



La radiación ionizante gamma y usos actuales en ciencias agrícolas, oportunidades para los cultivos andinos: Breve revisión

Ionizing radiation and current uses in agricultural sciences, opportunities for andean crops: Brief review

Radiação ionizante gama e usos atuais na ciência agrícola, oportunidades para as culturas andinas: breve revisão

Susana Isabel Balvoa-Caguana^I
susana.balvoa@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0663-1060>

Moisés Rubén Gualapuro-Gualapuro^{III}
moises.gualapuro@ikiam.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8284-9312>

María Fernanda Heredia-Moyano^{II}
mariaf.heredia@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0145-2098>

Vilma Nohemí Yanchapanta-Bastidas^{IV}
vilma.yanchapanta@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-00028166-5914>

Correspondencia: susana.balvoa@epoch.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

***Recibido:** 10 de abril de 2021 ***Aceptado:** 03 de mayo de 2021 * **Publicado:** 01 de junio de 2021

- I. Biofísica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Biofísica, Maestría en Física, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Ingeniería en Biotecnología, Maestría en Bioinformática y Sistemas Biológicos, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena, Ecuador.
- IV. Biofísica, Maestría en Física Médica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

El objetivo de este trabajo de investigación fue revisar el estado del arte sobre los efectos biológicos causados por la radiación ionizante gamma en los vegetales y la evaluación de la radiación como una tecnología de control de infecciones por microorganismos patógenos en cultivos andinos. Los efectos de la radiación gamma se manifiestan a nivel genético y fenotípico, debido a la interacción directa de los fotones con el ADN y las especies reactivas de oxígeno (ROS). Sin embargo, las plantas son organismos que presentan un nivel de radioresistencia, para ello, activan enzimas antioxidantes para contrarrestar el estrés oxidativo, mantienen estabilidad genómica al ser organismos poliploides, inhiben las mutaciones y reparan el daño en el ADN por recombinación homóloga. Los efectos adversos o benéficos dependen de la tasa de dosis suministrada y las características de las plantas como: especie, estructura de tejido, etapa de desarrollo y el tipo de genoma. Para la revisión de la literatura científica de calidad, se adaptó un algoritmo de minado de artículos en Google Colab Jupyter notebook. En la revisión se ha encontrado que la aplicación de la irradiación gamma en semillas causa efecto mutagénico que estimula el crecimiento, desarrollo, resistencia de enfermedades y condiciones ambientales de estrés. Asimismo, en la aplicación fitosanitaria, resulta una técnica física eficiente por la capacidad de penetración y los efectos no significativos en las cualidades organolépticas-sensoriales de los productos agrícolas que son irradiados contra la infestación por microorganismos patógenos. La irradiación aplicada (0 a 5 kGy), reduce la carga microbiana a límites no detectables, por ello es una técnica con potencial para ser utilizado en la desinfección y conservación durante el almacenamiento de los productos andinos, cultivos con altas cualidades nutricionales.

Palabras clave: Radiación gamma; efectos biológicos; aplicaciones; variabilidad.

Abstract

The aim of this work has been the review of biological effects caused by gamma ionizing radiation to vegetables and the evaluation of radiation as a potential technology for microbiological pathogens control in Andean crops. The effects of gamma radiation are expressed at the genetic and phenotypic level, it is caused by the direct interaction of photons with DNA and reactive oxygen species (ROS). Plants species are radioresistant, they activate antioxidant enzymes to counteract oxidative stress, maintain genomic stability because they are polyploid organisms, inhibit mutations and repair DNA damage by homologous recombination. Adverse or beneficial effects depends on the delivered dose rate and the specific features of each organism such as species, tissue structure, stage of development

or the genome. Scientific literature review was developed using a data mining algorithm adapted in Google Colab Jupyter notebook. Our review found that gamma irradiation in seeds provokes a mutagenic effect that stimulates growth, tissue development, resistance to diseases and stressful environmental conditions. Likewise, this physical technique in phytosanitary application for crop storage, has good perspective of development due to the high penetration capacity and little effect on the nutritional and sensory properties of vegetables infested with pathogenic microorganisms. Low irradiation doses (0 to 5 kGy) reduces the microbial load to undetectable levels, hence it is a useful technique that could be used for the sterilization and long term storage of Andean products, since crops as quinoa or lupines have high nutritional values.

Keywords: Gamma radiation; effects; biology; applications; variability.

Resumo

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi revisar o estado da arte sobre os efeitos biológicos causados pela radiação gama ionizante em plantas e a avaliação da radiação como tecnologia de controle de infecções por microrganismos patogênicos em culturas andinas. Os efeitos da radiação gama se manifestam em nível genético e fenotípico, devido à interação direta dos fótons com o DNA e espécies reativas de oxigênio (ROS). Porém, as plantas são organismos que apresentam um nível de radiorresistência, para isso, ativam enzimas antioxidantes para neutralizar o estresse oxidativo, manter a estabilidade genômica por serem organismos poliplóides, inibir mutações e reparar danos ao DNA por recombinação homóloga. Os efeitos adversos ou benéficos dependem da taxa de dose administrada e das características das plantas, tais como: espécie, estrutura do tecido, estágio de desenvolvimento e tipo de genoma. Para a revisão da literatura científica de qualidade, um algoritmo de mineração de artigos foi adaptado no notebook Google Colab Jupyter. Na revisão verificou-se que a aplicação de irradiação gama em sementes causa um efeito mutagênico que estimula o crescimento, o desenvolvimento, a resistência a doenças e condições ambientais estressantes. Da mesma forma, na aplicação fitossanitária, é uma técnica física eficiente devido à capacidade de penetração e aos efeitos não significativos nas qualidades organoléptico-sensoriais de produtos agrícolas irradiados contra a infestação por microrganismos patogênicos. A irradiação aplicada (0 a 5 kGy) reduz a carga microbiana a limites não detectáveis, portanto é uma técnica com potencial para ser utilizada na desinfecção e conservação durante o armazenamento de produtos andinos, culturas com altas qualidades nutricionais.

Palavras-chave: Radiação gama; efeitos biológicos; Formulários; variabilidade.

Introducción

Los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética, formados por paquetes de energía denominados fotones, tienen longitudes de onda menores a $1 \times 10^{-11} \text{m}$, son altamente energéticos de aproximadamente 1.36 MeV (Yashar, 2018). Su fuente puede ser natural debido a que se origina en el núcleo de elementos radiactivos inestables cuando pasan de un nivel de energía a otro, semejante a lo que ocurre en los niveles de energía del átomo (Ludovici et al., 2020), como la fuente de Cobalto 60 ($\text{Co}60$) que se produce al bombardear $\text{Co}59$ natural estable con neutrones (Sandle, 2013) y es ampliamente utilizado en la investigación experimental en células vegetales, en las aplicaciones de la tecnología de alimentos y en radiología (Fan et al., 2014; Gudkov et al., 2019; Amirikhah et al., 2019). Los rayos gamma interactúan con la materia a través de dos procesos significativos el efecto Compton y el efecto fotoeléctrico (Obodovski, 2019) ionizando átomos y moléculas, por ello actúan de forma indirecta produciendo radicales libres o las sustancias reactivas de oxígeno por sus siglas en inglés (ROS), consecuentemente dañan los componentes celulares vegetales, proteínas, lípidos, carbohidratos y ácidos nucleicos (ADN y ARN) (Jan et al., 2012). Puede actuar de manera directa, cuando interactúan con el ADN y provocar cambios puntuales en el genoma (Caplin y Willey, 2018). La acumulación de estas mutaciones intraespecíficas en una planta superior, puede generar nuevas características genotípicas y fenotípicas (Gudkov et al., 2019). Con el aumento de la necesidad de introducir nuevas variedades de especies de plantas con cualidades ventajosas, los rayos gamma han sido utilizados para inducir variabilidad genética (Amri-Tiliouine et al., 2018).

