



**DISEÑO PLANTA DE IRRADIACIÓN PARA ALIMENTOS CON FINES
FITOSANITARIOS**

IRIS ESTER NARVÁEZ DEFETH

SAMUEL ESTEBAN PEÑALOZA CASTRO

JOSE DAVID ARROYO CHARRIS

MAURICIO PEÑALOZA MAZUERA

FUNDACIÓN TECNOLÓGICA AUTÓNOMA DE BOGOTÁ FABA

PROGRAMA ACADÉMICO

BOGOTÁ

2025-1

**DISEÑO PLANTA DE IRRADIACIÓN PARA ALIMENTOS CON FINES
FITOSANITARIOS**

**Iris Ester Narváez Defeth Código: 24052060
Samuel Esteban Peñaloza Castro Código: 24052083
Jose David Arroyo Charris Código: 24052039
Mauricio Peñaloza Mazuera Código: 24052084**

**Director e Investigador Principal
Marlly Yaneth Rojas Ortiz
Líder línea Sistemas Salud y Cuidado**

**CODIRECTOR DISCIPLINAR Y METODOLOGICO
Juan Ricardo Cubides Garzón
Biólogo Especialista en Gestión Ambiental
Magister en Epidemiología**

**Grupo de Investigación:
Diseño, Computación, Competitividad y Salud**

**FUNDACIÓN TECNOLÓGICA AUTÓNOMA DE BOGOTÁ FABA
PROGRAMA ACADÉMICO DE RADIOLOGIA E IMÁGENES DIAGNOSTICAS
BOGOTÁ
2025 – 1**

NOTA DE ACEPTACIÓN

TRABAJO DE GRADO

"Diseño de planta de irradiación de alimentos con fines fitosanitarios."

Calificación Cualitativa: **LAUREADO**

Calificación Cuantitativa: **5.0**



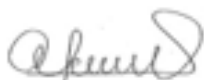
JURADO
Alenis Picón



JURADO
Manuel Andrés Ávila



CODIRECTOR DISCIPLINAR Y METODOLÓGICO
Juan Ricardo Cubides Garzón



DIRECTOR INVESTIGACIONES
Marilly Yaneth Rojas Ortiz



LIDER DE GRUPO DCC
Edgardo Samuel Barraza Verdesoto

Fecha: *Bogotá D.C. 24 de mayo de 2025*

DEDICATORIA

Queremos dedicar este trabajo de grado a Dios, a nuestras familias por su incondicional comprensión, dedicamos este proyecto a nuestros maestros asesores y empresas que nos ayudaron enseñaron con paciencia y dedicación.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro equipo de estudio queremos iniciar por agradecer profundamente a la Fundación Autónoma de Bogotá, a todas las personas e instituciones que han apoyado este proyecto.

Agradecemos a nuestras familias por la paciencia que han tenido en el proceso de estudios, en comprender el tiempo que hemos destinado para esta etapa de crecimiento profesional y personal.

Un especial agradecimiento para la Asociación Latinoamericana de Tecnología de la Irradiación (ALATI) por su valioso apoyo y orientación en el desarrollo de este proyecto.

También queremos agradecer al Texas A&M de la universidad de Texas, de Estados Unidos, la empresa e-Agro de Aguascalientes México, e-Foods Imports de Houston Texas Estados Unidos, también a International Nuclear Industry de Colombia por su colaboración y apoyo en la realización de este trabajo, fueron apoyo fundamental en la información para la preparación de este trabajo.

NOTA DE SALVEDAD INSTITUCIONAL

“La Fundación Tecnológica Autónoma de Bogotá, FABA, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético el mismo en aras de la búsqueda de la verdad y justicia”.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
ANEXOS	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2.1 DESCRIPCIÓN	15
2.2 FORMULACIÓN	15
2.3 SISTEMATIZACIÓN	15
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. OBJETIVOS	17
4.1 Objetivo General	17
4.2 Objetivo Específicos	17
5. MARCO REFERENCIAL	18
6. HIPÓTESIS:	19
7. METODOLOGÍA	20
7.1 Tipología de estudio	20

7.1.1	Propósito	20
7.1.2	Enfoque	20
7.1.3	Objeto en el área de conocimiento	20
7.1.4	Diseño	20
7.1.5	Seguimiento	20
7.1.6	Temporalidad	20
7.2	Unidad de estudio	20
7.2.1	Unidad de estudio	20
7.2.2	Universo	20
7.2.3	Muestra	20
7.2.4	Criterios de inclusión	20
7.3	Variables	20
7.3.1	Cualitativas o Cuantitativa	20
7.3.2	Elegir según corresponda al tipo de estudio	20
7.3.3	Independientes	20
7.3.4	Dependientes	20
7.4	Estrategia procedimental	20
7.4.1	Instrumentos	20
7.4.2	Recolección de información	20

7.4.3	Procesamiento para el análisis de la información	20
8	RESULTADOS	21
9	DISCUSIÓN	22
10	CONCLUSIONES	23
11	RECOMENDACIONES	24
12	PRESUPUESTO	25
13	CRONOGRAMA	26
14	BIBLIOGRAFIA	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 12.1 Presupuesto del proyecto	25
Tabla 13.1 Cronograma de actividades	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 7.1 Diagrama de flujo de la metodología	20
Figura 7.2 Esquema de blindaje de la sala de irradiación	34
Figura 7.3 Layout preliminar de la planta piloto	45
Figura 7.4 Comparación de tecnologías gamma, e-beam y rayos X	60

RESUMEN

Colombia enfrenta restricciones fitosanitarias que limitan la exportación de frutas exóticas a mercados como el de Estados Unidos. Ante esta problemática, el uso de tecnologías nucleares para la irradiación de alimentos surge como una solución eficaz. Este trabajo propone la instalación de una planta de irradiación con tecnología gamma basada en Cobalto-60, con una actividad de un millón de curios, que permita cumplir los requisitos internacionales de inocuidad, extender la vida útil de los productos y facilitar su exportación, diseñar un modelo técnico, económico y normativo para la implementación de una planta de irradiación de alimentos en Colombia, con el fin de cumplir los estándares fitosanitarios exigidos por el mercado estadounidense se empleó una metodología mixta, integrando el análisis documental de normas internacionales (IAEA, FAO, FDA), revisión de casos exitosos de plantas en Latinoamérica y Estados Unidos, cálculos técnicos para dimensionamiento del sistema y diseño del blindaje, así como un estudio financiero con proyecciones de inversión, operación y rentabilidad a diez años. También se propuso una distribución funcional del layout de la planta y se definió el perfil del talento humano requerido el estudio determinó que es viable establecer una planta de irradiación en Colombia con capacidad de operar 330 días al año en tres turnos, atendiendo a productores de frutas como mango, pitahaya, papaya y guanábana. Se estimó que, con una inversión de aproximadamente tres millones de dólares, la planta puede alcanzar retorno de inversión en el tercer año de operación, generando un impacto positivo en la competitividad del sector agroexportador.

PALABRAS CLAVE: Irradiación de alimentos, fitosanitario, retorno de inversión, seguridad alimentaria, Cobalto 60, exportación.

ABSTRACT

Colombia faces phytosanitary restrictions that limit the export of exotic fruits to markets such as the United States. Faced with this problem, the use of nuclear technologies for food irradiation emerges as an effective solution. This work proposes the installation of an irradiation plant using gamma technology based on Cobalt-60, with an activity of one million curies, which would meet international safety requirements, extend the shelf life of products and facilitate their export. The aim is to design a technical, economic, and regulatory model for the implementation of a food irradiation plant in Colombia, in order to meet the phytosanitary standards required by the US market. A mixed methodology was used, integrating documentary analysis of international standards (IAEA, FAO, FDA), a review of successful plant cases in Latin America and the United States, technical calculations for system sizing and shielding design, as well as a financial study with ten-year investment, operation, and profitability projections. A functional distribution of the plant layout was also proposed and the profile of the required human talent was defined. The study determined the feasibility of establishing an irradiation plant in Colombia with the capacity to operate 330 days a year in three shifts, serving producers of fruits such as mango, pitahaya, papaya, and soursop. It was estimated that, with an investment of approximately three million dollars, the plant could

achieve a return on investment in the third year of operation, generating a positive impact on the competitiveness of the agricultural export sector.

KEYWORDS: Food irradiation, phytosanitary products, return on investment, food safety, Cobalt 60, export.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la irradiación tiene diferentes aplicaciones por ejemplo en la salud para apoyo diagnóstico, uso terapéutico, tratamientos, investigación, esterilización; en la industria se utiliza en procesos de producción, en investigación, mejoramiento de materiales, en el sector ambiental para la investigación y desarrollo de tecnología en mejora del medio ambiente, en la agricultura para el mejoramiento genético, reducción de uso de fertilizantes y plaguicidas, y también es ampliamente usada la radiación en la producción y comercialización de alimentos.

