



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN



8  
2g'

# Preservación de Frutas y Hortalizas por Irradiación

(MONOGRAFIA)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A  
DEBORAH JAYA FLASCHNER CYBULA

Director de Tesis,  
DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1991



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

INDICE GENERAL

	PAGINA
I.-Resumen.	1
II.-Objetivos.	2
III.-Introducción.	3
1.-Capítulo Primero: Aspectos Generales de la Irradiación de Alimentos.	4
1.1 Antecedentes Históricos.	4
1.2 Desarrollo de los programas para la Irradiación de Alimentos.	5
1.3 El Proceso de Radiación Ionizante.	6
1.4 Tipos de Radiaciones utilizadas para el tratamiento de Alimentos.	8
1.5 Interacción de la Radiación Ionizante con la materia.	8
1.6 Otros procesos de Pérdida de Energía: Bremsstrahlung y Radiación de Cerenkov.	9
1.7 Tipos de Interacciones de Rayos Gamma y Rayos $\lambda$ .	10
1.8 Diversas fuentes de Radiación Isotópica (Gamma).	11
1.9 Factores a considerar al seleccionar una fuente de Rayos Gamma.	14
1.10 Propiedades de las Fuentes de Rayos Gamma.	17
1.11 Equipos utilizados como fuente de Irradiación.	18
1.12 Dosimetría.	22
1.13 Resumen.	23
1.14 Bibliografía.	31
2.0 Capítulo Segundo: Química de la Radiación.	32
2.1 Bases de la Química de Radiación.	33
2.2 Efectos Químicos de la Radiación Ionizante.	33
2.2.1 Efectos Químicos Primarios.	34
2.2.2 Efectos Químicos Secundarios.	35
2.3 Efectos Producidos en los Sistemas Acuáticos.	36
2.4 Química de Radiación de los Componentes de las Frutas y Verduras.	42
2.4.1 Carbohidratos.	43
2.4.1.1 Mezclas de CHOS con proteínas y lípidos.	46
2.4.2 Proteínas.	46
2.4.2.1 Proteínas secas.	47
2.4.2.2 Proteínas húmedas.	50
2.4.3 Lípidos.	50
2.4.4 Vitaminas.	51
2.4.4.1 Vitaminas Hidrosolubles.	51
2.4.4.2 Vitaminas Liposolubles.	51
2.5 Química de Radiación de Frutas y Vegetales.	52
2.6 Resumen.	53
2.7 Bibliografía.	55
3.0 Capítulo Tercero: Efectos Generales de la Irradiación en Frutas y Vegetales.	56
3.1 Factores que influyen en la respuesta de las frutas y vegetales a la irradiación.	56
3.2 Aplicaciones Potenciales de la Irradiación de Frutas y Vegetales.	58
3.2.1 Radurización y Radicidación de Frutas y Vegetales.	59
3.2.2 Tecnología de la Radurización.	60
3.2.3 Retardo en la Maduración y Senescencia de Frutas Cosechadas.	70

3.2.4 Inhibición de la germinación de Tubérculos y Bulbos.	75
3.2.5 Desinfestación de Insectos.	81
3.3 Resumen.	82
3.4 Bibliografía.	82
4.0 Capítulo Cuarto: Análisis Comparativo de la Irradiación con los Procesos de Conservación.	85
4.1 Perspectivas de las Técnicas de Irradiación.	85
4.2 Irradiadores Gamma.	90
4.3 Factores Económicos.	90
4.4 Bibliografía.	93
APENDICE A: Glosario de Términos Usados en la Irradiación de Alimentos.	94
APENDICE B: Tabla de Conversiones de RAD a GRAYS.	98

## RESUMEN

Este trabajo comprende un estudio de la Irradiación de Frutas y Vegetales presentando desde la historia de este proceso hasta las posibles aplicaciones potenciales de ésta sobre en los productos.

El primer capítulo se encarga de resumir las causas más importantes que motivaron las Investigaciones en Irradiación de Alimentos.

Se presenta la Radiación Isotópica como tal, incluyendo las fuentes de Radiación Isotópica (Gamma) y los diversos equipos que se utilizan como fuente de Irradiación. Se puede analizar la forma en que la materia interactúa con las radiaciones dependiendo de su composición química y física, así como de la temperatura y el tipo de radiación.

Se muestran las diferencias existentes entre el Cobalto 60 y el Cesio 137-134. Se puede decir que éste capítulo da las bases para la comprensión del proceso de Radiación Ionizante.

El capítulo segundo, nos permite revisar las bases de la Química de Radiación y sus efectos sobre los componentes de las frutas y verduras. Se puede analizar el efecto que tiene la Irradiación sobre Carbohidratos, Proteínas, Lípidos y Vitaminas.

Los cambios químicos causados por la irradiación que tienen que ver con los alimentos, y los cambios en los contaminantes de éstas.

Desde el punto de vista de Radiación de Alimentos, uno de los cambios que suceden es el rompimiento del enlace glucosídico, que será el causante de la pérdida de textura y causará el ablandamiento de frutas y verduras. El ablandamiento también está relacionado con la degradación por radiación de los carbohidratos asociados con una textura normal, principalmente la celulosa, la pectina y el almidón. Se puede notar que los estudios de Irradiación de frutas y vegetales se han limitado a dosis relativamente bajas (menores a 3 kGy).

En el capítulo tercero, se revisan los efectos generales de la Radiación Ionizante en las frutas y vegetales. Este es el capítulo más extenso debido a que se presentan diversos ejemplos de frutas y vegetales donde se han intentado realizar pruebas de aplicación de la Irradiación con diversos fines:

Estos fines pueden ser:

- Madurización y Radicación.
- Retardo en la Maduración y Senescencia de Frutas.
- Inhibición de la Germinación de Tubérculos y Bulbos y.
- Desinfestación de Insectos.

El último capítulo presenta el potencial de utilización de éste proceso además de un análisis comparativo de la irradiación con los procesos de Conservación.

Se muestra una pequeña descripción de los Irradiadores Gamma más comúnmente utilizados y los Factores económicos asociados con una planta de Irradiación.

En conclusión, este trabajo pretende dar un análisis global de lo que puede ser la Irradiación y las Aplicaciones que puede tener en las Frutas y Vegetales como método de conservación.

#### OBJETIVOS DE LA TESIS

- 1.-Proporcionar un panorama tecnológico del potencial de aplicaciones y sus principales problemáticas para apoyar el enfoque de la Investigación en Irradiación.
- 2.-Analizar el avance de conocimientos en el campo de la Radiación Ionizante de Frutas y Vegetales.
- 3.-Dar un panorama general de la Bibliografía existente en la FESC-UNAM, acerca de la Preservación de Alimentos por medio de la Radiación Ionizante.
- 4.-Compendiar los conocimientos sobre la irradiación de Frutas y Hortalizas como método de Preservación.
- 5.-Apoyar bibliográficamente las investigaciones que se pudieran llevar a cabo sobre este tema en la U.N.A.M.

## INTRODUCCIÓN

En 1800 Nicolas Appert recibió un premio por la invención de un método térmico de preservación de alimentos que nació a los alimentos perecederos estables cuando se almacenaban en refrigeración.

Al paso del siglo en que los métodos de conservación presentaron un desarrollo poco notable, apareció una nueva era que aplicaba la radiación electromagnética en la forma de electrones acelerados, rayos  $\gamma$ , o irradiaciones en la preservación de alimentos.

En febrero de 1960, se aprobó el consumo de tocino irradiado en los Estados Unidos. Se trataba de tocino empacado en latas de estaño y luego era irradiado con una dosis de 4.5 Mrad de rayos gamma con una fuente de Cobalto 60. Este fue el primer alimento irradiado permitido a un nivel de esterilización.

En agosto 23 de 1963, la FDA (Food and Drug Administration), permitió al trigo y a sus subproductos irradiados con 50000 Rad, para la desinfestación, y en mayo 21 de 1964, se dio acreditación a las papas blancas irradiadas con una dosis que no sobrepasaran los 10000 rad para la inhibición de la germinación.

Además, el problema de las frutas infestadas siempre ha estado latente debido a que las reglamentaciones evitan que estos productos puedan ser importados a los Estados Unidos. De esta manera, las primeras investigaciones que se realizaron en frutas, fueron llevadas a cabo en Hawái, sobre lotes de papayas, berenjenas y pimientos. De esta forma se trató de eliminar la mosca de las frutas con buenos resultados.

Podemos dividir a los objetivos de la Preservación de Alimentos por Irradiación en tres categorías:

a) Destrucción de todos los microorganismos de degradación y patógenos en los alimentos. (Radapertización), para que la pudrición microbiana no se lleve a cabo pese a las condiciones de almacenamiento.

b) Tratamientos en alimentos para destruir microorganismos patógenos no formadores de esporas viables (Raducidación).

c) Reducción del número de microorganismos causantes de pudriciones suficiente para mantener la calidad del alimento (Radurización).

Quedando entre estas categorías aplicaciones tales como:

d) Desinfestación de Insectos,

e) Inhibición de la Germinación de Tubérculos y Bulbos.

f) Retraso de la Maduración de Frutas.

Siendo estos tres últimos los que se describirán con mas detalle en esta tesis, ya que son los mas relacionados con las frutas y hortalizas.

En este trabajo se pretende presentar las posibles aplicaciones de la Radiación Ionizante en Frutas y Vegetales como método de preservación, presentando a su vez un pequeño análisis de el potencial que pudiera tener este método. No se pretende proponer al metodo como la unica opcion de preservacion de alimentos, sino como otra alternativa que aumente la efectividad de los tratamientos de preservación y conservación de frutas y hortalizas. En este trabajo se mencionarán varios ejemplos de aplicaciones ya hechas y los resultados obtenidos. Algunos han sido magníficos permitiendo aumentar la vida de algunos productos con mejores resultados que los obtenidos por otros métodos. Por otra parte, también se observará que existen productos para los que no se recomienda este método debido a sus efectos en las características sensoriales de los mismos.

## CAPITULO PRIMERO

### ASPECTOS GENERALES DE LA IRRADIACION DE ALIMENTOS

#### 1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

La preservación de alimentos por radiación ionizante ha sido sujeto de interés por más de 30 años, pero no fue hasta que el desarrollo de grandes máquinas y fuentes isotópicas, que la investigación extensiva pudo comenzar con la factibilidad de preservar alimentos por irradiación. El estímulo inicial para la aplicación de la radiación para este propósito surgió del hecho que los microorganismos podrían ser destruidos con un aumento despreciable de la temperatura. (Clarke I.D. 1967).

En 1809 Nicolás Appert recibió un premio por la invención de un método térmico de preservación de alimentos que hacía a los alimentos perecederos estables cuando se almacenaban sin refrigeración.

A finales del siglo XIX se inició el estudio de las aplicaciones de la radiación electromagnética en la forma de electrones acelerados, rayos X ó irradiaciones en la preservación de alimentos.

Roentgen anunció el descubrimiento de los rayos X en 1895 y Becquerel de la radioactividad en 1896. (Brynjolfsson A. y Wang C.P. 1933).

Los desarrollos tecnológicos durante la segunda guerra mundial, produjeron equipos adaptados para mejorar el proceso de radiación ionizante. Los tubos klystron desarrollados para radares, fueron usados para construir aceleradores de electrones de muy alto poder y ciertos radioisótopos generados en reactores atómicos quedaron disponibles como fuentes importantes de rayos gamma. (Josephson E.S. y Peterson M.S. 1983).

Los estudios de irradiación de alimentos en los E.E.U.U., comenzaron en los principios de los 50 cuando tanto las fuentes de radiación, los equipos de procesamiento alcanzaron un nivel práctico.

La mayoría de los estudios han sido patrocinados por el gobierno de los E.E.U.U., debido por lo menos en parte, a que la Enmienda de Aditivos de Alimentos y Drogas, Alimentos y Cosméticos, requería de una aprobación de la FDA, antes de que cualquier alimento irradiado fuera puesto a la venta. (IFT 1983).

En febrero de 1960 se aprobó el consumo de tocino irradiado por la FDA (Federal Drugs Administration). Se trataba de tocino empacado en latas de estaño y luego irradiado con una dosis de 4.5 Mrad de rayos Gamma, utilizando una fuente de Cobalto 60. Fue el primer alimento irradiado liberado a nivel de esterilización.

En agosto 23 de 1964 la FDA aprobó el trigo y subproductos irradiados con 50000 rad para la desinfección y en mayo 21 de 1964, se dio acreditación a las papes blancas irradiadas para el control de la germinación con una dosis que no sobrepasaran los 10000 rad.

El problema de las frutas parasitadas necesitaba ser resuelto debido a que las normas prohibían la importación a los Estados Unidos. Las investigaciones fueron llevadas a cabo en Hawaii sobre lotes de papayas, peronjeadas y plátanos, para la eliminación de la mosca de la fruta, obteniéndose muy buenos resultados. (Josephson E.S. y Peterson M.S. 1983).

Los objetivos de la preservación de alimentos por irradiación pueden ser divididos en tres categorías: (Loaharanu F. y Urbain W.M. 1983):

a) Destrucción de todos los microorganismos de degradación y patógenos en los alimentos (radapertización), para que la putrefacción microbiana no se lleve a cabo pese a las condiciones de almacenamiento.

b) Tratamiento de alimentos para destruir microorganismos patógenos no formadores de esporas viables (radicidación).

c) Reducción del número de microorganismos causantes de putrefacciones suficiente para mantener la calidad del alimento (irradiación).

Otros objetivos son:

- e) La Desinfestación de Insectos
- f) Inhibición de la Germinación de Tubérculos y Bulbos, y
- g) El Retraso de la Maduración de Frutas.

## 1.2 Desarrollo de los programas para la Irradiación de Alimentos.

Alimentar a la población mundial se está convirtiendo en un problema mayor a medida que los años transcurren. No sólo existe el problema de producir suficientes alimentos, sino que está el problema de prevenir la pérdida de parte de estos alimentos disponibles. Los daños causados por insectos en productos almacenados frescos, producen grandes pérdidas. Se estima que estas podrían alimentar a varios millones de personas. Por lo tanto, los esfuerzos para mejorar la situación deben ser manejados sobre una base internacional. La irradiación se está convirtiendo en una de las técnicas aplicables a la solución del problema de preservar los productos agrícolas y los alimentos. Es un método físico de preservación de alimentos, limpio y ambientalmente atractivo y modesto en requerimientos energéticos. Además, conlleva a la reducción en el consumo convencional de combustible y por lo tanto, reduce la contaminación de la atmósfera. (Fraser F.M. 1983).

Muchos países están llevando a cabo trabajos sobre los efectos químicos y biológicos de la radiación de alimentos y sus constituyentes, además, en trabajos de radurización, radurización, desinfección e inhibición de la germinación de tubérculos y bulbos, así como los aspectos de seguridad y salubridad de las irradiaciones. Sin embargo, otros campos, como la radurización, empaque, estudios de proceso, aspectos económicos y detección de los tratamientos de irradiación, han sido explorados en sólo algunos países (Burditt A.Jr. 1982).

La explicación más plausible acerca de la situación anterior, parece ser el hecho de que la mayoría de los trabajos llevados a cabo han sido a nivel de laboratorio. En muchas instituciones, las etapas de investigación, que envuelven estudios de factibilidad económica y tecnológica, pueden ser posibles solamente por fuentes muy grandes de radiación y todavía no se han alcanzado. La cantidad total de isótopos radiantes ( $^{60}\text{Co}$  o  $^{137}\text{Cs}$ ), instalados y activos en 1975, pueden ser calculados en aproximadamente 10 MCi ( $9.66 \text{ MCi} = 357 \text{ Fbq } ^{60}\text{Co}$ ) correspondiendo aproximadamente a 137 kW. (Fraser F.M. 1983).

Hay varias organizaciones internacionales involucradas en el trabajo de irradiación de alimentos:

- 1.-FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Roma, Italia.
- 2.-International Atomic Energy Agency (IAEA), Viena, Austria.
- 3.-World Health Organization (WHO) (OMS) Ginebra, Suiza.
- 4.-United Nations Environmental Programme (UNEP) Ginebra.
- 5.-Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)-Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) Francia.
- 6.-International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria.
- 7.-Council of Mutual Economic Assistance (CMEA, antes COMECON) USSR.
- 8.-United Nations Development Program (UNDP)

El Objetivo del Programa de la Sección de Alimentos es ayudar y asesorar a los miembros de la FAO y IAEA en habilitar la aplicación práctica de la irradiación de alimentos. Para llevar a cabo esta función, se han establecido dos programas:

- I.-Factibilidad tecnológica y económica en irradiación de alimentos, en el cual el objetivo es colaborar en la implementación de proyectos que aumentan la vida de algunos de los alimentos y de la irradiación de algunos alimentos a nivel piloto a través del análisis riguroso de la factibilidad tecnológica-económica y de requerimientos energéticos.
- II.-La aceptación por Salud Pública en los aspectos regulatorios del proceso de irradiación de alimentos, el objetivo es ayudar a alcanzar la aceptación global



La Radiación Corpuscular involucra a las partículas que tienen masa, las cuales poseen energía cinética cuando se encuentran en movimiento. (Urbain W.M. 1986). La relación de Energía Cinética E, con la masa y la velocidad, esta dada por la ecuación:

$$E = \frac{1}{2} \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \dots (3)$$

Donde  $m_0$  es la masa de la partícula en reposo,  $v$  su velocidad y  $c$ , la velocidad de propagación de la energía electromagnética.

La radiación ionizante puede causar ionización, el cual es un proceso en el que uno o más electrones orbitales son removidos de un átomo. El proceso es independiente de la localización de los átomos, esto es, si está libre o existe como parte de la molécula. La ionización lleva a la formación de dos o más cuerpos separados:

- 1) Uno o más electrones apareados "libres", cada uno de los cuales lleva una carga negativa, y
- 2) El residuo del átomo, que está positivamente cargado, y es el ión, o más específicamente un catión.

Las energías mínimas requeridas para liberar a los electrones presentes en los diferentes niveles atómicos son denominados "Potenciales de Ionización" (Brynjolfsson A. y Wang C.P. 1983).

El espectro electromagnético muestra que energía entre 4 y 20 eV, se encuentran en la región Ultravioleta, y que fotones con energías mayores son obtenidos con rayos X y rayos Gamma. Esto es posible observarlo en la figura (1.1). Por lo tanto, todos estos tipos de radiaciones electromagnéticas son capaces de causar ionización.

figura (1.1)

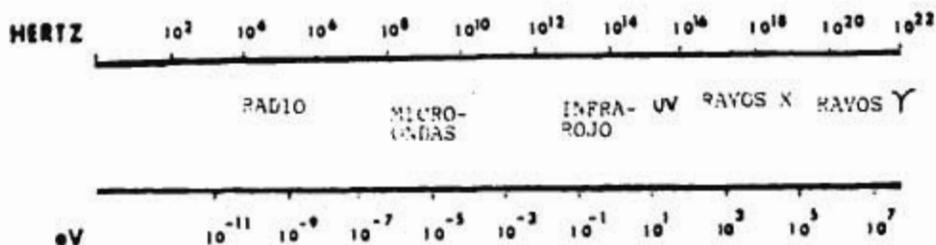


FIGURA (1.1) ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Con la radiación ionizante, cada fotón ó partícula tiene cantidades de energías mayores que las necesarias para producir una excitación o ionización, y dando a cada molécula tan sólo una porción de su energía total, puede excitar o ionizar muchas moléculas secuencialmente. Debido a esto, pueden ocurrir distintos cambios como la descomposición unimolecular, la formación de radicales libres y de especies moleculares nuevas, incluyendo la interacción con otras entidades presentes. Todos estos cambios químicos son la base de la Irradiación de los Alimentos. (Urbain W.M. 1985).

#### 1.4 Tipos de Radiaciones utilizadas para el Tratamiento de Alimentos.

Las consideraciones mencionadas anteriormente, han llevado a pensar que las energías de radiación de principal interés para la preservación de alimentos, sean los rayos Gamma, los rayos X y los haces de electrones. (Clarke I.D.1967). Aunque se han encontrado un número de partículas dentro del átomo a las cuales se les puede proporcionar energía cinética, sólo una, el electrón, ha encontrado aplicación en la irradiación de alimentos, debido a que:

- 1) Son fácilmente obtenibles en grandes cantidades.
- 2) Llevan una carga eléctrica que permite el uso de campos electrostáticos para impartir cantidades controladas de energía,
- 3) Puede ser dirigida y enfocada magnéticamente.