Los especímenes con mutaciones presentan características mejoradas para enfrentar el estrés ambiental, para tener mayor rendimiento de producción, para ser más resistentes a enfermedades o para ser más resistentes a los efectos de agroquímicos (Corrales et al., 2019; Hong et al., 2014; Shuryak et al., 2019). Esta técnica resulta prometedora para inducir variedades genéticas mejoradas en los cultivos andinos ecuatorianos.

Por otra parte, la respuesta del organismo vegetal frente a los rayos gamma depende del grado de ionizaciones atómicas y moleculares, sienten estos los efectos biológicos. La comprensión de los efectos biológicos en vegetales es importante, debido a que las plantas están expuestas a radiación ionizante natural de los isótopos radiactivos, a los efectos experimentales en la variabilidad genética en diferentes organismos vegetales (Ludovici et al., 2020). Asimismo, es de interés debido al

desarrollo de las plantas a altas latitudes como el cultivo andino de la quinua a 3200 m.s.n.m, que están expuestas a mayor dosis de radiación cósmicas, siendo el rango del ultravioleta el más representativo (Huarancca et al., 2018), y el aumento de las investigaciones en la agricultura en la creciente exploración espacial (De Micco et al., 2011; Obodovski, 2019; Prasad et al., 2020).

Los granos andinos tienen cualidades agrícolas y nutricionales excepcionales (Mujica y Jacobsen, 2006). Los cultivos tienen alta capacidad de adaptación por su variabilidad genética, en diferentes pisos climáticos, suelos pobres, condiciones de temperatura y fertilidades adversas. Por la parte nutricional, se ha determinado que los granos como la quinua (*Chenopodium quinoa*), la maca (*Lepidium meyenii*) el amaranto (*Amaranthus caudatus*) y el chocho (*Lupinus mutabilis*), contienen altos niveles de aminoácidos esenciales, vitaminas y minerales. Además, los cultivos altoandinos están expuestos a cambios bruscos de temperatura, altos niveles de radiación UV (Fuentes et al., 2019). Estas cualidades hacen que estos granos sean considerados como candidatos idóneos para la posible producción de alimentos en las futuras exploraciones espaciales (Douglas et al., 2020).

Además, los efectos beneficiosos o perjudiciales de la radiación dependen de la calidad de dosis, tiempo de exposición y las características de la especie como la arquitectura de tejidos y la estructura genética (Kovács y Keresztes, 2002; Kim, et al., 2019; De Micco et al., 2011; Amirikhah et al., 2019). Los efectos perjudiciales de la radiación y la radioresistencia vegetal se evidencia en los estudios post irradiación de los desastres nucleares de Chernobyl y Fukushima (Ludovici et al., 2020). Las plantas resultaron ser organismos radioresistentes que se adaptan, se ajustan y regulan sus procesos bioquímicos, fisiológicos para mantener la estabilidad genómica y fenotípica (Amirikhah et al., 2019; Beresford et al., 2016).

La radiación gamma se ha utilizado en diferentes áreas de la industria agrícola en la conservación y protección de los productos agrícolas contra agentes microbianos como técnica física fitosanitaria no térmica y sin residuos (Gomes et al., 2009), o como técnica inhibidora de germinación de los productos post cosecha (Kudo, 2011). La eficacia de la técnica ha sido probada en varios productos agrícolas y en diferentes microorganismos patógenos (Shankar et al., 2020; Young et al., 2006, Song et al., 2019).

La agricultura enfrenta desafíos como la resistencia de plagas de una gran variedad de cultivos, el efecto del cambio climático, la degradación de los suelos y la pérdida de diversidad de cultivos (Mie et al., 2017; Zulfiqar et al., 2019; Achari y Kowshik, 2018). Por otra parte, las pérdidas o los bajos

rendimientos de los cultivos andinos por infecciones con patógenos requieren ser tratados con métodos que sean amigables con el ambiente (Turtoi, 2013), debido a que el empleo de agroquímicos induce a los patógenos a crear resistencia, lo que implica aplicar agroquímicos de mayor toxicidad o elevar las tasas de exposición, causando toxicidad al medio ambiente y a los agricultores (Mishra et al., 2020; RaheliNamin et al., 2016; Del Prado-Lu, 2007) asimismo, se tiene otros impactos de contaminación en el aire y la alteración de biodiversidad útil.

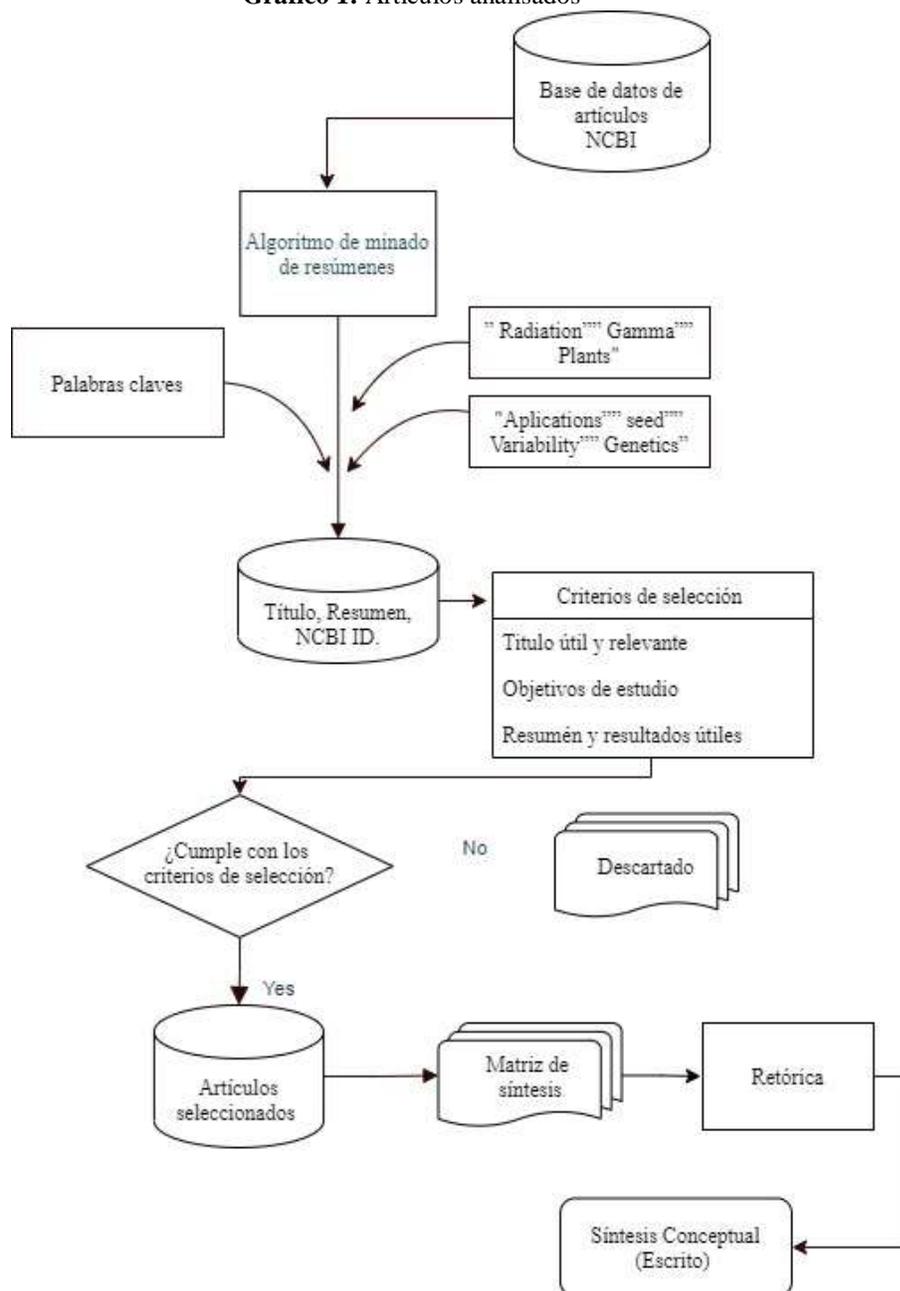
Los rayos gamma para el control de plagas de los cultivos de interés, resulta prometedor por la capacidad de inducir variedades mejoradas. Además, por considerarse una técnica amigable con el medio ambiente debido a que la radiación es una técnica física y no implica contaminación al ambiente (Young et al., 2006; De Micco et al., 2011). Las plantas sometidas a irradiación tienen varios mecanismos de defensa en contra de la radiación, mientras que la radiosensibilidad del patógeno es inversamente proporcional al tamaño y a la complejidad del microorganismo. La inactivación ocurre cuando los rayos gamma afectan directamente al material genético y sus componentes moleculares. Finalmente inhibe la proliferación de patógeno (Hong et al., 2014 ;Gudkov et al., 2019).