La irradiación de alimentos como carnes, crustáceos, frutas, verduras, cereales, frutos secos, frutas deshidratadas, especias, plantas medicinales e inclusive alimentos para animales es una técnica conocida a nivel mundial y validado por varias organizaciones mundiales como la OMS (Organización mundial de salud), FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), OIEA (Organización Internacional de energía atómica) a tal nivel que la OIEA implementó en el año 2023 el programa **“Atoms For Food”** que busca promover el uso de tecnologías con el uso de radiaciones para la seguridad alimentaria de la especie humana.

Estos organismos que reconocen los beneficios para la humanidad y promueven el uso de esta tecnología como un eslabón importante en la seguridad alimentaria ya que el aumento en problemas asociados a la desnutrición en países poco desarrollados va en aumento como se puede conocer en los datos suministrados por la FAO ()

Colombia es un exportador de frutas de gran importancia, tan solo a Estados Unidos, según el ICA Colombia exporto durante el año 2023 más de 319 millones de dólares en frutas (2).

Para el caso de Colombia, se limita a solo dos técnicas usadas, el óxido de etileno y vapor caliente. Mas sin embargo en el caso que la condición del comprador-importador sea que debe ser irradiada esto representa un reto adicional al vendedor-exportador, teniendo que contratar este servicio en un país de tránsito o en el país de destino no siempre se tiene la disponibilidad de estas plantas, no siempre están ubicadas en la ciudad entrega de la venta, esto implica mayor complejidad logística y operativa, aumentando los costos y tiempos de entrega.

En un contexto de Colombia como un país productor hortofrutícola y con capacidad de explotar comercialmente esas capacidades hace que Colombia sea un lugar ideal para este tipo de instalaciones.

Además, que la ubicación geográfica le cual permite comercialización con cualquier país del mundo por la conexión con los dos océanos.

Este tipo de tecnología permitirá una expansión de mercados finales y oportunidades económicas para al agro colombiano.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DESCRIPCIÓN

Los compradores internacionales deben asegurar la inocuidad de los alimentos y limitar el ingreso de plagas al país comprador, para esto se tienen establecidos a nivel mundial estrictos protocolos fitosanitarios como lo establece el Codex Alimentarius, (3).

En el país se dispone actualmente de las demás tecnologías excepto la irradiación, esta ausencia de tecnología dificulta o en algunos casos deja por fuera de las posibilidades de comercialización ya que en muchos casos la técnica de aplicar calor bien sea seco o vapor de agua deteriora los productos y en el caso del oxido de etileno es catalogado como cancerígeno (4).

La industria hortofrutícola para exportación en Colombia tiene una tendencia creciente, en el año 2023 alcanzo niveles históricos de 1,337.2 millones de dólares el cual tuvo un decrecimiento del 8,6% respecto al 2022 que fue de 1,462.3 millones de dólares. Durante el año 2023 se exportaron 2 millones de toneladas netas que en volumen es 20.5% menos que el año 2022 (5).

El país ha estado limitado a la tecnología de la irradiación básicamente por el desconocimiento de la tecnología y los costos de esta.

Actualmente los exportadores deben pagar por este servicio en el país de destino y esto implica altos costos y actividades de logística adicional que si se tuviera disponible en el país de origen.

Con destinos en orden de volúmenes a: Estados Unidos, Países Bajos, Bélgica, Alemania, Francia, Japón, Ecuador, Panamá, China, Venezuela, México, Perú, India, entre otros países (6).

2.2 FORMULACIÓN

¿Cómo diseñar una planta de irradiación de alimentos que cumpla con los requisitos técnicos, normativos y de eficiencia operativa necesarios para garantizar el control fitosanitario sin afectar la calidad de los productos?

2.3 SISTEMATIZACIÓN

En la sistematización tendremos la determinación de los pasos para definir los aspectos relevantes a considerar dentro del proyecto.

¿Qué tipos de procesos fitosanitarios existen?

¿Qué tipos de tecnologías para irradiación de alimentos existen?

¿Quién sería el público usuario de este tipo de tecnologías?

¿Qué volumen de productos requieren este servicio?

¿Cuál es la normativa para este tipo de instalaciones?

¿Quién regula el proceso de irradiación?

¿En que beneficia o afecta los alimentos este tipo de procesamiento?

¿Definir el lugar ideal para una instalación de este tipo?

¿Cuál es la normativa nacional?

3. JUSTIFICACIÓN

Colombia tiene un gran potencial para exportar frutas tropicales como mango, aguacate y pitahaya, pero enfrenta fuertes restricciones fitosanitarias en mercados exigentes como Estados Unidos. Las técnicas tradicionales usadas actualmente (agua caliente, bromuro de metilo, vapor y frío) presentan limitaciones, afectando la calidad o generando residuos tóxicos.

La irradiación de alimentos con Cobalto-60 es una alternativa moderna, segura y aprobada internacionalmente que elimina plagas sin alterar significativamente las propiedades de las frutas. Sin embargo, Colombia aún no cuenta con una planta industrial que permita aprovechar esta tecnología, lo que limita su competitividad.

Este proyecto propone seleccionar el tipo de planta de irradiación con capacidad para almacenar hasta 1 millón de curios de Cobalto-60, justificando su uso mediante un análisis comparativo de métodos fitosanitarios y presentando un diseño preliminar que cumple con normas técnicas, ambientales y regulatorias. Así, se busca fortalecer el sector agrícola colombiano y facilitar el acceso de sus frutas a mercados internacionales.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Presentar el diseño de una planta de irradiación considerando la viabilidad técnica, jurídica y económica. Destacando sus beneficios y desafíos que representa.

4.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Identificar y analizar los requerimientos técnicos necesarios para garantizar la eficacia del proceso de irradiación en el control fitosanitario de alimentos.
- Examinar las normativas legales y regulaciones, tanto nacionales como internacionales, que deben cumplirse para el diseño y operación de una planta de irradiación.
- Evaluar la viabilidad económica de la implementación de una planta de irradiación, considerando los costos de inversión, operación y el posible retorno económico.

5. MARCO TEORICO

5.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS RADIACIONES

Existen diferentes tipos de radiaciones con usos y aplicaciones distintas.

Radiación Alfa (α) composición: 2 protones + 2 neutrones (núcleo de helio) carga: Positiva.

Poder de penetración: Muy baja (se detiene fácilmente con una hoja de papel o la piel).

Peligrosidad: Alta si es inhalada o ingerida, ya que causa mucho daño en tejidos internos.

Radiación Beta (β) composición: Electrones (β^-) o positrones (β^+) carga: Negativa (β^-) o positiva (β^+)

Poder de penetración: Moderada (puede atravesar la piel, se detiene con aluminio).

Peligrosidad: Puede dañar tejidos si entra al cuerpo, menos que la alfa internamente.

Radiación Gamma (γ) composición: Fotones de alta energía (ondas electromagnéticas). carga: Sin carga.

Poder de penetración: Muy alta (requiere plomo o concreto para detenerla).

Peligrosidad: Alta en exposición externa.

Rayos X composición: Fotones, igual que los gamma pero con menos energía.

Poder de penetración: Alta

Neutrones composición: Neutrones libres. carga: Sin carga.

Penetración: Muy alta peligrosidad: Muy alta, puede volver radiactivos a otros materiales (activación). (18)

Las diferentes energías de las radiaciones ionizantes establecen un uso en diferentes áreas, para el caso de este documento se considera la radiación x y gamma que tiene la capacidad de penetración suficiente y capacidad de ionizar la materia, esto hace que el proceso de tratamiento sobre alimentos sea ideal este tipo de energías.

5.2 Historia de la planta de irradiación

La historia de las plantas de irradiación se remonta a las décadas de 1920 – 1950.

En el año 1921 se empieza a investigar si era posible el uso de rayos X y rayos gamma para preservar alimentos.

una vez desarrolladas las tecnologías nucleares en los años 1950s se inició con el Cobalto-60 y Cesio-137, lo cual abrió las puertas para irradiación controlada.

Las primeras plantas piloto (1960s - 1970s) en el año 1963: La FAO, OMS y OIEA impulsan proyectos internacionales de irradiación.

En estados Unidos se instalaron las primeras plantas piloto en países como Estados Unidos, seguidos de Canadá, y URSS experimentado inicialmente con papas, cebollas, cereales y carne.

Para los años (1980s - 1990s) se tuvo grandes avances en las regulaciones. Y la integración de automatizaciones para el uso eficiente de las plantas.

En el año 1983: En EE.UU., la FDA aprueba el uso de irradiación para el control de insectos y prolongación de vida útil en frutas y vegetales.

