el área de cultivo de la kiwicha. Según Bravo et al. (2010), el cultivo se sembraba predominantemente en parcelas de pequeña a mediana escala, con tecnología tradicional a media, lo que determinaba bajos niveles de productividad y rentabilidad. Sin embargo, la promoción del cultivo por diferentes entidades, la disponibilidad de nuevas variedades y un mercado de exportación determinó la mejora de la tecnología de cultivo y un mayor rendimiento por hectárea y por consiguiente una mayor rentabilidad para los agricultores. El año 2021 la superficie cosechada alcanzó a 2623 ha, con un rendimiento promedio nacional de 2522 kg/ha (SIEA 2024). Las zonas productoras de importancia son los departamentos de Apurímac (1968 ha), Cusco (287 ha), Ancash (179 ha), Arequipa (92 ha) y Ayacucho (34 Ha) (Álvarez et al., 2010; Pérez, 2010; SIEA 2024) y los que se encuentran distribuidas en los valles interandinos, donde el cultivo prospera hasta los 3300 msnm.

### 2.1.2. Ubicación taxonómica

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2019) presenta la siguiente clasificación taxonómica de *A. caudatus*:

- Reino: Plantae
- Sub-reino: Tracheobionta
- Superdivisión: Spermatophyta
- División: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida
- Subclase: Caryophyllidae
- Orden: Caryophyllales
- Familia: Amaranthaceae
- Género: Amaranthus L.
- Especies: Amaranthus caudatus L.

### 2.1.3 Descripción botánica

A continuación, se describe la morfología de la kiwicha considerando lo publicado por varios autores como Nieto (1990), Tapia (2007), Carmona y Orsini (2010) y Gómez y Ríos (2020).

**Raíz:** tipo pivotante, con numerosas ramificaciones y múltiples raicillas que permiten una alta eficiencia en la búsqueda y absorción de agua en el suelo. La raíz principal cumple la función de sostén de la planta, y las raicillas permiten la rápida absorción de agua y nutrientes.

**Tallo:** El tallo en la base es cilíndrico y luego se torna anguloso con apariencia acanalada, debido a la presencia de estrías longitudinales y a las ramificaciones. La planta puede carecer de ramificaciones o ser ramificada y las ramificaciones pueden ser basales o a media altura de la planta. Puede presentar estrías iniciándose en la base o alejada de esta con un color diferente al tallo. El grosor del tallo disminuye a medida que asciende la planta y puede alcanzar una altura de hasta 3 m. Suele presentar distintas coloraciones como el verde, amarillo, naranja, rosado, rojo o púrpura que pueden coincidir con el color de las hojas.

**Hojas:** Las hojas son pecioladas, alternas, lisas o con poca pubescencia. La forma es variable pueden ser lanceoladas, elípticas, rómbicas u ovals. Los márgenes pueden ser enteros, carenados u ondulados. La longitud de la hoja varía desde 6.5 a 15 cm, y este disminuye de

la base al ápice. Presentan nervaduras prominentes especialmente observables en el envés en algunos casos con coloraciones diferentes a la lámina. El color de la lámina puede ser verde-amarillento, verde intenso, rojo o púrpura. El peciolo es largo y también de variados colores.

**Inflorescencia:** Es una panoja. Por su forma se dividen en panojas amarantiformes, intermedias y glomeruladas. Por su posición se consideran erectas, decumbentes e intermedias. Por su densidad pueden ser compactas, intermedias y laxas. Sus coloraciones las hacen muy vistosas van del amarillo, anaranjado, rojo hasta el púrpura con combinaciones; la longitud de la panoja puede variar de 0.5 hasta 1 m.

**Flores:** Tiene dos tipos de flores unisexuales: estaminadas y pistiladas. Las flores estaminadas están formadas por un perigonio sepaloide (cinco tépalos: dos externos y tres internos) y una bráctea espinosa, cinco estambres, con filamentos delgados y alargados. Las flores pistiladas con un perigonio sepaloide (cinco tépalos: dos externos y tres internos) y una bráctea espinosa, un ovario esférico, supero coronado, con un solo óvulo y tres ramas estigmáticas de diferentes tamaños y formas, que alojara a una sola semilla. Las flores están agrupadas en glomérulos que tienen una ramificación dicasial. En un glomerulo se observa la siguiente disposición de flores: el eje de la primera flor estaminada y en su base dos flores laterales femeninas, y de las cuales a su vez se originan otras dos flores laterales femeninas y así sucesivamente. Un glomérulo puede contener 250 flores femeninas. La flor masculina luego de expulsar el polen se seca y cae.

**Fruto:** es una cápsula pequeña que botánicamente se denomina un pixidio unilocular, porque a la madurez se abre transversalmente, dejando caer la parte superior llamada opérculo, para poner al descubierto la inferior llamada urna, donde se encuentra la semilla la cual se cae por lo cual se considera dehiscente.

**Semilla:** es pequeña, lisa, de 1-1,5 mm de diámetro, ligeramente aplanada, de forma lenticular, elipsoidal u ovoide o redonda. Está conformada por una cubierta denominada episperma, un embrión, un perisperma almidonoso. El color puede ser crema, amarillentos, dorados, rojos, rosado, púrpura y negro. En un gramo se pueden tener de 1000 a 3000 granos dependiendo del genotipo y las condiciones ambientales.

#### **2.1.4. Fases fenológicas del cultivo**

Las fases fenológicas de la kiwicha que se citan a continuación fueron descritas por Mujica y Quillahuamán (1989).

Emergencia (VE): Dura aproximadamente de 8 a 21 días, en función al medio ambiente en que se desarrolla. En esta fase las plántulas emergen del suelo como una pequeña plántula con dos cotiledones, las hojas verdaderas que emergen sobre los cotiledones tienen un tamaño menor a 2 cm de largo.

Fase vegetativa (V1...Vn): se determina por la cantidad de nudos en el tallo principal y se considera “nudo” al sector en el tallo principal donde emergen las hojas verdaderas basales que se expanden en un mínimo de 2 cm y que al secarse dejan una marca o cicatriz. El primer nudo corresponde al estado V1; el segundo, a V2; y, así sucesivamente.

Fase reproductiva (R1....Rn):

R1: Inicio de panoja, en esta fase se observa el ápice de la inflorescencia en el extremo del tallo y generalmente se presenta entre los 50 y 70 días después de la siembra.

R2: panoja con al menos dos cm de largo.

R3: esta etapa se presenta aproximadamente a los 65 y 70 día de la siembra y se caracteriza por que la panoja tiene al menos cinco cm de largo. Si la antesis ya ha comenzado cuando se ha alcanzado esta etapa, la planta debería ser clasificada en la etapa siguiente.

R4 -Antesis: ocurre cuando se presenta al menos una flor abierta mostrando los estambres separados y el estigma completamente visible. En su mayoría, la antesis comienza desde el punto medio del eje central de la panoja hacia las ramificaciones laterales de esta misma. La floración debe observarse a medio día ya que en horas de la mañana y al atardecer las flores se encuentran cerradas. En esta etapa existe alta sensibilidad a las heladas y al estrés hídrico. Durante esta etapa la planta comienza a eliminar las hojas inferiores más viejas y de menor eficiencia fotosintética.

R5 - Llenado de granos: se presenta cuando al menos un 95% de las flores del eje central de la panoja se encuentran en antesis. Esta etapa puede ser dividida en:

- Grano lechoso: las semillas al ser presionadas entre los dedos, dejan salir un líquido lechoso.

- Grano pastoso, las semillas al ser presionadas entre los dedos presentan una consistencia pastosa de color blanquecino.

R6 - Madurez fisiológica: se considera el cambio de color de la panoja. En panojas verdes, éstas cambian de verde a un color oro; y, en panojas rojas cambian de rojo a café-rojizo. Además, las semillas son duras. En este estado al sacudir la panoja, las semillas maduras caen.

R7 - Madurez de cosecha: las hojas marchitas caen; la planta toma un color crema - café. Esto ocurre alrededor de 160 días después de la siembra.

### **2.1.5. Diversidad genética de la kiwicha**

Dentro del género *Amaranthus* se encuentran más de 60 especies, sin embargo, por la gran similitud y amplia distribución geográfica entre especies, la taxonomía y nomenclatura no es precisa (Estrada, 2011; Salazar, 2011).

Según Salazar (2011), la kiwicha posee una amplia diversidad genética. Existe variación morfológica en tallos, hojas, inflorescencia y granos. De igual modo variaciones en fisiología relacionadas con su ciclo de vida, sus niveles de tolerancia al ambiente y otros. Además, se reportan variaciones en el contenido de proteínas, minerales, grasas, vitaminas y otros. Álvarez et al. (2010) informa que la kiwicha posee diversidad en rendimiento de grano, adaptación a diferentes tipos de suelos, resistencia a las plagas y enfermedades, y otras características agronómicas, nutricionales e industriales.

La diversidad de esta especie ha sido colectada y conservada en Bancos de Germoplasma con el propósito de conservar el material genético y evitar pérdidas y la contaminación de los ecotipos nativos a raíz de la introducción de nuevas variedades (Bravo et al., 2010; Salazar, 2011, Gómez y Ríos, 2020). Los bancos de germoplasma conservan líneas nuevas desarrolladas por programas de mejoramiento genético y son el material genético para seguir desarrollando nuevas variedades mejoradas (Álvarez et al., 2010, 2013).

Las variedades mejoradas son importantes para los agricultores porque pueden ofrecer nuevas características que permitan superar problemas de suelo, de clima y otros como plantas precoces, resistentes y una buena calidad de grano, con aspecto atractivo, colores claros y uniformes requeridos por el mercado y adaptados a tecnologías propias (Bravo et al., 2010).

## **2.2. LA MEJORA DE CULTIVOS**

El mejoramiento de plantas ha sido una práctica común desde los inicios de la agricultura mediante la selección simple de semillas provenientes de plantas con las características deseadas (Camarena et al., 2014; Oladosu et al., 2016; Salas, 2015). Sin embargo, el mejoramiento de las plantas es considerado una actividad científica a partir del manejo artificial de la polinización y floración, que tiene inicio en 1694, cuando Camerarius demostró que las plantas tenían sexo (Camarena et al., 2014). Esta herramienta ha ido evolucionando a lo largo de los años hasta la actualidad, y como consecuencia, se ha desarrollado una amplia gama de especies de cultivos.

El fitomejoramiento es el medio por el cual se desarrollan nuevas variedades de plantas con características útiles para el ser humano. El mejoramiento del potencial de rendimiento y la calidad permite obtener mayor cantidad y diversidad de los productos para proveer de alimentos a una población en crecimiento (Oladosu et al., 2016). Según Camarena et al. (2014), el mejoramiento de plantas tiene un efecto multiplicativo que beneficia grandes poblaciones, es decir, un trabajo realizado por pocas personas, puede originar un impacto muy grande en la población; el caso más resaltante es el del trigo en México, India y Pakistán con la llamada “Revolución verde”.

El material genético para el mejoramiento de plantas puede provenir de especies silvestres, semi domésticas y cultivadas con caracteres deseables no presentes en las cultivadas (Salazar, 2011). La introducción de nuevo material genético, muchas veces es realizada en el área de origen, con el objetivo de desarrollar variedades mejoradas con características agronómicamente explotables y con capacidad de adaptación (Bravo et al., 2010; Porta y Jiménez, 2018).

Existen diversos métodos de mejora como es la selección de genotipos superiores en colecciones de germoplasma, cruzamientos, inducción de mutaciones, ingeniería genética entre otros.

## **2.3. MUTACIONES**

La mutación es un proceso espontáneo en donde ocurren cambios heredables en la estructura del ADN de un organismo, el cual no es causado por el proceso de recombinación genética y segregación (Maluszynski et al., 2016; Oladosu et al., 2016). La mutación cambia la expresión de un gen, en consecuencia, origina individuos mutantes que poseen genes

mutados, los cuales dan lugar a un fenotipo diferente en comparación con su población inicial (Maluszynski et al., 2016). La principal ventaja del mejoramiento por mutación es la posibilidad de mejorar uno o dos caracteres sin cambiar el resto del genotipo (Hamouda et al., 2014; Oladosu et al., 2016), la variación resultante proporciona material para la selección. Por lo mencionado anteriormente, la mutación es importante desde el punto de vista de la evolución al ser la fuente principal de la variación genética en cualquier organismo.

### **2.3.1. Tipos de mutaciones**

Las mutaciones generan cambios que pueden ser espontáneos o inducidos, los cuales han jugado un gran papel en el aumento de la seguridad alimentaria mundial, ya que las nuevas variedades de cultivos, han contribuido en el aumento significativo de la producción de los mismos (Kharkwal y Shu, 2009).

Las mutaciones espontáneas son aquellas que ocurren en la naturaleza en individuos o conjunto de individuos como consecuencia de la constante interacción con factores estresantes, con la finalidad de adaptarse al nuevo ambiente (Vera, 2019); errores en el metabolismo del ADN (por ejemplo, replicación, recombinación, reparación) o inestabilidad del genoma, son una fuente inicial importante de variación natural que condiciona todos los cambios evolutivos (Maluszynski et al., 2016), sin embargo, la tasa de frecuencia de que ocurra una mutación espontánea es muy baja y su identificación en condiciones naturales muy difícil (Salas, 2015).

Según Maluszynski et al., (2016) las mutaciones inducidas son ocasionadas por agentes mutagénicos, también llamados mutágenos. Los mutágenos son cualquier factor que aumenta la frecuencia de mutaciones por encima de los niveles espontáneos, y este proceso conduce a mutaciones llamadas mutagénesis (Oladosu et al., 2016). Los efectos de las mutaciones inducidas deben tratarse como eventos trascendentes, debido a que constituyen el primer paso de muchos de los métodos de mejoramiento actuales (Salas, 2015). Sin embargo, no existen diferencias cualitativas entre mutaciones espontáneas e inducidas (Maluszynski et al., 2016).

## **2.4. INDUCCIÓN DE MUTACIONES**

La inducción de mutaciones provoca cambios, que de manera natural tardarían demasiado tiempo en aparecer (Porta y Jiménez, 2018; Salas, 2015), con la ventaja de mejorar un defecto específico del cultivar deseado. Sarsu et al. (2020) indica que el uso de la inducción

de mutaciones en programas de mejoramiento genético de los cultivos ha permitido la liberación de más de 3320 variedades mutantes en más de 228 especies de cultivos en el mundo

Las mutaciones ocurren como resultado de tratamientos con agentes mutagénicos físicos o irradiación (rayos gamma, Rayos X, haz de iones, etc.) y tratamientos químicos (metano sulfonato de etilo- EMS), 1-metilo-1-nitrosourea - MNU) y 1-etilo-1-nitrosourea – ENU y otros) (Oladosu et al., 2016).

Los agentes mutagénicos físicos se basan en la irradiación, es decir, exponer un organismo o planta con radiación de ondas electromagnéticas asociadas con la descomposición nuclear (Kannan y Ganga, 2017; Maluszynski et al., 2016). Estos agentes mutagénicos producen especies reactivas con el oxígeno que interactúan con el ADN y causan daño oxidativo, como modificaciones en las bases, que inducen múltiples rupturas simples o dobles en la cadena del ADN (Hernández-Muñoz et al., 2019). La radiación se divide en dos grupos: radiaciones ionizantes y no ionizantes.