Mientras que cada electrón actúa individualmente, en la irradiación de alimentos, se usa un gran número de electrones, que se han hecho para viajar en una dirección dada y que colectivamente se denominan como "Haz de electrones". (Urbain W.M.1986). Así, para que puedan ser útiles en el tratamiento de alimentos, las radiaciones deben tener la capacidad de penetrar a diversas profundidades en un sólido alimentario. A los electrones se les puede dar suficiente energía para penetrar profundidades útiles en alimentos. Las radiaciones ultravioleta son esencialmente absorbidas en la superficie de los materiales como los alimentos, y por lo tanto, no cumplen con este requerimiento, por el contrario, los rayos X y los rayos Gamma, tienen capacidades de penetración totalmente adecuadas para cualquier tipo de alimento. De esta forma, estos dos últimos son los más utilizados en la aplicación a la que nos referimos, la preservación de frutas y hortalizas.

#### 1.5 Interacción de la Radiación Ionizante con la Materia.

Es necesario comprender los procesos mediante los cuales, las partículas cargadas, (derivadas de los rayos gamma, rayos X y haces de electrones), interactúan con la materia.

Esta interacción es compleja, lo que suceda dependerá de:

-Tipo de radiación y el contenido de energía.

-Composición química y física.

-Temperatura del material absorbente, además de otros factores como la velocidad de distribución de energía y el ambiente atmosférico.

El proceso primario de interacción es esencialmente la transferencia de energía de la fuente de radiación incidente hacia el absorbedor. Sin embargo, sólo la energía absorbida es efectiva en la producción de cambios.

Existen tres aspectos importantes del proceso de interacción:

a) El proceso físico,

b) Los cambios químicos que se derivan de los eventos físicos y,

c) Las consecuencias biológicas en los casos en que el objetivo sea un organismo viviente. (Wang C.P. y Brynjolfsson A. 1983).

Los procesos físicos que están relacionados con la interacción de las radiaciones ionizantes con la materia, utilizadas en alimentos, se mencionan a continuación en este capítulo. Los demás cambios se mencionarán en los capítulos siguientes. (Clarke I.D. 1970).

Dentro de los procesos físicos se pueden encontrar tres clases de interacciones entre partículas:

1.-La interacción electromagnética.

2.-La interacción "fuerte".

3.-La interacción "débil".

La interacción "fuerte", es la que da lugar a las reacciones nucleares y a otra producción de partículas por los protones o partículas alfa. Las reacciones nucleares y la producción de partículas a través de la interacción fuerte son materias importantes, pero no entran dentro de la irradiación de Alimentos.

La interacción electromagnética por un lado, causa ionización y excitación de los sistemas atómicos del medio, y por otro lado, induce radiación de partículas cargadas cuando son dispersadas del campo eléctrico del núcleo. (Wang C.P. y Brynjolfsson A. 1983).

Las partículas cargadas como los electrones de energía moderada interactúan a través de las fuerzas eléctricas entre ellos y los electrones orbitales de los átomos del absorbedor. La fuerza repulsiva entre un electrón incidente y un electrón orbital puede causar a este último que se mueva a una órbita de mayor energía; es decir, el electrón que se encuentra sobre la órbita del átomo, va a llevar a cabo un salto a otra órbita, llamando a este proceso como una excitación. Además, si el electrón incidente transfiere suficiente energía al electrón orbital, puede provocar que salga proyectado fuera del átomo. Este proceso es el denominado ionización.

Los procesos de transferencia de energía se pueden repetir varias veces y disipar toda la energía cinética del electrón incidente. Cuando esto sucede, el electrón es capturado por un átomo del absorbedor que posea una afinidad a electrones. (e.g. un catión). El camino del electrón incidente en un absorbedor no es recto, puede cambiar de dirección como resultado de la colisión con los átomos del absorbedor. La consecuencia es una dispersión de electrones en diferentes direcciones a las del electrón incidente.

1.3 Otros procesos de Pérdida de Energía: Bremsstrahlung y Radiación de Cerentkov.

En adición a la pérdida de energía a través de la excitación y la ionización, los electrones pueden perder energía también a través de dos procesos:

Bremsstrahlung (Radiación Frenada) y

Radiación de Cerentkov. (Urban M.M. 1985).

Estos procesos están relacionados con la radiación de las partículas cargadas.

Así, se puede decir que Bremsstrahlung es una radiación electromagnética comparable con los rayos X. Esto es, que resulta de la interacción de un

electrón de alta velocidad con el núcleo de un átomo y se lleva a cabo la conversión de alguna de las energías cinéticas del electrón a radiación electromagnética.

La proporción de energía del electrón convertida a Bremsstrahlung aumenta con la energía cinética del electrón y con el número atómico de los átomos del absorbedor.

Para materiales de números atómicos bajos ( como son los alimentos), Bremsstrahlung es apreciable solo con energías mayores a 1 MeV. Mientras que el Bremsstrahlung producido en un alimento puede ser insuficiente para producir un cambio químico, si la energía es suficientemente alta puede inducir radioactividad. Por esta razón se limita el nivel de energía del haz de electrones usados en la irradiación de alimentos.

Un electrón no puede obtener una velocidad mayor a la velocidad de radiación electromagnética. La velocidad de esta última, sin embargo, es diferente en medios diferentes. Es posible que un electrón viajando en un material, obtenga una velocidad mayor que la velocidad de la radiación electromagnética en otro material. En ese caso, el electrón entrando al otro medio lleva una pérdida de energía que usualmente aparece como ultravioleta o luz visible y que se denomina Radiación Cerenkov. (Brynjolfsson A. y Wang C.P. 1983).

El brillo azul alrededor del  $\text{Co}^{60}$  cuando se cubre de agua, es un ejemplo de este tipo. La radiación Cerenkov no tiene importancia en la irradiación de alimentos. (Urbain W.M. 1986).

#### 1.7 Tipos de Interacciones de Rayos Gamma y Rayos X.

Los fotones al no tener carga eléctrica, no están sujetos a fuerzas de Coulomb. Como consecuencia, su penetración dentro de un átomo es mayor a la de los electrones. De esta manera, como con los electrones, lo que suceda dependerá de la energía del fotón y de algunos parámetros del absorbedor como la composición física y química, el estado físico, temperatura y ambiente atmosférico. (Urbain W.M. 1986).

Se puede decir que existen tres mecanismos de Transferencia de energía para los rayos X y los rayos Gamma:

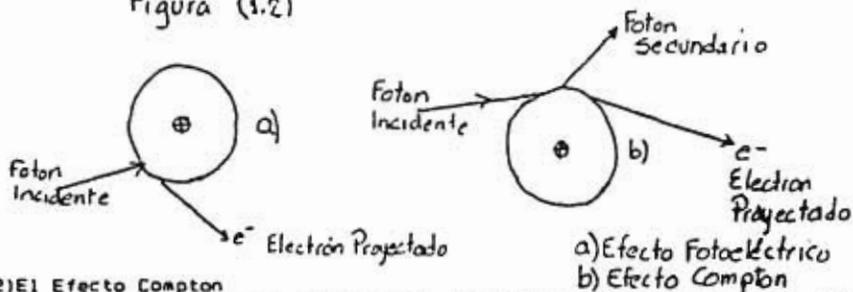
- 1) El Efecto Fotoeléctrico.
- 2) El Efecto Compton.
- 3) La producción de Pares.

A continuación se explica brevemente cada uno de ellos:

##### 1) El Efecto Fotoeléctrico:

En el Efecto Fotoeléctrico un quantum o paquete de energía electromagnética, esto es, un fotón, da toda su energía a un átomo, del cual un electrón es proyectado. Al perder un electrón, ocurre la ionización y el átomo adquiere una carga positiva. De esta manera, una parte de la energía del fotón puede ser utilizada para liberar al electrón. De la energía restante, una parte es adquirida por el electrón proyectado y otra se queda en el átomo en la forma de energía cinética. Se ha comprobado que un electrón de una órbita exterior de un átomo, sólo requiere aproximadamente 10 eV para su expulsión. Sin embargo, dicho efecto no está limitado a electrones exteriores. Estos requerirían solo 500 eV para ser expulsados. De esta manera, aun 500 eV son mucho menos de las energías de los fotones de los rayos X y Gamma y así, para estas radiaciones, el efecto fotoeléctrico es muy viable. La absorción fotoeléctrica ocurre ampliamente con fotones de energías menores a 0.1 MeV, en absorbedores teniendo números atómicos bajos. En la figura (1.2a), se puede observar la esquematización del efecto fotoeléctrico.

Figura (1.2)



### 2) El Efecto Compton

Para la absorción de radiaciones electromagnéticas por agua para energías mayores a 0.1 MeV, el efecto fotoeléctrico es reemplazado por el Efecto Compton, que se ilustra en la figura (1.2b). A diferencia del efecto fotoeléctrico, en el efecto Compton, sólo parte de la energía del fotón es transferida al átomo. Después de la interacción, el fotón incidente continúa a través del absorbente, pero con una dirección diferente y con menor energía. La energía transferida es utilizada para liberar a un electrón orbital del átomo y también para impartir energía cinética al electrón proyectado y al ion atómico remanente. Así, el electrón proyectado, conteniendo energía cinética, puede causar por sí mismo excitaciones e ionizaciones en átomos absorbentes. El efecto Compton se lleva a cabo como el mecanismo principal de transferencia de energía electromagnética en la irradiación de Alimentos.

### 3) Producción en pares.

El tercer mecanismo de transferencia de energía para la radiación electromagnética es denominada producción de pares. De esta manera, se lleva a cabo la absorción de un fotón y la formación subsiguiente de un electrón y de un positrón. La producción de pares involucra la conversión de un fotón de radiación electromagnética a materia, esto es, a dos partículas: un electrón y un positrón. Excepto para átomos de números atómicos grandes, la producción de pares no tiene importancia. De acuerdo a esto, para la irradiación de Alimentos es irrelevante.

### 1.8 Diversas fuentes de Radiación Isotópica (Gamma).

Existen tres principales fuentes para obtener rayos Gamma:

- 1) Elementos de Combustible Gastado.
- 2) Cobalto 60
- 3) Cesio 137-134.

Hasta este momento, son las únicas formas de producir rayos Gamma, y su utilización dependerá de su disponibilidad y costo principalmente. A continuación se explica brevemente cada una de ellas.

#### 1) Elementos de Combustible Gastado.

Han sido seleccionados debido a que están disponibles como productos de deshecho de los reactores a muy bajo o ningún costo. Son fuentes relativamente intensas de rayos Gamma con energías menores a 2 MeV.

Durante la operación de un reactor nuclear, los neutrones térmicos, (menores a 0.025 eV) son producidos por la colisión entre neutrones de alta energía (1 a 2 MeV), y el combustible. Estos neutrones térmicos interactúan con el combustible para producir productos de fisión que absorben neutrones adicionales, pero que no propagan la reacción en cadena.

Cualquier cosa que absorbe neutrones en el reactor además del combustible, disminuye la intensidad.

Como hay una formación de estos productos de fisión con el tiempo, es necesario renovar periódicamente del reactor a los elementos de combustible gastado ya utilizados y reemplazarlos con elementos de combustible frescos.

Después de ser removidos del reactor, los elementos del combustible gastado son normalmente transferidos a una alberca de almacenamiento. Aquí se mantienen en un período de enfriamiento radioactivo de 2 a 3 meses.

Después de un corto período de enfriamiento, (4 Meses), la energía promedio de los rayos gamma emitidos es de 1 MeV.

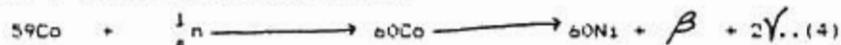
De esta manera, debido a la corta vida media (c.f. 1.9) de algunos radionucleótidos en el combustible gastado, hay inicialmente un rápido descenso de la intensidad gamma.

El diseño de los irradiadores de combustible gastado varía, pero esencialmente consiste de elementos del combustible gastado arreglados en varias configuraciones en el fondo de albercas llenas de agua. Se instalan platos de Cadmio para reducir la radioactividad alrededor de los elementos.

Las deficiencias en estas áreas, y la posibilidad de que algunos neutrones sean liberados de los elementos causando actividad inducida en los alimentos irradiados, ha provocado que no sea considerado como buena fuente de irradiación de alimentos.

## 2) Cobalto 60

La mayoría de las instalaciones comerciales de irradiación Gamma en operación, están utilizando Cobalto 60 como su fuente. Esto se debe a su disponibilidad y costo. El Cobalto 60, es principalmente producido en reactores de poder nuclear como subproducto. Al adicionar un neutrón monoisotópico de Cobalto 59 de acuerdo a la siguiente ecuación (4):



La cantidad de  $^{60}\text{Co}$  que puede ser producida en cualquier reactor depende del diseño del reactor, su flujo de neutrones en los puertos de irradiación para la inserción del cobalto, el tiempo que resta al cobalto en el reactor y su sección transversal de activación. El tiempo de exposición en un reactor es usualmente una función del tiempo del ciclo del combustible que para operación normal, quiere decir que el cobalto se encontrará aproximadamente 1 año en el reactor.

La producción de Cobalto en reactores de poder comerciales es dependiente de los ciclos de combustible y los flujos de neutrones del reactor. Debido a la economía, el cobalto 60 es usualmente removido del reactor antes de que exceda su actividad específica de 100 Ci/g y mas comunmente cuando su actividad promedio es aproximadamente 25 Ci/g.

El cobalto 60 se ha producido en una variedad de formas desde minipellets de 1 mm. de diámetro por 1 mm. de longitud, hasta pellets de 1.84 cm. diámetro por 25.4 cm. de longitud.

Para la irradiación comercial, hay tres formas que han dominado al mercado:

- Minipellets de 1 x 1 mm.
- Serpentines en hélice.
- Rondanas de 0.64 x 2.54 cm.

Todos los Cobalto 60 usados en los irradiadores de procesamiento de alimentos deben estar doblemente encapsulados para:

- a) Estar acuerdo con los requerimientos de las agencias reguladoras para el almacenamiento y uso de los radioisótopos.
- b) Eliminar la liberación de radioisótopos al ambiente durante el uso o en caso de accidentes.
- c) Proteger al radioisótopo del ambiente.

La doble encapsulación puede tener dos significados: Uno es donde el cobalto 59 es activado en un contenedor que es removido en una celda caliente, después de la activación, y luego el cobalto desnudo reencapsulado dos veces en contenedores sellados. La otra forma es donde el cobalto es activado en un contenedor y esta fuente y contenedor son reencapsulados en un segundo contenedor en una celda caliente.

Probablemente la fuente más usada que utiliza los minipellets es el AECL C-188. Esta fuente es básicamente un tubo de 1.1 Cm. de diámetro de varias longitudes

(para que cumpla con los requerimientos de diseño del irradiador). La única característica de estas fuentes es que los contactos terminales tienen un diámetro mayor al del tubo y la soldadura es en la pared lateral aproximadamente 1 cm del final de la fuente. Por este diseño, las paredes cilíndricas de la fuente y las soldaduras nunca están en contacto con otro metal. Todas las chaquetas de encapsulación y contactos terminales son de acero inoxidable 316L. (Josephson E.S. y Peterson M.S. 1983).

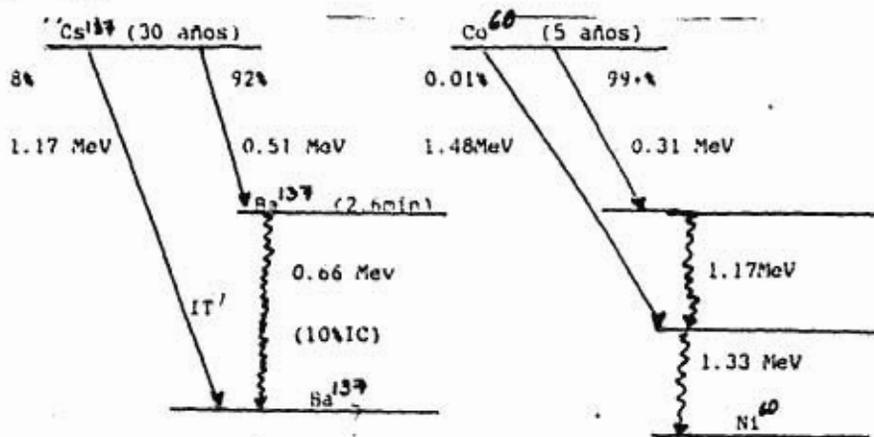
### 3) Cesio 137-134

Las fuentes de Cesio no se han usado en instalaciones comerciales debido a su costo y falta de disponibilidad. Por lo tanto, las fuentes de Cesio, solo son disponibles después de una inversión de multimillones de dólares. El Cesio 137 y el 134, no pueden ser fabricados en una forma de fuente final antes de la activación. Esto es, los isótopos de cesio son producidos en el combustible nuclear a partir de la fisión de Uranio 235 y son recuperables como productos de desecho durante el reprocesamiento de las rondanas del combustible gastado del reactor nuclear.

Operando a 25,000 MW/T, el Cesio 137 es producido a una velocidad de 41.6 kg/1000 MWano y el Cesio 134 a una velocidad de 4.4 kg/MWano.

El Cesio 137 es un subproducto de la fisión y se encuentra disponible en forma de cloruro. Los patrones de decaimiento para el Cesio 137 y el Cobalto 60 se muestran en la figura (1.3). Además, se provee de información adicional sobre el cesio 137 y el Cobalto 60 se muestra en la tabla (1.0).

Figura (1.3)



Esquema de desintegración para Cobalto 60 y Cesio 137.

"Training Manual of Food Irradiation Technology and Techniques" 1st Ed. Int. Atomic Energy Agency, Vienna, 1970.

Tabla (1.0)  
Características del Cs137 y del Co60

Características	Cs	Co
Forma típica de la fuente	Pellets de CsCl	Metal
Vida Media (años)	30	5.3
Disponibilidad Ci/g	25 Máximo	400 Máximo
Energía Gamma (MeV)	0.66	1.17 y 1.33
Poder Ci/g	258	68

Fuente: Urbain W.M. 1986.

En esta tabla (1.0) es posible analizar algunas de las características que tienen el Cs y el Co. Como hemos mencionado anteriormente, el Cs tiene una vida media casi seis veces mayor a la del Co60, pero muchas veces el Co60 esta económicamente mas disponible, además que provee de energías mayores a las que puede proveer el Cs137, aunque su poder en Ci/g sea casi tres veces menor al del Cs137.

A continuación se revisaran algunos de los factores a considerar si se quiere seleccionar una fuente de rayos Gamma.

#### 1.9 Factores a considerar al seleccionar una fuente de Rayos Gamma

Existen diversos factores que se deben tomar en cuenta para la selección de una fuente de rayos Gamma. Todos estos influirán en la decisión de selección, en base a los requerimientos del proceso. A continuación se enumeran dándose una

breve explicación de la importancia que pudiera tener cada uno:

a) Disponibilidad

La disponibilidad de la fuente es esencial. Para Cesio y Cobalto su disponibilidad está determinada por la disponibilidad de los reactores nucleares. Un tiempo promedio de dos años de vida media será razonable para el Cobalto 60 y de 5 a 10 años para el Cesio.

b) Economía.

Para una fuente de Cs137 o134 competir económicamente con su precio sería tres cuartas partes más del precio del Cobalto 60. Los principales factores que contribuyen al costo inicial de una instalación de irradiación son la fuente de rayos gamma, el aislamiento biológico, y el sistema del transporte del producto. Para grandes instalaciones el costo de la fuente será el que proporcione el costo inicial mayor, mientras que el costo de operación consistiría principalmente de la depreciación y de los costos de las refacciones.

c) Vida media.

El tiempo para que un isótopo se desintegre a la mitad de su actividad original, está determinado por la vida media. Cada radioisótopo tiene su propias velocidades de desintegración y no se conocen operaciones físicas y químicas que cambien la velocidad de desintegración.

La vida media de un isótopo debe ser considerada cuando se selecciona una fuente gamma para usar en un irradiador debido a que determina cuanto de la actividad original permanecerá después de un cierto período. Esto determina la vida de un irradiador de tal manera que se mantenga a una velocidad de producción dada.

La cantidad de radioisótopo que permanece después de n vidas medias puede ser determinada por la siguiente ecuación (5):

$$A = A_0 / 2^n \quad \dots (5)$$

$A_0$  = Act. original de la fuente

$A$  = Act. después de n vidas medias.