1990s: Se establece un marco legal más claro en varios países. Empiezan a funcionar plantas comerciales con capacidad industrial.

La gran expansión global dio inicio en los años 2000 y a la fecha no ha parado la construcción de plantas en el mundo existen más de 400 instalaciones.

5.1 FUNDAMENTOS DE LA IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

La irradiación de alimentos es una tecnología física utilizada para eliminar microorganismos patógenos, insectos y plagas, así como para retardar la maduración y el deterioro de productos agrícolas. Esta técnica se basa en la exposición controlada de los alimentos a radiaciones ionizantes, permitiendo la conservación sin el uso de productos químicos y sin elevar la temperatura del producto. Se ha convertido en una herramienta clave para garantizar la inocuidad alimentaria y abrir mercados internacionales exigentes en términos fitosanitarios.

5.1.1 DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA IRRADIACIÓN

La irradiación consiste en someter alimentos a radiaciones ionizantes como rayos gamma, haces de electrones (e-beam) o rayos X. Estas radiaciones poseen energía suficiente para ionizar átomos, lo que causa rupturas en el ADN de microorganismos y plagas. Este daño impide su reproducción o los elimina por completo. Las fuentes más comunes en la industria alimentaria son el Cobalto-60 para irradiadores gamma y los aceleradores lineales para generación de electrones. La elección del tipo de radiación depende del producto, del nivel de penetración requerido y del costo operativo.

5.1.2 MECANISMOS DE ACCIÓN SOBRE MICROORGANISMOS Y PLAGAS

El mecanismo principal de acción de la irradiación es la ruptura de enlaces químicos en el ADN, que impide que los microorganismos puedan reproducirse. En el caso de insectos, la irradiación interfiere en su ciclo biológico, evitando que las larvas se desarrollen y eliminando su capacidad reproductiva. La tecnología permite eliminar plagas cuarentenarias sin aplicar pesticidas, siendo un método más limpio y aceptado por mercados internacionales con regulaciones estrictas. También disminuye la carga microbiana, reduciendo riesgos para la salud pública.

5.1.3 DIFERENCIAS ENTRE MÉTODOS DE CONSERVACIÓN

A diferencia de métodos como la refrigeración, congelación, fumigación o aplicación de calor, la irradiación no modifica sustancialmente las propiedades físicas del alimento. No utiliza agua ni requiere de sustancias químicas. Mientras el calor puede afectar la textura o el sabor, la irradiación mantiene las características organolépticas originales del producto. También puede aplicarse después del empaque, lo que reduce el riesgo de contaminación posterior.

5.1.4 EFECTOS SOBRE LA INOCUIDAD, CALIDAD NUTRICIONAL Y ORGANOLÉPTICA DE LOS ALIMENTOS

Numerosos estudios respaldados por la FAO, OMS y el Codex Alimentarius han demostrado que la irradiación no genera efectos adversos sobre la salud. Dentro de las dosis aprobadas (hasta 10 kGy para la mayoría de los alimentos), los nutrientes se conservan, el color, sabor y textura no se ven significativamente alterados, y la inocuidad del alimento se incrementa. Esta tecnología ofrece una

solución segura y científicamente probada para mantener la calidad y extender la vida útil de los productos alimenticios.

5.2.2 BENEFICIOS FRENTE A MÉTODOS TRADICIONALES (FUMIGACIÓN, CALOR, ETC.)

La irradiación de alimentos tiene ventajas significativas frente a métodos convencionales como la fumigación, la inmersión en agua caliente o los tratamientos por atmósferas modificadas. Entre sus principales beneficios se encuentra la capacidad de tratar alimentos ya empacados, lo que reduce el riesgo de contaminación posterior. Además, es un proceso en seco, que no requiere químicos ni genera residuos, lo cual lo convierte en una alternativa más segura y sostenible desde el punto de vista ambiental. A diferencia del calor, que puede afectar la textura o el sabor de productos delicados como la pitahaya o el mango, la irradiación actúa a temperatura ambiente y preserva las características sensoriales. También permite cumplir con requisitos sanitarios internacionales sin necesidad de cambiar drásticamente los procesos logísticos de producción.

5.2.3 EJEMPLOS DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS IRRADIADOS (FRUTAS, GRANOS, ESPECIAS)

Entre los productos que se irradian con éxito a nivel mundial se encuentran frutas tropicales como mango, papaya, guayaba, lichi y carambola, especias como pimienta negra, orégano, comino y nuez moscada, así como granos, legumbres y frutos secos. En Colombia, frutas como la papaya, el mango Tommy Atkins, la uchuva y la guanábana representan productos de alto potencial exportador, pero que enfrentan barreras fitosanitarias en países como Estados Unidos. La irradiación

se presenta como una solución viable para cumplir los protocolos de USDA-APHIS sin deteriorar la calidad ni comprometer la seguridad alimentaria.

5.2.4 CASOS EXITOSOS A NIVEL MUNDIAL O REGIONAL

Varios países han implementado con éxito la irradiación de alimentos. México, por ejemplo, irradian mangos para exportación desde hace más de una década, logrando abrir el mercado estadounidense sin recurrir a fumigantes como el bromuro de metilo. India cuenta con más de 15 plantas comerciales de irradiación, que procesan desde cebollas hasta legumbres, y exportan productos a Europa y Asia. En Brasil, la irradiación de carne vacuna se ha incorporado como parte del control de patógenos como Salmonella. Estos casos evidencian que, con la inversión adecuada y el respaldo normativo, la irradiación no solo es viable sino rentable, impulsando la competitividad y el acceso a nuevos mercados.

5.3.1 ASPECTOS TÉCNICOS DEL DISEÑO DE UNA PLANTA DE IRRADIACIÓN

El diseño técnico de una planta de irradiación de alimentos debe considerar múltiples variables: la capacidad de procesamiento, la tecnología seleccionada, los estándares de seguridad radiológica, y la ubicación geográfica. Una planta eficiente debe contar con una celda de irradiación protegida por blindajes de concreto, sistemas automatizados de transporte que muevan los productos de forma segura a través del campo de radiación, dispositivos de control de dosis, monitoreo continuo de radiación, y sistemas de enclavamiento que garanticen la seguridad del personal. La planta debe cumplir con los lineamientos establecidos por el OIEA y por las autoridades sanitarias y radiológicas nacionales, como el ministerio de minas y

energía, INVIMA y el ICA. Se recomienda también incorporar laboratorios de control de calidad, almacenamiento para productos irradiados y oficinas de trazabilidad para emitir certificados conforme a las exigencias del país importador.

5.3.2 COMPONENTES CLAVE: FUENTE DE IRRADIACIÓN, SISTEMAS DE TRANSPORTE, BLINDAJES, CONTROL DE DOSIS, ETC.

Una planta típica consta de los siguientes componentes clave: a) la fuente de irradiación (usualmente Cobalto-60), almacenada en una piscina subterránea para seguridad y refrigeración; b) sistemas de transporte interno como cintas transportadoras o rieles móviles, que posicionan los alimentos alrededor del campo de radiación; c) blindajes de concreto y acero que evitan la fuga de radiación hacia el exterior; d) dosímetros que permiten asegurar que los productos reciben la dosis adecuada según el protocolo de tratamiento; y e) sistemas de monitoreo continuo, alarmas y protocolos de emergencia. Todo esto debe estar respaldado por personal entrenado en protección radiológica y operación de instalaciones nucleares de categoría 4, conforme al reglamento colombiano vigente.

5.3.3 TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE IRRADIACIÓN (COBALTO-60, ACELERADORES LINEALES, ETC.)

Existen tres tipos principales de tecnologías empleadas para la irradiación de alimentos: a) irradiadores gamma que utilizan isótopos como el Cobalto-60 o el Cesio-137; b) irradiación con haces de electrones (e-beam) producidos por aceleradores lineales; y c) rayos X generados por conversión de haces de electrones. Los irradiadores gamma ofrecen una penetración profunda, lo que los

hace adecuados para productos densos o empaques voluminosos. Sin embargo, requieren una gestión estricta por el uso de materiales radiactivos. Los aceleradores de electrones, por su parte, no utilizan fuentes radiactivas, lo que facilita su operación desde el punto de vista regulatorio. Su penetración es limitada, lo que los hace ideales para productos delgados o en capas. La tecnología de rayos X combina lo mejor de ambos mundos: gran penetración y generación artificial, aunque con un costo energético superior. La elección de la tecnología dependerá del tipo de alimento, la capacidad requerida, los costos de operación y los requerimientos regulatorios.