Las radiaciones ionizantes están conformadas por rayos alfa ( $\alpha$ ), los rayos beta ( $\beta$ ), los rayos X, los rayos gamma ( $\gamma$ ) y los neutrones; las radiaciones no ionizantes incluyen únicamente los rayos ultravioletas. Todas estas son radiaciones electromagnéticas emitidas en diferente longitud de onda (Maluszynski et al., 2016), los rayos gammas presentan una longitud de onda más corta que los rayos X, seguido por la UR-C, con 0.001 nm, 10 nm y 100-300 nm respectivamente. Las radiaciones ionizantes causan una amplia gama de lesiones en el ADN que aparecen fenotípicamente como mutaciones genéticas y aberraciones cromosómicas; por otro lado, la luz ultravioleta crea mutaciones en el ADN por cambios fotoquímicos (M. Kannan y Ganga, 2017; Maluszynski et al., 2016).

Existe un gran número de agentes químicos, sin embargo, solo una pequeña cantidad son realmente eficientes para el mejoramiento genético de plantas dentro de los siguientes grupos: agentes alquilantes, ácido nitroso, sustancias análogas a las bases nitrogenadas, sustancias intercalantes entre otras (Vera Vega, 2019). Uno de los grupos químicos mutagénicos más eficaces es el grupo de agentes alquilantes, éstos reaccionan con el ADN alquilando los grupos de fosfatos, así como las purinas y pirimidinas. Otro grupo es el de los análogos de bases, debido a que están estrechamente relacionados con las bases de ADN y pueden incorporarse erróneamente durante la replicación (Oladosu et al., 2016).

Entre el grupo de agentes mutagénicos tiene una gran aplicación en la mutagénesis experimental de plantas y en el fitomejoramiento: el etil metano sulfonato (EMS), el azida de sodio ( $\text{NaN}_3$ ) y el N-nitroso-N-metilurea (NMU) (Porta y Jiménez, 2018; Vargas, 2016).

## **2.5. RAYOS GAMMA**

Los rayos gamma son las radiaciones ionizantes más utilizadas para generar variabilidad genética en los cultivos agrícolas (Porta y Jiménez, 2018). La eficiencia alta de esta radiación se debe a que tienen una longitud de onda más corta y, por lo tanto, poseen un nivel de energía mayor, que oscila entre 10 keV a varios cientos de keV, lo que le atribuye mayor poder de penetración en los tejidos que los rayos alfa y beta (Hernández-Muñoz et al., 2019; Oladosu et al., 2016). Asimismo, según Patade et al., (2008) el 89% de las variedades mutantes se han obtenido con métodos de irradiación, de los cuales el 64% se obtuvieron mediante radiación gamma.

Los rayos gamma son usualmente obtenidos por radioisótopos, como el cobalto-60 ( $^{60}\text{Co}$ ), cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) y en menor medida de plutonio-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ) (Porta y Jiménez, 2018). Por lo general, se expone un sistema biológico a la radiación ionizante Cobalto-60, lo que origina la activación de una serie de pasos físicos y químicos entre la absorción inicial de energía y la lesión que se produce (Hernández-Muñoz et al., 2019). Su efecto biológico se basa en la interacción con las moléculas en la célula, en particular con el agua, donde se genera oxígeno reactivo (ROS), como uno de los radicales libres, los cuales pueden dañar o modificar la morfología, anatomía, bioquímica y fisiología de las plantas, de acuerdo con el nivel de irradiación (Maluszynski et al., 2016). El efecto mutagénico se debe principalmente a la ruptura de la doble cadena de ADN. Son una herramienta mutagénica efectiva para inducir nuevos caracteres en cultivos comercialmente valiosos y desarrollar nuevas variedades (Oladosu et al., 2016).

## **2.5. DOSIS LETAL MEDIA**

La magnitud de las alteraciones cromosómicas depende de las dosis e intensidad de los rayos gamma (Di Pane et al., 2018). En las mutaciones inducidas, La dosis letal es un parámetro determinante de estudio de radiosensibilidad a los rayos gamma en especies vegetales para iniciar un programa de mejoramiento genético asistido por inducción de mutagénesis; su importancia radica en su uso para inducir mutaciones favorables en el material genético objetivo (Hernández-Muñoz et al., 2019).

Una vez que se determina la DL50, el nivel máximo permitido de exposición a la radiación para un cultivo específico puede determinarse mediante los varios cambios que origina, especialmente cambios en la morfología, porque si la dosis no es precisa, existe el riesgo de que el experimento fracase. Dosis más bajas no causan mutaciones, pero pueden inducir hormesis (aumento de división celular, crecimiento y desarrollo en el organismo) (Cortés, 2017) y dosis más altas pueden inducir letalidad (Datta, 2019). Para que un programa de mutaciones inducidas sea eficiente, es necesario generar un apreciable número de variaciones (eventos mutacionales) y poblaciones grandes que permitan una adecuada identificación de los genotipos deseados.

## **2.6. ANTECEDENTES DEL USO DE INDUCCION DE MUTACIONES EN *Amaranthus sp.***

Heros (1999) empleando agentes mutagénicos físicos y químicos reporta una dosis óptima para inducción de mutaciones en kiwicha de 400 Gray de rayos gamma y no efecto del agente químico azida de sodio bajo las condiciones del estudio realizado.

Slabbert et al. (2004) trabajando con *Amaranthus tricolor* identificaron mutantes con tolerancia al calor por efecto de irradiación gamma en las generaciones M2 y M3.

Gajdosova et al. (2004) determinó que una dosis de 175 Gy en *Amaranthus cruentus*, da lugar a mutaciones candidatas en características como: crecimiento determinado, uniformidad en floración y madurez de semillas, inflorescencia sin hojas y aumento de tamaño de semillas.

Gómez al. (2006) señala que la inducción de mutantes dio como resultado el desarrollo de un cultivar cv. Centenario, con calidad similar, mejor rendimiento y un color de planta diferente al material original.

Yarango (2013) estudio 343 genotipos “candidatos mutantes” de kiwicha del Banco de Germoplasma de la UNALM en generación M3, obtenidos mediante la irradiación con rayos gamma a la dosis de 400 Gray de la variedad CICA UNSAAC del Cusco y observó mutaciones o cambios en las características cualitativas como color de tallo, ramificación de tallo, presencia de estrías, color de estrías, color de hoja, manchas en la hoja, forma de hoja,

márgenes de hoja, borde de hoja, forma de inflorescencia, densidad de inflorescencia, actitud de inflorescencia, color de inflorescencia, bráctea desarrollada, color de semilla y tipo de semilla. Además, en características cuantitativas como altura de planta, rendimiento por planta y días a madurez.

Gómez (2014) señala la identificación de mutantes en dos genotipos de *Amaranthus caudatus* la Selección Huacho con una dosis de 400 Gy y 600 Gy y la variedad CICA con dosis de 350 Gy, 400 Gy y 450 Gy.

Gómez et al (2021) señala la identificación de mutaciones morfológicas y fisiológicas en *Amaranthus caudatus* con la dosis de 400 Gray de rayos gamma en la variedad CICA-UNSAAC y la Accesoión Ancashino con una población inicial de 186915 plantas y 37700 plantas; respectivamente; destacando los cambios de colores de hojas, inflorescencia y granos.

Segura (2021) trabajando con rayos gamma y la selección Huacho señala que a partir del análisis de 12 caracteres morfológicos y fisiológicos evaluados, se encontró 10 grupos diferentes, que muestran variación en algunas características producto de mutaciones causadas por radiación gamma como: la presencia y color de estrías en el tallo, color de inflorescencia y color de grano, y la identificación de las líneas mutantes KACH3, KACH8, KACH11 y KACH14 con mejor comportamiento agronómico y por cambios de color de grano destacaron las líneas KACH6 y KACH19.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **4.1. UBICACIÓN**

Los experimentos en el presente estudio fueron realizados en el campo experimental y laboratorio del Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina- distrito de La Molina, provincia de Lima y departamento de Lima, cuya ubicación geográfica es la siguiente:

Latitud Sur: 12°05'

Longitud Oeste: 76°56'

Altura: 240 msnm.

#### **4.2. MATERIALES**

##### **Material Vegetal- Generación M<sub>1</sub>**

- 250 g de semillas de la variedad Centenario sin irradiar.
- 250 g semillas de la variedad Centenario irradiadas con rayos gamma (400 Gray).
- 250 g semillas de la variedad Centenario irradiadas con rayos gamma (600 Gray).

##### **Material Vegetal- Generación M<sub>2</sub>**

Semillas cosechadas de plantas maduras en la Generación M<sub>1</sub>

##### **Material Vegetal- Generación M<sub>3</sub>**

Semillas cosechadas de plantas mutantes candidatas de la Generación M<sub>2</sub>

##### **Material de campo**

- Libreta y registros
- Bandejas plásticas
- Fungicida Botrizim (carbendazim) y Bb5

## **Materiales de laboratorio**

- Pinzas
- Placa Petri
- Balanza eléctrica
- Balanza de precisión
- Lápiz y marcadores

## **Equipos**

Irradiador Gamma del Instituto Peruano de Energía Atómica -IPEN

Contador de Granos

INFRATEC

## **4.3. METODOLOGÍA**

La presente investigación se realizó en tres campañas agrícolas siguiendo el protocolo establecido para el manejo de poblaciones, empleando el método de inducción de mutaciones. Se describen las actividades realizadas en las Generaciones M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>.

### **4.3.1. Generación M<sub>1</sub>**

#### **A. Determinación de la radiosensibilidad**

##### **Tratamiento de semillas**

Semillas con 12 por ciento de humedad de la variedad comercial Centenario fueron sometidas a la radiación gamma con fuente de Cobalto (Co<sup>60</sup>), en la dosis de: 0, 400, 600 Gy en el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

##### **Evaluaciones:**

###### **a) Determinación del porcentaje de germinación**

Se tomaron al azar 400 semillas de cada dosis (0, 400 y 600 Gray). Se emplearon cuatro placas de Petri por cada tratamiento. En cada placa de Petri se colocaron 100 semillas, estableciendo cuatro repeticiones por dosis evaluadas. Cada placa de Petri estuvo cubierta con papel filtro el cual fue humedecido con agua destilada para proporcionar humedad para la germinación de las semillas. En un inicio se proporcionó 25 ml y luego cada dos días 10 ml de agua destilada y durante 6 días. Las placas estuvieron en un ambiente con 22 -23 °C

A los 6 días después de la instalación se procedió a la toma de datos. Se consideró semilla germinada a aquella que alcanzó 0.5 cm de plúmula o de radícula (Aguilar & Romero, 2019)

$$\% \text{Germinación} = \left( \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas}}{N^{\circ} \text{ total de semillas}} \times 100 \right)$$

#### **b) Determinación del porcentaje de sobrevivencia**

Se emplearon 400 semillas de cada tratamiento (0, 400 y 600 Gray) y se sembraron en bandejas conteniendo un sustrato preparado con una mezcla de compost y tierra de campo en una proporción de 2:1. Se usaron cuatro bandejas por tratamiento y en cada una de ellas se colocaron 100 semillas, totalizando cuatro repeticiones por tratamiento. Se humedeció el sustrato al inicio y durante todo el periodo de estudio para proporcionar un ambiente óptimo para la germinación y crecimiento de las plántulas. Se aplicó Botrizim (carbendazim) combinado con Bb5 para el control de la chupadera. Se calculó el % de sobrevivencia mediante un conteo simple de plantas vivas a los 30 días. Se usó la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de sobrevivencia de cada tratamiento.

$$\% \text{Sobrevivencia} = \left( \frac{N^{\circ} \text{ de semillas vivas}}{N^{\circ} \text{ total de semillas}} \times 100 \right)$$

#### **c) Determinación de la longitud de raíz y plántula**

Para esta evaluación se utilizaron placas de acrílico cubiertas con papel filtro formándose una estructura “tipo sándwich” conteniendo al medio las semillas de los tratamientos. Las semillas fueron colocadas de forma que el crecimiento de las plántulas fuera vertical y así facilitar el desarrollo de la raíz y la parte aérea. Se emplearon 40 semillas por cada tratamiento (0, 400 y 600 Gray). En cada placa se colocaron 10 semillas haciendo cuatro por cada tratamiento y equivalente a cuatro tratamientos. Se colocaron las placas en bandejas con agua suficiente para mantener humedad adecuada para la germinación y desarrollo de las plántulas. A los 10 días de instalación se aplicó Botrizim (carbendazim) combinado con Bb5, fungicida para el control del mal del almacigo. La longitud de la raíz y la altura de las plántulas se midieron a los 30 días.

La altura de plántula se midió en centímetros, desde la base de la plántula hasta el punto apical del tallo. Longitud de raíz: se midió en centímetros, desde la base de la plántula hasta el final de la raíz más larga. En ambos casos se empleó una regla con escala de centímetros.

#### **d) Determinación de esterilidad**

Para esta evaluación se usaron las plantas de la población M1 establecidas en campo. Para la evaluación se usaron las plantas establecidas en bloques y tres repeticiones por cada tratamiento (0, 400 y 600 Gray) y se determinó el porcentaje de reducción del rendimiento entre los tratamientos, el cual se atribuye al efecto negativo de la irradiación considerando que todos los tratamientos estuvieron en el mismo ambiente y recibieron un manejo agronómico igual.

#### **e) Determinación de la Dosis Letal 50**

Para conocer la magnitud de la respuesta de cada variable a las dosis de radiación, se empleó un modelo de regresión lineal. Sin embargo, sólo las variables supervivencia y emergencia de hojas se ajustaron a este modelo, por lo cual la determinación de la DL50 se realizó sólo para estas variables.

### **B. Manejo de campo de la M1 en campo**

Las semillas irradiadas con rayos gamma con las dosis de 400 y 600 Gray y un testigo referencial sin irradiar (0 Gray) fueron sembradas en canteros con un sustrato obtenido de la mezcla de suelo y compost en una proporción de 1:2. Se sembraron 200 g de cada tratamiento repartidas en tres bloques con repeticiones.

Las semillas fueron colocadas a chorro continuo en surcos de 1 m de longitud distanciados a 80 cm. Se mantuvo los tratamientos separados y para evitar polinización cruzada se usó como barreras semillas de plantas sin irradiar. Durante la campaña agrícola se manejó la M<sub>1</sub> siguiendo el protocolo establecido para el manejo de un campo comercial de kiwicha pero sin incluir la labor de desahije. A la madurez se cosecharon los bloques y repeticiones de cada tratamiento.

#### **4.3.2. Generación M<sub>2</sub>**

##### **A. Manejo de la población M<sub>2</sub>**

Se emplearon las semillas cosechadas en la generación M<sub>1</sub> y se sembraron en campo, panoja /surco, en surcos de 1m de longitud espaciados a 80 cm. Las semillas fueron colocadas a chorro continuo en una densidad menor a la empleada en la generación M<sub>1</sub> y se aplicaron las labores culturales empleadas en un campo comercial con excepción del desahije.

Se cosechó cada planta diferente al testigo referencial como “mutante candidato” en forma individual y en forma manual.

## B. Evaluaciones

### a) Número de plantas en cada tratamiento

En la generación M<sub>2</sub> se procedió a contar el número de plantas establecidas en las camas en la fase fenológica de crecimiento de plantas (1 par de hojas verdaderas). Este dato fue empleado para determinar la frecuencia de mutación.