Por ejemplo, el Cobalto 60 tiene una vida media de 5.26 años, por lo tanto, después de 3 años de uso, sólo tendrá el 67.55% de su fuerza original:

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{3}{5.26} \right) \cdot A_0$$

donde la fuente de Cesio 137, tiene una vida media de 30.3 años, y después de 3 años de uso, retendrá el 93.3% de su fuerza original.

La vida media de una fuente, también determina que tan seguido hay que hacer correcciones a los parámetros del proceso, para asegurar que las muestras están recibiendo la dosis absorbida correcta.

d) Actividad Específica ( $S_{max}$ ).

La Actividad Específica de un radioisótopo es una medida del No. de Curies de un isótopo contenido en una unidad de masa. Es un factor importante en el diseño de un irradiador ya que afecta tanto a la temperatura como al tamaño físico de la fuente. A medida que se aumenta la Actividad Específica, la temperatura de la fuente aumenta debido a la autoabsorción y el tamaño de la fuente necesario para contener la misma actividad total disminuye. Para cualquier radioisótopo es posible calcular su actividad específica máxima conociendo su masa atómica (A) y su vida media  $T_{1/2}$  en años:

$$S_{max} = 3.73 \times 10^5 \frac{1}{A \times T_{1/2}} \quad (Ci/g) \quad \dots (6)$$

Esta ecuación está basada en la actividad específica del Radio226 teniendo 1 Ci/g y dándole una vida media de 1550 años.

De esta manera, usando esta ecuación se ha visto que la actividad teórica máxima para el Cobalto 60 es 1181 Ci/g asumiendo una masa atómica de 60 y una vida media de 5.26 años.

e) fuerza de la fuente.

La fuerza de la fuente requerida para un irradiador es determinada por la cantidad de producto que debe ser procesado por unidad de tiempo y por la dosis requerida para obtener el efecto deseado.

Conociendo que una fuente de 1 KW, asumiendo 100% de eficiencia, puede procesar 795 lb de producto por hora, con una dosis de 1 Mrad (260 kg de producto con una dosis de 10x8Gy) y que contendrá 57,578 Ci si es una fuente  $^{60}\text{Co}$  o 503,641 Ci si es de  $^{137}\text{Cs}$ . Es posible obtener una ecuación con la que se pueda estimar cuantos curies se requieren para el irradiador (7):

$$S = \frac{P \cdot D \cdot C \cdot E}{M \cdot H \cdot K}$$

S=fuerza de la fuente (Curies)  
P=lb de producto a irradiar/año  
D=Dosis mínima requerida para el efecto deseado  
M=Horas de irradiador/año (8000 hr)  
K=795 Mrad lb/hr KW  
C=Curies/KW (57,558 Ci para  $^{60}\text{Co}$ )  
E=Eficiencia (para 100% E=100/100)

#### f) Penetración

Los rayos Gamma son absorbidos en materiales de tal manera que para cualquier incremento igual de espesor de material el mismo porcentaje de radiación es absorbido. Midiendo la radiación que penetra un espesor necesario para reducir la intensidad original por la mitad o una décima parte. El espesor décimo es un valor muy útil ya que permite determinar fácilmente el espesor necesario para reducir la intensidad de radiación a un nivel especificado.

En un irradiador, el espesor del material aislante requerido para obtener una atenuación dada, es esencialmente independiente de su distancia de la fuente. Sin embargo, poniendo aislante cerca de la fuente, el área superficial (y por lo tanto el volumen y masa del aislante) es mas pequeño que si el aislante se colocara a una distancia de la fuente.

De esta manera, para un material de bajo número atómico (agua), la penetración varía aproximadamente un 40% entre el  $^{137}\text{Cs}$  y el  $^{60}\text{Co}$ , mientras que para un material de alto número atómico (Plomo), sobre el mismo rango de energía, la penetración varía por un factor aproximado de 2. Esto es significativo, ya que al irradiar sólidos alimentarios, que son de bajo número atómico, no deberán existir diferencias en las muestras que vayan a ser irradiadas con muy pequeñas variaciones de dosis de fuentes de Cesio 137 y Cobalto 60. Sin embargo, el espesor de aislante, esto es, su peso necesario para proveer la misma dosis superficial en el exterior de un irradiador variará grandemente entre los dos isótopos.

En un irradiador, el espesor del material aislante necesario para obtener una atenuación dada es esencialmente independiente de la distancia de la fuente hasta este. Sin embargo, colocando al aislante cerca de la fuente, el área superficial, (esto es, el volumen y el peso del aislante), será menor a que si se colocara a cierta distancia de la fuente.

#### g) Uniformidad de dosis

La uniformidad de la dosis en un irradiador es una medida de la relación de una dosis máxima, en una unidad de volumen a la dosis mínima. Una razón de que la fuente gamma sea seleccionada sobre la fuente electrónica es que la variación de la dosis en muestras de amplio espesor es menor con los rayos gamma, especialmente cuando la densidad del producto se aproxima a la unidad.

#### h) Temperatura de la fuente.

Todas las fuentes gamma muestran un aumento en la temperatura cuando son renovadas del medio de enfriamiento. La temperatura que las fuentes alcanzarán durante el uso depende del total de Curies (Ci), los coeficientes de absorción de las mismas fuentes, la configuración de la fuente y la temperatura ambiente en el irradiador.

Si la fuente gamma no es pura, como en el caso de fuentes de Cesio, y hay cantidades apreciables de rayos beta, el aumento en la temperatura puede ser considerable.

1)Eficiencia.

En un irradiador no toda la radiación generada es absorbida por el producto para producir el efecto deseado. Una porción de radiación es absorbida antes de que deje la fuente (autoabsorción), poca es absorbida por el mecanismo de transferencia del producto, poca pierde el producto al pasar entre objetos ó fluyendo en direcciones donde no se localiza ningún producto y poca radiación pasa completamente a través del producto sin ser absorbida.

Como resultado de estos factores, es común para un irradiador de Cesio tener sólo del 15 al 25% de radiación generada usualmente absorbida. Similarmente, para Cobalto 60 sólo del 20 al 35% es finalmente absorbido.

El objetivo al diseñar un irradiador, es hacerlo lo mas eficiente posible. Esto se logra teniendo a los transportadores del producto y a la fuente lo más transparentes posibles y teniendo al producto, completamente rodeando a la fuente y lo suficientemente ancho para que absorba la mayor cantidad posible de radiación.

2)Corrosión.

La corrosión de una fuente y un sistema de transporte es un factor que puede ser controlado por la apropiada selección de materiales, diseño y mantenimiento.

1.10 Propiedades de las fuentes de Rayos Gamma.

Para poder utilizar cualquiera de estas fuentes es necesario conocer todas sus propiedades con el fin de poder adaptarlas de la mejor manera a cualquiera de los procesos en los que se pretenda su aplicación. A continuación se presenta en la tabla (1.1), la enumeración de todas las propiedades del Cobalto 60, el Cesio 137 y el 134. Además, estas propiedades son de gran utilidad en la evaluación de estas fuentes para su elección en un irradiador gamma.

Tabla 1.1)  
Propiedades de las fuentes de Rayos Gamma.  
Propiedades Físicas del Cobalto, Cs137 y Cs134.

	60Co	137Cs	134Cs
Vida media(años)	5.26	30.3	2.06
Actividad Ci/g (máxima teórica)	1130.00	86.5	1271.00
Actividad Ci/g (fuente típica)	25-100	25	
Energía watt/Ci Gamma	$14.85 \times 10^{-3}$	$3.35 \times 10^{-3}$	$9.49 \times 10^{-3}$
Beta Ci/kw	$0.5 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$0.25 \times 10^{-3}$
Salida específica de Rayos gamma Rhm/Ci	1.30	0.32	0.8
Tipo de radiación (energías MeV)			
Gamma	1.17, 1.23	0.662 (Ba rayos)	0.57, 0.60, 0.80
Beta	0.22	0.51, 1.17	0.09, 0.66, otras
Número atómico	27	55	55
Fuente común	Metal	Cloruro	Sal
Punto de Fusión	1495 C	646 C	469 C
Densidad de la fuente común	8.7	3.6	3.6
Coef. de expansión térmica (C)	$1.2-1.8 \times 10^{-5}$		
Espesor medio (cm)			
concreto	6.2	4.8	
acero	2.1	1.6	
plomo	1.20	0.65	
Espesor décimo/cm(1/10)			
concreto	20.6	15.7	
acero	6.9	5.5	
plomo	4.0	2.1	

Fuente: Jarret R.D. Sr., in "Preservation of Food by Ionizing Radiation" 1983

#### 1.11 Equipos utilizados como fuente de Irradiación.

En esta sección se revisarán los aceleradores de partículas que pueden ser usados para el procesamiento industrial. También se hará mención de los irradiadores que utilizan isótopos para la producción de rayos X.

En la elección de cualquier equipo, se deben tomar en cuenta, la intensidad, energía, distribución espacial, homogeneidad y su dependencia con el tiempo. Se debe tener cuidado en la elección debido a que cualquier complejidad aumentará el capital y los costos de operación.

#### Aceleradores de partículas:

Las principales fuentes de máquinas proveen de radiación electrónica. Sin

embargo, las máquinas de rayos X, se han vuelto disponibles y se están convirtiendo en equipos importantes. Tanto las máquinas electrónicas como las de rayos X, utilizan electrones, a los cuales se les da la energía a través de campos eléctricos. De esta manera, la aceleración causada lleva a la adquisición de una considerable cantidad de energía cinética en los electrones. Las máquinas que logran esto son denominadas usualmente como "Aceleradores de Partículas" (Ramler W.J. 1987).

Los Aceleradores de partículas están clasificados por la naturaleza de las partículas que aceleran (como electrones o protones), por la naturaleza física de la máquina (cíclica o lineal), por los campos eléctricos de aceleración (DC o RF) o por la temperatura de la estructura acelerante (Temperatura del cuarto o superconducente). (Urban W.M. 1986).

Todos los aceleradores pueden ser cíclico o lineares.

Si el proyectil es dirigido alrededor a través de un potencial de voltaje para impartir energía, la operación es cíclica.

Si el viaje es a lo largo de una trayectoria lineal, con energía que es impartida a lo largo del camino, la operación es lineal.

Además, todas las máquinas cíclicas usan potenciales de "Radio Frecuencia" RF, para desarrollar campos eléctricos acelerantes y son mejor ilustradas por las máquinas como el Cyclotron, Betatron, Microtron, y Synchrotron.

Por otro lado, los equipos lineares utilizan tanto aceleradores de potenciales no variantes (DC), como lo son el Van de Graaffs, ICT, y Dynamitrons como también, el Pelletrons y Linacs que utilizan técnicas RF. (Jarret R.D.Sr. 1983).

En la práctica, los electrones son usados debido a su habilidad de penetrar y su facilidad con la cual una intensidad alta y las emisiones de energías altas, pueden ser económicas y viablemente alcanzadas.

Como las máquinas cíclicas son de baja intensidad, se utilizan generalmente las máquinas lineares. (Ramler W.J. 1987).

En el acelerador lineal, pulsos de electrones adquieren energía de la acción de un campo eléctrico aplicado en fase como una onda electromagnética que viaja a una serie de cámaras diferentes del tubo acelerador. Cada módulo agrega energía cinética a los electrones y proveyendo de un número suficiente de esos módulos, la energía del haz puede ser elevada al nivel deseado.

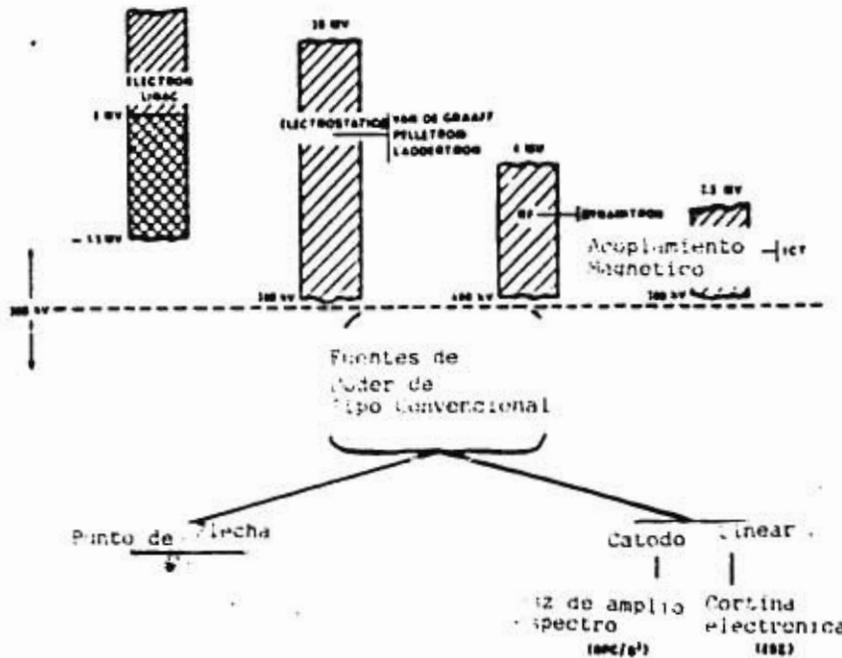
Este acercamiento evita el uso de un voltaje muy alto asociado con el uso completo del potencial eléctrico para la aceleración. Por lo tanto, no existe límite de las energías que le pueden ser dadas al haz de electrones. El haz de electrones de un linac es esencialmente monoenergético y esta hecho de una serie de pulsos.

El haz puede ser movido magnéticamente para enfocar el material que sirve de blanco.

Un diagrama esquemático de los rangos de energía de los aceleradores lineares, se muestra en la figura (1.4):

figura (1.4)

Diagrama esquemático de la distribución de los aceleradores lineares:



Para asegurar 10 MeV es necesario utilizar un acelerador lineal, ya que otro tipo de aceleradores no pueden producir haces de esta energía. (Urbain W.M. 1985).

**Subsistemas:**

Cualquier acelerador tiene numerosos subsistemas que deben ser integrados mecánica y eléctricamente para alcanzar una operación deseada. En una manera simplista estos subsistemas son siete:

**1.-Fuente de electrones:**

Los electrones a ser acelerados emanan de la fuente de la cual tendrá una estructura de diodo o triodo.

**2.-Vacío:**

La emisión de electrones y aceleración se puede lograr solo con un vacío. Una base de operación de  $10^{-6}$  T es necesaria para la realización diaria. Una variedad de configuraciones de bombeo es usado, incluyendo el Vac-Ion, Cryo o

ondas turbadoras lanes.

### 3.-Fodera:

Después de la emisión, la aceleración se alcanza impartiendo energía a los electrones por campos programados. Estos campos, DC o RF, son desarrollados por potenciales existiendo a lo largo de la trayectoria y generados por la energía de la fuente de poder.

### 4.-Sección de Aceleración:

A lo largo de la sección de aceleración, los campos eléctricos son comúnmente ópticamente formados para ayudar en el confinamiento espacial de los electrones. El tamaño físico de un acelerador es gobernado por la naturaleza de su campo acelerante, por ejemplo RF o DC.

### 5.-Enfriamiento:

El proceso de aceleración genera pérdidas térmicas debido a corrientes de fuga, electrones extraviados, o pérdidas de voltaje que resultan del uso de tanto campos pulsados o RF. Para remover este calor, se requiere un enfriamiento y el agua es el medio convencionalmente usado.

### 6.-Seguridad:

Debe ser la principal preocupación de todos los diseñadores así como del personal operante. Todos los accesos a las áreas de radiación incluyendo las regiones de alto voltaje y la ventilación debe estar asegurada y controlada tanto mecánica como eléctricamente.

### 7.-Ubicación:

Se requiere tomar en cuenta los requerimientos del acelerador, grado de aislamiento, ventilación, cerraduras de seguridad, manejo del producto, y almacenamiento en crudo y en procesado.

### El emisor.-

En la consideración de cualquier acelerador, tres parámetros principales caracterizan al emisor, estos son: el proyectil, la intensidad y la energía.

Esto se transforma en la velocidad a la cual la energía es depositada sobre una superficie y a través de un volumen de producto. El utilizador requerirá de otras caracterizaciones que envuelven el tamaño físico, orientación angular, distribución espacial, homogeneidad y la estabilidad de los proyectiles en el tiempo durante la irradiación del producto.

a) Proyectil e Intensidad: Los electrones son usados y el número/seg disponibles al producto (el blanco) determina la intensidad del rayo emisor. La unidad de medida es el ampere (A), con el mili (mA) o microampere ( $\mu A$ ), siendo el nivel de trabajo de un emisor típico. En general, las máquinas DC tendrán una intensidad de varios mA a 500 mA o más.

Para RF, la intensidad pico será de 2A o más.

b) Energía: se define como las unidades de electron-volts (EV) donde un EV es la energía impartida a una carga a través de un potencial de un volt(V). Para consideraciones del proceso, la energía de un electrón debe ser desde 1150KeV a 10MeV.

c) Dosis de energía y Velocidad de Producción: La unidad de deposición es el Rad que es 100 ergs de energía absorbidos por gramo del medio. La uniformidad de la distribución de la dosis a lo largo de un volumen pueden ser mejorados irradiando por los dos lados.

d) Tamaño físico: El tamaño del rayo emanado de un acelerador será convencionalmente de 1 cm o menor en diámetro con la excepción de un cátodo lineal. En ese caso el tamaño será rectangular y esencialmente el del cátodo.

### Aceleradores DC.-

Los aceleradores DC usados en el procesamiento por radiación son característicamente limitados por un voltaje terminal de aproximadamente 4 MV. Estos pueden ser reclasificados:

A.-Emisor de Exploración: 250 kV a 4 MV de 1 a 2 cm y densidad de corriente lineal de 15 mA/ft. Son máquinas industriales con un rango de energía de 4 MV a 300 kV y son típicamente representadas por el Dynamitron y el ICI.

5.-Máquinas catódicas lineares: de 150 a 500 kV; se de 1000 cm<sup>2</sup> o más para un producto de 150 cm y densidad lineal de 80 MA/ft. La energía máxima para esta máquina es de 500 kV con la limitación siendo gobernada por el área superficial de la terminal y su capacitancia hacia tierra, i.e. energía almacenada. (Raeber W.J. 1983).

#### Irradiadores que utilizan isótopos.

Un irradiador de investigación simple se muestra esquemáticamente en la figura (1.3), este utiliza Cobalto 60.

Los irradiadores para la producción comercial pueden ser de dos tipos: batch o continuos. El irradiador de papa Shihoro es una unidad batch. Varios irradiadores mas complejos se muestran en las figuras (1.6) a (1.10). Todas estas utilizan <sup>60</sup>Co y proveen de varios sistemas de transporte de los productos.

Los irradiadores continuos mueven al producto por medios mecánicos y pueden tomar varias formas. De esta manera, se buscan dos objetivos: eficiencia de las instalaciones y un valor de la unidad de relación de uniformidad de dosis U. Los principales métodos para obtener estos objetivos envuelven el acomodar el material secuencialmente en un número de locaciones con respecto a la fuente, incluyendo acomodar dos o más unidades de producto en profundidad con respecto a la fuente, volteando las unidades de producto para obtener en efecto, una radiación por ambos lados. Moviendo el producto a través de diferentes locaciones tanto horizontal como verticalmente dentro del área de la fuente. Usualmente cada posición requiere un periodo de tiempo sin movimiento para permitir suficiente absorción de la radiación.

#### 1.12 Dosimetría.

Los procedimientos correctos para la preservación de alimentos y el control de calidad en el procesamiento de irradiación, depende de mediciones reproducibles y verdaderas de las cantidades de radiaciones ionizantes y sus efectos biológicos. Las cantidades importantes son:

- La energía impartida a los productos alimenticios y sus alrededores durante el proceso y,
- La velocidad a la cual se deposita la energía.