Metodología

El estado del arte de la radiación ionizante gamma y usos actuales en ciencias agrícolas se realizó mediante un análisis del estado de la información actual del objeto de investigación. Los artículos científicos se obtuvieron de la base de datos de PubMed suscritos al Centro de Investigaciones Nacional para la información biotecnológica (NCBI) (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) mediante la adaptación de un algoritmo de minado en Google Colab escrito en Phyton por Paula Martínez (https://github.com/paulamartingonzalez/Targeted_Literature_Reviews_via_webscraping). Este algoritmo permite en base a palabras claves (“query”) extraer y almacenar artículos científicos en una hoja de cálculo. Este documento contiene para cada artículo: títulos, el identificador único del NCBI y el resumen. Las palabras claves utilizadas para esta revisión fueron:”radiation”” gamma”” plants”” applications”” seed”” variability”” genetics””pathogens”. Para seleccionar los artículos uno de los aspectos considerados fue la relación directa con el tema de investigación. Además, se analizaron los artículos científicos mediante una matriz de análisis como indica la figura 1.

Para el análisis de resultados se organizó la información en tres subtemas: 1) Técnica Fitosanitaria 2) Irradiación en semillas 3) Mecanismos de defensa de las células vegetales, debido a que detalla la información de los artículos científicos filtrados.

Gráfico 1: Artículos analizados



Fuente: Autores, 2021

Resultados

1. Técnica Fitosanitaria

La irradiación gamma en productos agroalimentarios se utiliza debido a la capacidad de penetración en la materia. La fuente de isótopos radiactivos como el Cobalto 60 y el Cesio 137, son los más utilizados para esta aplicación. La radiación gamma es una técnica física no térmica, que no deja residuos (Jeong y Kang, 2017; Guoping et al., 2015), utilizada para inactivar microorganismos en la agricultura (Jeong y Choi, 2017) debido a que tiene suficiente energía para iniciar roturas en la doble hebra de ADN e inducir la producción de sustancias reactivas de oxígeno por sus siglas en inglés (ROS) que provoca cambios en los componente moleculares, el metabolismo y en los mecanismos de defensa del microorganismo (Jan et al., 2012), que resultan letales para las estructuras bacterianas y fúngicas (Correa et al., 2019). Este mecanismo sirve para controlar microorganismos patógenos en alimentos, disminuye la carga microbiana y permite el almacenamiento prolongado de los agroalimentos (Young et al., 2006; Fan y Sokorai, 2008; Jan et al., 2012; Molina et al., 2020).

Además, la respuesta de los microorganismos frente a la irradiación gamma está asociada a varios factores como la composición del medio de irradiación por la presencia de protectores o sensibilizadores, atmósfera de irradiación como aire, nitrógeno, vacío, temperatura, contenido de agua en la célula, complejidad y edad de los microorganismos y la tasa de dosis (Verde et al., 2016). Por otra parte, las bacterias y los hongos son organismos radiosensibles, razón por la cual son inactivados con dosis de rango bajo y medio (0 a 5 kGy) de acuerdo con los diferentes factores asociados. Los virus han presentado radioresistencia por los mecanismos desarrollados para reparar los daños inducidos. Sin embargo ha resultado efectivo inactivar al virus con dosis altas (> 10 kGy), actúa en la estructura y degradación del virión (Tallentire, 1980; Rose, 1992; Feng et al., 2011). En el caso de la inactivación del Norovirus, causante de enfermedades gastrointestinales, disminuyeron la carga viral en un 93,6% en fresa con una dosis de 20 kGy. El efecto en las fresas en este nivel de dosis fue la separación de la pared celular y la membrana citoplasmática (Molina et al, 2020) de tal manera que afecta a las cualidades sensoriales del producto. Las enfermedades transmitidas por alimentos se originan en su mayoría por bacterias, hongos y mohos y en menor proporción por infecciones virales (Pimenta et al., 2016; Sommers et al., 2016) por lo tanto, la irradiación gamma resulta una técnica prometedora para el control de la calidad higiénica de los productos agrícolas postcosecha.

Tabla 1: Radiación gamma como técnica fitosanitaria en productos agrícolas

Bacterias y Hongo	Dosis kGy	Carga microbiana		Temperatura °C	Producto	Referencia
		Inicial (Log CFU/g)	Final (Log CFU/g)			
<i>Escherichia coli</i>	2	7.31	3.04	10°, 20°, 30°	Pepino	(Young et al.,2006)
	3	7.31	DL			
	2	7.37	3.24, 3.51	10°, 20°, 30°	Espinaca condimentada	
	3	7.37	DL			
<i>Escherichia coli</i>	1	7.0	3.0	15°	Hojas de Lechuga	(Gomes et al., 2009)
	5	-	DL	20°, 30°	Nueces	(Song et al., 2019)
<i>Salmonella typhimurium</i>	2	7.38	3.03	10°, 20°, 30°	Pepino	(Young et al.,2006)
	3	7.38	DL			
	2	7.30	DL	10°, 20°, 30°	Espinaca condimentada	(Young et al.,2006)
	3	7.30	DL			
<i>Salmonella typhimurium</i>	5	-	DL	20° - 30°	Nueces	(Song et al., 2019)
	5	-	DL	20° - 25°	Nueces	(Song et al., 2019)
<i>Staphylococcus aureus</i>	2	7.51	3.38	10°, 20°, 30°	Pepino	(Young et al.,2006)
	3	7.38	DL			
	2	7.30	315	10°, 20°, 30°	Espinaca condimentada	
	3	7.30	DL			
<i>Listeria ivanovii</i>	2	7.25	DL	10°, 20°, 30°	Pepino	(Young et al.,2006)
	3	7.25	DL			
	2	7.30	31.0	10°, 20°, 30°	Espinaca condimentada	
	3	7.30	DL			
<i>Bacillus cereus</i>	1.5	6.20	DL	20° - 30°	Grano de Arroz	
<i>Paenibacillus amylolyticus</i>	1.5	5.0	DL	20°-30°	Grano de Arroz	(Shankar et al., 2020)
<i>Aspergillus niger</i>	2,4	4.5	DL	20°-30°	Granos de arroz	(Shankar et al., 2020)