### b) Mutaciones de clorofila

Se empleo la escala propuesta por Gustafson (1969) (Tabla 1) en la que se describe los diferentes tipos de mutaciones de clorofila observados. Esta evaluación se realizó en la fase de germinación (cotiledones emergidos) y crecimiento de hojas.

**Tabla 1. Descripción de tipos de mutaciones de clorofila – Adaptado de Gustafson (1969)**

|                  |   |
|------------------|---|
| I. Albina        | No se forma clorofila ni carotenos.   |
| II. Xantha       | Prevalencia de carotenos o ausencia de clorofila.   |
| III. Alboviridis | Diferentes colores en la base y punta de la hoja  |
| Alboxantha       | Base amarilla, punta blanca. Muy común.   |
| Xanthalba        | Base blanca o ligeramente coloreada. Punta amarilla o amarillo verdosa. Puede alcanzar madurez.   |
| Alboviridis      | Base verde, punta blanca.   |
| IV. Viridis      | Grupo heterogéneo, característico amarillo verdoso o verde claro.   |
| Virescens        | Verde claro uniforme que gradualmente cambia a verde oscuro. Generalmente el color adquiere el tono normal. Mutación a menudo viable.                       |
| Chlorina         | Generalmente color amarillo verdoso que puede permanecer durante el ciclo de la planta u oscurecerse. Viable.   |
| Lutescens        | Los pigmentos verdes originales se destruyen, las hojas se marchitan y se tornan amarillas.   |
| Albescens        | Igual que lutescens pero más pronunciado. Los colores originales cambian a blanco o blanco amarillo.  |
| V. Tigrina       | Destrucción trasversal de los pigmentos. Líneas transversales son generalmente marrones o amarillas, delgadas y comprimidas. Muy características en cebada. |
| VI. Striata      | Líneas longitudinales de color blanco o amarillo.   |
| VII. Maculata    | Destrucción de clorofila y/o caroteno en forma de manchas distribuidas sobre las hojas.   |

### **c) Mutaciones morfológicas**

Se observó las plantas en todas las fases fenológicas y se evaluó la morfología empleando los descriptores de Amaranthus del IPGRI (1981) (Tabla 2).

Se evaluó la forma de hoja (HF), borde de hoja (HB), color de hoja (HC), color de venas (HVC), pigmentación en la hoja (HP), color de peciolo (HCP), color de tallo (TC), presencia de estrías en el tallo (TPE), color de estrías en el tallo (TCE), presencia de ramas (TPR), densidad de inflorescencia (ID), color de inflorescencia (IC) y actitud de inflorescencia (IA).

### **d) Mutaciones de caracteres agronómicos**

#### **Altura de Planta**

Se midió la planta desde base del tallo hasta el ápice de la inflorescencia un día antes de la cosecha y se expresó en cm.

#### **Días a la floración**

Se determinó la fecha de plena floración, cuando el 50% de las flores estaminadas o masculinas mostraron presencia de anteras en el ápice de los glomérulos o agrupaciones de flores.

#### **Días a la maduración fisiológica**

Se determinó la fecha de maduración fisiológica cuando se observó el inicio de la dehiscencia o caída de los granos en estado pastoso y el cambio de coloración de la inflorescencia y las hojas. Debido al problema de dehiscencia de los granos la cosecha se realiza en el estado de madurez fisiológica.

#### **Rendimiento**

Se cosecharon panojas individuales de plantas seleccionadas como candidatos mutantes y el testigo referencial en forma manual, una vez limpios los granos se procedió al pesado empleando una balanza y se expresó en gramos (g) por planta.

**Tabla 2. Caracteres morfológicos de *Amaranthus* – Adaptado Descriptores del IPGRI (1981).**

|                            | <b>Forma de Hoja</b>           |                    | <b>Color de Tallo</b>       |                               | <b>Tipo Inflorescencia</b>              |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|
| HF                         | 1 Lanceolada                   | TC                 | 1 Verde                     | IT                            | 1 Amarantiforme                         |
|                            | 2 Elíptica                     |                    | 2 Rojo                      |                               | 2 Glomerulata                           |
|                            | 3 Cuneolada                    |                    | 3 Púrpura                   |                               | 3 Intermedia                            |
|                            | 4 Aovada                       | TPE                | 4 Amarillo                  | ID                            | <b>Densidad Inflorescencia.</b>         |
|                            | 5 Ovotainada                   |                    | 5 Verde claro               |                               | 1 Laxa                                  |
|                            | 6 Rómbica                      |                    | <b>Presencia de Estrías</b> |                               | 2 Intermedia                            |
|                            | 7 Oval                         |                    | 0 Ausencia                  |                               | 3 Densa                                 |
|                            | <b>Borde de Hoja</b>           |                    |                             | <b>Actitud Inflorescencia</b> |   |
| HB                         | 1 Entera                       | TCE                | <b>Color de Estrías</b>     | IA                            | 1 Erecta                                |
|                            | 2 Carenada                     |                    | 1 Amarillo                  |                               | 2 Intermedia                            |
|                            | 3 Ondulada                     |                    | 2 Verde                     |                               | 3 Decumbente                            |
| HC                         | <b>Color de Hoja</b>           |                    | 3 Gris                      |                               | <b>Color</b>                            |
|                            | * Ver IC: Color Inflorescencia |                    | 4 Rojo                      |                               | 1 Amarillo                              |
| HVC                        | <b>Color de Venas</b>          |                    | 5 Púrpura                   |                               | 2 Verde / 2.1 V. Claro<br>2.2 V. Oscuro |
|                            | * Ver IC: Color Inflorescencia |                    | 6 Otros                     |                               | 3 Rojo                                  |
| HP                         | <b>Pigmentación</b>            | TPR                | <b>Presencia de Ramas</b>   | IC                            | 4 Púrpura                               |
|                            | 1 Color Entero                 |                    | 0 Ausencia                  |                               | 5 Púrpura/Verde                         |
|                            | 2 Área basal pigmentada        |                    | 1 Presencia                 |                               | 6 Rosado                                |
|                            | 3 Parte central con manchas    | <b>Pubescencia</b> | 7 Púrpura/Verde Claro       |                               |   |
|                            | 4 Dos estrías en forma de V    | TP                 | 1 Glabra                    |                               | 8 Púrpura/Amarillo                      |
|                            | 5 Una estría en forma de V     |                    | 2 Poca                      |                               | 9 Púrpura/Rosado                        |
| 6 Margen y vena pigmentada | 3 Conspicua                    |                    | 10 Púrpura/Blanco           |                               |   |
| rHPb                       | <b>Pubescencia</b>             |                    |                             |                               | 11 Verde/Rosado                         |
|                            | 1 Glabra                       |                    |                             |                               | 12 Rosado/Amarillo                      |
|                            | 2 Poca                         |                    |                             |                               | 13 Verde<br>púrpura/Rosado              |
| HCP                        | 3 Conspicua                    |                    |                             |                               | 14 Amarillo/Rojo                        |
|                            | <b>Color de Pecíolo</b>        |                    |                             |                               | 15 Amarillo/Púrpura                     |
|                            | * Ver IC: Color Inflorescencia |                    |                             |                               |   |

#### **e) Mutaciones de caracteres de calidad**

Estas evaluaciones se realizaron en el material irradiado y en el testigo sin irradiar y se llevaron a cabo en el Laboratorio de Calidad del Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina y se describen a continuación:

##### **Tamaño de grano – Peso de 1000 granos**

Se tomo al azar 1 gramo de semillas y se contaron 1000 granos empleando un contador de granos y luego se pesó empleando una balanza de precisión.

##### **Contenido de Proteína del grano (porcentaje)**

Se determino el porcentaje de proteína de muestras de cada planta seleccionada, utilizando el equipo llamado “INFRA TECK 1255 Food & Feed Analyzer”.

#### **4.3.3. Generación M<sub>3</sub>**

Se sembraron las semillas de cada planta “mutante candidata” M<sub>2</sub>, del tratamiento de 400 Gray, en forma separada en camas o canteros en la casa malla, con un sustrato adecuado y con densidad de 1 m de longitud separado por 80 cm. Se realizaron las evaluaciones morfológicas, de caracteres agronómicos y de calidad tal como fueron descritos en la generación M<sub>2</sub> para determinar si las variantes observadas fueron cambios heredables o transferibles a las siguientes generaciones.

#### **4.3.4. Diseño Experimental**

##### **Generación M<sub>1</sub>**

El diseño experimental que se empleo es un Diseño Completamente al Azar con cuatro repeticiones, para evaluar los caracteres de germinación y supervivencia. Cada unidad experimental estuvo conformada por 100 semillas en bandejas por tratamiento para las variables germinación y sobrevivencia. Para las variables longitud de la raíz y altura de plántula la unidad experimental será 10 semillas en placas especiales por tratamiento.

De igual modo para determinar el nivel de esterilidad se empleó un diseño de Bloques completos al azar con tres repeticiones en condiciones de campo.

### **Generación M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>**

En estas generaciones se tomaron los datos mediante observación de plantas individuales establecidas en surcos de observación de 1m de longitud y separados cada 80 cm. No se empleó diseño estadístico por el tipo de estudio y el nivel de segregación.

#### **4.3.5. Frecuencia de Mutaciones**

Se contaron todas las variantes que no se observaron en el testigo sin irradiar. Estas variantes se consideraron como mutantes candidatos.

La frecuencia de mutantes candidatos en la generación M<sub>2</sub> se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$Fr = \frac{N^{\circ} \text{ de mutantes / caracter / tratamiento}}{N^{\circ} \text{ de plantas } M_2 / \text{tratamiento}}$$

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### OBJETIVO 1:

#### DETERMINACION DEL NIVEL DE RADIOSENSIBILIDAD DE SEMILLAS DE KIWICHA (*Amaranthus caudatus*) var. CENTENARIO

##### Germinación

Esta variable fue medida a los 6 días después de sembrar las semillas de la variedad Centenario en placas petri en condiciones controladas. En la Tabla 3 se presenta el análisis de varianza que determina la diferencia significativa de la germinación entre los diferentes tratamientos; comparados con el tratamiento testigo sin irradiar. Se puede apreciar diferencias altamente significativas para la dosis de irradiación.

**Tabla 3. Análisis de varianza del porcentaje de germinación de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

| Fuente de variación | GL | SC     | CM     | F VA       |
|---------------------|----|--------|--------|------------|
| Tratamientos        | 2  | 1481.2 | 740.58 | 24.732 *** |
| Error               | 9  | 269.5  | 29.94  |            |
| Total               | 11 |        |        |            |

**a= 0.05% Coeficiente de variabilidad (CV) = 10.26028**

En la Tabla 4 se presenta los resultados de la prueba de significación Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) para el porcentaje de germinación; que muestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos de radiación y el testigo sin radiación. Se puede apreciar que el porcentaje de germinación varió de 68.75 a 43 por ciento, observándose una disminución del porcentaje de germinación con el incremento de la dosis. Siendo el tratamiento de 600 Gy el de menor porcentaje de germinación y el testigo el de mayor porcentaje de germinación, dicho efecto

en el material irradiado puede atribuirse al daño fisiológico producido por el agente mutagénico. La baja germinación del testigo se debió a problemas ambientales mayormente.

**Tabla 4. Valores medios y prueba de significación Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) del porcentaje de germinación de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

| Tratamientos | % de Germinación | Tukey 0.05 |
|--------------|------------------|------------|
| T0           | 68.75            | a          |
| T1           | 48.25            | b          |
| T2           | 43.00            | b          |

Conforme se incrementa las dosis de irradiación, disminuye el porcentaje de germinación de las semillas de kiwicha, es decir, existe una relación inversa entre las dosis de radiación y el porcentaje de germinación. Los resultados concuerdan con diversos autores, quienes encontraron que la germinación tiende a disminuir a medida que se aumenta la dosis de irradiación (Álvarez et al., 2017; Álvarez et al., 2018; Golubinova & Gecheff, 2011).

Mayta (2016) encontró que las semillas de cañihua expuestas a 5 dosis de radiación gamma (100 Gy, 200 Gy, 300 Gy, 400 Gy y 500 Gy), mostraron menor porcentaje de germinación con el incremento de las dosis. Quintas y Quintas (2019) reportan un resultado similar al evaluar el efecto de 6 dosis de radiación gamma (60 Gy, 80 Gy, 100 Gy, 120 Gy, 140 Gy y 160 Gy) sobre semillas de alverja. Asimismo, Álvarez et al. (2018) irradió semillas de pasto africano (*Eragrotis lehamaniana*), encontró que el porcentaje de germinación tuvo diferencias significativas con respecto al del testigo a partir de 1400 Gy y en general afirma, que la germinación tendió a disminuir conforme aumento la dosis de radiación.

### **Supervivencia**

Se contó el número de plántulas que sobrevivieron a los 30 días después de sembrar la semilla en bandejas en condiciones controladas. En la Tabla 5 se presenta el análisis de varianza (ANVA) que determina la diferencia significativa del porcentaje de germinación entre los diferentes tratamientos; comparados con el tratamiento testigo sin irradiar. Se puede apreciar diferencias altamente significativas las dosis de irradiación.

**Tabla 5. Análisis de varianza del porcentaje de supervivencia de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

| Fuente de variación | GL | SC     | CM      | F VA      |
|---------------------|----|--------|---------|-----------|
| Tratamientos        | 2  | 2395.7 | 1197.58 | 30.642*** |
| Error               | 9  | 351.75 | 39.08   |           |
| Total               | 11 |        |         |           |

**a= 0.05% Coeficiente de variabilidad (CV) = 10.1791**

En la tabla 6 se presenta los resultados de la prueba de significación Tukey (a= 0.05). Se muestra que las planta testigo tuvieron un mayor porcentaje de supervivencia con un 80.5 por ciento; el rango de supervivencia varió de 46.75 a 80.5 por ciento; correspondiendo el valor más bajo a la dosis de 600 Gy y la más alta al testigo sin irradiación, respectivamente.

**Tabla 6. Valores medios y prueba de significación Tukey (a = 0.05) del porcentaje de supervivencia de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

| Tratamientos | % de Supervivencia | Tukey 0.05 |
|--------------|--------------------|------------|
| T0           | 80.5               | a          |
| T1           | 57                 | b          |
| T2           | 46.75              | b          |

En el caso de trigo, se encontró que el porcentaje de supervivencia disminuye con el incremento de la dosis de rayos gamma desde 300 Gy (Argumedo, 2013). Por otro lado, Quintana (2019) al evaluar la supervivencia de café (*Coffea arabica*) en laboratorio, observo que al aumentar la dosis de radiación a 200 Gy y 300 Gy no hubo supervivencia.

Según, Akshatha y Chandrashekar (2014) y Ousmane et al. (2013); la radiación acelera la diferenciación de las células, afecta el balance hormonal, el intercambio gaseoso, la síntesis de proteínas y la actividad enzimática, lo que causa la inhibición de funciones vitales de las células y provoca la muerte de algunas de ellas afectando la supervivencia.

### Longitud de raíz (cm)

En la Tabla 7 se presenta los resultados de la prueba estadística de Kruskal Wallis para para la longitud de raíz (cm) de kiwicha irradiados con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. Esta prueba define si existen diferencias a nivel intergrupar de las dos variables analizadas. Se observa que existe diferencias estadísticas entre todos los tratamientos en la variable altura de plántula. En las que se observa una evidente disminución de la longitud de raíz en los tratamientos irradiados en comparación con el testigo.