Como en la esterilización, se requiere de una dosimetría adecuada para lograr asegurar la distribución de la dosis (D), que contenga ciertos valores mínimos y máximos (D<sub>min</sub> y D<sub>max</sub>), que den un valor suficientemente pequeño de uniformidad (U):

$$U = D_{max} / D_{min}$$

El valor de D<sub>min</sub> es especificado como la dosis absorbida en el producto tal que sea suficiente alcanzar la meta de la preservación del alimento en interés, ya sea inhibición de la germinación de tubérculos, retraso en la maduración, desinfestación de granos y frutas o eliminación de algunas formas de microorganismos. El valor de D<sub>max</sub> es la dosis absorbida a la cual el producto se convierte legalmente inaceptable, sobre el cual la irradiación causa pudrición o pérdida del valor de salubridad. Los tipos de radiación utilizada en el procesamiento de alimentos incluyen los rayos Gamma, rayos X o electrones acelerados con una variación de energía de 0.1 a 10 MeV. Las dosis absorbidas varían desde 10<sup>3</sup> a 7x10<sup>6</sup> rads (10 a 7x10<sup>6</sup> Gy) (1 Gy=1 J/kg=100 rad) (MacLaughlin W.L. et.al.1983).

Existen varios métodos para la medición de la dosis. Se pueden clasificar como físicos o químicos. En relación a la irradiación de alimentos se pueden clasificar como sistemas de referencia y sistemas de rutina. (Urbain W.M. 1984).

#### Sistemas Primarios de referencia:

Definidos como sistemas estándar que sus lecturas estan basadas en la medición de cantidades físicas básicas, como corriente de ionización, carga eléctrica y temperatura, o la medición de rendimientos químicos de radiación a partir de soluciones estándar que están disponibles y son reproducibles en cualquier

tiempo y laboratorio. La dosimetría, uno de los métodos más usados es el calorimétrico. El calorímetro proporciona lecturas del aumento de la temperatura del agua debido a la irradiación. La dosis se calcula de la manera siguiente (3):

$$D = Kx \Delta T \dots (8)$$

$\Delta T$  = Cambio en T en C

K = Constante determinada por el cuerpo calorimétrico dada por:  $(\rho \cdot c_p)$

$\rho$  = Masada cada componente que contribuye al aumento de T.

$c_p$  = 2.389

$c_p$  = Capacidad calorífica de cada uno.

2.389 = factor de conversión

Solo este sistema puede ser usado para la aplicación en línea en la irradiación de alimentos, ya que es el único suficientemente aislado que tiene terminaciones eléctricas desconectables.

Sistemas de transferencia de rutina: Sistemas estables que se pueden enviar por correo y se les puede analizar con posibilidad de obtener una señal reproducible en función de la dosis absorbida (espectro ESR, cambio en densidad de transmisión óptica, etc.). (MacLaughlin W.L. et al. 1983).

Dosimetría aplicada a la Irradiación de Alimentos.-

Los tres principales propósitos de la dosimetría en la Irradiación de Alimentos son:

1) Investigación: Determinar las dosis y sus distribuciones en un determinado proceso de preservación de un alimento.

2) Nombramientos: asegurar y crear parámetros dentro del proceso de irradiación, como los tiempos de residencia en el irradiador, tiempo de permanencia en el arrastrador e irradiador, dosis transitorias mas dosis principales y velocidades de las bandas para efectuar un proceso dado ( por ejemplo, dar los valores de D<sub>min</sub> y D<sub>max</sub> para cada alimento de interés).

3) Control de calidad: Proveer de valores de dosis en diferentes muestras de un proceso y dar suficientes datos para la medición correcta del alimento. (MacLaughlin W.L. 1983).

### 1.13 Resumen.

A pesar de que las investigaciones y esfuerzos para el desarrollo de la irradiación de alimentos han existido por mas de cuarenta años, sólo se han escrito pocos trabajos que cubran esta materia en una forma generalizada. En este capítulo se ha revisado la historia general de la irradiación de Alimentos, así como los programas para su aplicación a nivel mundial. Se ha podido observar un gran interés para la aplicación de este proceso como otro método de Preservación de Alimentos.

A partir de los 50, es cuando mayor desarrollo se ha dado en esta nueva tecnología, aunque todavía está limitado su uso en algunos países donde la tecnología tiene altos niveles de desarrollo. Sin embargo no se debe perder de vista como una alternativa tecnológica con un gran potencial de aplicación.

También este capítulo revisó todos los aspectos relacionados con el proceso de la radiación ionizante. Se ha podido analizar la forma en que la materia interactúa con las radiaciones dependiendo de su composición química y física así como de la temperatura y tipo de radiación.

Se ha comprendido la diferencia existente entre los rayos gamma y los rayos X, sabiendo que el efecto que mas comunmente sucede en el caso de la irradiación de alimentos es el efecto Compton. Podemos mencionar que existen tres fuentes principales de obtención de rayos gamma, los elementos de combustible gastado, el cobalto 60 y el cesio 137-134. Existen varios factores que se deben considerar al seleccionar una fuente de rayos gamma, estos dependerán de las necesidades que se tengan así como de la disponibilidad económica. Además, en este capítulo se han podido conocer algunos de los equipos más comunmente utilizados como fuente de irradiación, y de la misma forma la elección dependerá de las

necesidades que el proceso tenga. En forma concluyente, se puede decir que se tienen las bases para poder comenzar a entender lo que es el proceso de radiación para continuar con los efectos que este pueda tener sobre cualquier producto que se desee.

En el siguiente capítulo, se comenzará con la revisión de la Química de la Irradiación y sus efectos sobre los componentes de las Frutas y las Verduras.

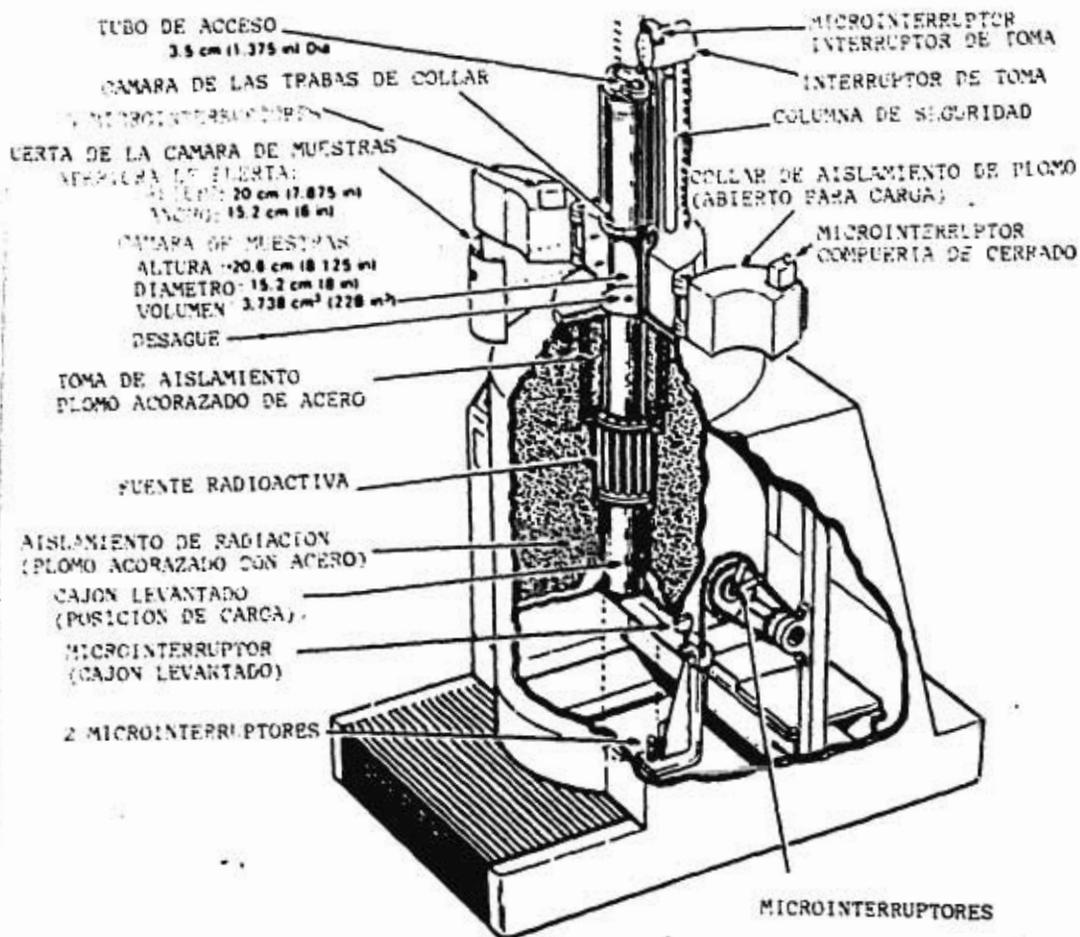


FIGURA (1.5). ESQUEMA DE UN IRRADIADOR DE INVESTIGACION DE COBALTO 60,  
 AISLADO CON PLOMO. CORTESIA DEL ATOMIC ENERGY OF CANADA LTD., KANATA,  
 ONTARIO, CANADA.

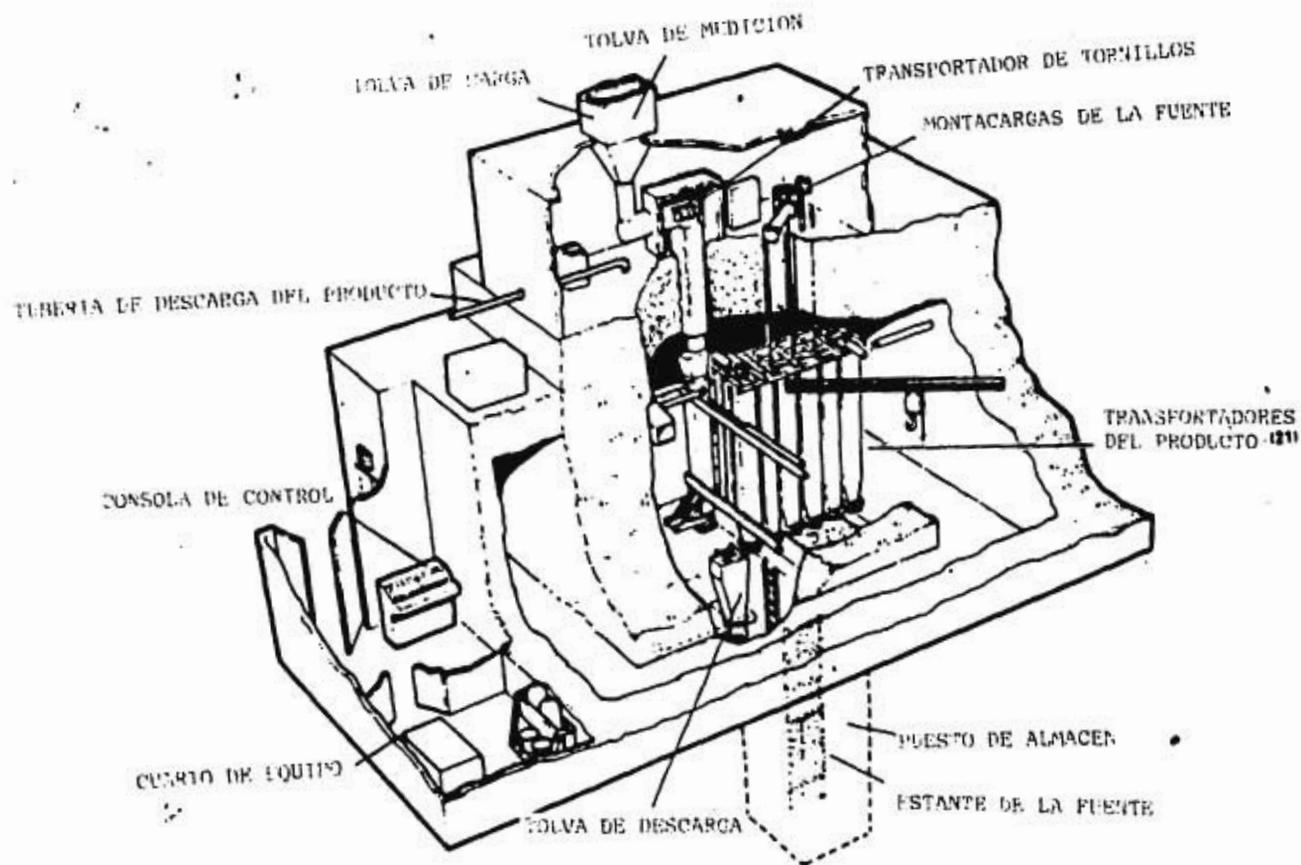


FIGURA (1.6)  
 ESQUEMA DE UN IRRADIADOR DE COBALTO 60.  
 CORTESIA DEL ATOMIC ENERGY OF CANADA LTD.,  
 KANATA, ONTARIO, CANADA.

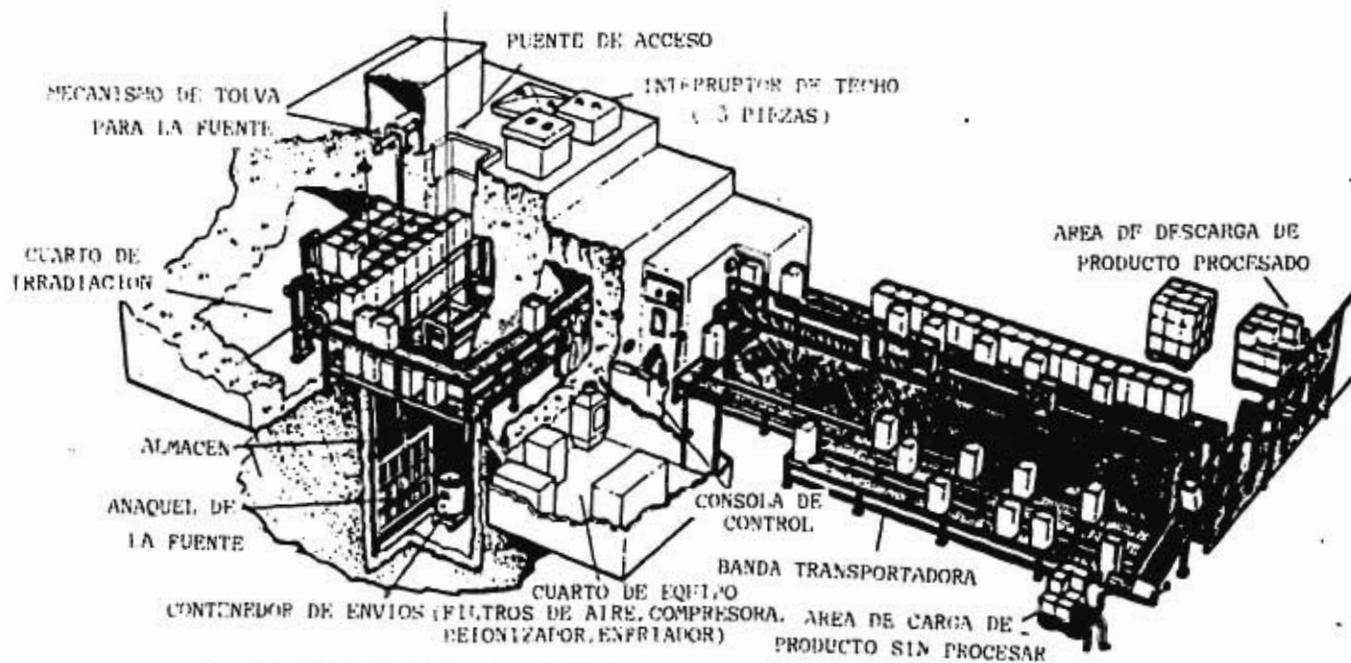


FIGURA (1.7). IRRADIADOR DE COBALTO 60 COMERCIAL AUTOMATICO DE CASAS.  
 CORTESIA DEL ATOMIC ENERGY OF CANADA LTD., KANATA, ONTARIO, CANADA

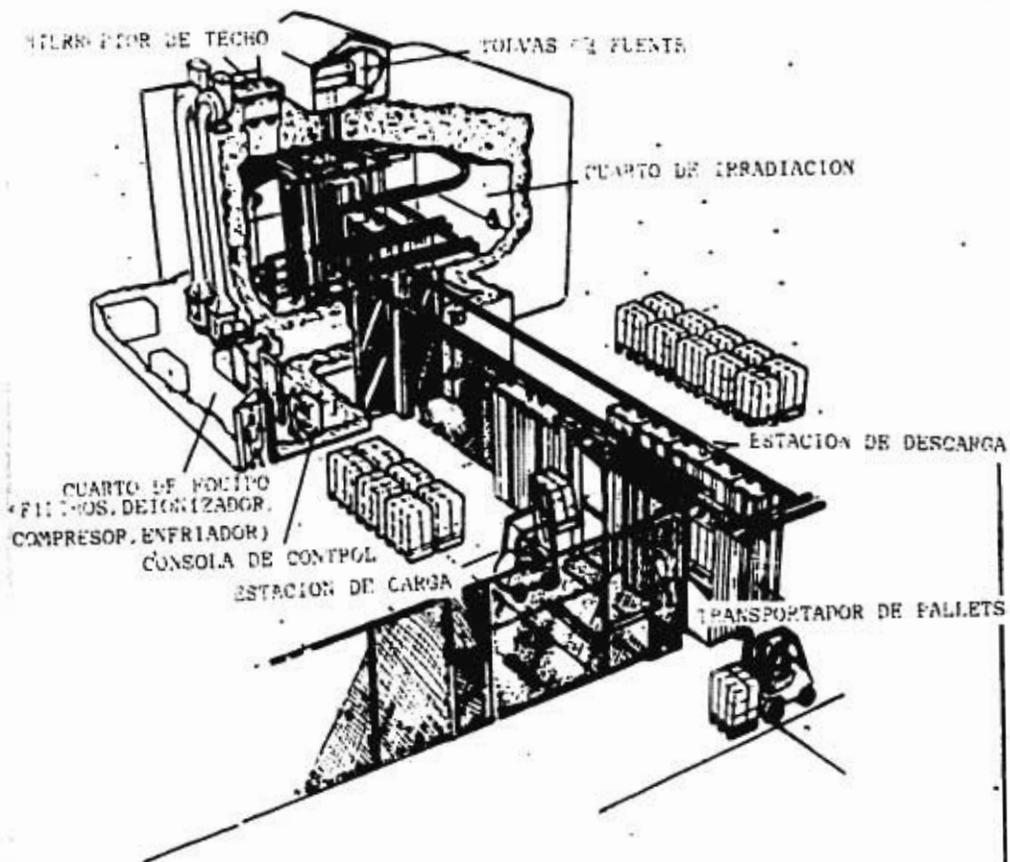


FIGURA (1.8) IRRADIADOR DE COBALTO 60 COMERCIAL AUTOMATICO DE PALLETES.  
 CORTESIA DEL "ATOMIC ENERGY OF CANADA LTD., KANATA, ONTARIO, CANADA".

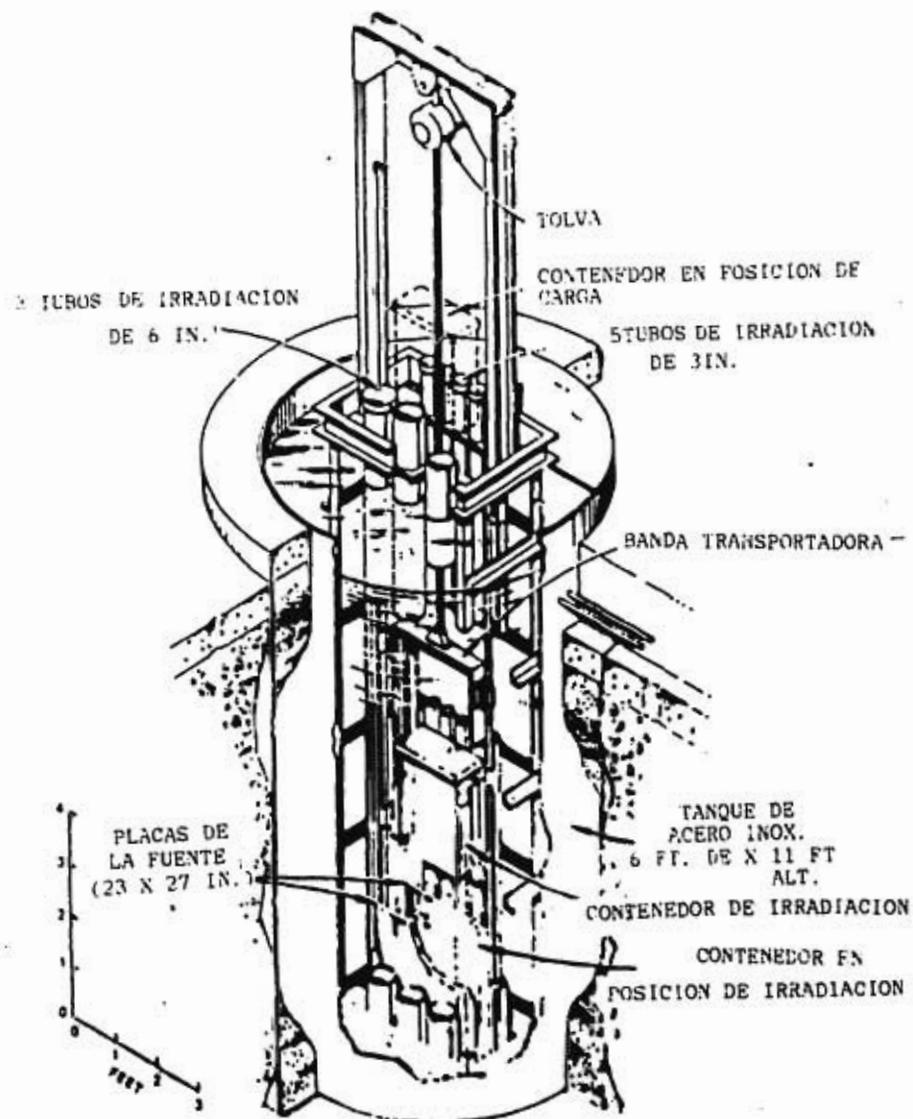


FIGURA (1.9). IRRADIADOR DE INVESTIGACION DE COBALTO 60. DE G.R. DIETZ AND R.H. LAFFERTY, JR. FOOD IRRADIAT. (SACLAY) 6(4), A39(1966).