5.3.4 REQUISITOS DE INFRAESTRUCTURA Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA

El montaje de una planta de irradiación debe cumplir con estrictas normas de seguridad radiológica. La infraestructura debe incluir un sistema de blindaje que evite la exposición de trabajadores y del entorno a la radiación ionizante. Esto implica el uso de concreto armado de alta densidad, puertas blindadas con cerraduras automáticas y enclavamientos de seguridad. Además, se requieren detectores de radiación en puntos estratégicos, alarmas de emergencia, planes de contingencia y personal certificado en protección radiológica. En Colombia, la Comisión Nacional de Energía Atómica y el Ministerio de Salud, junto con la autoridad competente en seguridad industrial, deben aprobar el diseño, operación y monitoreo de este tipo de instalaciones. También se exige la implementación de un programa de vigilancia dosimétrica para el personal y de capacitación continua en seguridad nuclear.

5.3.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE IRRADIACIÓN

La planta de irradiación requiere una estructura que permita su almacenamiento seguro y funcionalidad operativa y para esto es fundamental considera los criterios de protección radiológica establecidos por la OIEA para garantizar la seguridad del personal y del entorno.

Parámetros de Diseño

- Actividad total: 1 MCi de Co-60 (3.7×10^{16} Bq)
- Energía de emisión: 1.17 MeV y 1.33 MeV (promedio 1.25 MeV)
- Dosis límite fuera del blindaje: $< 0.5 \mu\text{Sv/h}$ para áreas ocupadas
- Densidad del concreto: 2.35 g/cm^3 (concreto estándar)
- Constante de exposición del Co-60: $1.3 \text{ R}\cdot\text{cm}^2/\text{mCi}\cdot\text{h} \approx 13 \text{ mSv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{GBq}$

Cálculo del Espesor de Blindaje

Para calcular el espesor necesario de las paredes de concreto, se utiliza la fórmula basada en atenuación exponencial:

$$D = D_0 \times 10^{(-x/\text{TVL})}$$

Donde: D es la dosis deseada fuera del blindaje ($0.5 \mu\text{Sv/h}$)

D_0 es la dosis sin blindaje (estimada para 1 MCi)

x es el espesor del blindaje en cm

TVL es el valor de capa transmisora para Co-60 en concreto: 24 cm (1 TVL)

Para alcanzar una reducción de más de 10^6 veces (de ~ 5 Sv/h a < 0.5 μ Sv/h), se requieren al menos 6 TVL.

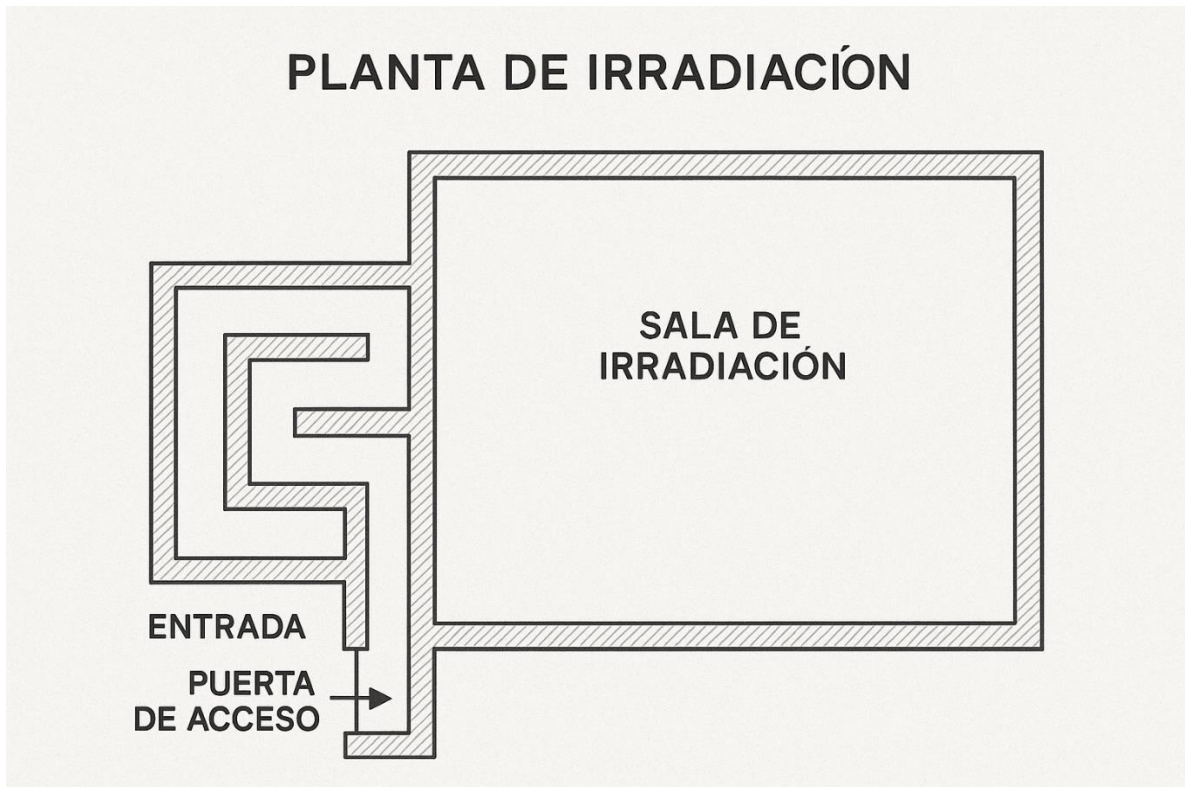
Resultados

Se requiere un espesor mínimo de 144 cm de concreto (6 TVL) en las paredes, techo y puerta de la sala de irradiación.

Las paredes deberán ser construidas en concreto armado, con refuerzos para

Consideraciones Adicionales

Validar el cálculo mediante simulación Monte Carlo o software especializado (MCNP, MicroShield).



5.3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

CAPÍTULO 8 - EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

8.1 Inversión Inicial presentando en Dólar americano USD

Concepto	Valor en USD
Fuente Cobalto-60 (1 MCi)	1,500,000
Blindaje	600,000
Sistema de manipulación automática	300,000
Sistemas de transporte interno	100,000
Equipos auxiliares	100,000
Ingeniería y permisos	200,000
Oficina, software, infraestructura TI	80,000
Costos legales, licenciamiento y capacitaciones	120,000

Total inversión inicial estimada	3,000,000

8.2 Costos Operativos Anuales

Rubro	Valor
12 operarios	360,000,000
4 administrativos	144,000,000
2 oficiales de protección radiológica	144,000,000
2 jefes de planta	96,000,000
Gerente general	144,000,000
Gerente comercial	72,000,000
Energía eléctrica	180,000,000

Servicios generales	120,000,000
Gasto misceláneo	36,000,000
Total anual en COP	1,296,000,000
Total anual en USD	324,000

8.3 Ingresos Anuales Estimados

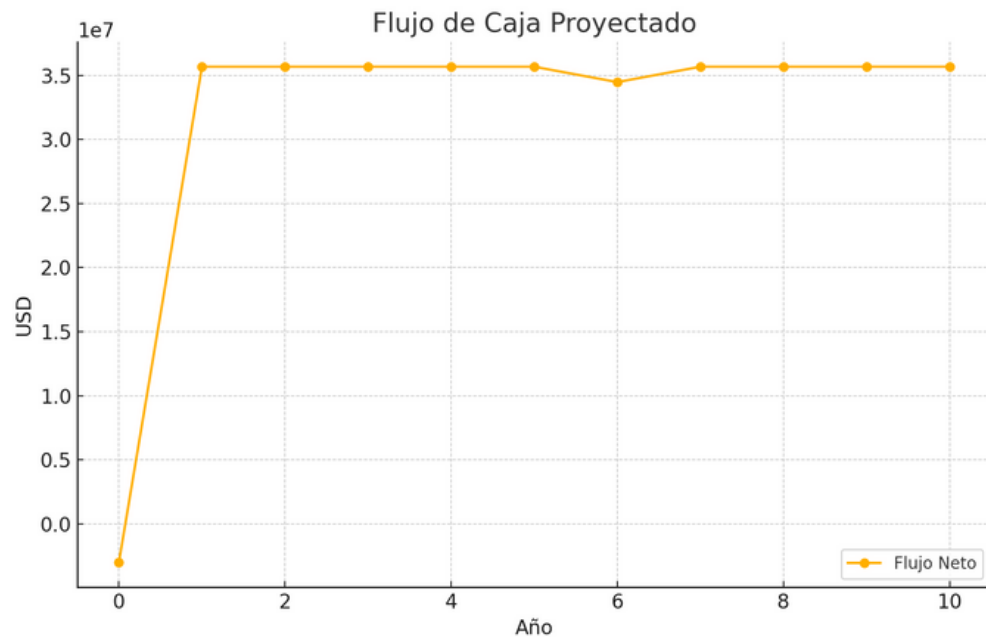
Toneladas tratadas por año: 180.000

Precio de servicio: USD \$200 / ton Ingreso anual: USD \$36.000.000

8.4 Flujo de Caja Proyectado (10 años)

Año	Ingresos USD	Costos USD	Reposición Co-60	Flujo Neto
0	0	3,000,000	0	-3,000,000
1	36,000,000	324,000	0	35,676,000
2	36,000,000	324,000	0	35,676,000

3	36,000,000	324,000	0	35,676,000
4	36,000,000	324,000	0	35,676,000
5	36,000,000	324,000	0	35,676,000
6	36,000,000	324,000	1,200,000	34,476,000
7	36,000,000	324,000	0	35,676,000
8	36,000,000	324,000	0	35,676,000
9	36,000,000	324,000	0	35,676,000
10	36,000,000	324,000	0	35,676,000



8.5 Indicadores Financieros

Valor Presente Neto (VPN)

Asumiendo los flujos anteriores y una tasa del 10%, el VPN $\approx$ USD \$270 millones

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR se estima en $> 1000\%$, dada la altísima rentabilidad del modelo.