DL: Límite de detección.100 UFC/g

Fuente: Autores, 2020

Por otra parte, el aumento de enfermedades transmitidas por alimentos en productos frescos es un problema de salud pública Mundial. En Ecuador en el año 2019 se registraron 9419 casos de infecciones bacterianas causantes de trastornos gastrointestinales (Ministerio de Salud Pública, 2019). Para enfrentar esta problemática mundial, en las últimas décadas, los países desarrollados han empleado radiación ionizante gamma como técnica fitosanitaria para inactivar a los microorganismos infecciosos como se indica en la tabla 1 que en el grupo de las bacterias como: E. coli, S. typhimurium, S. aureus, L. ivanovi, B. cereus, P. amylolyticus, en los diferentes productos frescos como: pepino, espinaca, lechuga, nueces y arroz, la dosis de irradiación fue en un rango de 1 a 5 kGy, a diferentes

escalas de temperatura, parámetro que influye en la inactivación. La inactivación por debajo del límite de detección en los agroalimentos se logra como una dosis media de 3 kGy. El hongo *A. niger* en las semillas de arroz se reduce a límites de detección con una dosis de 2,4 kGy. Estos productos fueron controlados con eficacia la proliferación de la carga microbiana, de tal manera que esta técnica potencialmente se utiliza en la etapa de almacenamiento segura de los agroalimentos como indica la tabla 1.

Los cambios químicos estructurales en los productos frescos sometidos a radiación tienen dependencia directa con la dosis suministrada, es decir, a dosis baja se evidencia que no existe alteración en los componentes moleculares y tampoco dejan residuos en comparación con los métodos de conservación química (Mukhopadhyay et al., 2013). Estudios realizados en las verduras recién cortadas como: lechuga, perejil, cebolla, brócoli, espinaca, apio, tomate y zanahoria demostraron que toleran una dosis de 1 kGy sin provocar cambios en la apariencia, textura y aroma, sin embargo los resultados indican leves diferencias en la concentración de vitamina comparando con las de control (0 kGy), por ejemplo, en zanahorias existió una reducción de 92.6 a 88.6 $\mu\text{g/g}$, en el brócoli de 925.9 a 902.3 $\mu\text{g/g}$ y en la espinaca 264.8 a 197.8 $\mu\text{g/g}$ (Jeong & Kang, 2017). La tendencia de reducción se mantiene para las demás verduras, dando resultados efectivos para la conservación de productos comerciables que requieran de gran tiempo de almacenamiento, seguridad microbiana y conservación de las cualidades sensoriales.

En los productos andinos reportan pérdidas en la etapa de almacenamiento en productos como: quinua, amaranto y maca, por los microorganismos patógenos como las bacterias y los hongos que reducen la calidad nutricional del grano y el rendimiento, además de incrementar el índice de infecciones por alimentos contaminados (Meyhuay, 2000).

2. Irradiación en semillas

La mutagénesis inducida por el método físico empleando radiación ionizante gamma puede incidir de diferentes maneras de exposición como propágulos, semillas, tejidos y órganos de las plantas (Horn et al., 2016) o crear genes potenciales para el mejoramiento genético y la producción a corto plazo a diferencia de la mutación natural o los cruces controlados (Tulmann, 2011; Odeigah, 1998; Kodym y Afza, 2003).

La evaluación de la radiación gamma con dosis bajas en semillas previa a la siembra tiene efectos estimulantes y beneficios en rasgos agronómicos en varias plantas como la altura, madurez precoz, la resistencia a las roturas de semillas, la resistencia a enfermedades, el rendimiento, el crecimiento y

desarrollo de las plantas (Yasmin et al., 2020; Horn et al., 2016). Los efectos estimulantes están relacionados con la activación de la síntesis de proteínas como indica la Tabla 2. En el caso de la arveja los parámetros de crecimiento resultaron efectivos con una dosis de 30 Gy. El aumento del contenido de clorofila guarda relación con la actividad eficaz del gen de la proteína de unión de la clorofila a/b (Cab). Para este caso reportaron 158,4µg/FM (masa fresca) medida 28 días después de la siembra, lo cual implica la estimulación en la fotosíntesis, sin embargo, las muestras irradiadas con dosis mayores a 70 Gy inhibieron los parámetros de crecimiento y el desarrollo.

En la evaluación de semillas de maíz (*Zea mays*) con dosis > 100 Gy obtuvieron inhibición en el porcentaje de germinación afectando al desarrollo normal de la planta, los niveles de clorofila disminuyeron en 67,27µg/FM que equivale en un 27% comparada con el control (Marcuet al., 2013b).

Tabla 2: Efectos de la radiación gamma en semillas

Dosis Absorbida (Gy)	Semillas	Efectos	Referencia
50	Planta Perenne	-Incremento en el nivel de clorofila -Incremento de los pigmentos fotosintéticos	(Amirikhah et al., 2019)
150	Flores (<i>Lathyrus chrysanthus Boiss</i>)	-Aumento del porcentaje de germinación en 62,4%	(Beyaz et al., 2016)
30	Arveja (<i>Lactuca sativa</i>)	-Aumento del porcentaje de germinación (25%). -Aumento de índice de germinación (75%). -Incremento del contenido de clorofila (28%).	(Marcu et al., 2013a)
400	Amaranto (<i>Amaranthus caudatus</i>)	-Mayor producción semillas	(Gómez et al., 2009)
300	Cebada (<i>Hordeum vulgar</i>)	- Incremento de la clorofila en 91% -Madurez Alterada -Mayor producción de semillas	(Gómez et al., 2009)
250	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>).	-Alto rendimiento -Altura más corta	(Kim, et al., 2019)

Fuente: Autores, 2021

El tratamiento de las semillas secas de Cebada (*Hordeum vulgar*) y Amaranto (*Amaranthus caudatus*) revelaron que los genotipos inducidos mostraron características mejoradas en la morfología de la planta debido al alto porcentaje de producción de semillas. Por otra parte, el efecto de la irradiación gamma tiene impactos positivos para el desarrollo de plantas resistentes a microorganismos

patógenos. Han reportado que el tratamiento de semillas de cebada tiene resistencia al hongo (roya amarilla). Asimismo, la variedad desarrollada de trigo mostró resistencia a la roya negra, enfermedad mundial que causa pérdidas en el rendimiento en un 40% al 100% (Li y Wang, 2009; Jiang et al., 2020).