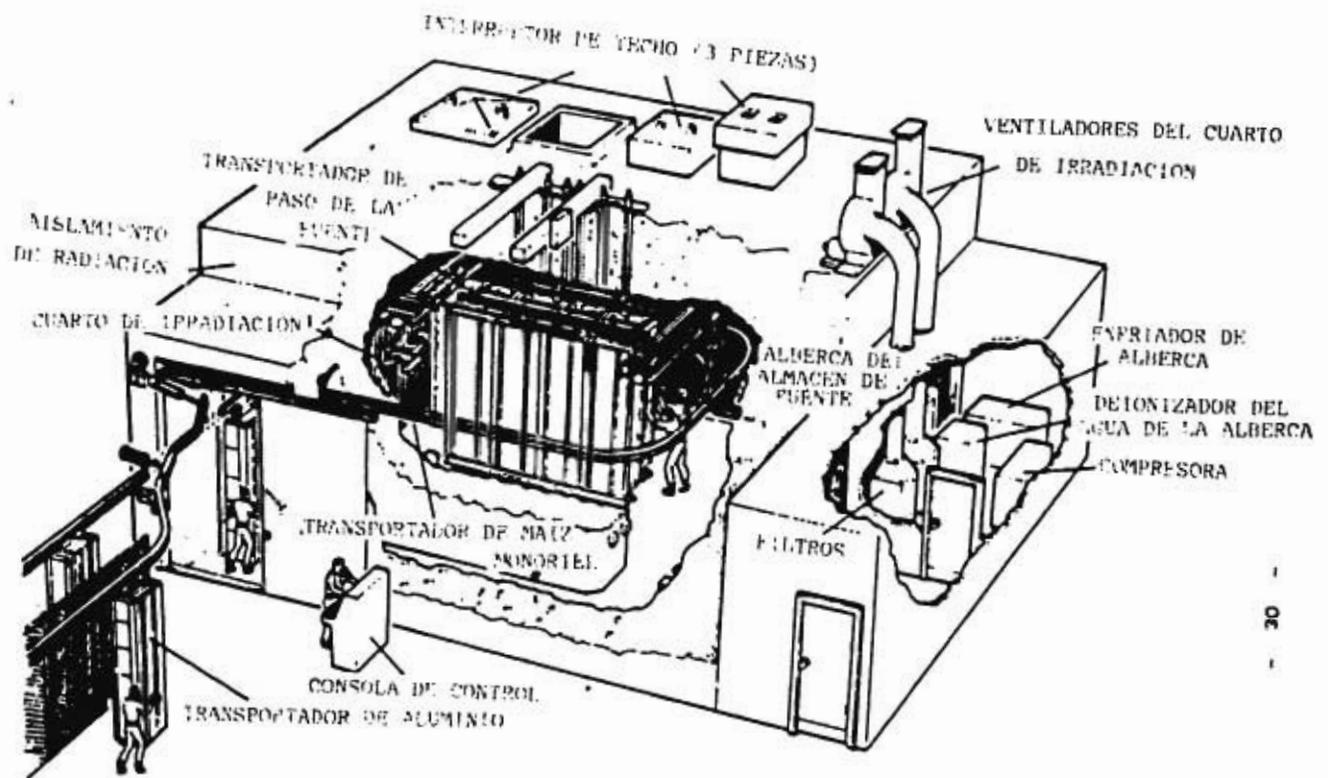


FIGURA (1.10). IRRADIADOR DE COBALTO 60 COMERCIAL DE CARGA POR LOTES. CORTESIA DEL ATOMIC ENERGY OF CANADA LTD. CANADA, ONTARIO, CANADA.

#### 1.14 Bibliografía

- BRYNJOLFSSON A. & WANG C.P. 1983.  
Atomic Structure. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS.  
Preservation of food by Ionizing Radiation. Vol. I, CRC Press,  
Boca Raton, Florida.
- SURDITT A.V. Jr. 1982.  
Food Irradiation as a quarantine treatment of Fruits.  
Food Technology, pp.51-52.
- CLARKE I.D. 1970.  
Effects of Radiation Treatments. In: ED. HULME A.C.  
The Biochemistry of fruits and their products. Vol. II, p.687, Academic Press, NY.
- FAC/WHO/IAEA. 1981.  
Report on the Wholesomeness of Irradiated Foods, Brussels.
- FDA/POLICY OF IRRADIATED FOODS.  
Advance Notice of Proposed Procedures for the Regulation of Irradiated Foods  
for Human Consumption. FDA, Federal Register 46(59) 18992-18994.
- FRASER F.M. 1983.  
Gamma Radiation Processing Equipment and Associated Energy Requirements. In:  
JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food by Ionizing  
Radiation. Vol I, CRC Press, Florida.
- IFT 1983.  
Radiation Preservation of Foods. Food Technology pp.55-60 (2).
- LOHARANI P. & URSAIN W.M. 1983.  
Certain utilization aspects of Food Irradiation. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON  
M.S. EDS. Preservation of Food by Ionizing Radiation. Vol. I, CRC Press, Florida.
- MACLAUGHLIN W.L. ET. AL. 1983.  
Dosemetry. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food by  
Ionizing Radiation. Vol. I, CRC Press, Florida.
- RAMLER W.J. 1983.  
Machine Sources. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food  
by Ionizing Radiation. Vol. I, CRC Press, Florida.
- DEPARTMENT OF HEALTH AND SOCIAL SECURITY. 1982.  
Report on the Safety and Wholesomeness of Irradiated Foods, Great  
Britain, London.
- U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION. 1984.  
Source Facilities and Technology. Radiation Preservation of Foods, Proceedings  
of an International Conference. Boston Mass., Sep. 27-30.  
Publication 1273, National Academy of Sciences, National Research  
Council, Washington D.C.
- URSAIN W.M. 1986.  
Food Irradiation, Academic Press Inc. (London) LTD.

## CAPÍTULO SEGUNDO

### QUÍMICA DE LA RADIACIÓN

Antes de iniciar el análisis de los efectos químicos que se producen después de una irradiación, es importante mencionar los parámetros que van a influir en el proceso de irradiación. Además, como cabe esperar, estos mismos parámetros tendrán gran influencia sobre los efectos que se producen después de una radiación ionizante. Se van a mencionar seis parámetros considerados como los que mayor importancia puedan tener en una irradiación:

#### A.-DOSIS

Como se mencionará en los siguientes capítulos, los usos particulares de la irradiación de alimentos, requieren de dosis específicas para lograr alcanzar los objetivos que se deseen. De esta manera, para cada aplicación de la irradiación de alimentos, será muy importante la dosis utilizada de tal manera que se puedan asegurar los cambios requeridos en el producto. Por esta razón, de todas las variables que pudieran existir en la irradiación de alimentos, la dosis, es la más importante.

Aunque el cambio químico inducido por la radiación, podría iniciar una acción sobre los sistemas biológicos, la relación exacta entre la dosis y el efecto, usualmente está unida a los mismos parámetros del sistema biológico. Esto es, por ejemplo, existen bacterias que son resistentes a la radiación y requerirán de mayores dosis para lograr asegurar la letalidad. Es muy importante recordar, que a medida que la dosis se aumenta, una mayor cantidad de moléculas se puede ver afectada, y en algunos casos, la dosis necesaria para obtener los efectos deseados, excederá a las dosis permitidas. En consecuencia, algunas aplicaciones particulares en la irradiación de alimentos pueden no ser prácticas. (Adam S. 1983).

#### B.-VELOCIDAD DE DOSIS

La velocidad en la cual la radiación se puede aplicar a algún alimento, puede variar en un amplio rango, posiblemente en un factor de  $10^6$ . Sin embargo, la velocidad de la dosis no se ha utilizado como un parámetro crítico en la irradiación de alimentos. Si se han observado algunas situaciones donde la velocidad de dosis ha afectado, por ejemplo, a velocidades de dosis altas, se forman radicales libres a muy altas concentraciones y, por consiguiente, se favorece más la recombinación que la reacción con otros absorbedores. (Adam S. 1983).

#### C.-CONTENIDO DE AGUA

En los alimentos y en los sistemas biológicos, la acción de la radiación está asociada con su contenido de agua. Esto es porque el agua líquida provee de un medio efectivo para que los productos radiolíticos primarios (ver efectos primarios, cf. 2.2.1), se muevan e interactúen entre ellos o con otros componentes del absorbedor de una manera más fácil. En cambio, los alimentos secos, no proveen de esa facilidad y los radicales libres formados por irradiación pueden persistir por períodos bastante largos. En general, los alimentos secos tienen menos cambios químicos que los alimentos que contienen agua. (Diehl J.F. 1983).

#### D.-TEMPERATURA

El papel de la temperatura en la irradiación de alimentos puede ser importante ya que las energías de activación de las reacciones químicas varían con ésta, y como consecuencia, los rendimientos de productos en las reacciones pueden verse alterados. Además, la movilidad de los radicales libres y de otros reactantes, también puede ser alterada por la temperatura. Esto es, por ejemplo, cuando la viscosidad del producto es afectada por la temperatura y si se aumenta la viscosidad, la movilidad de los reactantes disminuirá interfiriendo con sus posibilidades de reacción. Otro factor importante es que la temperatura también

puede afectar a los sistemas biológicos, por ejemplo, la temperatura va a cambiar el metabolismo de los insectos y esto tendrá un efecto sobre su respuesta a la radiación. (Diehl J.F. 1983).

#### E.-ADITIVOS

##### e.1) Oxígeno

La presencia de oxígeno durante la irradiación puede alterar los cambios químicos que se produzcan. Como se sabe, el oxígeno molecular, teniendo dos electrones apareados (O-O), actúa como un diradical, y por consiguiente, puede reaccionar con otros radicales formando radicales peróxido (RO2), los cuales podrán reaccionar posteriormente.

Además, el oxígeno también es un oxidante, y en algunos casos, la irradiación de sistemas oxigenados dará resultados de autooxidación. Por ejemplo, los alimentos que contienen lípidos, se ven afectados por el oxígeno durante la irradiación y pueden desarrollar sabores rancios.

##### e.2) Otras sustancias.

Algunas sustancias usadas como aditivos pueden alterar los cambios químicos que pudieran ocurrir de una irradiación. Usualmente, sólo pequeñas cantidades de un aditivo son las utilizadas, pero su acción probablemente sería la de interactuar con uno o más de los productos radiolíticos. Además, un aditivo también puede servir para alterar a un componente original del sistema para que se logre prevenir la producción de algún producto radiolítico particular. (Taub I.A. 1983).

#### 2.1 Bases de la Química de Radiación.

La segunda etapa de la acción de la irradiación se refiere a los cambios químicos que se presentan dentro de las moléculas del absorbedor y que son resultado de esta transferencia de energía. Estos cambios químicos serán cubiertos en este capítulo.

Debido a que los átomos del absorbedor tienen una energía mayor a la normal, sus electrones orbitales se han desplazado a estados superiores de energía, o han sido proyectados fuera de estos. A estos átomos que han ganado energía sin perder electrones se les denomina "excitados", siendo los iones aquellos que han perdido electrones y han ganado una carga positiva. Esta es la base de la etapa de los cambios químicos (Taub I.A. 1983).

Debido a que los iones y los átomos excitados contienen cantidades de energía mayores a las normales, son inestables, y desde el punto de vista químico, altamente reactivos, pudiendo reaccionar átomos de su mismo tipo o con otras entidades disponibles cercanas. (Urban W.M. 1986).

El estudio de estos cambios corresponde a la "Química de Radiación", misma que comprende un vasto campo de acción y que puede cubrir áreas que no necesariamente tienen aplicación directa a la irradiación de alimentos. De tal forma, que sólo se cubrirá en este capítulo lo relacionado en particular a la irradiación de Alimentos.

La importancia principal de la Radiación Ionizante en alimentos radica en los cambios químicos que se producen en los alimentos y sus contaminantes cuando son irradiados. El entender este hecho permite hacer un uso inteligente de la aplicación de la Irradiación en Alimentos. (Taub I.A. 1983).

La unidad que permite tener una base cuantitativa de los cambios químicos producidos por la irradiación es el número de moléculas del absorbedor que han cambiado, o también el número de nuevas sustancias formadas por cada 100 eV de energía depositada, este valor es el denominado valor "G". A excepción de las reacciones en cadena que ocurren en algunas moléculas orgánicas los valores de G rara vez van a exceder a 10. (Urban W.M. 1986).

#### 2.2 Efectos químicos de la Radiación Ionizante.

Se pueden tener dos tipos de efectos químicos, y se dividen de esta manera en base al orden en que pueden aparecer en las moléculas del absorbedor:

##### 2.2.1) Efectos químicos primarios.

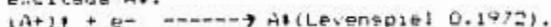
##### 2.2.2) Efectos químicos secundarios.

Los efectos químicos primarios son la consecuencia directa de que los componentes del absorbedor adquieran energía a través de la interacción con la





/ Subsecuentemente puede ocurrir una neutralización y de esta manera formar una molécula excitada  $A^*$ :

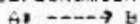


Una molécula excitada puede retener su energía extra por un período del orden de los  $10^{-8}$  segundos. De esta manera, la pérdida de la energía de excitación puede ocurrir por diversos caminos:

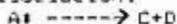
- Emisión de energía como fotón (fluorescencia).
- Conversión interna a calor.
- Transferencia de la energía hacia una molécula cercana.
- Reacción Química. Que puede llevarse a cabo por distintas formas:

1) Unimolecular. Se divide en:

1.1) Reordenamiento o Isomerización:



1.2) Disociación:

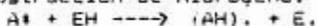


2) Bimolecular. También se puede dividir en:

2.1) Transferencia de electrones:



2.2) Abstracción de Hidrógeno.

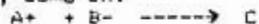


2.3) Adición:



El segundo reactante E puede ser idéntico a  $A^*$  o ser otra entidad. Los nuevos productos B, C, D y F formados por las reacciones anteriores pueden ser moléculas estables o ser entidades reactivas como por ejemplo, radicales libres. Esta es una de las razones por las que se pretende evitar el uso de la irradiación en alimentos debido a los efectos tóxicos que pudieran tener estos radicales libres que se forman en alimentos. Aunque se ha encontrado, que no sólo la irradiación provoca la formación de estos radicales libres. (Report on the Safety and Wholesomeness of Irradiated Food 1983). b) Ionización.

Normalmente, un ion reacciona con otro ion de signo opuesto para formar una entidad neutra, como en:



Los iones también pueden existir como complejos de iones-molécula transientes en los cuales si se lleva a cabo una neutralización, se pueden obtener nuevos compuestos:



En la ionización pueden ocurrir procesos similares a los que se mostraron para las moléculas excitadas. Por lo tanto, después de que se lleva a cabo la neutralización, se tienen las mismas posibilidades que para la excitación.

(Mahan B.H. 1977).

Estos han sido los dos tipos de efectos químicos primarios que se pueden tener. Como se mencionó, también se tienen otro tipo de efectos que se han denominado secundarios ya que normalmente aparecen después de la excitación o de la ionización:

2.2.2) Efectos Químicos Secundarios: A partir de los efectos químicos primarios se han formado nuevos compuestos o posiblemente radicales libres en los átomos o moléculas del absorbedor. Sin embargo, todavía es posible que ocurran mayores cambios químicos. Estos pueden llevarse a cabo dependiendo tanto de la composición química del absorbedor como de otros factores como el estado físico y la temperatura.

Las nuevas moléculas que se formaron a partir de los efectos químicos primarios pueden reaccionar entre ellas mismas o con otras moléculas que todavía no hayan cambiado del absorbedor. Además, tanto las nuevas moléculas como aquellas que no han cambiado pueden interactuar con los radicales libres que se hayan formado a partir de los efectos químicos primarios.

Estos radicales libres, son constituyentes comunes en muchos sistemas,

incluyendo los alimentos, y pueden ser producidos por otros procedimientos además de la irradiación. (Urbain W.M. 1985). Sin embargo, la irradiación puede llegar a producir algunos con energías cinéticas mayores que las de las moléculas que se encuentran en el absorbedor. Y de esta manera, reaccionarán de forma diferente a los radicales que tengan energías equivalentes a las energías térmicas. Aunque se ha observado (Diehl J.F. 1983), que los radicales libres persisten indefinidamente en algunos sistemas, pueden ser altamente reactivos cuando suceden diferentes tipos de reacciones como las de adición, combinación, disociación, rearrreglo y transferencia de electrones. (Simic M.G. 1983). La estabilidad de estos se puede ver afectada por distintos factores como el contenido de agua, el estado físico, la temperatura y la disponibilidad de Oxígeno. (Urbain W.M. 1986).

### 2.3 Efectos producidos en los sistemas acuosos.

Debido a que muchos alimentos contienen cantidades substanciales de agua, los efectos indirectos son importantes en la aplicación de la irradiación. Esta misma consideración se aplica a los sistemas biológicos que van a contaminar a los alimentos como por ejemplo, las bacterias.

Esto sucede cuando se irradia agua pura, un número de productos son formados de acuerdo a la siguiente ecuación, donde al ser irradiada agua, se producen estos seis productos principalmente:



Debido a los efectos de recombinación, si se continua la irradiación de agua pura, se llega a la situación de un estado estable con productos moleculares presentes como el H<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, donde sus concentraciones estarán determinadas por la velocidad de dosis. (explicada en la sección 3.1), tomando en cuenta que el H<sub>2</sub> no deja el sistema. (Simic, M.G. 1983).

Los átomos de H<sub>2</sub> y los electrones son agentes reductores / el radical hidroxil es un agente oxidante como en el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Por lo tanto, no es de sorprenderse de que estos productos reaccionarán con muchas sustancias cuando se disuelvan en agua. Sin embargo, debido a la fuerza de unión del O-H no reaccionan con las moléculas de agua presentes (Simic M.G. 1982). El electrón acuoso e-aq se forma cuando los electrones pierden energía hasta un nivel comparable con la energía térmica del medio ambiente.

Las moléculas de agua que se encuentran en los alrededores están ligadas al electrón por medio de la carga electrostática del electrón y de los dipolos eléctricos de las moléculas de agua, como se indica con la siguiente ecuación (9) y con la figura (2.2):



figura (2.2)

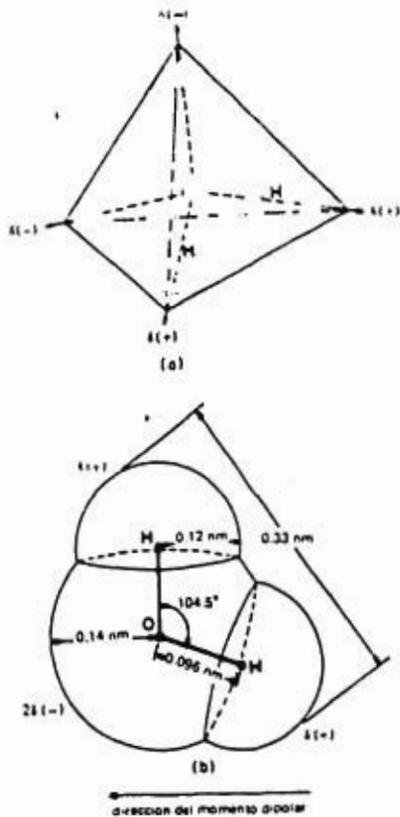


Figura 2.1 Representación esquemática de la molécula de agua: (a) estructura tetraédrica formada por las orbitas  $sp^3$  del oxígeno; (b) dimensiones de la molécula de agua.