**Tabla 7. Estadístico de prueba Kruskal Wallis para longitud de raíz (cm) de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

| Tratamientos | Medias | Kruskal Wallis |
|--------------|--------|----------------|
| T0           | 99.325 | a              |
| T1           | 51.775 | b              |
| T2           | 30.400 | c              |

**T-Student: 1.980448    Alpha: 0.05**

Porta y Jiménez (2018), reportar resultados similares al someter semillas de aguaymanto a diferente dosis de radiación gamma.

Antúñez-Ocampo et al. (2017), indican que la longitud de la raíz fue una variable altamente sensible a la irradiación en uchuva (*Physalis peruviana* L.), pues en todas las dosis la longitud varió entre 3.84 y 6.00 cm, mientras que las plantas testigo presentaron las raíces más largas (11.84 cm). Asimismo, Ramírez et al. (2006), reporta que dosis superior a los 100 Gy sobre cuatro variedades de *S. lycopersicum* L disminuyeron el crecimiento de la raíz, y que dosis entre 5 y 20 Gy lograron incrementar la longitud de la raíz.

### Altura de plántula (cm)

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la prueba estadística de Kruskal Wallis para la altura de plántula (cm) irradiados con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas. Se observa que existen diferencias estadísticas entre todos los tratamientos en la variable altura de plántula. Al igual que las características presentadas previamente se observó una reducción de altura de plántula concordante con el incremento de la dosis de irradiación.

**Tabla 8. Estadístico de prueba Kruskal Wallis para la altura de plántula (cm) de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con 2 dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

| Tratamientos | Medias  | Prueba Kruskal Wallis |
|--------------|---------|-----------------------|
| T0           | 93.1125 | a                     |
| T1           | 55.9500 | b                     |
| T2           | 32.4375 | c                     |

**T-Student: 1.980448    Alpha: 0.05**

Resultados similares fueron informados para varias especies. Quintas y Quintas (2019), menciona que conforme aumenta la dosis de radiación gamma en semillas de alverja, la altura de las plántulas disminuye. Asimismo, Porta y Jiménez (2018) informa que la altura de planta de aguaymanto disminuye un 38%, con respecto al testigo en dosis de 440 Gy.

#### **Determinacion de esterilidad**

En la Tabla 9 se presentan los datos del ANOVA de rendimiento de plantas individuales de los diversos tratamientos de irradiación en condiciones de campo en la generación M1, establecidas para determinar el porcentaje de esterilidad por efecto de la irradiación y para generar la población para el programa de mejoramiento. Se puede apreciar que hubo significación estadística para tratamientos y un coeficiente de variación igual a 19.11 por ciento.

La radiación gamma afecto la fisiología de las plantas en forma negativa reduciendo la capacidad productiva a medida que se incrementa la dosis, tal como se puede apreciar en la Tabla 10. El rendimiento de la planta se redujo en 47.99 por ciento y en 65.32 por ciento en el material irradiado con 400 Gray y 600 Gray; respectivamente. Este rendimiento se atribuye a la esterilidad ocasionada por la radiación considerando que las plantas no tuvieron diferencias en ambiente y manejo agronómico. En general se concluye que el incremento de las dosis origina un aumento en el % porcentaje de reducción o esterilidad.

**Tabla 9. Cuadrado medio del ANOVA del rendimiento de planta en la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma**

| Fuente de variación | G.L. | CM       |
|---------------------|------|----------|
| Repetición          | 2    | 7        |
| Tratamiento         | 2    | 616.33 * |
| Error               | 4    | 25.33    |
| Total               | 8    |          |
| CV (%)              |      | 19.11    |

**Tabla 10. Valores Medios y Prueba de significación Tukey ( $\alpha=0.05$ ) del rendimiento de planta en la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma**

| Tratamiento Rayos gamma (Gray) | Rendimiento g/planta (Tukey $\alpha=0.05$ ) | Porcentaje de Reducción |
|--------------------------------|---|-------------------------|
| 0                              | 42.30 a                                     |                         |
| 400                            | 22.00 b                                     | 47.99                   |
| 600                            | 14.67 b                                     | 65.32                   |

Gómez (2014) reporta efectos somáticos en el tratamiento mutagénico con rayos gamma sobre la tasa de esterilidad en semillas de dos genotipos de *Amaranthus caudatus*. Menciona que la vr. Selección Huacho a dosis de 400 Gy y 600 Gy mostro una reducción de 51.3% y 72%, respectivamente. La vr. CICA a dosis de 350 Gy, 400 Gy y 450 Gy igualmente tuvo una reducción del rendimiento de 26.3%, 35.3% y 39%, respectivamente.

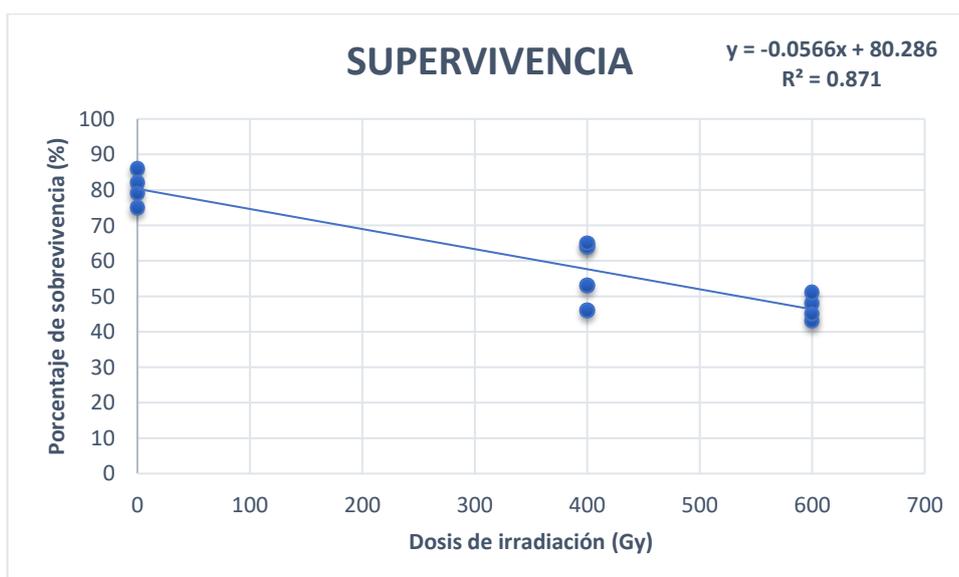
#### **Determinación de la dosis letal 50 (DL<sub>50</sub>)**

La dosis letal media para la germinación fue 404.9 Gy. Esta estimación se realizó con el modelo de regresión lineal simple con uncoeficiente de determinación superior al 0.8, que indica que más del 80% de la respuesta de la germinación fue influenciado por la radiación gamma (Figura 1).



**Figura 1: Dosis Letal 50 considerando el Porcentaje de germinación de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

La dosis letal media para la supervivencia resulto igual a 535 Gy (Figura 2). Ousmane et al. (2013) siguiendo el mismo procedimiento usado en el experimento para determinar la DL en mijo perla (*Pennisetum glaucum*) concluye que el incremento de las dosis origina una reducción en la germinación. Resultados similares estudiando la radiosensibilidad de diferentes especies fue reportado por diversos investigadores (Ilguan Caizaguano, 2016; Quintas & Quintas, 2019).



**Figura 2: Dosis Letal 50 considerando el Porcentaje de supervivencia de la generación M1 de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var. Centenario irradiado con dos dosis de rayos gamma bajo condiciones controladas.**

Hernández-Muñoz et al. (2019), determino la DL50 para la supervivencia de protocormos (*Laelia autumnalis*) y la dosis reductiva media para formación de hojas fue 53 y 28 Gy, respectivamente. Asimismo, Ángeles-Espino et al. (2013), encontro la DL50 entre 20 y 25 Gy para número de brotes y tamaño de plántula de *Agave tequilana*. Los resultados concuerdan con los hallados por Mayta (2016); quien en su estudio de inducción de mutaciones mediante radiaciones gamma en cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), afirma que encontró un aumento considerable de mortalidad a medida que se incrementaba la dosis de radiación, donde la dosis letal (DL50) estaría entre la dosis 200 y 300 Gy.

Gómez Villalva et al (2020) determino la dosis letal de pasto janeiro (*Eriochloa polystachya*) entre 42 y 52 Gy considerando el grado de establecimiento de la planta.

Ahumada-Flores et al. (2020) estudio la respuesta de semillas de trigo a la radiacion gamma con dosis de 100, 200, 300, 400, 5000 y 600 Gy y determino que la dosis mas baja estimulo el crecimiento de las plantas de trigo y que las dosis mas altas afectaron el crecimiento y la supervivencia de las plantas determinado que la dosis letal de la variedad de trigo estudiada, en base a supervivencia fue igual a 290.6 Gy

Corazon-Guivin et al. (2022) empleando Ethyl Methanesulphonate (EMS), un agente mutagénico químico, en semillas de *Plukenetia volubilis* L., determino que la dosis letal media fue de 3% de EMS con 30 horas de exposición, la determinación la realizo evaluando la reducción en un 50 por ciento aproximado de porcentaje de emergencia, altura de planta, pérdida de dominancia apical, clorosis y deformación de las hojas.

## **OBJETIVO 2:**

### **DETERMINACION DE LA DOSIS DE INDUCCION DE MUTACIONES MORFOLOGICAS, AGRONOMICAS Y DE CALIDAD – GENERACIÓN M<sub>2</sub> Y M<sub>3</sub>**

#### **Generación M<sub>2</sub>**

##### **Numero de plantas por tratamiento**

En la dosis de 400 Gray se tuvo una población de 7847 plantas y en la dosis de 600 Gray 6473 plantas establecidas en condiciones de campo.

### **Mutaciones de clorofila**

En la Tabla 11 y Figura 3 se presentan el espectro y la frecuencia de mutaciones de clorofila en las dosis de 400 y 600 Gray. Se observaron 5 tipos diferentes de mutantes de clorofila. Las mutantes albinas carecían por completo de clorofila y carotenoides y sobrevivieron durante 8 a 10 días. Los mutantes de clorina eran de color verde amarillento. Los mutantes Tigrina mostraron destrucción transversal de pigmentos. Los mutantes de Xantha eran amarillos, estos mutantes sobrevivieron durante 10 a 15 días. Los mutantes lutescens eran de color verde apagado. Se puede apreciar que en ambas dosis se observaron mutaciones de clorofila tipo chlorina, tigrina, xanta y lutescens y solo en la dosis de 600 gray se aprecia mutaciones de tipo albino. Se aprecia una ligera mayor frecuencia de mutación en la dosis de 400 Gray.

Gómez-Pando et al (2021) informa una frecuencia de 0.0016 para mutaciones tipo xanta y de 0.0082 para mutaciones tipo albino en kiwicha variedad Ancashino y la variedad CICA-UNSAAC irradiadas con rayos gamma.

Aldaba (2014) estudiando frecuencia de mutaciones de clorofila en líneas mutantes de cebada en generación M8 empleando radiación gamma 250 Gy, informa que, de las 665 líneas estudiadas, 256 líneas (38,59 por ciento) mostraron presencia de mutaciones de clorofila. En este grupo, el espectro o tipo de mutaciones identificadas fueron: Albinas, Xanthas, Chlorinas, Lutescens, Striatas, Tigrinas, Xanthalbas, Alboxanthas y Alboviridis.

Soraluz (2015) menciona que la inducción de mutaciones en centeno, en dosis de 100 Gy el mutante de clorofila más frecuente fue tipo lutescens y antocianina; mientras que en la dosis de 150Gy, fue tipo chlorina.

Ahumada-Flores et al., (2021) indicaron que al irradiar semillas de trigo CIRNO C2008 a dosis de 100, 200 y 300 Gy. se encontró catorce mutantes de clorofila (en diferente frecuencia). Tigrina, Viridis, Xantha, Xanthviridis y Xanthalba a dosis 100 Gy; mientras que Viridoalbina, Striata, antocianina y alboviridis fueron encontrados a 200 Gy. Maculata, Clorina y Albina se observó en la frecuencia más alta a 300 Gy. En general se descubrió que la frecuencia de los mutantes de clorofila depende de la dosis, es decir, 0,00927 (100 Gy), 0,02675 (200 Gy), 0,03094 (300 Gy).

De igual modo en cebada se informe de la mutación de un gen mutador de cloroplastos de la cebada (cpm), que es un material experimental excepcional para la obtención de variabilidad genética en el plastoma y del cual se aislaron mutantes de cebada tolerantes a herbicidas, otros con valor agronómico y otros con valor científico como el mutante sensible a alta temperatura del gen plastidico y cf3 relacionado al fotosistema I (Landau et al., 2020)

**Tabla 11. Tipos y frecuencia de mutaciones de clorofila observadas en la Generación M2 de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima**

| Dosis    | No. Plantas | Mutación      | Nº Plantas Mutantes | Frecuencia |
|----------|-------------|---------------|---------------------|------------|
| 400 Gray | 7847        | Chlorina      | 8                   | 0.00102    |
|          |             | Tigrina       | 11                  | 0.00140    |
|          |             | Xantha        | 18                  | 0.00229    |
|          |             | Lutescens     | 2                   | 0.00025    |
| Dosis    | No. Plantas | Mutación      | Nº Plantas Mutantes | Frecuencia |
| 600 Gray | 6473        | <i>Albina</i> | 1                   | 0.00015    |
|          |             | Chlorina      | 7                   | 0.00108    |
|          |             | Tigrina       | 15                  | 0.00232    |
|          |             | Xantha        | 13                  | 0.00201    |
|          |             | Lutescens     | 1                   | 0.00015    |



**Figura 3. Mutaciones de clorofila: A. Tigrina, Xantha, Chlorina y Lutescens**

## **Mutaciones Morfológicas**

### **Mutaciones de Hojas**

Las hojas de una planta adulta de la variedad Centenario son elípticas de color verde oscuro. En las Tablas 12 y 13 y Figura 4 se presentan el tipo o el espectro y la frecuencia de mutaciones en la morfología de hojas en ambos tratamientos de irradiación. Se puede apreciar que algunas mutaciones son más frecuentes en la dosis de 400 Gray y otras en las dosis de 600 Gray, sin embargo, hay un mayor espectro o tipo de mutación en la dosis de 600 Gray. La mutación más frecuente fue el tipo hojas con apéndice con una frecuencia de 0.0054 y 0.0042, para dosis de 400 Gy y 600 Gy, respectivamente.

Los tipos de mutaciones observadas en la presente tesis fueron reportados por diversos investigadores en *Amaranthus* y *Chenopodium*; como Slabbert et al. (2004) que informa cambios de color de hoja por efecto del tratamiento mutagénico en *Amaranthus cruentus*. Yarango (2013) encontró mutaciones morfológicas en hojas de kiwicha de la variedad CICA-UNSAAC en color de hoja con una frecuencia de 2.469, presencia de manchas con una frecuencia de 3.270, forma de hoja con una frecuencia de 2.337 y márgenes de hojas con una frecuencia de 2.702. Gómez (2014) observó cambios en hojas de kiwicha Var CICA por efecto de la aplicación de rayos gamma.

Mayta (2016) observó plantas con hojas marcadamente más grandes que las del testigo sin irradiar en el tratamiento con 100 Gy y 200 Gy en cañihua. Asimismo, Gómez (2014) observó cambios en hojas de kiwicha Var CICA por efecto de la aplicación de rayos gamma.