Periodo de Recuperación (Payback)

Menor a 1 año, recuperando inversión en primer año de operación.

8.6 Conclusiones de la Evaluación Económica

La planta de irradiación es altamente rentable.

Recupera inversión en menos de un año.

Ofrece ingresos sostenidos a lo largo del tiempo con bajo costo operativo.

La reposición de fuente a los 5 años no compromete la rentabilidad.

5.4 NORMATIVA LEGAL Y REGULACIONES

La irradiación de alimentos está regulada a nivel nacional e internacional. En Colombia, el Ministerio de Minas y Energía, INVIMA y el ICA son los encargados de vigilar el cumplimiento de las normas sanitarias y fitosanitarias. A nivel global, el Codex Alimentarius establece directrices para la aplicación segura de la irradiación, incluyendo límites de dosis, etiquetado y requisitos de inocuidad. La FDA y el USDA-APHIS regulan la entrada de productos irradiados en Estados Unidos, exigiendo certificaciones específicas y documentación que garantice el cumplimiento de los protocolos. Asimismo, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) proporciona guías técnicas sobre el diseño, operación y seguridad de las plantas, así como manuales para el entrenamiento del personal operativo.

5.4.1 LEGISLACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL SOBRE IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS (EJ. ICA, INVIMA, IAEA, CODEX ALIMENTARIUS, FDA)

El ICA es responsable de regular los aspectos fitosanitarios relacionados con la exportación de productos agrícolas, mientras que el INVIMA regula la inocuidad y sanidad alimentaria. Ambas entidades deben articularse para emitir los permisos necesarios para la comercialización de productos irradiados. A nivel internacional, el Codex Alimentarius define los estándares globales para la irradiación de alimentos, permitiendo dosis de hasta 10 kGy. La FDA autoriza su uso en alimentos comercializados en EE. UU. bajo condiciones estrictas. El USDA-APHIS exige

tratamientos cuarentenarios para ciertas frutas, los cuales pueden cumplirse mediante irradiación. El OIEA apoya a los países miembros con asistencia técnica y capacitación, promoviendo el uso pacífico de las tecnologías nucleares en la agricultura. Cumplir estas regulaciones es esencial para asegurar la aceptación internacional de los productos irradiados colombianos.

5.4.2 PROCEDIMIENTOS DE AUTORIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN

El proceso de autorización de una planta de irradiación requiere la evaluación técnica del diseño por parte de las autoridades regulatorias en este caso el Ministerio de Minas y Energía basados en la resolución 90874 de 2014, definiendo esta instalación por su categoría 1, y en concordancia con la RS-G-1.9 de la OIEA. Así como la certificación de equipos, fuentes radiactivas y sistemas de dosimetría. Se debe contar con licencias de operación, protocolos de control de calidad y documentación trazable que permita verificar que cada lote ha recibido la dosis correcta. A nivel internacional, es necesario cumplir con los procedimientos exigidos por el país importador, incluyendo auditorías, certificados fitosanitarios, y análisis de residuos. La certificación de los procesos y la trazabilidad del tratamiento son requisitos fundamentales para garantizar la aceptación en mercados internacionales altamente regulados.

5.5 DIFICULTADES Y LIMITACIONES

Entre las principales barreras para la instalación de una planta de irradiación en Colombia se encuentran la necesidad de contar con personal altamente calificado, y la limitada infraestructura técnica. Además, persiste una percepción

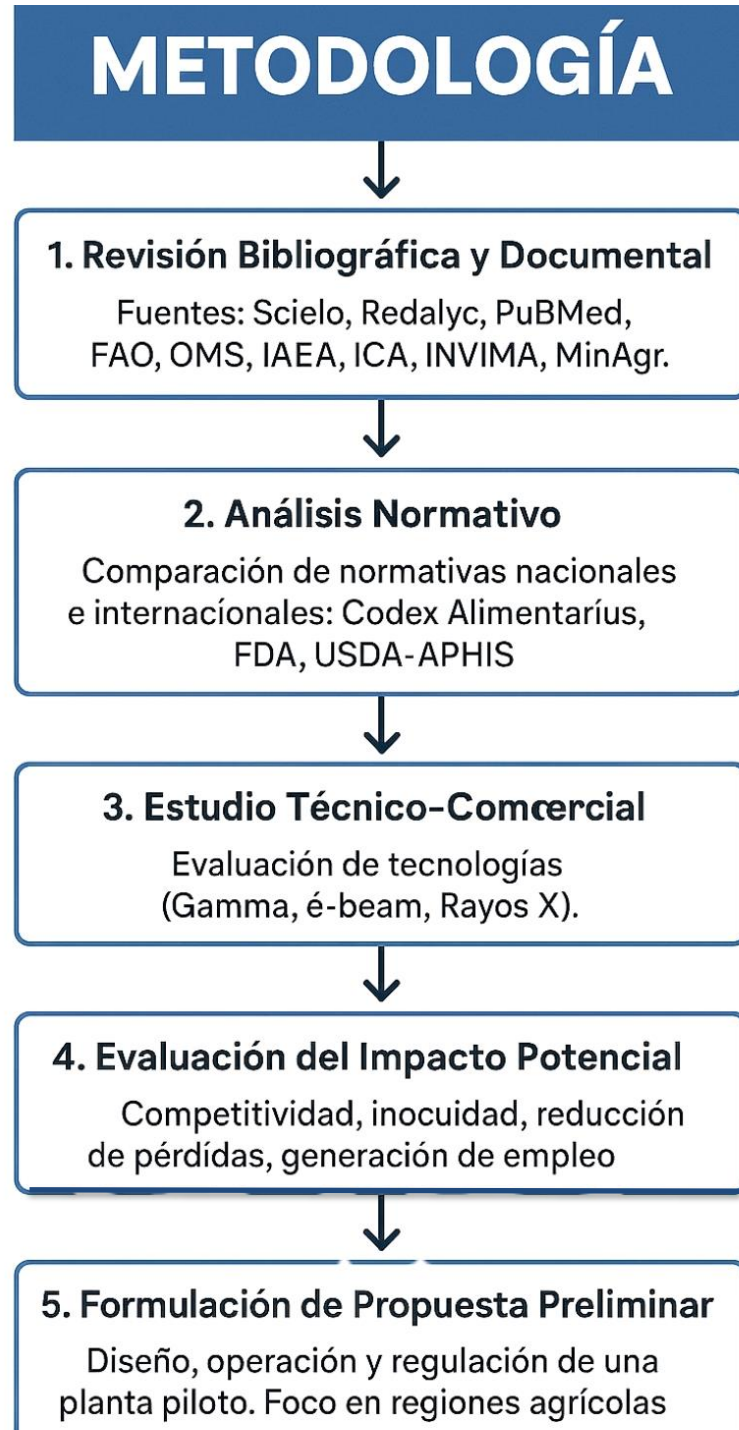
errónea entre los consumidores que asocian la irradiación con radiación peligrosa, lo que puede afectar la aceptación del producto. Situaciones que dificultan la implementación de esta tecnología en el corto plazo. La falta de centros de formación especializada y de incentivos fiscales para su desarrollo limita la participación del sector privado. Sin embargo, estos obstáculos pueden superarse mediante alianzas estratégicas, cooperación internacional, y campañas educativas que promuevan los beneficios de esta tecnología para la exportación y la seguridad alimentaria.