El tratamiento en flores (*Lathyrus chrysanthus* Bois) con dosis de 150 Gy, estimularon eficientemente la germinación pero causó una reducción del 52,4% del total de clorofila en comparación con las muestras de control, influyendo directamente en la supervivencia y la fisiología vegetal (Beyaz et al., 2016). Además la interacción de la planta Perenne y el hongo endófito *Epichloë* fue afectada por la irradiación gamma en una dosis de 50 Gy, disminuyendo el microorganismo, y el efecto mutagénico en la planta afectó al crecimiento y al desarrollo. La dependencia de los efectos mutagénicos está relacionada con el nivel de dosis aplicada y las condiciones fisiológicas de las semillas de cada especie vegetal. En general, la dosis absorbida para esta aplicación se encuentra en un rango de 0.01 a 1 kGy. La irradiación gamma evita la germinación y brotes de raíces en productos como las papas, ajos y cebollas, debido a que las células y los tejidos en el proceso de almacenamiento son radiosensibles de tal manera que inactiva las divisiones celulares, detiene la germinación y mantiene el producto en estado fresco. La dosis adecuada para la papa es de 0.06 a 0.15 kGy, para el ajo y la cebolla se requiere de 0.02 a 0.15 kGy (Kudo, 2011), resultando así, una aplicación importante para mantener el buen estado de los productos alimentarios en post cosecha, incluso estimulando las semillas de siembra. Otro aspecto importante es la resistencia de las semillas a la radiación en comparación con los organismos vegetativos en desarrollo (Gudkov et al., 2019).

3. Mecanismos de defensa de las células vegetales

Las plantas tienen mecanismos para protegerse del estrés ambiental, han evolucionado de tal manera que pueden soportar altas dosis de radiación efectuando ajustes bioquímicos y fisiológicos (Kim et al., 2012). Son organismos vivos resistentes a la radiación ionizante debido a que la mayoría de las plantas toleran dosis de 50 Gy, mientras que para el ser humano una dosis de 5 Gy resulta letal, además existen plantas resistentes que toleran hasta 1000 Gy (Kim et al., 2019). La radiación gamma induce estrés e influye en la genética de toda la planta para generar variedades genéticas mejoradas, que potencialmente puedan mejorar los cultivos andinos y expandir la producción a nivel global (Naito et al., 2005).

Los efectos a nivel genético inducen cambios estructurales y funcionales en la molécula del ADN, causados por las alteraciones en la expresión genética y pueden ser de tres maneras; (1) intergénico

o mutación genética puntual (2) intergénético o mutación cromosómica estructural y (3) cambios en el número de cromosomas o mutación genómica. Los efectos de manera indirecta son causados por las sustancias reactivas de oxígeno (ROS) compuestos resultantes de la hidrólisis del agua, que provoca estrés oxidativo del 70% al 80%, además la acumulación de estas sustancias incide en la estructura de la cromatina, modificaciones de base y roturas en la doble hebra (Kim et al., 2012). El efecto de forma directa ocurre en las rupturas de la doble hebra del ADN y ocurre del 20% al 30% (Caplin y Willey, 2018; Jung et al., 2019; Sidler et al., 2015).

Los mecanismos que implementan las células vegetales para contrarrestar los efectos de las especies reactivas de oxígeno (ROS) es aumentando la actividad de las antioxidasas como: peroxidasa (POD), catalasa (CAT), Ascorbato peroxidasa (APX), super peróxido dismutasa (SOD) y el glutatión reductasa (Gudkov et al., 2019; Jung et al., 2019; Kim et al., 2019). Así también, las plantas poliploides tienen varios juegos de cromosomas que pueden ocultar las mutaciones, por la presencia de las múltiples copias que examinan el gen. Experimentos realizados en la Cebada (*Hordeum vulgare*) y el trigo (*Triticum aestivum*) en mutaciones inducidas por irradiación gamma, evidenciaron que la poliploidía confiere estabilidad fenotípica (De Micco et al., 2011). Asimismo, los efectos a nivel genético son las aberraciones cromosómicas y depende de las roturas de la doble cadena de ADN y la capacidad de reparación (Ryu et al., 2018).

La tabla 3 indica los efectos de la radiación gamma en diferentes sistemas vegetales. En semillas y plántulas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) y la mala hierba (*Arabidopsis thaliana*) demostraron que el mecanismo de reparación del ADN es por recombinación homogénea y lograron restaurar la función genética. En una irradiación crónica en las semillas del arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum durum*) y tabaco (*Nicotiana tabacum*) con dosis mayores a 0.5 kGy presenta aberraciones cromosómicas. Además, son difíciles de caracterizar, debido a que el cariotipo de las plantas es más complejo y los cromosomas de las diferentes especies son similares en tamaño, forma y patrón de bandas. Por otra parte, la acumulación de los micronúcleos en plántulas de arveja (*Pisum sativum*) demostró la dependencia de la calidad de dosis y la resistencia de las células vegetales al estrés abiótico por la intensa actividad celular en un estado postirradiación. Además, la supervivencia celular en el tabaco (*Nicotiana tabacum*) tras la irradiación en los protoplastos indica la radioresistencia con una LET entre 80 y 310 keV/ μm , con una eficiencia relativa biológica (RBE) para una supervivencia celular

del 10% y una dosis absorbida de 47,2 Gy. Estas investigaciones indican los mecanismos de resistencia ante irradiación a nivel genético y molecular.

Además, la organización de los tejidos vegetales confiere cualidades de organismos radioresistentes debido a la actividad multicelular que permite la reparación de células y tejidos. Asimismo, los radicales libres que causan daños en la composición celular y que afecta a la morfología, anatomía, bioquímica y fisiología, son reducidos por la producción de enzimas antioxidantes (Jan et al., 2012).

Tabla 3: Efectos genéticos de la radiación ionizante gamma en diferentes sistemas vegetales

Especie	Sistema vegetal	Efecto	Referencia
Planta herbácea (<i>Arabidopsis Thaliana</i>) Tabaco (<i>Nicotiana Tabacum</i>)	Semillas y plántulas	Recombinación homologa	(Kovalchuk et al., 2000)
Tabaco Tex-Mex (<i>Nicotiana plumbaginifolia</i>)	Protoplastos	Supervivencia de la célula	(Derks y Hall, 1992)
Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Protoplastos	Supervivencia de la célula	(Hell, 1983)
Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Protopastos	No repara el daño en la doble cadena del ADN	(Manova y Gruszka, 2015)
Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Semillas	Aberración cromosómica	(Li et al., 2019)
Arveja (<i>Pisum sativum</i>)	Plántulas	Micronucleido	Vasilenko y Sidorenko 1995
Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Semillas	Aberración cromosómica en los diferentes tamaños de las raíces	(Zanzibar y Sudrajat, 2016)
Trigo duro (<i>Triticum durum</i>)	Semillas	Aberraciones cromosómicas en la generación M1	(Cao et al., 2009)

Fuente: Autores, 2021

Los efectos de los rayos gamma en una exposición invivo provocan ruptura en la laminilla media de la pared celular, afectando al desarrollo y la función de los plástidos, en consecuencia, daños en el aparato fotosintético, dilatación a los tilacoides, modulación al sistema antioxidante y la acumulación de compuestos fenólicos (Kim et al., 2015; Jan et al., 2012;)(Gudkov et al., 2019), estos efectos guardan estrecha relación con la dosis absorbida en diferentes organismos vegetales como indica la

tabla 4 y muestra la disminución y el crecimiento en cuanto al tamaño de las hojas y la características de crecimiento. Asimismo, han reportado efectos beneficios como la estimulación del crecimiento de las hojas primarias, aumento de la altura, diferencias en los índices de semillas, crecimiento y desarrollo (Kim et al.,2011; citados en Gudkov et al. 2019). La respuesta de la planta a la irradiación gamma es semejante a la senescencia foliar, activan genes y antioxidantes para mantener la estabilidad genotípica y fenotípica (Naito et al., 2005;Sidler et al., 2015).