Como se podría pensar, influyendo en la concentración de los reactantes radiolíticos, el pH de un sistema acuoso puede afectar el resultado final de la irradiación formando iones de hidrógeno (H<sup>2+</sup>) o de Oxígeno (O<sup>2-</sup>), dependiendo del grado de acidez o alcalinidad, respectivamente.

Además, el estado líquido, al proveer un buen medio para el movimiento de los reactantes, ayuda en la acción indirecta de la radiación. Sin embargo, el congelar las soluciones va a limitar el movimiento y reducirá la acción indirecta. (Adam S. 1983)

Dependiendo de la concentración de solutos, las soluciones acuosas de un sólo soluto van a mostrar una variedad de respuestas a la irradiación. Por ejemplo, en soluciones diluidas, esto es, a concentraciones menores a 0.1 M, la acción indirecta predomina. En cambio, a concentraciones mayores, la acción directa puede ocurrir y puede ser significativa por arriba de 1 M.

Otro factor que puede afectar el efecto de la irradiación, es la introducción de un segundo soluto a la solución. Esto puede provocar que ocurra una competencia entre los dos solutos por los productos radiolíticos del agua y dar como resultado que cada soluto tenga una menor oportunidad de reaccionar que la que tendría si se encontrara presente el puro soluto. Un ejemplo de este efecto se muestra en la figura (2.3), donde la Destrucción de la histidina-HCl en agua es reducida por la adición de Acido Disoascórbico durante una Irradiación electrónica. (Taub I.A.1983).

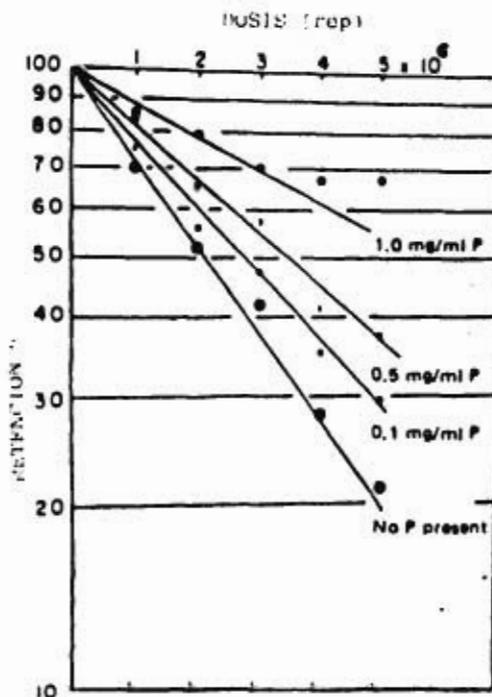


FIGURA (2.3). EFECTO DE LA RADIACION ELECTRONICA DE 3-MeV SOBRE SOLUCIONES DE HISTIDINA (1 MG/ML) EN PRESENCIA DE DISTINTAS CANTIDADES DE ACIDO D-ISOASCORBICO (P) DE: B.E. PROM. "PROC. INT. CONF. PRESERV. FOODS CONCL. RADIAT., 1959.

Generalmente, las soluciones acuosas que contienen un número alto de solutos van a presentar sólo pequeñas posibilidades de reacción y cambiará para cada soluto presente. De esta manera, tanto para la acción directa como la indirecta, la dosis de energía que se aplica se va a distribuir entre los solutos, más que concentrarse en sólo alguno de ellos. Y como consecuencia, usualmente se van a formar diversos productos radiolíticos finales; pero cada uno en muy pequeñas cantidades. Esto es, como los alimentos generalmente tienen un gran número de sustancias que los componen, puede esperarse que la irradiación con alto contenido de humedad produzca varios productos radiolíticos pero cada uno en muy bajas concentraciones. (Simic M.G. 1983).

Sin embargo, dependiendo de la composición química, se pueden tener variaciones de los efectos usuales. Por ejemplo, algunas sustancias reaccionan preferentemente con radicales libres e interfieren con las reacciones usuales. De esta manera, algunas moléculas, especialmente las más largas y complejas, pueden contener ciertas agrupaciones de átomos particulares que son fácilmente atacadas por radiación ó por productos radiolíticos y van a reaccionar de preferencia con las partes menos sensibles de la molécula. Por ejemplo, el grupo -SH de la cisteína es muy sensible a cambios, especialmente cuando se encuentra con soluciones oxigenadas. De esta manera, algunas sustancias tienen una sensibilidad a los cambios químicos a través de la interacción con los productos radiolíticos del agua. La figura (2.4) indica la destrucción de Tiamina en carne en función de la dosis. Esta destrucción es el resultado de la acción indirecta de la radiación asociada al contenido de agua de la carne. Esto también se puede observar en la figura (2.5) donde la pérdida de Tiamina se reduce si se irradia a temperatura de congelación. (Taub I.A. 1983).

figuras (2.4) y (2.5)

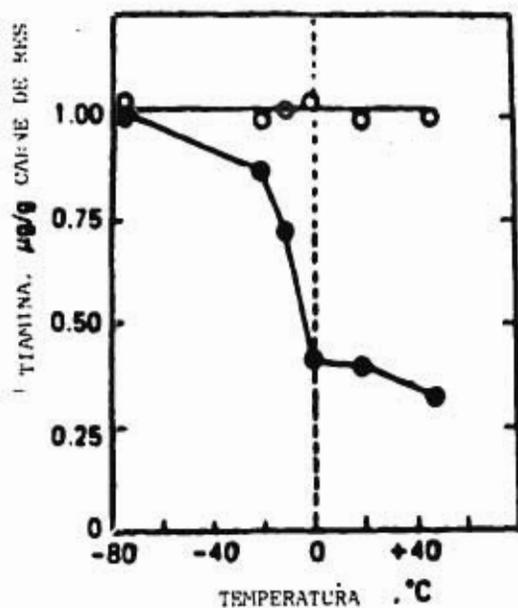


FIGURA (2.4)  
 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE IRRADIACION SOBRE LA DESTRUCCION  
 DE CARNE DE RES DESHEBRADA. IRRADIADA: IRRADIADA (10 KGy).  
 FUENTE: WILSON G.M., J. SCI. FOOD AGRIC. 10, 25 (1959).

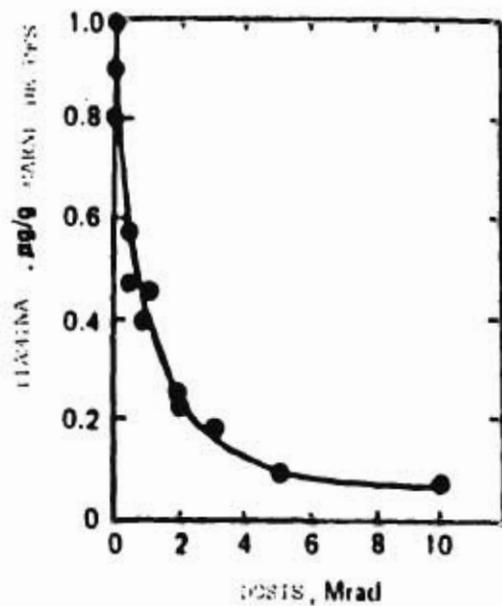


FIGURA (2.5)  
 CONSTRUCCION DE FILAMINA EN RES DESHEBRADA POR MEDIO DE IRRADIACION  
 A TEMPERATURA AMBIENTE. WILSON C.M. J.SCI. FOOD AGRIC.10.295(1959)

Aunque pueden ocurrir excepciones, los efectos ordinarios de la irradiación en sistemas acuosos complejos, como lo son los alimentos, son de importancia crítica ya que los alimentos cambian poco químicamente por la irradiación. (Adam S. 1983).

Se toman en cuenta estos hechos en relación a:

1) Dosis empleadas en la irradiación de alimentos.

Cada alimento tendrá una dosis óptima, bajo la cual se obtendrán los mejores resultados. Sin embargo, no se debe olvidar que existirán casos en los que aún teniendo la mejor dosis, el alimento no sea apto para la irradiación y tendrá cambios que no sean favorables. Las dosis se revisaran en el capítulo de Tecnología de Irradiación de Frutas y Vegetales.

2) La naturaleza altamente selectiva de los procesos de irradiación en términos de controlar a los organismos vivos que contaminan a los alimentos.

La irradiación permite controlar únicamente los organismos contaminantes sin arriesgar al huésped. Esto es, controlando las dosis es posible, por ejemplo, terminar con la capacidad de reproducción de los insectos que contaminan las frutas y hortalizas sin dañar al producto.

3) Las consideraciones de seguridad toxicológica de los alimentos irradiados.

Este ha sido un tema de gran discusión a nivel mundial ya que era uno de los principales factores por los que se limitó el uso de la radiación ionizante. Ahora se ha estudiado que los productos resultantes de una irradiación no son mayores a los que se producen en otros procesos de conservación de alimentos y que toxicológicamente hablando, es posible controlar las concentraciones, manteniendo controladas a las variables de operación del proceso (Report on the Wholesomeness of Irradiated Foods 1983).

4) El valor nutricional.

Se han realizado estudios donde se ha observado que la irradiación no cambia en gran medida la calidad nutricional del alimento. Esto también se revisará más adelante en el capítulo de las Perspectivas de la Irradiación. (cf. 4.1) (Clarke I.D. 1970).

5) Las cualidades sensoriales de los alimentos irradiados.

Este punto se desarrolla ampliamente en el siguiente capítulo donde se menciona el efecto de la irradiación en frutas y vegetales, haciendo hincapié en los efectos que se tienen en las características organolépticas.

No todos los productos son aptos de irradiarse ya que hasta en las dosis más pequeñas, se provocan cambios en las cualidades sensoriales lo cual los hace comercialmente no aptos para el consumo.

#### 2.4.- QUÍMICA DE RADIACION DE LOS COMPONENTES DE LAS FRUTAS Y VERDURAS

Existen diversos cambios químicos que son causados por la irradiación y que tienen que ver con los alimentos como las frutas y las verduras. Entre estos cambios podemos encontrar a:

- 1) Los cambios que suceden dentro de las mismas frutas y verduras, y.
- 2) Los efectos en los contaminantes de estas, como pueden ser las bacterias, ya que su inactivación es uno de los principales objetivos de la irradiación.

La irradiación no va a alterar la composición elemental del alimento. Y por esta razón, los componentes minerales no variarán (Diehl J.F. 1983). Se puede observar en la tabla (2.1) el contenido de agua de algunos alimentos. Claramente se ve que el porcentaje de agua varía desde un 50% hasta un 95%. Por lo que se puede decir que el principal componente es el agua, principalmente para el caso de frutas y verduras.

Tabla (2.1)  
Contenido de agua de algunos alimentos

Alimento	Contenido de agua(%)
<b>Carne:</b>	
Cerdo,crudo magro	55-60
Buey,crudo despojos	50-70
Pollo de toda clase,carnecruda sin piel	74
Pescado,proteinas musculares	65-81
<b>Frutas:</b>	
Bayas,cerezas,peras	80-85
Manzanas,melocotones,naranjas,pomelos	85-90
Ruibarbo,fresas,tomates	90-95
<b>Verduras:</b>	
Aguacates,bananas,guisantes(verdes)	74-80
Remolacha,brocoli,Zanahorias,patatas	80-90
Espárragos,judías(verdes),col,coliflor, Lechuga	90-95

Fuente:Fennema D.R.,Introducción a la Ciencia de los Alimentos,  
Ed. Reverte,S.A. 1982.

Los carbohidratos ocupan un segundo orden de importancia en las frutas y vegetales después del agua. Como grupo, sólo tienen muy pequeñas cantidades de proteínas y lípidos. Además, las vitaminas, aunque son constituyentes menores en términos de cantidades presentes, son tan importantes nutricionalmente que se revisará el efecto de la irradiación sobre de estas.

A continuación se explica brevemente el efecto de la irradiación principalmente para cada uno de los componentes de las frutas y vegetales.

#### 2.4.1 Carbohidratos

Al irradiar a los carbohidratos de bajo peso molecular (como son los azúcares simples), ocurren cambios físicos (que serán indicativos de cambios químicos), como los cambios en el punto de fusión, rotación óptica y en el espectro de absorción.

Con la irradiación de los carbohidratos, se producen varios gases como hidrógeno, dióxido de carbono, metano y monóxido de carbono. Así, la cantidad de gases formada es dependiente de la dosis. Además, la irradiación en el estado sólido va a rendir un número de productos radiolíticos no gaseosos como el formaldehído, acetaldehído, acetona, derivados de ácidos, lactonas, glicoxales, malonaldehídos, peróxidos de hidrógeno y derivados de azúcares. Los carbohidratos puros en el estado cristalino (sacarosa sólida), son muy sensibles a la radiación, y algunas veces se van a producir reacciones con altos valores de G (el valor de G, se da en función al número de moléculas de absorbedor que han cambiado), y posiblemente esto sea debido a las reacciones en cadena.

Además de los carbohidratos secos, que pueden estar contenidos en algunos alimentos, hay otros que tienen tanta agua (como las frutas y verduras), como para requerir una particular atención en relación a los cambios inducidos por la radiación de los carbohidratos relacionados a la acción de los productos radiolíticos del agua. (Diehl J.F. 1983).

De esta manera, los azúcares de bajo peso molecular en soluciones acuosas, generalmente van a tener degradaciones oxidativas, por un lado, debidas a la acción directa de la radiación y por otro lado, debido a la interacción con los productos radiolíticos del agua, principalmente los radicales OH. (Taub I.A. 1983).

La oxidación en las terminaciones de la molécula va a producir derivados de ácidos. Además, la sustracción de hidrógeno por los radicales OH., puede ocurrir con la glucosa en la ausencia de O<sub>2</sub> en cualquiera de los seis carbonos de la molécula. Las reacciones para el radical glucosil formado en la posición C-1 se indica en la fig. (2.6) donde se muestra la formación de los productos después del ataque al C-1 de la glucosa. (Clarke I.D. 1970).

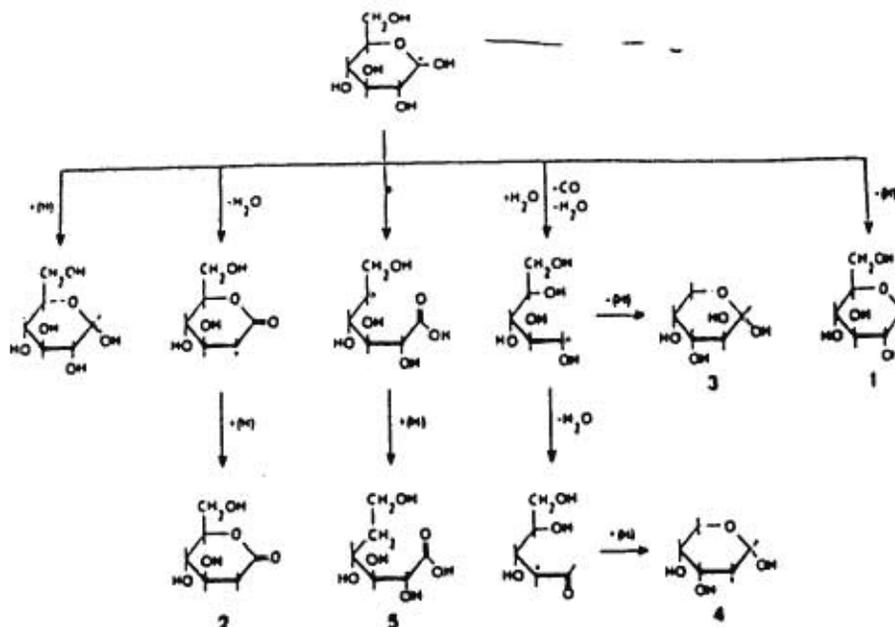


FIGURA (2.6). FORMACION DE PRODUCTOS DESPUES DEL ATAQUE DE RADICALES SOBRE EL C-1 DE GLUCOSA. 1. ACIDO GLUCONICO; 2. ACIDO 2-DEOXI-GLUCONICO; 3. ARABINOSA; 4. 2-DEOXI-RIBOSA; 5. ACIDO 5-DEOXI-GLUCONICO; DE: E.P. DIEHL, S. ADAM, H. DELINEF, V. JANKOVICK, J. AGRIC. FOOD CHEM. 26, 15 (1978).

Además pueden ocurrir reacciones similares con los radicales glucosil formados en los otros 5 carbonos. La presencia de O<sub>2</sub> aumenta el rendimiento de ácidos y cetoácidos, y al aumentar el pH se aumentan los compuestos deoxi. (Badui S. 1982). El enlace glucosídico de los disacáridos puede romperse por radiación. Desde el punto de vista de la irradiación de alimentos, el cambio más importante en los polisacáridos, causado por la irradiación es el rompimiento del enlace glucosídico. De esta manera, en almidones, pectinas y celulosa, resulta en la formación de unidades de carbohidratos más pequeñas. Y como consecuencia, algunos alimentos, especialmente las frutas, van a presentar tendencias al ablandamiento y a la pérdida de textura (Simic, M.G. 1983). Con los almidones, el rompimiento del enlace glucosídico, llevara a la formación de dextrinas de diferentes longitudes, Esto también tendrá un efecto sobre la textura. Además, se van a formar otros productos radiolíticos. (Badui S. 1982).

Generalmente, todos los almidones muestran cambios similares, tanto que la información disponible para un almidón en particular, pudiera ser usada para predecir los cambios que ocurren con otros almidones. A continuación, se dan en la tabla (2.2) los productos radiolíticos que se han identificado en el almidón de maíz.

Una importante consecuencia de la degradación de los almidones es la reducción de la viscosidad, esto es debido a que por el rompimiento de sus enlaces glucosídicos, sus propiedades funcionales como la viscosidad se ven afectadas, como se muestra en la tabla (2.2).

Tabla (2.2)  
Productos radiolíticos del almidón de maíz irradiado en presencia de Oxígeno, con un contenido de agua del 12-17%.

Productos Radiolíticos	Concentración ( g/g por 10 kGy)
Formol	20
Acetaldehído	40(=3kGy)
Acetona	2.1( 20 kGy)
Malonaldehído	2
Glicolaldehído	9
Glioxal	3.5
Gliceraldehído	4.5
Hidroxiacetilfurfural	1.0
Metilglioxal	0.25
Diacetil	0.1
Acetoína	0.1
Furfural	0.4
Acido fórmico	100
Acido Acético	1.8
Acido Glioxílico	0.5
Acido Pirúvico	0.2
Acido Glicólico	0.6
Acido Málico	1.3
Acido Oxálico	1.4
Metil formato	Trazas
Alcohol etílico	variable
Alcohol Metílico	2.8
Glucosa	5.8
Maltosa	9.8
Manosa	0.1
Ribosa	0.6
Xilosa	0.4
Eritrosa	1.2
H2O2	6.6 (1-4 kGy)

Fuente: J.F. Dauphin and L.R. Saint Lebe, Radiation Chemistry of Carbohydrates. En "Radiation Chemistry of Major Food Components" (P.S. Elias and A.J. Cohen eds.) Elsevier, Amsterdam 1977.

Tabla (2.3)

Efecto de la Irradiación sobre la viscosidad y grado de polimerización de la amilosa de papa.

Dosis(KGY)	Viscosidad Intrínseca (g-1 x ml)	Grado de polimerización
0	230	1700
0.5	220	1650
1.0	150	1100
2.0	110	800
5.0	95	700
10.0	80	600
20.0	50	350
50.0	40	300
100.0	35	250

Fuente: Urbain W.M. 1986, pp.41, de C.T. Greenwood and C. Mackenzie, Die Starke 15,444 (1963).

#### 2.4.1.1 Mezclas de Carbohidratos con Proteínas y Lípidos.

Debido a que los carbohidratos se encuentran en muchos alimentos, como en algunas frutas y vegetales, -junto con otras sustancias como proteínas y lípidos, es interesante revisar el efecto de la irradiación bajo estas circunstancias.