**Tabla 12. Tipos de mutación en hojas de observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima**

| Dosis           | No. Plantas | Mutación  | Nº Plantas Mutantes | Frecuencia |
|-----------------|-------------|---|---------------------|------------|
| <b>400 Gray</b> | 7847        | Hojas bifurcadas (tipo 1)                           | 5                   | 0.0006     |
|                 |             | Hojas bifurcadas (tipo 2)                           | 3                   | 0.0004     |
|                 |             | Hojas bifurcadas (tipo 3)                           | 7                   | 0.0009     |
|                 |             | Hojas con apéndice                                  | 42                  | 0.0054     |
|                 |             | Formación anormal de hojas                          | 11                  | 0.0014     |
|                 |             | Hojas corrugadas y coloreadas                       | 15                  | 0.0019     |
|                 |             | Hojas lanceoladas                                   | 5                   | 0.0006     |
|                 |             | Hojas ovales  | 2                   | 0.0003     |
|                 |             | Hojas con bordes ondulados                          | 10                  | 0.0013     |
|                 |             | Hojas con mutaciones clorofílicas (sectores xantha) | 7                   | 0.0009     |
|                 |             | Verde claro   | 25                  | 0.0032     |

**Tabla 13. Tipos de mutación de hojas observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima**

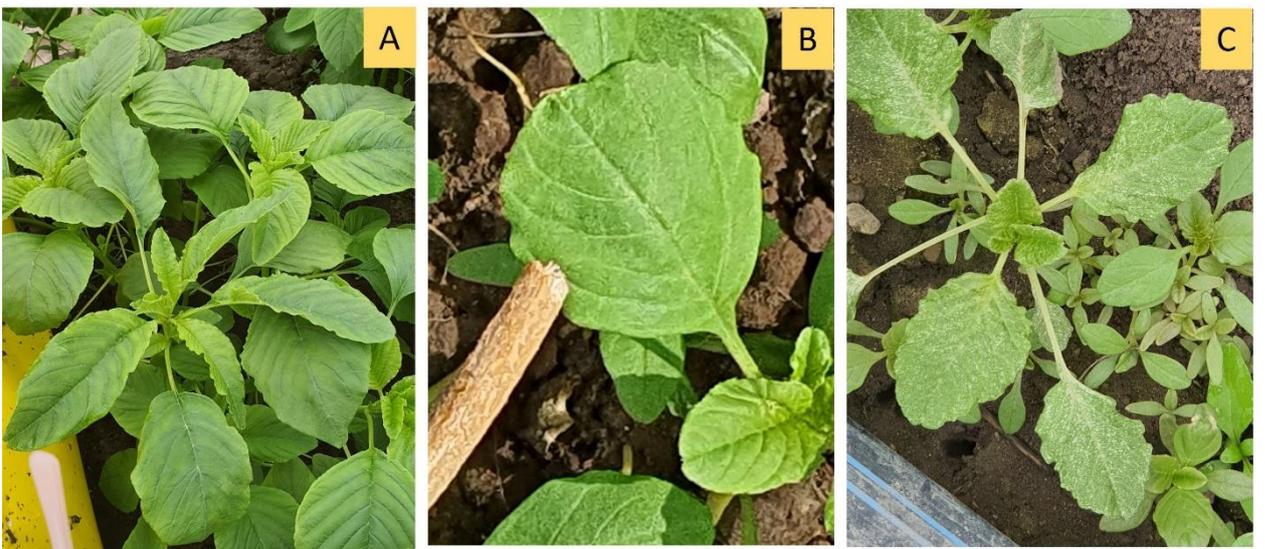
| Dosis           | No. Plantas | Mutación  | Nº Plantas Mutantes | Frecuencia |
|-----------------|-------------|---|---------------------|------------|
| <b>600 Gray</b> | 6473        | Hojas bifurcadas (tipo 1)                           | 7                   | 0.0011     |
|                 |             | Hojas bifurcadas (tipo 2)                           | 4                   | 0.0006     |
|                 |             | Hojas bifurcadas (tipo 3)                           | 9                   | 0.0014     |
|                 |             | Hojas con apéndice                                  | 27                  | 0.0042     |
|                 |             | Formación anormal de hojas                          | 18                  | 0.0028     |
|                 |             | Hojas corrugadas y coloreadas                       | 12                  | 0.0019     |
|                 |             | Hojas lanceoladas                                   | 7                   | 0.0011     |
|                 |             | Hojas ovales  | 3                   | 0.0005     |
|                 |             | Hojas con bordes ondulados                          | 5                   | 0.0008     |
|                 |             | Hojas marmoleadas (clorofila - sectores albinos)    | 7                   | 0.0011     |
|                 |             | Hojas con mutaciones clorofílicas (sectores xantha) | 8                   | 0.0012     |
|                 |             | Hojas marmoleadas y bordes ondulados                | 2                   | 0.0003     |
|                 |             | Hojas marmoleadas y lanceoladas                     | 9                   | 0.0014     |



**Figura 4A: Mutaciones de Hojas observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma. A. Hojas bifurcadas Tipo 1. B. Hojas bifurcadas Tipo 2. C. Hojas bifurcadas Tipo 3. D. Hojas con apéndice.**



**Figura 4B. Mutaciones en hojas. A. Formación anormal de hojas. B. Hojas corrugadas C. Hojas corrugadas y coloreadas**



**Figura 4C: Mutaciones en hojas: A. Forma lanceolada. B. Forma Ovais. C. Oval con bordes ondulados**



**Figura 4D. Mutaciones en hojas. A. Hojas marmoleadas con sectores blancos. B. Hojas con sectores xantha.**



**Figura 4E. Mutaciones en hojas. A. hojas marmoleadas y bordes ondulados. B. Hojas marmoleadas y lanceoladas**

## Mutaciones de Tallo

La variedad Centenario tiene un tallo de color verde claro semi grueso, sin estrías y no ramificado con una sola panoja individual en el ápice. En la población de la generación M<sub>2</sub> se observaron plantas con tallos mucho más gruesos, con estrías de tonos rosados y púrpuras y ramificados, estos cambios tuvieron una mayor frecuencia en la dosis de 600 Gray (Tabla 14 y Figura 5). La mutación más frecuente fue el tipo grosor del tallo con una frecuencia de 0.0024 y 0.0039, para dosis de 400 Gy y 600 Gy respectivamente.

Similares mutaciones fueron reportadas por Yarango (2013) que informa mutaciones por efecto de radiación gamma en la variedad de kiwicha CICA-UNSAAC de color de tallo con una frecuencia de 0.4005, de niveles de ramificación con una frecuencia de 0.9988, ausencia de estrías en el tallo de 3.0828 y color de estrías de tallo igual a 1.0698. Segura (2021) reporta también mutaciones inducidas por rayos gamma en caracteres del tallo como son color y presencia de estrías en la selección Huacho de la especie *Amaranthus cruentus*.

Aldabada (2014) menciona que en la generación M<sub>8</sub> de cebada, empleando radiación gamma a dosis 250 Gy. Observo 14 líneas que mostraron mutaciones en el color de tallo. En el Grupo de 6 hileras se observó una mutación de “púrpura en la mitad o más del tallo” y en el Grupo de 2 hileras encontró dos tipos de mutaciones para color de tallo “púrpura en más de la mitad” y “púrpura basal”.

**Tabla 14. Mutación de tallo observada en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima**

| Dosis    | No. Plantas | Mutación              | Nº Plantas Mutantes | Frecuencia |
|----------|-------------|-----------------------|---------------------|------------|
| 400 Gray | 7847        | Grosor tallo          | 19                  | 0.0024     |
|          |             | Ramificación de tallo | 3                   | 0.0004     |
|          |             | Presencia de estrías  | 11                  | 0.0014     |
| 600 Gray | 6473        | Grosor Tallo          | 25                  | 0.0039     |
|          |             | Ramificación de tallo | 10                  | 0.0013     |
|          |             | Presencia de estrías  | 18                  | 0.0027     |



**Figura 5. Mutación de tallo (grosor y ramificación) observada en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina-Lima. A. Grosor de tallo. B. Ramificación de tallo.**

### **Mutaciones de Inflorescencia**

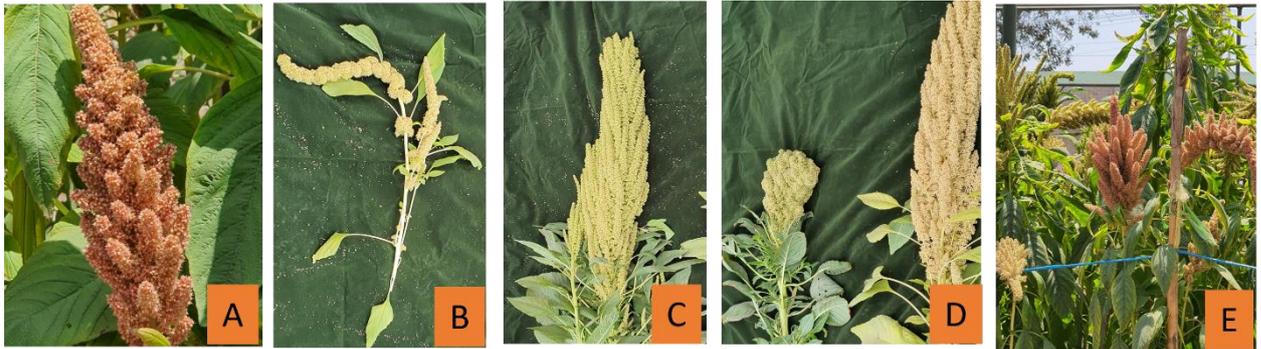
La inflorescencia de la variedad Centenario en el estado de floración es de color verde claro, es de forma amarantiforme, densidad intermedia y posición erecta. En la población M<sub>2</sub> de esta investigación se observaron cambios en el color de verde a rosado, el tipo de panoja de amarantiforme a glomerulata y tipo intermedio, la densidad de intermedia a compacta y la posición de erecta a decumbente. Para la mayor parte de las características observadas la frecuencia fue mayor en la dosis de 600 Gray y adicionalmente solo en esta dosis se observó el cambio en la densidad de la panoja de intermedia a compacta (Tabla 15 y Figura 6). La mutación más frecuente fue tipo Color- Rosado con una frecuencia de 0.0055 y 0.0049, para dosis de 400 Gy y 600 Gy respectivamente.

Estas mutaciones morfológicas en la inflorescencia, también fueron encontradas por Yarango (2013), que informa de mutaciones en la variedad de kiwicha CICA-UNSAAC de forma de inflorescencia de amarantiforme a glomerulata e intermedia con una frecuencia igual a 1.4248 y de 0.0760; respectivamente, de densidad intermedia a compacta (0.7909) y laxa (2.3222), de actitud de inflorescencia de erecta semi decumbente (2.2157) y decumbente (0.1571) y de color de inflorescencia de rojo-purpura a amarillo naranja (0.608), amarillo-verde (1.7290), amarillo (0.0709). De igual modo Gómez-Pando et al. (2021) informan de mutaciones en la Selección Ancashino de kiwicha de purpura a verde (0.0193).

También mutaciones en la inflorescencia de otras especies fueron informadas como Ahumada-Flores et al., (2021) menciona que al irradiar semillas de trigo CIRNO C2008, se observaron mutantes de espiga ramificada en frecuencias más altas en los tratamientos a 200 y 300 Gy. Asimismo, Soraluz (2015) en un experimento con semillas de centeno de la variedad "Sorom" irradiadas a dosis de 100 Gy, 150Gy, 200Gy y 300Gy, encontró mutaciones morfológicas de espigas ramificadas, espigas bifurcadas, espigas con entrenudo largo, espigas largas y precocidad.

**Tabla 15. Tipos de mutaciones en inflorescencia observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima**

| <b>Dosis</b>         | <b>No. Plantas</b> | <b>Mutación</b>            | <b>N° Plantas Mutantes</b> | <b>Frecuencia</b> |
|----------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| <b>400 Gray</b>      | 7847               | Color- Rosado              | 43                         | 0.0055            |
|                      |                    | Tipo - Panoja              | 5                          | 0.0006            |
|                      |                    | Glomerulata                |                            |                   |
|                      |                    | Tipo - Panoja              | 17                         | 0.0022            |
|                      |                    | Intermedia                 |                            |                   |
| Posición- Decumbente | 4                  | 0.0005                     |                            |                   |
| <b>600 Gray</b>      | 6473               | Color- Panoja Rosado       | 32                         | 0.0049            |
|                      |                    | Tipo - Panoja              | 14                         | 0.0022            |
|                      |                    | Glomerulata                |                            |                   |
|                      |                    | Tipo - Panoja              | 28                         | 0.0043            |
|                      |                    | Intermedia                 |                            |                   |
|                      |                    | Densidad - Panoja compacta | 22                         | 0.0034            |
|                      |                    | Posición- Decumbente       | 9                          | 0.0014            |



**Figura 6. Mutaciones de inflorescencia observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima. A. Color rosado. B. Tipo Glomerulata. C. Tipo Intermedio. D. Densidad Compacta. E. Posición decumbente**

### **Mutaciones de caracteres agronómicos**

En esta investigación se evaluaron las características, altura de planta, ciclo de vida y peso de biomasa. En ambas dosis se encontraron plantas con altura menor o mayor a la variedad centenario. De igual forma se identificaron plantas con ciclo de vida menor y mayor al material parental. En la fase de madurez fisiológica previa a la cosecha se determinó mayor producción de biomasa en algunas plantas de la generación M<sub>2</sub>. Las frecuencias para las características arriba mencionadas fueron mayores en la dosis de 600 Gray (Tabla 16 y Figura 7).

En el experimento la altura de planta en el testigo vario de 71 a 83 cm, en el tratamiento de 400 Gray las plantas seleccionadas tuvieron una altura de 65 cm y 90 - 93 cm y en el tratamiento de 600 Gray midieron 50 cm y 95 a 120 cm. El ciclo de vida del testigo vario de 120 a 130 días, en el tratamiento de 400 Gray y 600 Gray se seleccionaron plantas con 107 -112 días, y 135 - 154 días. La biomasa del testigo vario de 345 a 386 g/planta, en el tratamiento de 400 Gray se identificaron plantas de 421 a 485 g/planta y en la dosis de 600 Gray de 421 a 610 g/planta.

En la variedad de kiwicha CICA-UNSAAC, Yarango (2013) encontró mutantes con mayor y menor altura en la población M<sub>3</sub> con una frecuencia de 0.3853 y 3.1031; respectivamente y de igual modo reporto cambios en el ciclo de vida por efecto del agente mutagénico rayos gamma identificando mutaciones de precocidad con una frecuencia de 0.2637. Gómez-Pando et al (2021) informa la presencia de mutantes de menor altura obtenido por radiación gamma en generaciones avanzadas en la población irradiada con rayos gamma de la variedad CICA-UNSAAC con una altura de 140 cm comparado con el material parental con 180 cm

de altura y un mutante precoz con 59 días a la floración y 118 días a la maduración comparada con el testigo sin irradiar con 62 días a la floración y 123 días a la maduración. Mutaciones en características agronómicas también han sido informadas en otras especies. Irfaq y Nawab (2001), indica que los cultivares de trigo Pirsabak-91 (P-91), Khyber87 (K-87) y Tarnab-78 (T-78) fueron irradiados con cuatro diferentes dosis de rayos gamma (10kR, 20kR, 30kR y 40kR). Todos los cultivares mostraron una reducción significativa en la altura de planta, porcentaje de supervivencia y peso de 1000 granos bajo los tratamientos de las dosis más altas (30kR y 40kR).