En las plantas del trigo (*Triticum aestivum*) reportan disminución en los pigmentos fotosintéticos como la clorofila y los carotenoides para desarrollar dos tipos de pigmentos protectores: la antocianina y los flavonoides. Por otra parte, en *Arabidopsis thaliana*, una especie dicotiledónea actúa activando la biosíntesis de la antocianina que regula dos grupos de genes de biosíntesis temprana por sus siglas en inglés (EGB) y genes de biosíntesis tardía (LBG) como una manera de controlar los pigmentos fotosintéticos y protectores de la planta, lo cual indica una regulación sólida en resistencia a los efectos de la radiación (Hong et al., 2014; Alghamian et al., 2017)

Tabla 4: Efectos de la RI gamma en plantas in vivo

Especie	Familia	Efecto	Dosis Absorbida (Gy)	Tasa de Dosis / Tiempo de exposición	Referencia
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Poaceae	-Disminuye la altura -Cambios de color en las hojas -Aumento de enzimas antioxidantes	50	0.5Gy/h -2 semanas 0.25 Gy/h- 4 semanas 0.16 Gy/h- 6 semanas	(Hong et al.,2014)
Orquídea (<i>Cymbidium</i>)	Orchidaceae	-Crecimiento dependiente de la dosis -Disminución en la tasa de supervivencia	16.1, 23.6, 37.9, 40.0	1, 4,8, 16, 24 h / exposición	(Kim et al. 2019)
Arroz salvaje de Manchuria (<i>Zizania latifolia</i>)	Poaceae	- Disminución en la altura -Inhibición del crecimiento -Disminución en el número de hojas, tallos -Contenido de clorofila -Actividades antioxidantes	25 50 100	Etapa de 6 hojas 150 a 200 plántulas Tasa de dosis de 1,0 Gy/min	(Fan et al., 2014a)

Fuente: Autores, 2021

Aunque las plantas tienen mecanismos de protección a nivel genético y molecular frente a la radiación, existen organismos que son radiosensibles y se evidencia en el cambio de la morfología del vegetal. En general, los cambios inducidos son regulados y dependen de la calidad de la dosis y las características de la planta objetivo.

Conclusiones

La técnica fitosanitaria por irradiación gamma es prometedora por la capacidad de penetración en los productores agrícolas e incidir en el metabolismo de agentes patógenos, causantes de enfermedades transmitidas por alimentos, el mecanismo de inactivación es óptimo para el almacenamiento de productos postcosecha.

Las semillas irradiadas inducen fitomejoramiento, con características agronómicas favorables como las variedades de trigo y cebada que mostraron resistencia a enfermedades, mayor producción de semillas, aumento de pigmentos fotosintéticos y estimulación en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Los efectos de la radiación ionizante gamma inducen cambios de manera directa en la molécula del ADN y de forma indirecta por la producción de sustancias reactivas de oxígeno (ROS) originadas por la radiólisis del agua, sin embargo, las plantas modulan el estrés mutagénico por irradiación mediante recombinación homóloga, activación de genes reguladores y producción de enzimas antioxidasas. Además, la resistencia de los cultivos andinos a factores abióticos podría minimizar los efectos adversos de la radiación y ser regulados por la dependencia de la tasa de dosis.

Referencias

1. Achari, G. A., & Kowshik, M. (2018). Recent Developments on Nanotechnology in Agriculture: Plant Mineral Nutrition, Health, and Interactions with Soil Microflora [Review-article]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(33), 8647–8661. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>
2. Alghamian, Y., Abou Alchamat, G., Murad, H., & Madania, A. (2017). Effects of γ -radiation on cell growth, cell cycle and promoter methylation of 22 cell cycle genes in the 1321NI astrocytoma cell line. *Advances in Medical Sciences*, 62(2), 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2017.03.004>

3. Amirikhah, R., Etemadi, N., Sabzalian, M. R., Nikbakht, A., & Eskandari, A. (2019). Physiological consequences of gamma ray irradiation in tall fescue with elimination potential of *Epichloë* fungal endophyte. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182(June), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109412>
4. Amri-Tiliouine, W., Laouar, M., Abdelguerfi, A., Jankowicz-Cieslak, J., Jankuloski, L., & Till, B. J. (2018). Genetic variability induced by gamma rays and preliminary results of low-cost TILLING on M2 generation of chickpea (*cicer arietinum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 871(October), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01568>
5. Beresford, N. A., Fesenko, S., Konoplev, A., Skuterud, L., Smith, J. T., & Voigt, G. (2016). Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *Journal of Environmental Radioactivity*, 157, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003>
6. Beyaz, R., Kahramanogullari, C. T., Yildiz, C., Darcin, E. S., & Yildiz, M. (2016). The effect of gamma radiation on seed germination and seedling growth of *Lathyrus chrysanthus* Boiss. under in vitro conditions. *Journal of Environmental Radioactivity*, 162–163, 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.006>
7. Cao, Y., Bie, T., Wang, X., & Chen, P. (2009). Induction and transmission of wheat-Haynaldia villosa chromosomal translocations. *Journal of Genetics and Genomics*, 36(5), 313–320. [https://doi.org/10.1016/S1673-8527\(08\)60120-4](https://doi.org/10.1016/S1673-8527(08)60120-4)
8. Caplin, N., & Willey, N. (2018). Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: From acute high doses to chronic low doses. *Frontiers in Plant Science*, 9(June), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
9. Corrales Lerma, R., Avendaño Arrazate, C. H., Morales Nieto, C. R., Santellano Estrada, E., Villarreal Guerrero, F., Melgoza Castillo, A., Álvarez Holguín, A., & Gómez Simuta, Y. (2019). Radiación gamma para inducción de mutagénesis en pasto rosado [*Melinis repens* (Willd.) Zizka]. *Acta Universitaria*, 29, 1–10. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1847>
10. Correa, W., Brandenburg, J., Behrends, J., Heinbockel, L., Reiling, N., Paulowski, L., Schwudke, D., Stephan, K., Martinez-de-Tejada, G., Brandenburg, K., & Gutschmann, T. (2019). Inactivation of Bacteria by γ -Irradiation to Investigate the Interaction with Antimicrobial Peptides. *Biophysical Journal*, 117(10), 1805–1819. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2019.10.012>

11. De Micco, V., Arena, C., Pignalosa, D., & Durante, M. (2011). Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants. *Radiation and Environmental Biophysics*, 50(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>
12. Del Prado-Lu, J. L. (2007). Pesticide exposure, risk factors and health problems among cutflower farmers: A cross sectional study. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-2-9>
13. Derks, F. H. M., & Hall, R. D. (1992). Effect of gamma irradiation on protoplast viability and chloroplast and damage in *lycopersicon peruvianum* with respect to donor recipient protoplast fusion. 32(3), 255–264.
14. Douglas, G. L., Zwart, S. R., & Smith, S. M. (2020). Space food for thought: Challenges and considerations for food and nutrition on exploration missions. *Journal of Nutrition*, 150(9), 2242–2244. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa188>
15. Fan, J., Shi, M., Huang, J. Z., Xu, J., Wang, Z. D., & Guo, D. P. (2014). Regulation of photosynthetic performance and antioxidant capacity by ^{60}Co γ -irradiation in *Zizania latifolia* plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 129, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.013>
16. Fan, X., & Sokorai, K. J. B. (2008). Retention of quality and nutritional value of 13 fresh-cut vegetables treated with low-dose radiation. *Journal of Food Science*, 73(7). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00871.x>
17. Feng, K., Divers, E., Ma, Y., & Li, J. (2011). Inactivation of a human norovirus surrogate, human norovirus virus-like particles, and vesicular stomatitis virus by Gamma irradiation. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(10), 3507–3517. <https://doi.org/10.1128/AEM.00081-11>
18. Fuentes, C., Perez-Rea, D., Bergenståhl, B., Carballo, S., Sjöo, M., & Nilsson, L. (2019). Physicochemical and structural properties of starch from five Andean crops grown in Bolivia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.120>
19. Gomes, C., Da Silva, P., Moreira, R. G., Castell-Perez, E., Ellis, E. A., & Pendleton, M. (2009). Understanding *E. coli* internalization in lettuce leaves for optimization of irradiation treatment. *International Journal of Food Microbiology*, 135(3), 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.08.026>