La irradiación de mezclas de azúcares y aminoácidos lleva a la polimerización seguida del efecto del oscurecimiento. La adición de cisteína o metionina a una solución de glucosa inhibe a la formación de los compuestos carbonilos. De esta manera, se ha observado una acción protectora de los aminoácidos y proteínas ya que interfieren con la disponibilidad del radical OH. para la interacción con el azúcar. (Clarke I.D. 1970).

Los lípidos emulsificados (como en el caso de mantequillos y margerinas), no tienen un efecto significativo en la radiólisis de azúcares, como se ha visto en algunos estudios en soluciones de trealosa a las que se le agregó aceite homogeneizado de girasol (Adam S. 1983). La química de radiación de carbohidratos es compleja y son posibles muchos productos radiolíticos. La gran diversidad de estos productos previene la formación de grandes cantidades de uno solo.

#### 2.4.2 Las Proteínas.

La absorción de la radiación ionizante por una molécula de proteína, puede conducir a que se lleven a cabo múltiples ionizaciones y excitaciones dentro de esta. Por lo tanto, la energía absorbida puede trasladarse del lugar inicial a otro que sea más "sensible" y donde se pudiera llevar a cabo un rompimiento de los enlaces. Debido a esto, el resultado de la irradiación de una proteína es un proceso que lleva a patrones regulares de cambios. (Zeeuw D. 1965).

Se pueden identificar tres tipos de estructuras en las proteínas:

- a) **Primaria:** Es el tipo y número de aminoácidos que la componen y la relación que existe entre estos para formar las cadenas a través de los enlaces peptídicos.
- b) **Secundaria:** Es el arreglo de las cadenas polipeptídicas, ya sean abiertas, dobladas o enrolladas.
- c) **Terciaria:** Es la configuración espacial en tres dimensiones de las cadenas polipeptídicas. Esto es cuando hay mas de una cadena, en una misma proteína.
- d) **Cuaternaria:** Es la unión de varias cadenas polipeptídicas entre sí. (Lehninger A.L. 1980).

La complejidad y tamaño de las proteínas permiten tener un gran número de sitios para la interacción a través de las acciones directa e indirecta que por lo tanto, los productos finales son muy diversos. (Simic M.G. 1983).

Las proteínas se pueden encontrar en presencia o ausencia de agua. Como se revisó en el capítulo anterior, el agua, puede afectar los resultados de la acción de la radiación. Debido a esto, a continuación se revisarán los efectos de la irradiación tanto para las proteínas secas, como para las que se encuentran en estado húmedo (Braverman J.B.S. 1976).:

#### 2.4.2.1 Proteínas secas.

Con la ausencia de agua la acción de la radiación se limita esencialmente a la acción directa. Los radicales libres que se forman a bajas temperaturas (p. ej.  $-196^{\circ}\text{C}$ ) designados como "primarios", son muy diferentes a los que se forman a temperatura ambiente. (A estos se les denomina radicales secundarios) Además, la formación de radicales es mayor en las proteínas que tienen mayor contenido de azufre. Esto es porque los radicales libres que se unen al azufre van a durar más tiempo (Urban W.M. 1986).

Debido a la limitada difusión que existe a bajas temperaturas, es más probable que ocurra la recombinación. Mientras que a altas temperaturas, la reacción con otras sustancias es más probable.

La irradiación puede desnaturar a las proteínas nativas, principalmente a través del rompimiento de los puentes de hidrógeno y otros enlaces que toman parte en las estructuras secundaria y terciaria. De esta forma, esta desnaturalización puede provocar cambios en la forma de la molécula y permitir que algunos grupos aparentemente "resguardados" queden expuestos, como los enlaces de azufre. Estos cambios no ocurren con todas las proteínas, sino que varían según la naturaleza de estas. (Simic M.G. 1983). Por ejemplo, las proteínas globulares, que tiene una estructura firme, favorecen las reacciones de recombinación y consecuentemente son más resistentes a cambiar. Las proteínas fibrosas, que su estructura es más "abierto" van a cambiar más fácilmente. Por ejemplo, el colágeno, que es una proteína fibrosa presente en carnes, se va a degradar formando unidades más pequeñas cuando es irradiado en estado seco. De esta manera, estos cambios van a afectar las propiedades de las proteínas. En la fig (2.7) se muestra el efecto en la viscosidad en el sol de la gelatina seca, donde se observa una caída en la viscosidad debida a la formación de unidades más pequeñas, a medida que se aumenta la dosis. Además se muestra en la fig (2.8) la reducción en la fuerza del gel, en función también al aumento a la dosis de la irradiación. (Fennema D.R. 1976).:

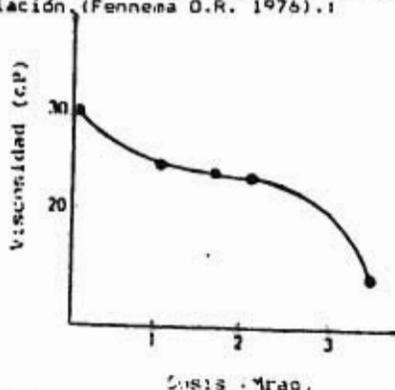


FIGURA (2.7):  
EFECTO DE LA RADIACION EN LA VISCOSIDAD DEL SOL DE GELATINA.  
DE: BACHMAN S., GALANT, S., GASYNA Z., WITKOWSKI S. Y ZECOTA H.  
EFECTOS DE LA RADIACION IONIZANTE EN GELATINA EN EL ESTADO SOLIDO  
EN: "IMPROVEMENT OF FOOD QUALITY BY IRRADIATION". INT. ATOMIC ENERGY  
AGENCY, VIENNA, 1971.

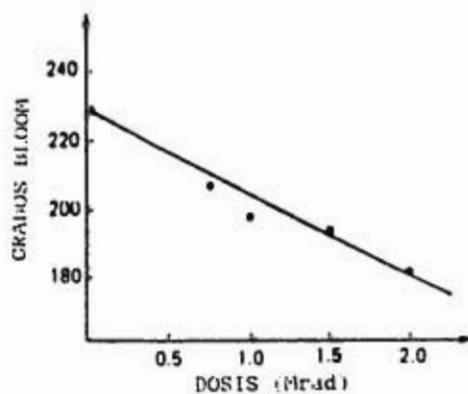


FIGURA (2.8)  
 FUERZA DEL GEL SOBRE GELATINA IRRADIADA. DE: FACHMAN S., GALANT S.,  
 CASYNA Z. ET. AL. "EFFECTS OF IONIZING RADIATION ON GELATIN IN THE  
 SOLID STATE. EN: "IMPROVEMENT OF FOOD QUALITY BY IRRADIATION."  
 INT. ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1974.

Los tipos de cambios causados por la irradiación están relacionados con la dosis. Las dosis moderadas pueden afectar las estructuras secundarias y terciarias. Las dosis mayores provocan cambios detectables en la estructura primaria, esto es, se provoca la destrucción de aminoácidos. Mientras que muy altas dosis puede llevar a la destrucción de aminoácidos, los datos en gelatina seca irradiada con dosis hasta 35 kGy que se presentan en la tabla (2.4) indican que las dosis usadas en la irradiación de alimentos no llevan a pérdidas significativas. (Kader A.A. 1986).

Tabla (2.4)  
Contenido de aminoácidos en la gelatina seca después de la Irradiación

Aminoácidos	Control	Dosis (kGy)		
		10	25	35
Hidroxiprolina	11.9	10.6	11.0	13.00
Acido Aspártico	5.4	6.0	5.7	5.5
Treonina	1.65	2.12	1.7	1.7
Serina	3.13	3.14	3.15	3.30
Acido Glutámico	10.10	10.50	10.30	10.00
Prolina	13.55	13.30	13.20	14.40
Glicina	22.30	21.20	21.30	21.50
Alanina	8.60	9.35	9.20	8.60
Valina	2.41	2.53	2.50	2.50
Arginina	8.28	7.75	7.00	7.10
Metionina	0.53	0.90	0.53	0.40
Isoleucina	1.15	1.23	1.16	1.00
Leucina	2.80	2.80	2.74	2.70
Tirosina	Trazas		Trazas	
Fenilalanina	2.04	1.90	1.87	1.90
Hidroxilisina	0.90	0.91	0.77	1.10
Lisina	3.45	3.87	3.48	2.70
Histidina	0.77	0.75	0.64	0.60
NH4+	1.12	1.01	0.77	0.90

Fuente: S. Bachman and H. Zegota, Physicochemical changes in irradiated (gamma 60Co) inulin. En "Improvement of Food Quality by Irradiation" Intl. Atomic Energy Agency, Vienna, 1974.

#### 2.4.2.2 Proteínas Húmedas

La mayoría de las proteínas que se encuentran en los alimentos pertenecen a esta categoría. La presencia de agua aumenta la acción indirecta de la radiación tanto para la presencia de los productos radiolíticos activos del agua, como para ser el medio de atracción de los reactantes. (Urbain W.M. 1986).

La radiación puede causar la separación de la proteína en unidades más pequeñas. Por ejemplo, la Hemocianina, a través del rompimiento de los puentes de hidrógeno, se separa irreversiblemente formando dos subunidades de igual tamaño. La Caseína también se separa en unidades más pequeñas, pero aumentando la dosis se produce de nuevo la unión.

Estos fenómenos de separación y de unión están relacionados a las variaciones de la estructura secundaria y terciaria de la proteína que exponen a los grupos reactivos a la acción de los productos radiolíticos del agua, como son  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , y el OH. Esta unión se le adjudica al cruzamiento que se produce entre las cadenas peptídicas. (Simic M.G. 1983)

Además de estos cambios, también ocurren variaciones en la estructura primaria. Estas son similares a las que se encuentran en las proteínas secas. Entre las reacciones que pueden llevarse a cabo, se puede mencionar la desaminación, descarboxilación, oxidación del grupo  $-\text{SH}$  y los grupos aromáticos (Clarke I.D. 1970).

Sin embargo, en presencia de agua, la radiación es menos eficiente debido a que parte de la energía incidente es absorbida por el agua. Existe cierto tipo de proteínas que necesitan una consideración especial en conexión con la irradiación de alimentos. Dentro de estas se encuentran las enzimas, cromoproteínas, que tienen un papel importante en los procesos biológicos. Todas estas están sujetas a la química de radiación que se aplica a las proteínas. (Taub I.A. 1983).

Al considerar el uso de la irradiación para el tratamiento de alimentos, el hecho de que la radiación puede alterar a las proteínas no constituye necesariamente una dificultad. Esto es debido a que los aminoácidos sobreviven perfectamente a este proceso. Algunos de los cambios en las estructuras secundaria y terciaria de las proteínas de los alimentos podrían interferir en los usos que se le diera al alimento. Por ejemplo, la irradiación afecta la calidad de esponjamiento de la clara del huevo, sin embargo, los cambios inducidos por la irradiación son tan pocos que no tienen una significancia en particular en la mayoría de los alimentos. (Zeeuw D. 1965).

#### 2.4.3 Lípidos.

Los lípidos se encuentran en bajas concentraciones en las frutas y vegetales por lo que únicamente se mencionaran en forma generalizada.

Los efectos de la irradiación de los lípidos son de interés en términos de sus características nutricionales, toxicológicas, funcionales y sensoriales. Los lípidos existen en los alimentos en una fase emulsificada junto a los sistemas acuosos que caracterizan a los otros dos componentes mayoritarios de los alimentos como son los carbohidratos y las proteínas. Sin embargo, las consideraciones básicas de la química de radiación se aplican a los lípidos.

Esto es, como en los sistemas acuosos, los lípidos están sujetos a acción directa como la indirecta de la radiación. La primera etapa de interacción con la radiación lleva a la excitación y a la ionización. La siguiente etapa, es principalmente la producción de intermediarios, en su mayoría radicales libres, que reaccionan de diferente forma, para formar productos estables. (Naar W.W. 1983).

Como se puede esperar, la acción indirecta de la radiación está influenciada por los factores ambientales y otros como el estado físico del lípido, temperatura de irradiación, presencia o ausencia de oxígeno, dosis, etc.

El oxígeno toma un papel muy importante en algunos lípidos ya que puede ocurrir una oxidación, que la irradiación normalmente va a acelerar. (Urbain W.M. 1986).

#### 2.4.4 Vitaminas.

La principal preocupación en relación a las vitaminas cuando un alimento es irradiado es el mantenimiento de su función biológica como nutriente esencial. Por esta razón, la mayoría de la información disponible sobre los efectos de la radiación en vitaminas está relacionado únicamente al grado de sobrevivencia después de la irradiación. Por lo tanto, en los casos en que hay pérdida de vitaminas, no hay mucha información sobre la identidad de los productos radiolíticos finales. Las vitaminas usualmente son agrupadas en relación a su solubilidad en agua o en lípidos. Este agrupamiento tiene relación con los efectos indirectos de la radiación. (Burditt A.K. 1986).

##### 2.4.4.1. Vitaminas hidrosolubles

-Vitamina C (Acido Ascórbico).-En una solución acuosa simple, la vitamina C es fácilmente destruida por irradiación. Se han identificado como productos radiolíticos a los ácidos Dehidroascórbico y Dicitoglucónico, además de otros ácidos y compuestos. Además, a pH neutros, el Ac. Ascórbico es atacado por el eaq y el OH. (Kader A.A. 1986). Por el contrario, con dosis hasta 5K Gy, sólo se han producido pequeñas pérdidas de Ac. Ascórbico en frutas y Vegetales como papas, cebollas y jitomates. (Maxie E.C. 1965)

-Vitaminas del complejo B.-Entre las vitaminas del complejo B, la Tiamina (B1) es la más lábil a la radiación. Esta labilidad puede deberse a la presencia de enlaces heterodobles en la molécula de Tiamina, como por ejemplo: -C=O y -C=N.

En una solución con agua, se va a formar la dihidrotiamina. Se ha observado que la destrucción de la B1, se reduce grandemente en presencia de N2O o O2 (son inhibidores del eaq) o de glucosa (inhibidor del OH) (Zeeuw D. 1965). La Riboflavina (B2) también contiene un número de enlaces heterodobles y por esta razón, en soluciones acuosas simples, también tiene interacciones con los productos radiolíticos activos del agua. Debido a que la riboflavina se puede unir a las proteínas, es un poco resistente a la radiación en muchos alimentos. Cuando se tienen bajas temperaturas en la irradiación, se mejora la retención de ésta. (Clarke I.D. 1969). La Niacina, piridoxina, vitamina B6 y Cobalamina (B12) también se degradan cuando están en soluciones acuosas. Sin embargo, cuando están en los alimentos, solo son moderadamente afectadas por la irradiación. La Colina, el Ac. Pantoténico, la Biotina y la Folacina, son resistentes cuando están en los alimentos. (Nawar N.W. 1985).

##### 2.4.4.2 Vitaminas Liposolubles.

-Vitamina A.-Las fuentes de Vitamina A en alimentos incluyen a la vitamina A (Retinol) y a los carotenoides provitamina A (principalmente los beta-carotenos). De esta forma, mientras que la vitamina A y los beta-carotenos son esencialmente equivalentes nutricionalmente, su química de la radiación no es la misma. Cuando se encuentran en medios de solventes lipídicos, se produce la destrucción de la vitamina A y envuelve tanto la acción directa como la indirecta de la radiación. La cantidad de degradación varía sustancialmente con el solvente lipídico usado y con las diferencias en composición, como cuando la vitamina A está presente como acetato o alcohol. En los alimentos, las pérdidas de vitamina A en vegetales son muy pocas. Sin embargo, las pérdidas aumentan cuando los alimentos irradiados se mantienen en contacto con el aire. (Drehi J.F. 1983).

Vitamina D.-La vitamina D existe por lo menos en dos formas: D2 (calciferol) y

D3 (7 Dehidrocolesterol irradiado). Estas dos formas difieren en la composición de la cadena de hidrocarburos. Los dos son esteroides y contienen grupos particulares que ordinariamente son vulnerables a ser atacados por la radiación. Se han identificado algunos hidrocarburos como productos radiolíticos. La irradiación de alimentos generalmente no produce pérdidas de vitamina D. (Zeeuw D. 1965).

Vitamina E.-La vitamina E (alfa tocoferol) ordinariamente es fácilmente oxidada, particularmente por productos de la oxidación de grasas insaturadas. La irradiación de alimentos que contienen lípidos en presencia de oxígeno, o su almacenamiento en presencia de aire, causa grandes pérdidas de vitamina E. (Clarke I.D. 1970).

Vitamina K.-Hay un número de compuestos relacionados que tienen una actividad de vitamina K. La sensibilidad a la radiación es dependiente de los compuestos particulares y el medio en el que se lleva a cabo. De todas sus formas, la vitamina K3 es la más sensible a la radiación. En alimentos vegetales, la irradiación casi no causa pérdidas. (Urbain W.M. 1986).

#### 2.5.-QUÍMICA DE RADIACION DE FRUTAS Y VEGETALES

La gran mayoría de las aplicaciones de la irradiación de frutas y vegetales es la concerniente a los productos frescos. Esta circunstancia distingue al uso de la irradiación en estos productos a diferencia de la irradiación de otros alimentos en que las frutas frescas y los vegetales son organismos vivos con procesos metabólicos activos, cuyo curso puede estar influido por la irradiación y que sus consecuencias pueden causar cambios químicos después de la irradiación de los alimentos. De esta manera, los efectos inmediatos de la irradiación son sólo una parte del resultado total de la irradiación de estos alimentos vivos. Las frutas y vegetales están caracterizados generalmente por tener como principal componente a los carbohidratos, además del agua. Sólo tienen muy pequeñas cantidades de proteínas y lípidos. Además, están caracterizados por tener propiedades de textura que les dan los atributos tan importantes de calidad, particularmente en el estado fresco. (Urbain W.M. 1986). La textura de las frutas y vegetales está relacionada con el turgor de las células vivas que son parte de los tejidos y de otros tejidos estructurales, incluyendo a los materiales que producen la cohesión intracelular, que proveen de las características de rigidez de un alimento en particular. El turgor es la presión de los componentes de la célula sobre la pared celular. Cualquier cosa que afecte esta presión alterará la textura. (Zeeuw D. 1965). Por lo tanto, la reducción de la cantidad de componentes celulares, reducirá la presión causando la disminución del turgor y el ablandamiento del alimento. Los cambios en la pared celular pueden afectar su permeabilidad y de esta manera afectar el turgor. La ruptura de la pared celular puede liberar a los componentes de la célula y causar cambios en la textura. Las paredes celulares contienen celulosa, hemicelulosa y ligninas. Las sustancias pécticas están presentes en el área de la pared celular. En los alimentos que tienen un alto contenido de almidón, como los plátanos verdes, el almidón presente puede ser un factor adicional de su firmeza. Debido a la importancia de la textura en la calidad de frutas y vegetales y debido a que su textura está tan cercanamente ligada a los componentes de los carbohidratos, los cambios causados por la irradiación en los carbohidratos son de gran importancia. De los cambios inmediatos causados por irradiación de frutas y vegetales, el ablandamiento, esto es, la pérdida de textura, es el principal factor limitante en usar este proceso. Para la mayoría de las frutas y hortalizas esto limita la dosis que pueda ser utilizada. (Kader A.A. 1986) El ablandamiento de frutas y vegetales está principalmente relacionado con la degradación por radiación de los carbohidratos asociada con una textura normal, principalmente la celulosa, la pectina y el almidón. Esta degradación puede afectar la textura en por lo menos dos formas:

- a) Al debilitar los tejidos estructurales rígidos o
- b) Alterando las paredes celulares para reducir el turgor. (Clarke I.D. 1970).
- c) Afectando a los procesos de enzimas endógenas, al liberar a las enzimas de sus lugares normales dentro de los tejidos de la planta, generalmente hacia

donde pueden atacar a los carbohidratos o alterando a los sustratos de los carbohidratos para hacerlos más susceptibles a la acción enzimática. Generalmente, a dosis relativamente bajas de 2-3 kGy, el cambio de textura parece estar relacionado con la liberación de Calcio de la asociación de Calcio-Pectina que está presente en las frutas y vegetales. Otros cambios inmediatos inducidos por la radiación de frutas y vegetales, incluyen la reducción del contenido de Ac. Ascórbico y por la pérdida de los grupos -SH. En las papas, se lleva a cabo un aumento en los azúcares reductores y no reductores y en aminoácidos libres (Ajluni S. y Hamdy M.K. 1988). En las fresas aparece una reducción en la acidez debido a la irradiación. Esto causa un aparente sabor más dulce de los normal. (Burditt A.K. 1982). Se puede notar que los estudios de irradiación de frutas y vegetales se han limitado a dosis relativamente bajas (menores a 3 KGy) (Burditt A.K. 1982). La mayoría de las aplicaciones de la irradiación a estos alimentos requiere de bajas dosis (Kader A.A. 1986). Sin embargo, las limitaciones a las dosis impuestas por el efecto del ablandamiento producida por la irradiación de estos alimentos ha limitado la investigación de los efectos a dosis mayores. (Dishl J.F. 1983)

#### 2.6 Resumen

En este capítulo se han revisado los cambios químicos que se presentan dentro de las moléculas del absorbedor cuando son irradiadas. La base de la etapa de los cambios químicos, se puede decir que es el momento en el que se producen átomos que han ganado energía y se convierten en "excitados", y átomos que al perder energía se transforman en "iones". Debido a que los iones y los átomos excitados contienen cantidades de energía mayores a las normales, son inestables y desde el punto de vista químico, altamente reactivos. Así, pueden reaccionar con átomos de su mismo tipo o con entidades cercanas a ellos. Se pueden tener dos tipos de efectos dentro de la química de radiación:

- efectos directos y,
- efectos indirectos.