Quintana (2018) reporta que la altura en plantas de café var. Typica fue menor en plantas irradiadas con 100 Gy en comparación con el tratamiento.

**Tabla 16. Mutaciones de características agronómicas observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima**

| <b>Dosis</b>    | <b>No. Plantas</b> | <b>Mutación</b>                  | <b>N° Plantas Mutantes</b> | <b>Frecuencia</b> |
|-----------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|
| <b>400 Gray</b> | 7847               | Altura de planta - reducción     | 5                          | 0.0006            |
|                 |                    | Altura de planta - Incremento    | 32                         | 0.0041            |
|                 |                    | Ciclo de vida- Plantas tardías   | 8                          | 0.001             |
|                 |                    | Ciclo de vida - Plantas precoces | 14                         | 0.0018            |
|                 |                    | Biomasa (maduración fisiológica) | 9                          | 0.0011            |
| <b>600 Gray</b> | 6473               | Altura de planta - reducción     | 10                         | 0.0015            |
|                 |                    | Altura de planta - Incremento    | 36                         | 0.0056            |
|                 |                    | Ciclo de vida- Plantas tardías   | 15                         | 0.0023            |
|                 |                    | Ciclo de vida - Plantas precoces | 23                         | 0.0035            |
|                 |                    | Biomasa (maduración fisiológica) | 12                         | 0.0019            |



**Figura 7. Mutaciones de características agronómicas observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 600 Gray. La Molina- Lima. A. Altura planta. B. Ciclo de vida.**

#### **Mutaciones de carácter de calidad**

En la generación M<sub>2</sub> se evaluó el tamaño de grano asociado al peso de 1000 granos y el porcentaje de proteína de plantas seleccionadas. Se identificaron plantas con mayor peso de mil granos y mayor porcentaje de proteínas. Las frecuencias de mutación igualmente fueron mayores en la dosis más alta y se presenta en la Tabla 17.

Las evaluaciones realizadas en el testigo dieron un rango para peso de 1000 granos de 0.69 a 0.71 g, en el tratamiento de 400 gray se seleccionaron las plantas con 0.87 a 0.95 g y en el tratamiento de 600 Gray se seleccionaron de 0.88 a 0.93 g. De igual modo para proteína en el testigo se encontró un rango de 10.03 a 11.75 por ciento, en la dosis de 400 Gray se seleccionaron plantas con 13.68 a 15.13 por ciento y en la dosis de 600 Gray de 11.75 a 13.44 por ciento.

Gómez et al, (2014) reportó mutantes con contenidos de proteínas alterados (inferiores o superiores) de la quinua cv. LM 89 irradiados a dosis de 150 Gy y Gómez- Pando et al. (2018) informa, también, de mutaciones en peso de mil granos en *Amaranthus cruentus* por efecto de radiación gamma con una variación entre 0.32 a 0.97 g, seleccionándose 15 mutantes con un peso mayor de 0.48 g.

Das y Bhagwat (2009), irradiaron semillas maduras de avena variedad C-306 en dosis de 200, 300 o 400 Gy. Se seleccionaron siete líneas mutantes para el análisis de calidad. Estas líneas de la generación M5 mostraron antesis en 50 días, madurez en 90 días y un contenido de proteína del grano que osciló entre 11,9 y 14,9% en comparación con el 13,1% en el progenitor.

**Tabla 17. Mutaciones de características de calidad observadas en la Generación M<sub>2</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 y 600 Gray. La Molina- Lima**

| <b>Dosis</b>    | <b>No. Plantas</b> | <b>Mutación</b>                 | <b>N° Plantas Mutantes</b> | <b>Frecuencia</b> |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------|
| <b>400 Gray</b> | 7847               | Tamaño grano (peso 1000 granos) | 11                         | 0.00140181        |
|                 |                    | Proteína de granos              | 7                          | 0.00089206        |
| <b>600 Gray</b> | 6473               | Tamaño grano (peso 1000 granos) | 13                         | 0.00200834        |
|                 |                    | Proteína de granos              | 2                          | 0.00030898        |

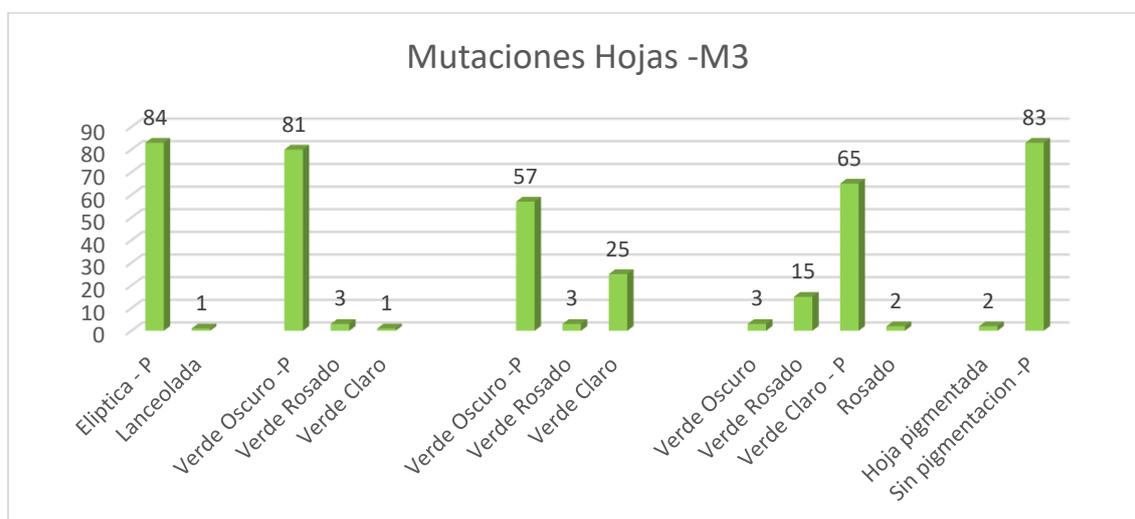
### OBJETIVO 3

#### IDENTIFICACION DE MUTANTES CON CARACTERISTICAS AGRONOMICAS Y FISIOLÓGICAS VALIOSAS

En la presente investigación se trabajó solo con el tratamiento de 400 Gray de radiación gamma y el material seleccionado, 84 plantas. Se hicieron evaluaciones de hojas, tallo e inflorescencia empleando los descriptores del IBPGR.

#### Hojas

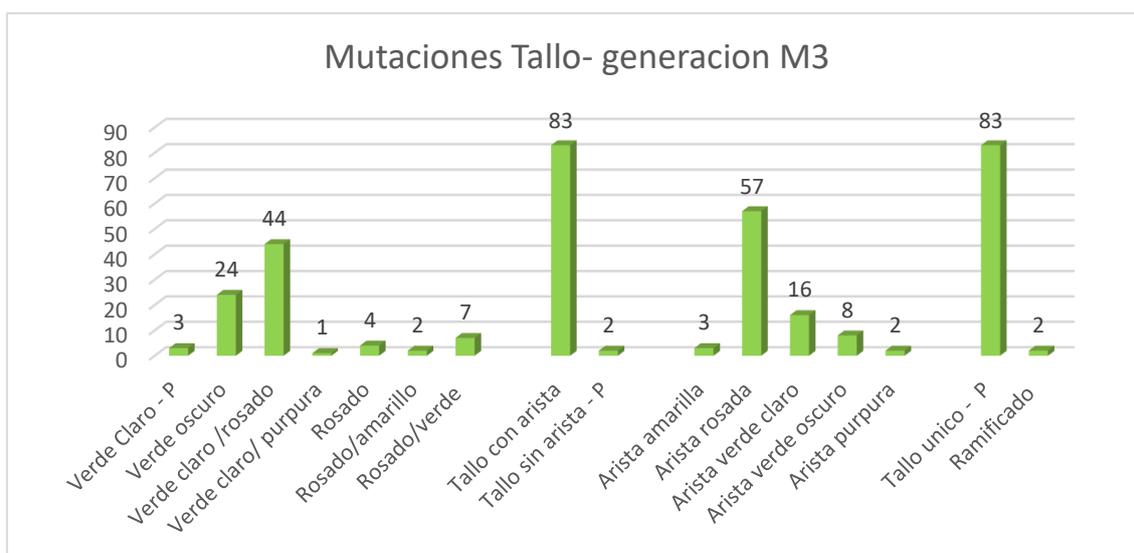
En la Figura 8 se presenta las variantes en hojas identificadas en las 84 plantas en la generación M<sub>3</sub> se aprecia plantas con mutaciones en la forma de hoja, en el color de la lámina, el color de las venas, el color del peciolo de la hoja y la presencia de pigmentación al compararlas con el testigo el cual tiene hojas elípticas con la lámina verde oscuro, las venas verdes oscuro y el peciolo verde claro. Es importante señalar que las venas y el peciolo son muy prominentes en los amarantos.



**Figura 8. Mutaciones de hojas observadas en plantas seleccionadas como mutantes en la generación M<sub>3</sub> de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.**

## Tallos

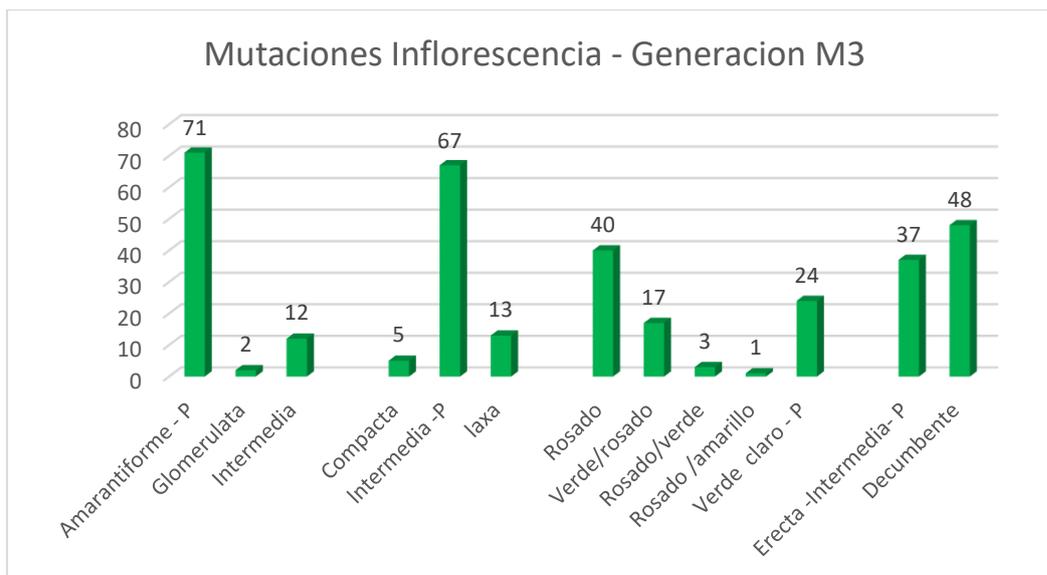
En la Figura 9 se muestra el espectro de mutaciones de color de tallo, presencia de aristas, color de aristas, ramificación y presencia de pubescencia. La variedad parental tiene un tallo de color verde claro, sin aristas, sin ramificación y glabra. Los colores de las plantas mutantes presentaron tallos con un solo color o combinaciones de colores con diferentes intensidades algunas en la base u otras en la parte del ápice. Es importante señalar que todas las plantas seleccionadas presentaron aristas con colores amarillo, rosado, verde claro, verde oscuro y púrpura. Dos mutantes fueron ramificados y uno presentó pubescencia.



**Figura 9. Mutaciones de tallo observadas en plantas seleccionadas como mutantes en la generación M3 de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.**

## Inflorescencia

En la generación M<sub>3</sub> las plantas seleccionadas mostraron mutaciones de tipo, densidad, color y posición de inflorescencia. El material parental tiene una inflorescencia de color verde claro, de tipo amarantiforme, densidad intermedia y posición erecta y dependiendo de condiciones ambientales que puedan causar daño en zonas de inserción de la panoja una posición intermedia. El color predominante en las plantas mutantes es el rosado con algunas combinaciones de color amarillo y verde. Se observaron mutaciones del tipo amarantiforme a las formas intermedia y glomerulata, de densidad intermedia a laxa y compacta y de posición erecta a decumbente (Figura 10).



**Figura 10. Mutaciones de inflorescencia observadas en plantas seleccionadas como mutantes en la generación M3 de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.**

Un análisis de componentes principales empleando estas características morfológicas muestra la presencia de tres grupos diferentes. Además, muestra cuatro mutantes mucho más diferentes a los otros 80 y son el 31, 66, 82 y 84 (Figura 11). Las variaciones más notorias fueron para el mutante 31: la hoja lanceolada, tallo ramificado, tallo con pubescencia e inflorescencia compacta. El mutante 66 tiene tallo ramificado, inflorescencia verde/rosada y de posición decumbente. El mutante 82 presenta diferencias como hojas con pigmentación, tallo rosado, estrías en el tallo de color purpura y panoja de densidad laxa, de color rosado y decumbente. El mutante 84 pigmentación en hojas, estrías en el tallo de color purpura y panoja tipo intermedia de color rosado, de densidad laxa y decumbente. En la Figura 12 se nota tres grupos definidos en los 84 mutantes seleccionados en base a características morfológicas.

Segura (2021) en una investigación similar empleando rayos gamma para inducir mutaciones en la "Selección Huacho" de *Amaranthus cruentus* identifico 10 grupos diferentes empleando 12 caracteres morfológicos y caracteres agronómicos.

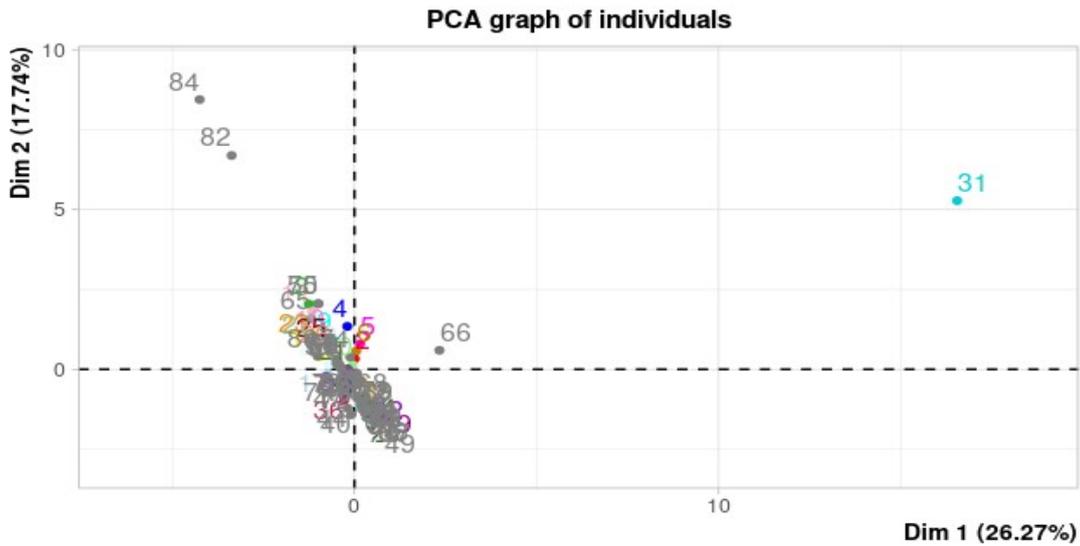


Figura 11. Agrupamiento por similitud de plantas mutantes de kiwicha de *Amaranthus caudatus* var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.