20. Gómez-Pando, L., Eguiluz, A., Jimenez, J., Falconí, J., & Heors Aguilar, E. (2009). Barley (*Hordeum vulgare*) and Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) Improvement by Mutation Induction in Peru. *Induced Plant Mutations in the Genomics Era*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 330–332.
21. Gudkov, S. V., Grinberg, M. A., Sukhov, V., & Vodeneev, V. (2019). Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 202(January), 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001>
22. Guoping, Z., Lili, R., Ying, S., Qiaoling, W., Daojian, Y., Yuejin, W., & Tianxiu, L. (2015). Gamma irradiation as a phytosanitary treatment of *bactrocera tau* (Diptera: Tephritidae) in pumpkin fruits. *Journal of Economic Entomology*, 108(1), 88–94. <https://doi.org/10.1093/jee/tou013>
23. Hell, K. G. (1983). Survival of *Nicotiana tabacum* wisconsin-38 plants regenerated from gamma irradiated tissue cultures. 23(2), 139–142.
24. Hong, M. J., Kim, J. B., Yoon, Y. H., Kim, S. H., Ahn, J. W., Jeong, I. Y., Kang, S. Y., Seo, Y. W., & Kim, D. S. (2014). The effects of chronic gamma irradiation on oxidative stress response and the expression of anthocyanin biosynthesis-related genes in wheat (*Triticum aestivum*). *International Journal of Radiation Biology*, 90(12), 1218–1228. <https://doi.org/10.3109/09553002.2014.934930>
25. Horn, L. N., Ghebrehiwot, H. M., & Shimelis, H. A. (2016). Selection of novel cowpea genotypes derived through gamma irradiation. *Frontiers in Plant Science*, 7(MAR2016), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00262>
26. Huaranca Reyes, T., Scartazza, A., Castagna, A., Cosio, E. G., Ranieri, A., & Guglielminetti, L. (2018). Physiological effects of short acute UVB treatments in *Chenopodium quinoa* Willd. *Scientific Reports*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18710-2>
27. Jan, S., Parween, T., Siddiqi, T. O., & Mahmooduzzafar, X. (2012). Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews*, 20(1), 17–39. <https://doi.org/10.1139/a11-021>
28. Jeong, R. D., & Choi, H. S. (2017). Inactivation of tobacco mosaic virus using gamma irradiation and its potential modes of action. *Acta Virologica*, 61(2), 223–225. https://doi.org/10.4149/av_2017_02_14

29. Jeong, S. G., & Kang, D. H. (2017). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-bake cookie dough by gamma and electron beam irradiation. *Food Microbiology*, 64, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.12.017>
30. Jiang, C., Kan, J., Ordon, F., Perovic, D., & Yang, P. (2020). Bymovirus-induced yellow mosaic diseases in barley and wheat: viruses, genetic resistances and functional aspects. *Theoretical and Applied Genetics*, 133(5), 1623–1640. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03555-7>
31. Jung, I. J., Ahn, J. W., Jung, S., Hwang, J. E., Hong, M. J., Choi, H. Il, & Kim, J. B. (2019). Overexpression of rice jacalin-related mannose-binding lectin (OsJAC1) enhances resistance to ionizing radiation in *Arabidopsis*. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2056-8>
32. Kim, D. Y., Hong, M. J., Park, C. S., & Seo, Y. W. (2015). The effects of chronic radiation of gamma ray on protein expression and oxidative stress in *Brachypodium distachyon*. *International Journal of Radiation Biology*, 91(5), 407–419. <https://doi.org/10.3109/09553002.2015.1012307>
33. Kim, J. H., Ryu, T. H., Lee, S. S., Lee, S., & Chung, B. Y. (2019). Ionizing radiation manifesting DNA damage response in plants: An overview of DNA damage signaling and repair mechanisms in plants. *Plant Science*, 278(September 2018), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.10.013>
34. Kim, Sang Hoon, Jo, Y. D., Ryu, J., Hong, M. J., Kang, B. C., & Kim, J. B. (2019). Effects of the total dose and duration of γ -irradiation on the growth responses and induced SNPs of a *Cymbidium* hybrid. *International Journal of Radiation Biology*, 96(4), 545–551. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1704303>
35. Kim, Sang Hoon, Kim, Y. S., Lee, H. J., Jo, Y. D., Kim, J. B., & Kang, S. Y. (2019). Biological effects of three types of ionizing radiation on creeping bentgrass. *International Journal of Radiation Biology*, 95(9), 1–6. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1619953>
36. Kim, Sun Hee, Song, M., Lee, K. J., Hwang, S. G., Jang, C. S., Kim, J. B., Kim, S. H., Ha, B. K., Kang, S. Y., & Kim, D. S. (2012). Genome-wide transcriptome profiling of ROS scavenging and signal transduction pathways in rice (*Oryza sativa* L.) in response to different types of ionizing radiation. *Molecular Biology Reports*, 39(12), 11231–11248. <https://doi.org/10.1007/s11033-012-2034-9>

37. Kodym, A., & Afza, R. (2003). Physical and chemical mutagenesis. *Methods in Molecular Biology* (Clifton, N.J.), 236(2), 189–204. <https://doi.org/10.1385/1-59259-413-1:189>
38. Kovács, E., & Keresztes. (2002). Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells. *Micron*, 33(2), 199–210. [https://doi.org/10.1016/S0968-4328\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0968-4328(01)00012-9)
39. Kovalchuk, I., Kovalchuk, O., & Hohn, B. (2000). Genome-wide variation of the somatic mutation frequency in transgenic plants. *EMBO Journal*, 19(17), 4431–4438. <https://doi.org/10.1093/emboj/19.17.4431>
40. Kudo, H. (2011). Radiation applications. In *Physics Today* (Vol. 7, Issue 4). <https://doi.org/10.1063/1.3051538>
41. Li, F., Shimizu, A., Nishio, T., Tsutsumi, N., & Kato, H. (2019). Comparison and characterization of mutations induced by gamma-ray and carbon-ion irradiation in rice (*Oryza sativa* L.) using whole-genome resequencing. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 9(11), 3743–3751. <https://doi.org/10.1534/g3.119.400555>
42. Li, H., & Wang, X. (2009). *Thinopyrum ponticum* and *Th. intermedium*: the promising source of resistance to fungal and viral diseases of wheat. *Journal of Genetics and Genomics*, 36(9), 557–565. [https://doi.org/10.1016/S1673-8527\(08\)60147-2](https://doi.org/10.1016/S1673-8527(08)60147-2)
43. Ludovici, G. M., Oliveira de Souza, S., Chierici, A., Cascone, M. G., d’Errico, F., & Malizia, A. (2020). Adaptation to ionizing radiation of higher plants: From environmental radioactivity to chernobyl disaster. *Journal of Environmental Radioactivity*, 222(July), 106375. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106375>
44. Manova, V., & Gruszka, D. (2015). DNA damage and repair in plants – From models to crops. *Frontiers in Plant Science*, 6(OCTOBER), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00885>
45. Marcu, D., Cristea, V., & Daraban, L. (2013). Dose-dependent effects of gamma radiation on lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata) seedlings. *International Journal of Radiation Biology*, 89(3), 219–223. <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.734946>
46. Marcu, D., Damian, G., Cosma, C., & Cristea, V. (2013). Gamma radiation effects on seed germination, growth and pigment content, and ESR study of induced free radicals in maize (*Zea mays*). *Journal of Biological Physics*, 39(4), 625–634. <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9322-z>