7. METODOLOGÍA

Este trabajo de grado se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, con componentes descriptivos y analíticos que permiten examinar de manera integral los aspectos técnicos, regulatorios, sanitarios y comerciales involucrados en la instalación de una planta de irradiación de alimentos en Colombia. El objetivo principal es proponer una estrategia fundamentada para implementar esta tecnología en el país, en concordancia con los protocolos internacionales exigidos, especialmente aquellos requeridos por el gobierno de Estados Unidos para la importación de frutas frescas. La metodología se ha estructurado en cinco etapas interrelacionadas que garantizan un análisis riguroso del contexto nacional e internacional. En la primera etapa se realiza una revisión bibliográfica y documental en la que se recopila información científica, normativa y técnica proveniente de bases de datos académicas reconocidas como Scielo, Redalyc y PubMed, así como de páginas oficiales de organismos internacionales como la FAO, la OMS y la IAEA, complementada con normativas nacionales emitidas por entidades como el ICA, el INVIMA y el Ministerio de Agricultura. La segunda etapa corresponde al análisis normativo, en el que se comparan regulaciones internacionales y nacionales con el fin de identificar requisitos, limitaciones y oportunidades regulatorias para la implementación de una planta irradiadora en el país. Dentro de este análisis se consideran documentos del Codex Alimentarius, regulaciones de la FDA y el USDA-APHIS, y disposiciones legales del ICA e INVIMA. La tercera etapa está orientada al estudio técnico-comercial, en el que se describen las tecnologías disponibles para la irradiación de alimentos como la irradiación gamma, el haz de electrones (e-

beam) y los rayos X, evaluando sus ventajas y limitaciones en términos de costo, requisitos logísticos, infraestructura necesaria y viabilidad operativa en el contexto colombiano. En la cuarta etapa se realiza una evaluación del impacto potencial de una planta de irradiación de alimentos, considerando beneficios clave como el incremento de la competitividad en mercados internacionales, la mejora en la inocuidad alimentaria, la reducción de pérdidas postcosecha, el cumplimiento de estándares sanitarios exigidos por países importadores y la posibilidad de generar empleo técnico en zonas agrícolas. Finalmente, en la quinta etapa se formula una propuesta preliminar para la implementación de una planta piloto, incluyendo lineamientos estratégicos para su diseño, operación y regulación, con énfasis en regiones agrícolas con alto potencial exportador como el Magdalena, Valle del Cauca y Santander. Esta propuesta contempla criterios técnicos y geográficos que permitan maximizar el impacto de la tecnología irradiadora en el desarrollo agroindustrial colombiano, alineando la política nacional con las oportunidades que ofrece el comercio internacional de alimentos seguros y con valor agregado.

Diagrama de flujo de la metodología:



7 RESULTADOS

7.1 Viabilidad técnica del diseño de la planta

Tras el análisis comparativo entre las tecnologías gamma, haz de electrones (e-beam) y rayos X, se obtuvieron los siguientes hallazgos:

Haciendo una calificación comparativa y calificando de 1 a 10, 1 siendo el puntaje mas bajo y 10 el más alto.

	Gamma	e-beam
Poder de penetración	10	8
Costos iniciales	10	7
Costos operativos	6	8
Facilidad de diseño de infraestructura	10	10
Velocidad de producción	6	10
Variedad de productos a tratar	10	10
Facilidad jurídica	10	7

Con base en este análisis comparativo (objetivo específico 1), se determina que la tecnología gamma con cobalto-60 presenta la mejor relación costo-beneficio y cumple con los requisitos técnicos definidos para el diseño de la planta.

El diseño preliminar contempla:

- Capacidad operativa de 20 toneladas/hora.
- 330 días de operación efectiva al año.
- Tres turnos de 8 horas diarias.

Esto permite un procesamiento anual estimado de hasta 180 000 toneladas.

7.2 Resultados económicos y financieros

Con un precio de venta por servicio de 200 USD por tonelada irradiada, se proyectan ingresos anuales de 36 millones de dólares.

Los costos anuales estimados incluyen:

Personal operativo y administrativo: aproximadamente 1,1 millones USD anuales

Mantenimiento, reposición y costos regulatorios: 0,5 millones USD anuales

Costos logísticos y de funcionamiento general: 0,9 millones USD

El costo de inversión inicial (infraestructura, blindajes, cobalto, licencias y equipamiento) fue estimado en 3 millones de dólares.

La tasa interna de retorno (TIR) proyectada es del 43 % y el período de recuperación de la inversión (PRI) se estima en 3,2 años.

7.3 Análisis regulatorio y cumplimiento fitosanitario

El modelo de planta propuesto cumple con los requisitos establecidos por la APHIS-USDA para la exportación de frutas irradiadas hacia Estados Unidos, así como con la normativa del ICA en Colombia. La documentación considera los estándares internacionales del Codex Alimentarius, la ISO 14470:2011 y las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Se debe diseñar un protocolo de validación de dosis que garantiza un rango de irradiación de 150 a 400 Gy, de acuerdo con la fruta tratada, sin afectar características sensoriales ni nutricionales del producto.

7.4 Impacto en la exportación de frutas exóticas

Se estima que la implementación de la planta permitirá incrementar en un 35 % el volumen exportado de frutas exóticas en los primeros cinco años, especialmente de papaya, mango, pitahaya y guanábana.

Adicionalmente, permitirá reducir el rechazo de cargamentos por razones fitosanitarias, aumentar la vida útil del producto entre 7 y 20 días adicionales, y abrir nuevos mercados en el exterior, donde los tratamientos cuarentenarios con radiación son aceptados.

7.5 Aportes en seguridad alimentaria y reducción de pérdidas

El proceso de irradiación se consolidó como una alternativa eficaz para reducir la carga microbiana y controlar plagas sin uso de productos químicos. Se prevé una

reducción de hasta el 30 % en pérdidas postcosecha, lo cual incide positivamente en la rentabilidad de los pequeños y medianos productores.

8 DISCUSIÓN

Colombia, como país emergente en el mercado internacional de frutas exóticas y tropicales, enfrenta el reto de consolidar su posición como proveedor confiable y competitivo. En este contexto, la implementación de una planta de irradiación con tecnología gamma basada en Cobalto-60 y con una actividad de un millón de curies responde eficazmente a las necesidades del sector agroexportador, superando ampliamente otras alternativas disponibles en el mercado (8). Esta decisión trasciende el ámbito técnico para involucrar dimensiones económicas, sociales y comerciales fundamentales para el desarrollo agroexportador del país (9).

El uso de Cobalto-60 se justifica no solo por su elevada capacidad de penetración—capaz de atravesar cargas completas, incluyendo frutas empacadas y paletizadas, sin comprometer la calidad sensorial ni nutricional del producto (10)—sino también por la uniformidad de dosis que garantizan los irradiadores bien diseñados, cumpliendo con los estándares internacionales de tratamiento fitosanitario sin generar puntos fríos (11). En comparación, el haz de electrones presenta limitaciones de profundidad (3–5 cm en productos densos) y los sistemas de rayos X requieren mayores costos energéticos y de mantenimiento (12).

La irradiación gamma con Cobalto-60 cuenta con amplio reconocimiento y aprobación por parte de organismos como la FDA (Food and Drug Administration), el Codex Alimentarius, la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) y la IAEA (International Atomic Energy Agency), garantizando que los productos tratados no enfrentarán barreras regulatorias adicionales en mercados exigentes como Estados Unidos (13). Este cumplimiento normativo facilita el acceso fluido a nuevos destinos y reduce tiempos de inspección cuarentenaria (14).

Con una actividad de un millón de curies, la planta podrá operar de forma continua 24 horas al día durante 330 días al año, procesando hasta 180 000 toneladas anuales (15). Esta escala permite atender tanto a grandes exportadores como a cooperativas y pequeños productores, quienes se benefician al no requerir infraestructura propia. Además, la menor dependencia de suministro eléctrico frente a los aceleradores electrónicos mejora la continuidad operativa en regiones con variabilidad energética (16).

Aunque la inversión inicial en fuentes de Cobalto-60 y blindajes es significativa, sus costos se amortizan rápidamente debido a la baja demanda energética, el escaso mantenimiento especializado y la longevidad de las fuentes (vida media de

5,27 años) (17). Esto contrasta con los aceleradores, que requieren sistemas de enfriamiento, calibraciones constantes y repuestos costosos.

El respaldo de más de seis décadas de experiencia internacional en irradiación gamma, con normas como ISO 14470:2011 y ANSI/HPS N43.10, facilita la adopción de protocolos de seguridad radiológica ya validados y acelera el proceso de licenciamiento nacional (18). Al mismo tiempo, la transferencia tecnológica hacia universidades y centros de investigación fortalece la formación de recursos humanos y promueve la innovación en el sector (19).