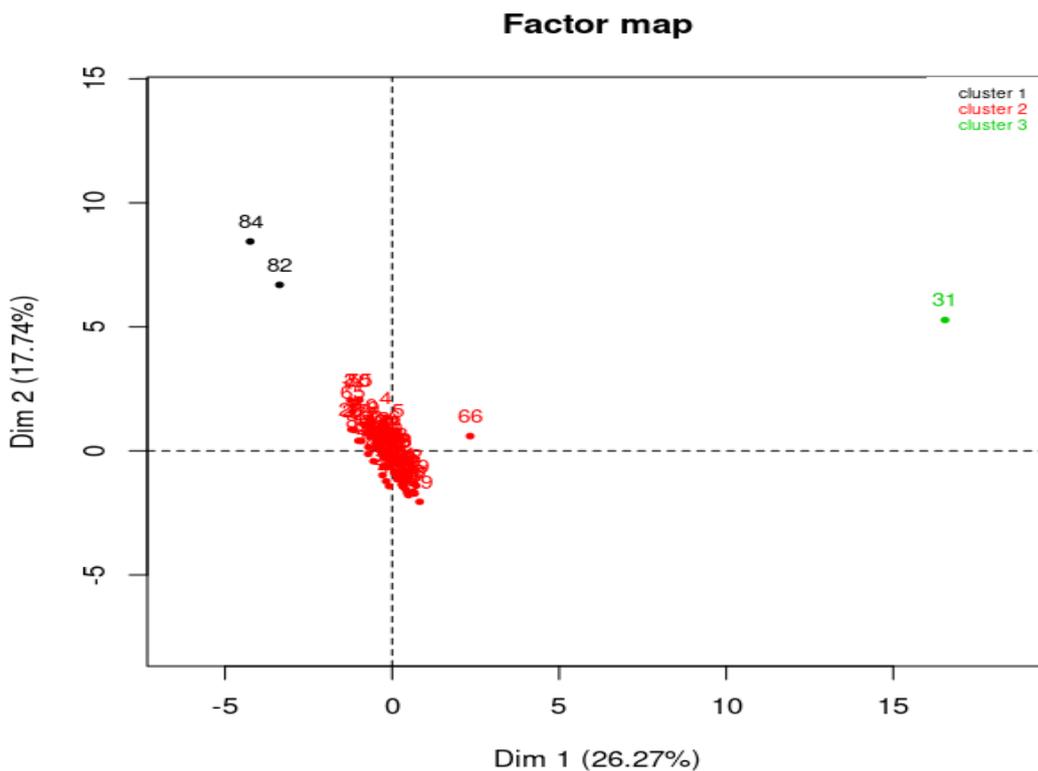
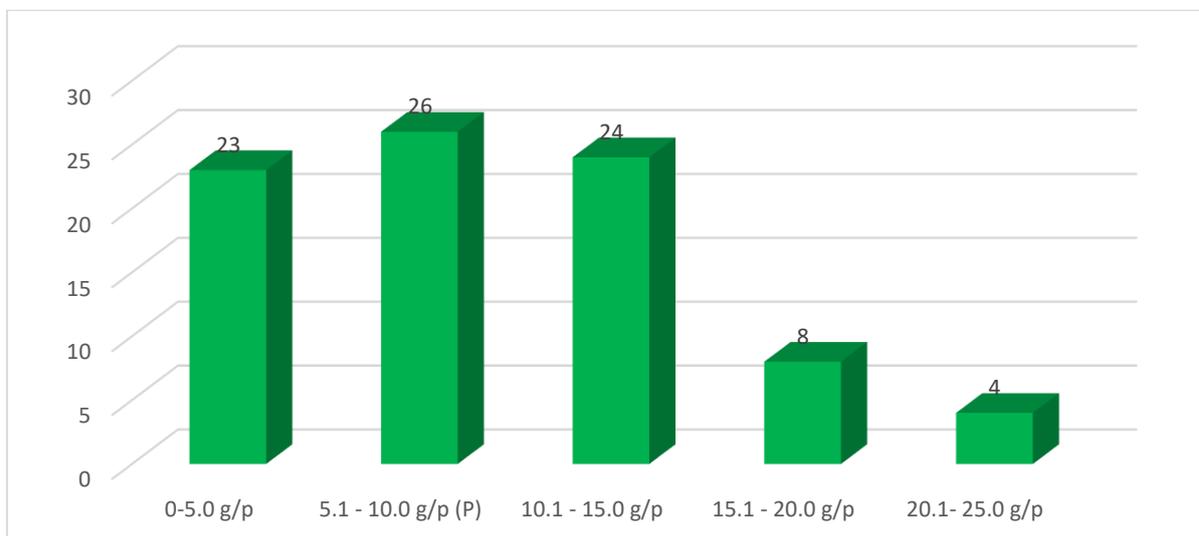


Figura 12. Mapa de agrupamiento de mutantes de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.

### Peso g/planta

El peso de las plantas vario de 0.10 a 22.98 g/ planta (Figura 13), este valor es el promedio de 10 plantas tomadas al azar. El material parental tuvo un peso de 9.20 g/planta. Se identificaron 30 plantas con mayor peso de panoja que el material parental.



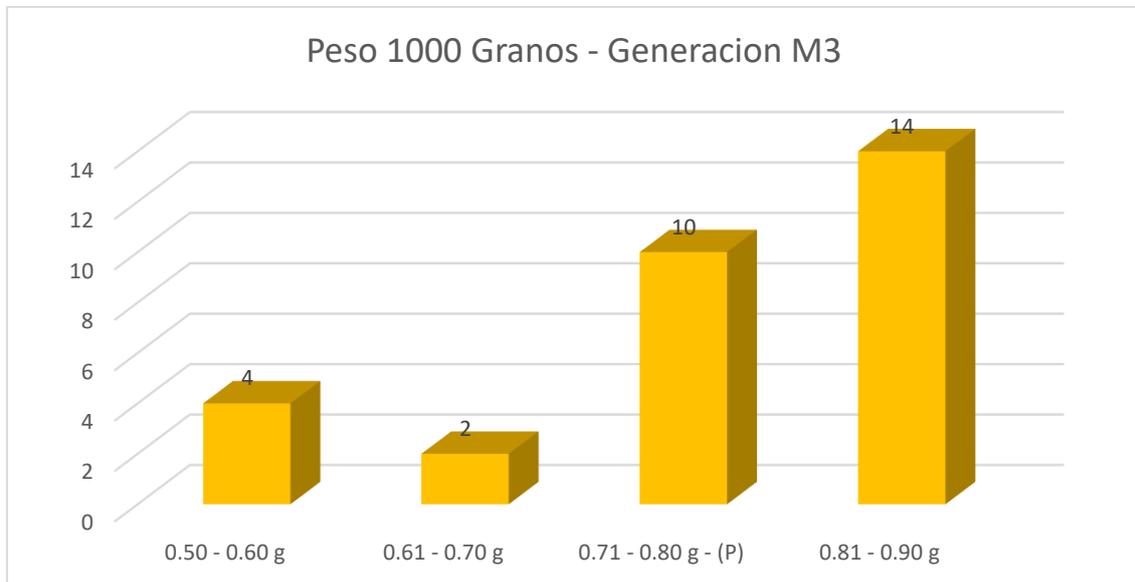
**Figura 13. Peso de granos panoja/planta en plantas mutantes en la generación M3 kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina-Lima.**

### Peso de 1000 granos

Las semillas de las 30 plantas seleccionadas por mayor rendimiento fueron evaluadas por tamaño considerando en este caso el peso de 1000 granos. El material parental en este experimento tuvo un peso de 0.77g / planta y el rango observado vario de 0.50 a 0.90 g/planta. En la Figura 14 se puede apreciar la distribución del peso de 1000 granos en el material evaluado.

Gajdosova et al. (2007) empleando semillas de una variedad Ficha de *Amaranthus cruentus* y un híbrido K-433 (*A. hypochondriacus* x *A. hybridus*) irradiadas con diferentes dosis de rayos gamma determinaron una dosis letal de 400 Gy considerando una reducción del 50 por ciento del crecimiento de la plántula y aplicaron para el estudio una dosis de 175 Gy. El material genético desarrollado fue evaluado y seleccionado por tamaño de granos o por peso de 1000 granos en la Generación M2 – M5. Considerando la información de las generaciones M3 al M5 se identificaron 12 plantas mutantes de *A. cruentus* con un peso mayor 0.9675g y

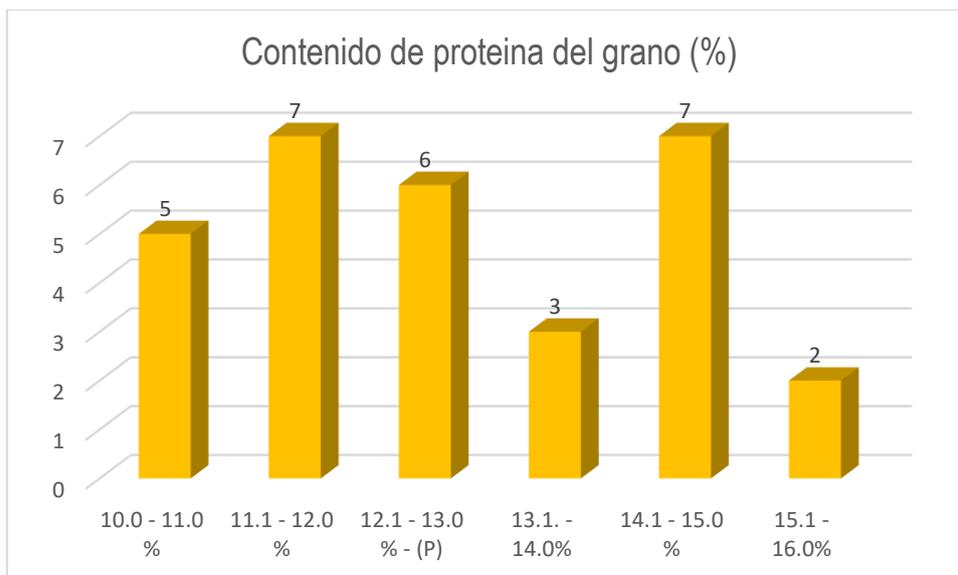
cuatro plantas en el material proveniente del híbrido K-433 con un peso mayor 0.8014 g superiores al material testigo o sin irradiar.



**Figura 14. Peso de 1000 granos (g) de plantas mutantes en la generación M3 kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina-Lima.**

#### **Contenido de proteína del grano (%)**

El contenido de proteína en los granos del material parental o la variedad Centenario en este estudio fue igual a 12.71 %. En las 30 plantas evaluadas se observó un rango de 10.06 a 15.88 %. En la Figura 15 se presenta la distribución de los valores observados en las 30 plantas seleccionadas.



**Figura 15. Contenido de proteínas de granos (%) de plantas mutantes en la generación M3 kiwicha (*Amaranthus caudatus*) var Centenario irradiado con rayos gamma con 400 Gray. La Molina- Lima.**

Observando los datos de los caracteres agronómicos y de calidad se puede apreciar que la aplicación de rayos gamma en la dosis de 400 gray permitió identificar en forma preliminar plantas mutantes con mejor rendimiento, peso de 1000 granos y contenido de proteínas en el grano que la variedad Centenario o el material parental.

De igual modo Segura (2021) en una población M4 de *Amaranthus cruentus* originada por la aplicación de rayos gamma identifico cuatro mutantes con valor agronómico seleccionados por presentar un mayor rendimiento igual a 2767.36 Kg/ha (KACH8), 2704.86 Kg/ha (KACH3), 2347.22 Kg/ha (KACH11) y 2250.0 Kg/ha (KACH14); respectivamente.

## **V. CONCLUSIONES**

### **OBJETIVO 1**

- Se observaron efectos somáticos del tratamiento mutagénico con rayos gamma sobre la tasa de germinación, supervivencia, altura de las plántulas, longitud de raíz, y esterilidad. Las variables presentaron una reducción concordante con el incremento de la dosis de irradiación, a excepción de la esterilidad.
- La dosis letal media para la germinación fue 404.9 Gy y la dosis letal media para la supervivencia fue 535 Gy.

### **OBJETIVO 2**

- Se observaron mutaciones de clorofila del tipo tipo chlorina, tigrina, xanta y lutescens y solo en la dosis de 600 gray se aprecia mutaciones de tipo albino. Se aprecia una ligera mayor frecuencia de mutación en la dosis de 400 Gray.
- Se identificaron mutaciones morfológicas en caracteres de hoja, tallo e inflorescencia. Los más frecuentes fueron: “hojas con apéndice”, “grosor de tallo” y “panoja color-rosado”, respectivamente.
- Se identificaron mutaciones para carácter agronómicos y de calidad como altura de planta, ciclo de vida, biomasa, tamaño y proteína de grano.

### **OBJETIVO 3**

- Se identificaron mutantes valiosos con mejor rendimiento de planta, peso de mil granos y contenido de proteínas que el material parental.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda continuar evaluando las siguientes generaciones de las plantas seleccionadas para pruebas de resistencia a factores bióticos y abióticos y rendimiento por hectárea en diferentes localidades.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, E. J., Romero, M. (2019). Actividad antioxidante del germinado de la semilla de cuatro variedades de *Amaranthus caudatus* L. "kiwicha". *Pharmacognosy Journal*, 11(3), 588–593. <https://doi.org/10.5530/pj.2019.11.94>
- Ahumada Flores, Sergio, Torre Amavizca, Cesiah de la, Cruz Torres, Eulogio de la, Parra Cota, Fannie Isela, Gómez Pando, Luz Rayda, & Santos Villalobos, Sergio de los (2018). Improving Yield and Commercial Potential of Wheat for Heat Tolerance by Mutation Induction Techniques (IAEA-CN--263). International Atomic Energy Agency (IAEA)
- Ahumada-Flores, Sergio, Briceño-Zamora, María Fernanda, García-Montoya, Jesús Alberto, López-Cázarez, Carolina, Pereo-Galvez, Angel Esequiel, Parra-Cota, Fannie Isela and de los Santos-Villalobos, Sergio. "Gamma radiosensitivity study on wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*)" *Open Agriculture*, vol. 5, no. 1, 2020, pp. 558-562. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0057>
- Akshatha and K. R. Chandrashekar (2014) Gamma sensitivity of forest plants of Western Ghats. *Journal of Environmental Radioactiv- ity* 132:100-107.
- Aldaba, G. 2014. Identificación de líneas mutantes de cebada (*Hordeum vulgare* L.) con valor agronómico y calidad en una población M8 de va la variedad UNA-La Molina 96 desarrollada con irradiación gamma. Tesis para optar por el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima, Perú. 154 p.
- Álvarez Holguín, A., Corrales Lerma, R., Morales Nieto, C. R., Avendaño, C. H.; Villarreal Guerrero, A. F. (2017). Dosis óptima de irradiación gamma con Co60 para inducción de mutagénesis en pastos. *Revista Electrónica Nova Scientia*. 67–88.
- Álvarez Holguín, A., Morales Nieto, C. R., Avendaño Arrazate, C. H., Santellano Estrada, E., Melgoza Castillo, A., Burrola Barraza, M. E., y Corrales Lerma, R. (2018). Dosis letal media y reducción media del crecimiento por radiación gamma en pasto africano (*Eragrostis lehmanniana* Ness). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 81. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1268>.