47. Meyhuay, M. (2000). QUINUA, Operaciones de Poscosecha. Organización de Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación (FAO), 35. <http://www.fao.org/3/a-ar364s.pdf>
48. Mie, A., Andersen, H. R., Gunnarsson, S., Kahl, J., Kesse-Guyot, E., Rembiałkowska, E., Quaglio, G., & Grandjean, P. (2017). Human health implications of organic food and organic agriculture: A comprehensive review. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 16(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4>
49. Ministerio de Salud Pública. (2019). Vigilancia Sive- Alerta Enfermedades Transmitidas Por Agua Y Alimentos Ecuador, Se 1-23, 2019. Subsecretaria De Vigilancia De La Salud Publica Direccion Nacional De Vigilancia Epidemiologica, 1, 1–6.
50. Molina-Chavarria, A., Félix-Valenzuela, L., Silva-Campa, E., & Mata-Haro, V. (2020). Evaluation of gamma irradiation for human norovirus inactivation and its effect on strawberry cells. *International Journal of Food Microbiology*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108695>
51. Mujica, A., & Jacobsen, S. (2006). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 449–457. <http://www.beisa.dk/Publications/BEISA Book pdfer/Capitulo 27.pdf>
52. Mukhopadhyay, S., Ukuku, D., Fan, X., & Juneja, V. K. (2013). Efficacy Of integrated treatment of Uv light and low-dose gamma irradiation on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *salmonella enterica* on grape tomatoes. *Journal of Food Science*, 78(7). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12154>
53. Naito, K., Kusaba, M., Shikazono, N., Takano, T., Tanaka, A., Tanisaka, T., & Nishimura, M. (2005). Transmissible and nontransmissible mutations induced by irradiating *Arabidopsis thaliana* pollen with γ -rays and carbon ions. *Genetics*, 169(2), 881–889. <https://doi.org/10.1534/genetics.104.033654>
54. Obodovskiy, I. (2019). Nuclei and Nuclear Radiations. *Radiation*, 41–62. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63979-0.00002-1>
55. Pimenta, A. I., Guerreiro, D., Madureira, J., Margaça, F. M. A., & Cabo Verde, S. (2016). Tracking human adenovirus inactivation by gamma radiation under different environmental conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(17), 5166–5173. <https://doi.org/10.1128/AEM.01229-16>

56. Prasad, B., Richter, P., Vadakedath, N., Mancinelli, R., Krüger, M., Strauch, S. M., Grimm, D., Darriet, P., Chapel, J. P., Cohen, J., & Lebert, M. (2020). Exploration of space to achieve scientific breakthroughs. *Biotechnology Advances*, 43, 107572. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107572>
57. RaheliNamin, B., Mortazavi, S., & Salmanmahiny, A. (2016). Optimizing cultivation of agricultural products using socio-economic and environmental scenarios. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5599-2>
58. Rose, K. S. B. (1992). Lower limits of radiosensitivity in organisms, excluding man. *Journal of Environmental Radioactivity*, 15(2), 113–133. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(91\)90047-J](https://doi.org/10.1016/0265-931X(91)90047-J)
59. Ryu, T. H., Kim, J. K., Kim, J. Il, & Kim, J. H. (2018). Transcriptome-based biological dosimetry of gamma radiation in *Arabidopsis* using DNA damage response genes. *Journal of Environmental Radioactivity*, 181(November 2017), 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.007>
60. Sandle, T. (2013). Gamma radiation. Sterility, Sterilisation and Sterility Assurance for Pharmaceuticals, 55–68. <https://doi.org/10.1533/9781908818638.55>
61. Shankar, S., Follett, P., Ayari, S., Hossain, F., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2020). Microbial radiosensitization using combined treatments of essential oils and irradiation- part B: Comparison between gamma-ray and X-ray at different dose rates. *Microbial Pathogenesis*, 143(February), 104118. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104118>
62. Shuryak, I., Tkavc, R., Matrosova, V. Y., Volpe, R. P., Grichenko, O., Klimenkova, P., Conze, I. H., Balygina, I. A., Gaidamakova, E. K., & Daly, M. J. (2019). Chronic gamma radiation resistance in fungi correlates with resistance to chromium and elevated temperatures, but not with resistance to acute irradiation. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47007-9>
63. Sidler, C., Li, D., Kovalchuk, O., & Kovalchuk, I. (2015). Development-dependent expression of DNA repair genes and epigenetic regulators in *Arabidopsis* plants exposed to ionizing radiation. *Radiation Research*, 183(2), 219–232. <https://doi.org/10.1667/RR13840.1>
64. Sommers, C. H., Scullen, O. J., & Sheen, S. (2016). Inactivation of uropathogenic *Escherichia coli* in ground chicken meat using high pressure processing and gamma radiation, and in purge

- and chicken meat surfaces by ultraviolet light. *Frontiers in Microbiology*, 7(APR), 8–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00413>
65. Song, W. J., Kim, Y. H., & Kang, D. H. (2019). Effect of gamma irradiation on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* on pistachios. *Letters in Applied Microbiology*, 68(1), 96–102. <https://doi.org/10.1111/lam.13095>
66. Tallentire, A. (1980). The spectrum of microbial radiation sensitivity. *Radiation Physics and Chemistry*, 15(1), 83–89. [https://doi.org/10.1016/0146-5724\(80\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0146-5724(80)90101-6)
67. Turtoi, M. (2013). Ultraviolet light treatment of fresh fruits and vegetables surface: A review. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 19(3), 325–337.
68. Verde, S. C., Silva, T., & Matos, P. (2016). Effects of gamma radiation on wastewater microbiota. *Radiation and Environmental Biophysics*, 55(1), 125–131. <https://doi.org/10.1007/s00411-015-0617-2>
69. Yashar, C. M. (2018). Basic principles in gynecologic radiotherapy. In *Clinical Gynecologic Oncology* (Ninth Edit). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-40067-1.00023-1>
70. Yasmin, K., Arulbalachandran, D., Dilipan, E., & Vanmathi, S. (2020). Characterization of ^{60}Co γ -ray induced pod trait of blackgram-A promising yield mutants. *International Journal of Radiation Biology*, 96(7), 929–936. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1748738>
71. Young Lee, N., Jo, C., Hwa Shin, D., Geun Kim, W., & Woo Byun, M. (2006). Effect of γ -irradiation on pathogens inoculated into ready-to-use vegetables. *Food Microbiology*, 23(7), 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2005.12.001>
72. Zanzibar, M., & J. Sudrajat, D. (2016). Effect of gamma irradiation on seed germination, storage, and seedling growth of *Magnolia champaca* L. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 3(2), 95–106. <https://doi.org/10.20886/ijfr.2016.3.2.95-106>
73. Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A., & Munné-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289(July). <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>