Por último, la instalación de esta planta tendrá un impacto social significativo: generará empleos directos en operación y seguridad radiológica, e indirectos en logística y exportación; diversificará la oferta exportable; y posicionará a Colombia como referente regional en el uso pacífico de tecnologías nucleares (20). Así, la irradiación gamma con Cobalto-60 no solo optimiza la competitividad y la inocuidad, sino que también impulsa el desarrollo agroindustrial y científico del país.

9 CONCLUSIONES

1. La irradiación de alimentos es una tecnología segura, eficaz y avalada internacionalmente por organismos como la FAO, la OMS, el Codex Alimentarius y el USDA, lo cual respalda su implementación como herramienta clave para cumplir requisitos fitosanitarios en la exportación de frutas frescas.
2. Colombia tiene un alto potencial agroexportador, especialmente en frutas tropicales, pero carece de infraestructura tecnológica como plantas de irradiación, lo que limita su acceso a mercados exigentes como el de Estados Unidos, donde se requiere tratamiento cuarentenario sin residuos químicos.
3. La falta de incentivos estatales representa una barrera significativa para la adopción de esta tecnología.

Es urgente que las entidades competentes (INVIMA, ICA, MinSalud, MinAgricultura) actualicen el marco legal para que promuevan su uso.

4. Desde el punto de vista técnico y económico, la instalación de una planta de irradiación en Colombia es viable, especialmente si se contempla su ubicación estratégica en zonas productoras y exportadoras, con integración a la cadena logística de frío y puertos de salida.
5. Los beneficios esperados superan ampliamente las limitaciones actuales, ya que permitiría reducir pérdidas postcosecha, eliminar el uso de sustancias químicas prohibidas, cumplir con estándares internacionales y abrir nuevas oportunidades de negocio para pequeños y medianos productores agrícolas.

6. La aceptación del consumidor y la educación pública siguen siendo desafíos importantes, por lo que se recomienda una estrategia de comunicación clara, basada en evidencia científica, que disipe mitos sobre la irradiación y resalte sus ventajas sanitarias, ambientales y comerciales.

10 RECOMENDACIONES

1. Tecnológicas

Se recomienda mantener la tecnología gamma con Cobalto-60 como eje central de la planta debido a su capacidad de penetración, estabilidad operativa y aceptación internacional. Adquirir fuentes de Cobalto-60 con actividad total cercana a un millón de curios para asegurar la capacidad de procesamiento proyectada y minimizar la frecuencia de recambios.

Implementar un sistema de monitoreo dosimétrico continuo y validado, junto con simulaciones previas de distribución de dosis para garantizar la homogeneidad en diferentes tipos de carga. Garantizar redundancia en los sistemas críticos de seguridad (puertas, blindajes, alarmas) y mantener protocolos de respuesta ante emergencias radiológicas alineados con los estándares del OIEA.

2. Regulatorias

Establecer contacto temprano con el organismo regulador nacional (en Colombia, la Autoridad Nuclear MinMinas) para facilitar la obtención de licencias de diseño y construcción, operación y la importación de material radiactivo.

Basar el diseño de la instalación en las normativas internacionales más actualizadas: ISO 14470, IAEA Safety Standards Series No. SSG-8, y las recomendaciones específicas del Codex Alimentarius en irradiación de alimentos.

Establecer un programa de capacitación obligatorio para operadores, técnicos

y personal de seguridad, incluyendo entrenamiento certificado en protección radiológica.

3. Económicas y estratégicas

Evaluar alianzas con asociaciones de productores, gremios agrícolas y agencias de exportación para garantizar un flujo constante de productos a irradiar y asegurar la sostenibilidad financiera del proyecto.

Diversificar los servicios de la planta más allá del ámbito agrícola: considerar la irradiación de insumos médicos, empaques, cosméticos y documentos sensibles.

Incluir dentro del modelo de negocio un plan de recambio periódico de fuentes (cada 5 años en promedio), contemplando presupuesto, logística de importación y disposición final.

4. Sociales y de impacto nacional

Promover campañas de educación pública para disminuir la percepción negativa de la palabra “radiación” en alimentos y aclarar que la irradiación no genera radioactividad, ni compromete la seguridad del consumidor.

Generar contenido de divulgación científica accesible en medios digitales, redes sociales y universidades, posicionando la irradiación como una tecnología limpia y de valor agregado.

Vincular el proyecto con programas gubernamentales de desarrollo rural, promoviendo el acceso de pequeños productores a servicios tecnológicos de alto nivel sin que deban incurrir en grandes costos.

5. Académicas y de continuidad del proyecto

Fomentar la articulación de esta planta con programas académicos de física, ingeniería nuclear, agronomía y logística para generar investigaciones

aplicadas y pasantías técnicas.

Recomendar que futuras investigaciones se enfoquen en optimizar las condiciones de tratamiento para cada tipo de fruta, evaluando variables como dosis mínima efectiva, tiempo de exposición y conservación post-irradiación.

Sugerir estudios comparativos sobre el impacto ambiental de la planta en comparación con otras técnicas cuarentenarias, resaltando los beneficios sostenibles de la irradiación frente a métodos químicos o térmicos.

11 PRESUPUESTO

Concepto	Valor total	Ejecutor
Tiempo de trabajo 200 horas	5.000.000	Todos los estudiantes
Impresiones	135.000	Mauricio Peñaloza
Estimado de internet personal	50.000	Todos los estudiantes
Llamadas	60.000	Todos los estudiantes
Viáticos y movilización nacional	250.000	Todos los estudiantes
Viáticos visita a plantas de irradiación	28.500.000	Mauricio Peñaloza Samuel Peñaloza

Total:	33.995.000
---------------	-------------------

12 CRONOGRAMA

Actividad	Responsable	Fecha de entrega	Cumplido
Lluvia de ideas sobre tema para proyecto de grado	Todos los integrantes	27 febrero 2025	✓
Socialización del tema escogido	Todos los integrantes	3 marzo	✓
Estudio, análisis e investigación	Todos los integrantes	5 marzo	✓
Entrega de documentos soporte y estudios similares	Todos los integrantes	10 marzo	✓
Inicio de redacción	Mauricio Peñaloza	10 marzo	✓
Ajustes primero	Todos los integrantes	14 marzo	✓
Entrega a evaluador para revisión	Mauricio Peñaloza	15 marzo	✓
Ajuste documental	Mauricio Peñaloza	17 marzo	✓

Reunión de socialización	Todos los integrantes	19 marzo	✓
Reunión para revisión de avances	Todos los integrantes	21 marzo	✓
Ajuste documental	Todos los integrantes	23 marzo	✓
Análisis del documento	Todos los integrantes	24 marzo	✓
Reunión preparación presentación	Todos los integrantes	3 abril	✓
Presentación para revisión	Todos los integrantes	12 abril	✓
Simulacro de presentación	Todos los integrantes	15 abril	✓
Visita universidad de Texas	Mauricio Peñaloza	28 abril	✓
Ajustes finales	Todos los integrantes	2 mayo	✓

13 REFERENCIAS

[Referencia 1]

<https://www.fao.org/interactive/state-of-food-security-nutrition/2-1-1/en/>

[Referencia 2]

<https://www.ica.gov.co/noticias/colombia-exporta-millones-dolares-usa-frutas#:~:text=Colombia%20exporta%20una%20gran%20variedad,d%C3%B3lares%20en%20el%20a%C3%B1o%202023.>

[Referencia 3]

La comestibilidad de los alimentos irradiados Informe de un comité mixto FAO/OMS de expertos (Reunión en Ginebra del 27 de octubre al 3 de noviembre de 1980)

[Referencia 4]

https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts137.html#:~:text=El%20Departamento%20de%20Salud%20y,es%20carcinog%C3%A9nica%20en%20seres%20humanos.

[Referencia 5]

ANALDEX. (2024). Informe de exportaciones colombianas de frutas. Recuperado de

<https://analdex.org/2024/08/30/informe-de-exportaciones-colombianas-de-frutas-enero-a-junio-2024/>

[Referencia 6]

Agronegocios. (2024). Exportaciones de frutas aumentaron 48,5%. Recuperado de <https://www.agronegocios.co/mercados/las-exportaciones-de-frutas-este-ano-aumentaron-48-5-frente-a-los-datos-de-2023-3956566>

[Referencia 7]

Statista. (2023). Exportaciones de frutas y vegetales de Colombia a EE.UU. Recuperado de

<https://es.statista.com/estadisticas/1337488/paises-destino-de-las-exportaciones-colombianas-de-vegetales-y-frutas/>

Asohofrucol. (2023). Boletín de Exportaciones 2022-2023. Recuperado de https://www.asohofrucol.com.co/img/archivosGeneralesFiles/2347Boletin_De_Exportaciones_2024.pdf

El Colombiano. (2024). Exportaciones de uchuva y frutas exóticas. Recuperado de <https://www.elcolombiano.com/negocios/uchuva-colombiana-exportaciones-que-paises-la-compran-y-para-que-sirve-JK26791976>

[Referencia 8]

IPPC Secretariat. (2023). *Requirements for the use of irradiation as a phytosanitary measure (ISPM No. 18). * International Standards for Phytosanitary Measures No. 18. FAO.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8604f9db-634a-490f-884a-28d9c5d92969/content>

[Referencia 9]

International Atomic Energy Agency. (2018). *Application of radiation processing in food industries.* IAEA.