- Álvarez, A; Céspedes, E; Sumar, L. (2010). Conservación y mejoramiento genético de la kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) en la Región Cusco” Programa de Kiwicha del Centro de Investigación de Cultivos Andinos (CICA). Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), Cusco, Perú.
- Álvarez, A; Céspedes, Pacheco, D. 2013. Catálogo de Caracterización del Germoplasma del Banco Ex Situ del Programa de Investigación en Kiwicha del CICA-FAZ-UNSAAC. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. 417 p. REF/07.07.04 Ca/00126. <https://catalogo.cbc.org.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=552>
- Ángeles-Espino, A., Valencia-Botín, G., Virgen-Calleros, C., Ramírez-Serrano, L., Paredes-Gutiérrez, s., y Peña., H.-D. L. (2013). Determinación de la dosis letal (DL 50) con <sup>60</sup>Co en vitroplántulas de *Agave tequilana* var. Azul. *Rev. fitotec. mex*, 36(4), 381-386. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802013000400003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000400003&lng=es&tlng=es)
- 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 <sup>60</sup>Co aplicados a la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(2), 211–218. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.2.211-218>
- Argumedo, K. 2013. Inducción de mutaciones en trigo (*Triticum turgidum* spp. durum) selección Arequipa empleando rayos gamma. Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima, Perú. 57 p.
- Ayala Garay, A. V, Espitia Rangel, E., Rivas Valencia, P., y Almaguer Vargas, G. (2016). Análisis de la cadena del valor de amaranto en México. *Agricultura y desarrollo*, 87–104.
- Bravo, R., Valdivia, R., Andrade, K., Padulosi, S., y Jager, M. (2010). Granos Andinos Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañihua y kiwicha en Perú. Bioersivity International, Roma, Italia., 148. <file:///C:/Users/user/Downloads/1412.pdf>
- Brenner, D. 1990. Seed shattering control with indehiscent utricles in grain amaranths. *Legacy* 3 (1): 2-3

- Camarena Mayta, F., Chura Chuquija, J., y Blas Sevillano, R. H. (2014). Mejoramiento genético y biotecnológico de plantas. Agro Banco, 286. <https://doi.org/10.1021/pr3003326>
- Carmona W., Orsini G. 2010. Sinopsis del subgénero *Amaranthus* (*Amaranthus*, *Amaranthaceae*) en Venezuela Acta Botánica Venezolana. Fundación Instituto Botánico de Venezuela Dr. Tobías Lasser Caracas, Venezuela, vol. 33, núm. 2: 329-356
- Corazon-Guivin, M., Arévalo-Rojas, M., Acosta-Córdoba, R., Chirinos-Hinojosa, D., Valverde-Iparraguirre, J., Ruiz-Sánchez, M., Cerna-Mendoza, A. & Guerrero-Abad, J. (2022). Determinación de la DL50 de Metanosulfonato de Etilo (EMS) para la inducción de cambios morfológicos y fisiológicos en plántulas de *Plukenetia volubilis*. Revista agrotecnológica amazónica, 2(1), e209. <https://doi.org/10.51252/raa.v2i1.209>
- Cortés Conget, C. A. (2017). Estimación de dosis letal 50 en dos explantes de *Alstroemeria* spp. irradiados con rayos gamma (Tesis de pre grado). Universidad de Chile, Santiago.
- Datta, S. K: (2019). Determination of Radiosensitivity : Prerequisite Factor for Induced Mutagenesis. En C. P. Malik and P.C. Trivedi, Harnessing Plant Biotechnology and Physiology to Stimulate Agricultural Growth. Agrobios, India.
- Di Pane, F. J., Lopez, S. C., Cantamutto, M. Á., Domenech, M. B., & Castro-Franco, M. (2018). Effect of different gamma radiation doses on the germination and seedling growth of wheat and triticale cultivars. Australian Journal of Crop Science, 12(12), 1921–1926. Doi: <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.12.p1251>[14]
- Estrada Zuniga, R. (2011). Kiwicha alimento nuestro para el mundo. Instituto Nacional De Innovación Agraria (INIA). [https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/105/1/Kiwicha\\_Cusco\\_2011.pdf](https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/105/1/Kiwicha_Cusco_2011.pdf)
- Gajdosova, A., Libiakova, G. and Huska, J., 2004. Improvement of selected *Amaranthus* cultivars by means of mutation techniques and biotechnological approaches. In: Genetic improvement of under-utilized and neglected crops in low income food deficit countries through irradiation and related techniques. IAEA-TECDOC-1426. IAEA, Vienna, Austria.

- Gajdosova, A., Libiakova, G., Fejer J. 2007. Improvement of selected *Amaranthus* cultivars by means of mutation induction and biotechnologies approaches. En: Breeding of neglected and under-utilized crops, Spices and Herbs. Ed. Sergio Ochatt y S. Mojan Jain. Science Publishers. ISBN 978-1-57808-509-5. P: 151 -169.
- Golubinova, I., y Gecheff, K. (2011). M1 cytogenetic and physiological effects of gamma-rays in Sudan grass (*Sorghum sudanense* (Piper.) Stapf). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 17(4), 417–423.
- Gómez L., Heros E. & Eguiluz-de la Barra A. (2006). Mejoramiento Genético de la kiwicha (*Amaranthus caudatus*) empleando inducción de mutaciones. *Revista Agroenfoque* 21(152): 32-37.
- Gómez P., L.; Eguiluz, A.; Jimenez, J.; Falconí, J. y Heros, A., E. (2009). Barley (*Hordeum vulgare* L.) and Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) Improvement by Mutation Induction in Peru. In Q.Y. Shu (ed.), *Induced Plant Mutations in the Genomics Era*. Food and Agriculture, Rome. 371-374.
- Gómez Pando Luz (2014). Development of improved varieties of native grains through radiation-induced mutagenesis. *Mutagenesis: exploring novel genes and pathways*. 105–124. DOI: [https://doi.org/10.3920/978-90-8686-787-5\\_4](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-787-5_4)
- Gomez-Pando L., Ibañez Tremolada M., Deza Montoya D. 2018. Desarrollo de la variabilidad Genética de *Amaranthus* sp mediante Inducción de Mutaciones para su empleo en programas de mejoramiento Genético. En *Memorias del primer Congreso Mundial del Amaranto*. 10-12, Octubre, Cholula Puebla, Mexico.
- Gómez Villalva, J. , Aguirre Terrazas, L. , Gomez Pando, L . , Reyes Borja, W. , Rodríguez Álava, J. , & Arana Vera, L. (2020) . Dosis letal media para inducir mutaciones, con rayos gamma, en pasto janeiro (*Eriochloa polystachya* Kunth) . *Revista de Producción Animal*, 32(1).
- Gómez-Pando, L., Ríos-Alfaro, M. 2020. Catálogo del Banco de Germoplasma de Amaranto. Ed. Programa de Investigación en Cereales y Granos Nativos, Universidad Nacional Agraria la Molina. ISBN No. 978-612-4387-57-9. 175 p
- Gómez-Pando, L., Heros, E., Aguilar-Castellanos, E., Ibañez-Tremolada, M., Eguiluz-de la Barra, A., Yarango-Gutierrez, D., Geraldino-Valenzuela C. 2021. Peru: Fitomejoramiento en los cultivos de cebada (*Hordeum vulgare*), Quinua

(*Chenopodium quinoa*) y Kiwicha (*Amaranthus caudatus*). En: Inducción de mutaciones. Estado del Conocimiento en el Mejoramiento de Plantas en América Latina y el Caribe. Ed. Sergio de Los Santos Villalobos. Editorial Fontamara. ISBN Fontamara 978-607-736-684-3, p:179 - 198

Hamouda, M., Saad-Allah, K. M., y Kasim, W. A. (2014). Molecular and physiological responses of *Pisum sativum* and *Vicia faba* to sodium azide.

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. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.12.022>

Heros E. 1999. Mejoramiento genético de la kiwicha ( ) mediante la inducción de mutaciones. Tesis Mag. Sc. Lima, Perú, UNALM. 81 p

Ilguan Caizaguano, M. J. (2016). Estudio de radiosensibilidad en la germinación y crecimiento de la arveja *Pisum Sativum* L, con semillas expuestas a radiación gamma utilizando un irradiador de Co-60. *Facultad de Ciencias, I* (0), 77. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5651>

*International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR)*, 4(6), 46–61.

Kharkwal, M. C., y Shu, Q. Y. (2009). The role of induced mutations in world food security. *Induced Plant Mutations in the Genomics Era*, 33–38.

Landau, A., Brizuela, V., Lencina, F., Petterson M.E., Etchart, V., García A., Costoya, S., Pacheco M.G., Díaz, G.D., Prina A. (2020) Mutaciones inducidas en plantas cultivadas en Argentina: mutantes de interés científico y agronómico. En: *Memorias del II Simposio Latinoamericano de Aplicaciones Nucleares en la Agricultura*. Eds. Mario Caviedes, María Gabriela Albán, José Luis Zambrano, Luis Ponce-Molina. Universidad San Francisco de Quito USFQ. Ecuador. **ISBN:** 978-9978-68-158-9 **ISBNe:** 978-9978-68-156-6,27, pp.19. <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/archivosacademicos/index>

M. Kannan, K. K., y Ganga, M. (2017). Effect of Physical and Chemical Mutagens on Morphological Characters in M1V2 Generation of Tuberose (*Polianthes tuberosa* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(4), 2492–2499. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.290>

- Maluszynski, M., Szarejko, I., Maluszynska, J., y Szurman-Zubrzycka, M. (2016). Mutation Techniques. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 2(1990), 215–228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00194-5>
- Mayta, M. E. (2016). Dosimetría de Rayos Gamma para la Inducción de Mutación en Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima, Perú. 87 p. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2836/F30-M39-T.pdf>
- Mejía Valvas, R. L., Gómez Pando, L., Pinedo Taco, R. E., Mendoza Vilcahuamán, H., y Pajuelo Roldán, C. E. (2020). Niveles de fertilización inorgánica en tres variedades de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) en Ancash, Perú. *IDESIA (Chile)*, 38(1), 75–84.
- Mostafa, H. H. A., Wang, H., Shen, D., Qiu, Y., y Li, X. (2015). Sprout differentiation and mutation induction of garlic (*Allium sativum* L.) callus exposed to gamma radiation. *Plant Growth Regulation*, 75(2), 465–471. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0009-7>
- Mujica, A. 1997. El cultivo del amaranto, producción, mejoramiento genético y utilización. Universidad Nacional del Altiplano, Universidad de Concepción. FAO, Santiago de Chile.
- Mujica, A; Quillahuaman, A. 1989. Fenología del cultivo de la kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). p. 29-31. En: Curso taller fenología de cultivos andinos y uso de la información agrometeorológica. Puno, 7-10 agosto. INIA, PICA. Perú.
- Nieto, C. 1990. El cultivo de amaranto (*Amaranthus spp*) una alternativa agronómica para Ecuador. INIAP, EE. Santa Catalina. Publicación Miscelánea N°52. Quito, Ecuador.
- Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H. A., Miah, G., y Usman, M. (2016). Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: A review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 30(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>
- Ousmane SD, Elegba W, Danso K (2013) Radio-sensibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seeds germination and seedling growth. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 4: 665-671.

- Patade, V. Y., Suprasanna, P., y Bapat, V. A. (2008). Gamma Irradiation of Embryogenic Callus Cultures and In vitro Selection for Salt Tolerance in Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Agricultural Sciences in China*, 7(9), 1147–1152. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60158-3](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60158-3)
- Pérez Avila, A. (2010). Cultivo de Kiwicha en la Sierra Central. In Instituto Nacional De Innovación Agraria (INIA) (p. 24).
- Porta, R., & Jiménez, J. (2018). Efectos de agentes mutagénicos en la germinación de semillas de aguaymanto. *Scientia Agropecuaria*, 9(2), 231-238. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.08>
- Quintana, V. (2019). Radiosensibilidad de café (*Coffea arabica* L. var. Typica) aplicado con radiación gamma. Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima, Perú. 74 p.
- Quintas, S., y Quintas, J. (2019). Radiosensibilidad de la arveja (*Pisum sativum* L.) Var. Blanco Churcampino a través de irradiaciones gamma-Co-60. Tesis para obtener el título de Biofísica. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 77 p. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2755>
- Ramírez R., L. M. González, Y. Camejo, N. Zaldívar y Y. Fernández (2006) Estudio de radiosensibilidad y selección del rango de dosis estimulantes de rayos X en cuatro variedades de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales* 27:63-67.
- Roque-siguas, O. (2019). Requerimiento térmico de las fases fenológicas de dos variedades de amaranto (*Amaranthus caudatus* L): precoz y tardía en Ayacucho. *Journal of the Selva Andina Biosphere*.
- Salas Ordinola, L. J. (2015). El azida de sodio aplicada a las semillas de salvia (*Salvia farinacea* Benth. var. Blue bedder) para cambios genéticos. Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima, Perú. 91 p.
- Salazar Vila, M. L. (2011). Introducción de 20 accesiones de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) del ensayo regional de la E.E.A. Andenes-Cusco a condiciones. E.E.A El Mantaro - Jauja. Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional del Centro del Perú. Jauja, Perú. 84 p.

- Sarsu, F., Sivasankar, S., Kofi Bimpong, I., Jankuloski, L. (2020). Induced mutations for food security. En: Memorias del II Simposio Latinoamericano de Aplicaciones Nucleares en la Agricultura. Eds. Mario Caviedes, María Gabriela Albán, José Luis Zambrano, Luis Ponce-Molina. Universidad San Francisco de Quito USFQ. Ecuador. ISBN: 978-9978-68-158-9 ISBNe: 978-9978-68-156-6,27, pp.11.  
<https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/archivosacademicos/index>
- Segura Rojas, J. N. (2021) 2021. Variabilidad fenológica y fenotípica de una población M4 de *Amaranthus cruentus* accesión Selección Huacho irradiada con rayos gamma.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/4809>
- Slabbert, M. M.; de Ronde, K.; Caetano, T.; Spreeth, M.; and Van den Heever, E. 2004. Development and evaluation of mutant germplasm of *Amaranthus* in Genetic improvement of under-utilized and neglected crops in low-income food deficit countries through irradiation and related techniques. IAEA-TECDOC-1426. Proceedings of a final Research Coordination Meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Pretoria, South Africa, 19–23 May 2003: 13-23 p.
- Sierra Exportadora. (2013). Perfil comercial: Kiwicha.  
<http://repositorio.minagri.gob.pe/bitstream/handle/MINAGRI/56/KIWICHA%20201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yarango D. 2013. Identificación de mutaciones y frecuencia de mutaciones M3 en una población M3 de KIWICHA (*Amaranthus caudatus* L.) en condiciones en La Molina. 89p

## VIII. ANEXOS



Materiales de campo



Mutaciones Color- Panoja Rosado



Mutaciones hoja con apéndice



Mutación inflorescencia glomerulata



Mutación ciclo de vida precoz