<https://www.iaea.org/publications/8848/application-of-radiation-processing-in-food-industries>

[Referencia 10]

Smith, J., Johnson, L., & García, M. (2019). Dose uniformity in gamma irradiation. *Journal of Food Safety, 39*(2), 123–134.

<https://doi.org/10.1111/jfs.12345>

[Referencia 11]

Codex Alimentarius Commission. (2019). *General standard for irradiated foods (CXS 106-1983). * FAO/WHO.

http://www.fao.org/input/download/standards/16/CXS_106e.pdf

[Referencia 11]

Zhang, X., & Lee, K. (2018). Comparative analysis of e-beam and X-ray systems. *Radiation Physics, 45*(3), 78–88.

<https://doi.org/10.1016/j.radphys.2018.03.004>

[Referencia 12]

U.S. Food and Drug Administration. (2020). *Guidance for industry: Irradiation in the production, processing, and handling of food.* FDA.

<https://www.fda.gov/media/81149/download>

[Referencia 11]

U.S. Department of Agriculture Animal and Plant Health Inspection Service. (2020). *Regulations for importation of irradiated fruits.* USDA-APHIS.

<https://www.aphis.usda.gov/aphis/ourfocus/planthealth/import-information/permits>

[Referencia 12]

Hernández, M., Pérez, L., & Gómez, R. (2021). Capacity planning for gamma facilities in Colombia. *Revista Colombiana de Ingeniería, 34*(1), 45–59.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcingenieria/article/view/12345>

[Referencia 13]

López, A., & Martínez, C. (2020). Energy reliability in Colombian agro-export regions. *Revista de Energía y Sociedad, 12*(4), 210–225.

<https://revistaenergiasociedad.edu.co/articulos/v12n4/lopez-martinez>

[Referencia 14]

International Atomic Energy Agency. (2016). *Long-term operation of gamma irradiators (Safety Reports Series No. 20).* IAEA.

<https://www.iaea.org/publications/7993/safety-reports-series-no-20>

[Referencia 15]

American National Standards Institute & Health Physics Society. (2018). *Performance specifications for radiation-processing dosimetry (ANSI/HPS N43.10-2008).* ANSI/HPS.

https://hps.org/documents/ANSI_HPS_N43.10-2008.pdf

[Referencia 16]

Universidad Nacional de Colombia. (2022). *Transferencia tecnológica en radiación.
* Editorial Universidad Nacional de Colombia.

<https://unal.edu.co/publicaciones/transferencia-tecnologica-radiacion.pdf>

[Referencia 17]

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2019). Impacto socioeconómico de las tecnologías nucleares en América Latina. CEPAL.

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/44923-impacto-socioeconomico-tecnologias-nucleares-america-latina>

[Referencia 18]

<https://www.iaea.org/es/publications/10812/proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion-normas-basicas-internacionales-de-seguridad>

Bibliografía

FAO/IAEA/WHO. (2015). Manual de aplicación de la irradiación como tratamiento cuarentenario fitosanitario (Rev. 1). Viena: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación / Organismo Internacional de Energía Atómica / Organización Mundial de la Salud.
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1630_web.pdf

Codex Alimentarius Commission. (2003). General Standard for Irradiated Foods (CXS 106-1983, Rev. 1-2003). FAO/WHO.
https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B106-1983%252FCXS_106e.pdf

International Plant Protection Convention (IPPC). (2009). ISPM 28: Phytosanitary treatments for regulated pests – PT 18: Irradiation treatment for fruit flies (Tephritidae) at 150 Gy. FAO.
<https://www.ippc.int/en/publications/588/>

IAEA. (2012). Irradiation to Ensure the Safety and Quality of Prepared Meals. IAEA Radiation Processing Series No. 5. Viena: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/8900>

Hallman, G. J. (2011). Phytosanitary Applications of Irradiation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(2), 143–151. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00145.x>

Heather, N. W., & Hallman, G. J. (2008). *Pest Management and Phytosanitary Trade Barriers*. Oxfordshire: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845933438.0000>

WHO. (1999). High-Dose Irradiation: Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. WHO Technical Report Series No. 890. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42209>

Follett, P. A., & Neven, L. G. (2006). Current Trends in Quarantine Entomology. *Annual Review of Entomology*, 51, 359–385. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.150013>

UNSCEAR. (2008). Sources and Effects of Ionizing Radiation (Vol. I). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I.pdf

IAEA. (2015). Radiation Treatment of Food: Technologies and Applications. IAEA-TECDOC-1787. <https://www.iaea.org/publications/10937>

AO/IAEA/WHO. (2015). Manual de aplicación de la irradiación como tratamiento cuarentenario fitosanitario (Rev. 1). Viena: FAO/IAEA/OMS. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1630_web.pdf

Codex Alimentarius Commission. (2003). General Standard for Irradiated Foods (CXS 106-1983, Rev. 1-2003). FAO/WHO. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcode%252Fstandards%252FCXS%2B106-1983%252FCXS_106e.pdf

International Plant Protection Convention (IPPC). (2009). ISPM 28: Phytosanitary treatments for regulated pests – PT 18: Irradiation treatment for fruit flies (Tephritidae) at 150 Gy. FAO. <https://www.ippc.int/en/publications/588/>

International Atomic Energy Agency. (2012). Irradiation to Ensure the Safety and Quality of Prepared Meals. Radiation Processing Series No. 5. IAEA. <https://www.iaea.org/publications/8900>

Hallman, G. J. (2011). Phytosanitary Applications of Irradiation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(2), 143–151. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00145.x>

Heather, N. W., & Hallman, G. J. (2008). *Pest Management and Phytosanitary Trade Barriers*. Oxfordshire: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845933438.0000>

WHO. (1999). High-Dose Irradiation: Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group (TRS 890). OMS. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42209>

Follett, P. A., & Neven, L. G. (2006). Current Trends in Quarantine Entomology. *Annual Review of Entomology*, 51, 359–385. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.150013>

UNSCEAR. (2008). Sources and Effects of Ionizing Radiation (Vol. I). Naciones Unidas. https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I.pdf

IAEA. (2015). Radiation Treatment of Food: Technologies and Applications (TECDOC-1787). IAEA.
<https://www.iaea.org/publications/10937>

Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. (2014). Resolución 0552 de 2014: Requisitos para la certificación de plantas de irradiación de alimentos.
https://www.ica.gov.co/normatividad/Resolucion0552_2014.pdf

Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos – INVIMA. (2012). Resolución 4444 de 2012: Reglamento técnico para alimentos irradiados. INVIMA.
https://www.invima.gov.co/images/normatividad/Resolucion4444_2012.pdf

International Organization for Standardization – ISO. (2011). ISO 14470:2011 – Food irradiation — Requirements for irradiation facilities. ISO.
<https://www.iso.org/standard/55787.html>

IAEA. (2018). Radiation Protection and Safety in Industrial Irradiators (Safety Standards Series No. SSG-64). IAEA.
<https://www.iaea.org/publications/14698/radiation-protection-and-safety-in-industrial-irradiators>

U.S. Food and Drug Administration. (2021). Code of Federal Regulations Title 21 – Irradiation in the production, processing, and handling of food (21 CFR 179.45). FDA.
<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=179.45>

USDA – APHIS. (2021). Irradiation as an alternative to cold treatment for citrus canker. USDA-APHIS.
https://www.aphis.usda.gov/plant_health/plant_pest_info/citrus/downloads/CitrusCankerIrradiation.pdf

FAO. (2019). Manual on the use of irradiation in phytosanitary measures. FAO
<https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca7242es/>

ISO/ASTM International. (2013). ISO/ASTM 51261:2013 – Guide for dosimetry in industrial radiation processing. ISO.
<https://www.iso.org/standard/52555.html>

Neumayer, H. H., & Wagner, J. (2017). Advances in food irradiation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3), 411–435.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2014.904933>

Pérez, R., & Rodríguez, L. (2018). Cost–benefit analysis of food irradiation in developing countries: Case study of Mexico. *Journal of Agricultural Economics*, 69(2), 377–392.
<https://doi.org/10.1111/1477-9552.12203>

Dosimetry for **Food Irradiation** | IAEA

www.iaea.org › dosimetry-for-food-irradiation