Los efectos directos son todos los cambios inducidos por la radiación que vayan a provocar transformaciones de naturaleza permanente en el absorbedor, esto es, los cambios que sufran los componentes del absorbedor al adquirir energía a través de la interacción con el absorbedor.

Los efectos indirectos son los cambios que se derivan de la interacción de los productos primarios con sí mismos o con otros componentes del absorbedor.

Debido a que muchos alimentos contienen cantidades sustanciales de agua, los efectos indirectos son importantes en la aplicación de la irradiación de alimentos. De esta manera, se puede decir que los efectos ordinarios de la irradiación en sistemas acuosos complejos, como lo son los alimentos, son de importancia crítica ya que los alimentos cambian poco químicamente por la irradiación.

Los cambios químicos causados por la irradiación que tienen que ver con los alimentos, como las frutas y verduras, involucran los cambios en las frutas y las verduras, y los cambios en los contaminantes de éstas.

Desde el punto de vista de la irradiación de alimentos, el cambio más importante en los polisacáridos causado por la irradiación es el rompimiento del enlace glucosídico. Esto traerá como consecuencia, la pérdida de textura y presentarán tendencias al ablandamiento en frutas y verduras, además de la reducción de la viscosidad.

Para el caso de las proteínas secas, los tipos de cambios causados por la irradiación están relacionados con las dosis. Las dosis moderadas pueden afectar las estructuras secundarias y terciarias. Las dosis mayores provocan cambios detectables en la estructura primaria, o sea causar la desnaturalización. De una manera similar, ocurren cambios en las proteínas húmedas, sin embargo, en presencia de agua, la radiación es menos eficiente debido a que parte de la energía es absorbida por el agua.

La principal preocupación en relación a las vitaminas cuando un alimento es irradiado es el mantenimiento de su función biológica como nutriente esencial.

Por esta razón se puede decir, que las vitaminas que se ha visto que presentan

pérdidas en alimentos son: La vitamina C, en pequeñas cantidades en papas, cebollas y jitomates, la vitamina B1 o Tiamina, que es la más lábil a la radiación, la vitamina A, cuando los vegetales se mantienen en contacto con el aire después de ser irradiados y la vitamina E. Las vitaminas que casi no presentan variación cuando están presentes en alimentos irradiados son: la Niacina, Piridoxina, Vitamina B6, la vitamina B12, la Colina, el Ac. Pantoténico, la Biotina, la Folacina, la vitamina D, y la vitamina K. Todas estas pérdidas que se mencionan no son mayores a las que se presentan durante cualquier tratamiento de cocción de un alimento.

Para finalizar se puede repetir que el efecto más importante químicamente en las frutas y vegetales, puede ser el de la pérdida de textura de las frutas y vegetales. La textura está relacionada con el turgor de las células. Cualquier cosa que afecte la presión de los componentes de la célula, o turgor, alterará la textura, y por lo tanto, causará el ablandamiento del alimento. Además, no se debe olvidar que la textura también está cercanamente ligada a los carbohidratos, y los cambios que se produzcan en estos como el rompimiento del enlace glucosídico, también provocará un ablandamiento y pérdida de textura. Debido a esto, se entenderá, que para las frutas y verduras, esto será el factor que limitará las dosis a emplearse.

Las limitaciones a las dosis impuestas por el efecto de ablandamiento provocado por la irradiación ha limitado la investigación de los efectos a dosis mayores así como la aplicación en varios tipos de frutas.

## 2.7 Bibliografía

- ADAM S. 1983.  
Recent developments in radiation chemistry of carbohydrates. In: P.S. ELIAS AND COHEN EDS. Recent Advances in Food Irradiation. Elsevier Biomedical, Amsterdam.
- BADUI S. 1982.  
Química de los Alimentos, Ed. Alhambra, Mexico.
- BRAVERMAN J.B.S. 1976  
Introducción a la Bioquímica de los Alimentos. Ed. El Manual Moderno S.A., Mexico.
- BURDITT A.K. 1986.  
Food Irradiation as a Quarantine Treatment of Fruits and Vegetables, Food Technology, (6).
- CLARKE I.D. 1970.  
Effects of Radiation Treatments. In: ED. HULME A.C. The Biochemistry of Fruits and their products. Vol. II, p. 687, Ac. Press, NY.
- DIEHL J.F. 1983.  
Radiolytic Effects in Foods. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Foods by Ionizing Radiation. Vol. I, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- FENNEMA O.R. 1976.  
Food Chemistry, Marcel Dekker, N.Y.
- KADER A.A. 1986.  
Potential Applications of Ionizing Radiation in Postharvest Handling of fresh fruits and vegetables. Food Technology. (6).
- LEHNINGER A.L. 1980.  
Biochemistry, Worth Publ., N.Y.
- LEVENSPIEL O. 1972.  
Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons, N.Y.
- MAHAN B.H. 1977.  
Química. Fondo Educativo Interamericano S.A. Mexico.
- TAUB I.A. 1983.  
Reaction Mechanisms, Irradiation Parameters and Product Formation. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. Preservation of Food by Ionizing Radiation. Vol. II, CRC Press, Florida.
- URBAIN W.M. 1986.  
Food Irradiation, Academic Press Inc., (London) LTD.
- SIMIC H.G. 1983.  
Radiation Chemistry of Water Soluble Food Components. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food by Ionizing Radiation. Vol. II, CRC Press, Florida.
- ZEEUW D. 1965.  
Fruits and Vegetables. In: U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION. Radiation Preservation of Foods. Proceedings of an International Conference. Boston Mass., Publication 1272, National Academy of Sciences, Nat. Research Council, Washington D.C.

## CAPITULO TERCERO

### EFFECTOS GENERALES DE LA IRRADIACION EN FRUTAS Y VEGETALES

En el capítulo anterior se revisaron los cambios químicos que se provocan por la irradiación tanto a nivel atómico, como en estructuras más complejas, hasta llegar a las frutas y vegetales. En este capítulo se revisarán más a fondo todos los efectos y algunos estudios que se han realizado sobre la irradiación de frutas y vegetales. Como ya se ha mencionado, el principal interés de tratar a los alimentos con radiación ionizante es el de asegurar su preservación. De esta manera, para el caso de frutas y vegetales nuestro principal objetivo al irradiarlas es el de reducir las mermas que se producen durante la comercialización de estas. Bien es sabido que en nuestro país, uno de los principales factores que nos limita a la debida comercialización de las frutas y vegetales, son los altos porcentajes de frutas y vegetales que ya llegan deteriorados al momento de su comercialización. Debido a esto, se propone analizar una alternativa más de preservación. (Clarke I.D. 1971).

En base a lo ya mencionado anteriormente, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios antes de llevar a cabo la irradiación de frutas y vegetales:

- a.-No debe haber pérdidas de la calidad nutricional como resultado de la irradiación.
- b.-Los cambios químicos y físicos, como ablandamiento, pérdida de textura, etc., inducidos por la irradiación no deben volver al producto más susceptible a los daños mecánicos durante su transporte. Además de que no deben ser afectadas sus características organolépticas, como olor, color y sabor.
- c.-Los sabores y olores provocados por la irradiación no deben crear un producto diferente a los de su especie y/o variedad.
- d.-La apariencia del producto debe ser atractiva y preferiblemente típica a las especies y/o variedad.
- e.-No deben promoverse sustancias tóxicas para los humanos.
- f.-No se debe aumentar la susceptibilidad a infecciones causadas por microorganismos.
- g.-Los métodos tecnológicos utilizados para llevar a cabo la irradiación no deberán requerir de un excesivo manejo del producto.
- h.-Los requerimientos de refrigeración del producto irradiado no deberán ser diferentes a los originales del mismo producto, para no aumentar los costos de operación, que ya son altos.
- i.-El costo del proceso no debe exceder a los beneficios que se pudieran obtener, para que no resulte en un aumento en el precio del producto al consumidor. (IFF 1983).

#### 3.1.-Factores que Influyen la Respuesta de las frutas y vegetales a la Irradiación.

Para mencionar a los factores que pueden influir en la respuesta a la irradiación, es importante recordar que las frutas y vegetales cosechados, al ser tejidos vivos, difieren de otros grupos de alimentos en sus requerimientos óptimos de postcosecha, los cuales están dedicados a disminuir sus velocidades de respiración, sin tener que decir que ya son tejidos muertos. De esta manera, las frutas y vegetales son altamente sensibles a los diversos daños mecánicos como las inducidas por golpes, rasguños y otros daños físicos; la exposición a mayores o menores temperaturas de las óptimas para cada producto; pérdida de agua; y la exposición a niveles de Oxígeno o Bióxido de Carbono que se encuentren fuera de las concentraciones que pueden ser toleradas por cada producto. Entre las respuestas de las frutas frescas y los vegetales a estos tipos de daños mecánicos se puede encontrar el aumento en las velocidades de respiración y en la producción de etileno. (Kader A.A. 1984).

Según el tipo de frutas y vegetales, serán las respuestas que pudieran tener al manejo que se les da después de la cosecha, y debido a esto, es importante tener en cuenta los factores que están relacionados a las características de cada producto, y de esta forma, poder analizar los procedimientos de irradiación que van a influir en la respuesta de las frutas y los vegetales a la irradiación.

En la siguiente tabla se mencionan algunos de los factores que influyen en la respuesta a la irradiación de frutas y vegetales:

Tabla (3.1)

Factores que Influyen en la Respuesta a la Irradiación de Frutas y Vegetales

Factores del Producto

- Tipo de Producto
- Área de Producción y Estación
- Madurez en el momento de la Cosecha
- Calidad Inicial: sanidad, textura, porosidad, sabor, aroma, tamaño, forma, etc.
- Vida Postcosecha
- Procedimientos postcosecha

Factores Climáticos

- Temperatura
- Lluvia
- Viento
- Granizo
- Heladas
- Humedad Relativa

Factores de Cultivo

- Variedad
- Características del suelo: físicas y químicas
- Fertilización
- Densidad y forma de siembra
- Poda
- Fumigación
- Aplicación de reguladores de crecimiento: compuestos que influyen sobre el desarrollo del producto.

Factores de la Cosecha

- Índice de cosecha
- Momento de cosecha
- Forma de cosecha

Factores Postcosecha

- manejo en la huerta
- transporte al centro de empaque
- empaque
- lavado
- preenfriado
- transporte
- almacenamiento

Procedimientos de Irradiación

- Dosis
- Velocidad de Dosis
- Condiciones ambientales durante la irradiación
- Temperatura
- Composición Atmosférica

A Continuación se van a revisar las posibles aplicaciones de la Irradiación en frutas y vegetales y los tipos de aplicación tecnológica que se pueden hacer.

### 3.2 Aplicaciones Potenciales de la Irradiación de Frutas y vegetales.

Los efectos de la irradiación a diferentes dosis en frutas y vegetales frescos se puede resumir en la siguiente tabla (3.2): Se presenta en forma de sumario las dosis que normalmente se utilizan para el efecto que se busca. En General, sólo se habla de las posibles aplicaciones que se pueden tener en cuanto a frutas y vegetales, ya que como se ha estado mencionando, existen factores limitantes para la irradiación de las frutas y vegetales, basados en la pérdida de textura y aumento del ablandamiento de éstas. Sin embargo, se ha podido observar que sí es posible la utilización de la radiación ionizante para el control de algunos de los efectos que se mencionarán en este capítulo.

Tabla (3.2)  
Efectos de la Radiación ionizante en Frutas y Vegetales

Dosis (kGy)	Efectos Observados
0.05-0.15	Inhibición de Germinación de Tubérculos, bulbos y vegetales de raíz; Inhibición del crecimiento de espárragos y champiñones.
0.15 -0.75	Desinfestación de Insectos.
0.25 -0.50	Retraso en madurez de algunas frutas tropicales como plátano, mango y papaya.
mayores a 1.75	Control de enfermedades postcosecha.
1.00 -3.00	Ablandamiento acelerado de frutas y vegetales; Desarrollo de sabores desagradables en algunos productos como en algunas variedades de manzanas (Urbain W.M.1986)
mayores de 3.00	Ablandamiento, Madurez anormal, incidencia de desórdenes fisiológicos, sabor disparatejo.

Fuente: Kader A. 1986.

En la tabla se puede observar que la mayor cantidad de aplicaciones se tiene a dosis menores debido a la sensibilidad que presentan las frutas y los vegetales a dosis mayores de irradiación. El límite de dosis para evitar tener problemas de ablandamiento y deshidratación de las características organolépticas de los productos, se encuentra en 1.0 kGy. A partir de este momento, es cuando se comienzan a tener este tipo de problemas. En cuanto a economía, esto presentaría una ventaja ya que a medida que se aumentan las dosis los costos también lo hacen. A continuación se desglosa en subcapítulos las distintas aplicaciones que se han llevado a cabo en frutas y vegetales.

### 3.2.1 Radurización y Radicación de Frutas y Vegetales.

El término "enfermedad postcosecha" ha sido utilizado para referirse a la senescencia de frutas y vegetales causada por microorganismos. De esta manera, la senescencia de las frutas resulta principalmente de las infecciones provocadas por hongos filamentosos y por levaduras. Como es de esperarse, en la senescencia de frutas, las infecciones bacterianas son de menor importancia. A la exposición de una fruta o vegetal a una dosis limitada de radiación ionizante que provoque una reducción de los microorganismos que causan la pudrición de estas, se le denomina "Radurización". Esto es, controlar la pudrición postcosecha y las enfermedades que afectan a frutas y vegetales sin afectar sus cualidades sensoriales. (Moy J.H. 1983).

Los niveles de dosis aplicados para la radurización han llegado hasta los 5-6 Kgy. Sin embargo, aunque varios microorganismos vegetativos son usualmente controlados a estos niveles de dosis, algunos más resistentes como los estreptococos y las levaduras probablemente permanezcan. De esta manera, una dosis de 2-3 Kgy se recomienda para el control de la pudrición provocada por hongos. (Moy J.H. 1983).

Otra aplicación de la irradiación es la "Radicación", esto es, el tratamiento de un alimento con una dosis suficiente de radiación ionizante para reducir el número de bacterias patógenas a un nivel tal que ninguna es detectable en el alimento cuando es examinado por cualquier método de análisis bacteriológico (Hendel et.al.1961). Este proceso se aplica en particular en alimentos congelados o deshidratados. Debido a esto, en frutas y vegetales, los estudios que se llevan a cabo están más encaminados a la radurización más que a la radicación. Entre los problemas que se pueden presentar en la radurización de frutas y vegetales, podemos encontrar los que se presentan en la tabla (3.3). (Kader A. 1986).

En esta tabla, se menciona la posibilidad de causar diferentes cambios morfológicos, genéticos y fisiológicos en los hongos, de tal forma, que se pueda controlar su aparición en los productos, pero deben tomarse en cuenta las condiciones previas a las que se encuentra el producto para que el hongo pueda o no crecer en él, esto es, si tenemos un producto en buen estado, será difícil el crecimiento de hongos, a menos que también las condiciones del ambiente vayan a favorecer su proliferación; ya sea un aumento en la humedad y la temperatura, que puedan favorecer la germinación de las esporas que pudiera tener el producto. (Maxie E.C. et.al. 1965).

Es importante tomar en cuenta que cada tipo de hongo tendrá una sensibilidad diferente a las dosis de irradiación; además de que las condiciones de almacenamiento y transporte del producto, pudieran cambiar también los requerimientos de las dosis. En general, se puede decir que si se conoce el tipo de hongo que queremos controlar, incluyendo sus características fisiológicas y genéticas, se podrá llevar un control adecuado por medio de la irradiación, siempre y cuando las dosis necesarias no sean excesivas, para no dañar las características del propio producto. (Sommer N.F. y Fortlage R.S. 1966).

TABLA (3.3)  
Problemas de la Radurización de Frutas y Vegetales

Problemas	Efectos
Efectos Radiobiológicos	Los tratamientos de Irradiación causan diferentes cambios morfológicos, genéticos y fisiológicos en los hongos. Se requieren dosis mayores para causar la muerte más que para inhibir la germinación y retardar el crecimiento.
Condiciones del huésped antes del tratamiento	La especificidad huésped-patógeno y la facilidad del huésped a mantener el crecimiento de los hongos puede variar.
Efectos ambientales	Un aumento en la humedad y temperatura pueden favorecer la germinación de esporas; El requerimiento de dosis se ve afectado por los diferentes grados de infección en el campo y el desarrollo de las lesiones.
Sensitividad del hongo a la irradiación	La resistencia varía con su genética. La sensibilidad aparentemente depende de la población de células fúngicas.
Efectos técnicos deseados	Los tipos de condiciones de almacenamiento, requerimientos de transporte, y vida fisiológica del huésped pueden cambiar los requerimientos de dosis.
Efectos de otros factores que interactúan.	Efectos en el control de los hongos varían de acuerdo a la velocidad de dosis, nivel de oxígeno, protección química del huésped, mecanismos de reparación, recuperación y mutación del hongo.

Fuentes: (Sommer N.F. y Fortlage R.S. 1966; Tilton E.W. y Burditt A.K. Jr. 1983; Moy J.H. 1983).

### 3.2.2 Tecnología de la Radurización.

La aplicación de la Radiación Ionizante de frutas y vegetales para el control de la pudrición es más complicado y difícil que para otros propósitos como el retraso de maduración o en la extensión de la vida de almacenamiento cuando se aplica a otros tipos de alimentos como carnes y derivados. Esto es debido a varios problemas interrelacionados: (Moy J.H. 1977).

-La dosis tolerable del huésped a la radiación es usualmente menor a la dosis óptima requerida para el control de patógenos.

-Las frutas y vegetales crecen naturalmente en un medio donde los microorganismos causantes de enfermedades son libres para moverse, resultando en varios grados de infección y diferentes tamaños de población de los microorganismos que contaminan el producto. (Kader A. 1986).

-La condición mencionada anteriormente también resulta en la imposibilidad de encontrar un número suficiente de frutas y vegetales que crezcan naturalmente y que se encuentren libres de contaminación además de que sirvan como control para determinar los requerimientos de dosis para inhibir el crecimiento microbiano cuando se encuentran en un mismo estado de madurez.

-No existe un método eficiente para estimar el tamaño de la población de los microorganismos infectantes. (Moy J.H. 1983).

Los resultados experimentales de los estudios de los efectos de radiación en organismos individuales usando técnicas *in vitro* probablemente pueden ser interpretados con un mayor grado de precisión que los que se tienen de estudios *in vivo*. De esta forma, para hablar de la Tecnología de la Radurización se puede dividir en tres tipos de tratamientos que se han llevado a cabo en frutas y vegetales:

a) Tratamientos de irradiación de microorganismos *in vitro*.

b) Tratamientos de irradiación en varias frutas y Vegetales

c) Tratamientos combinados. (Moy J.H. 1983).

a) Tratamientos de irradiación de microorganismos *in vitro*.

Sommer y Fortlage (1966) presentaron una revisión de los resultados de sus experimentos utilizando irradiación *in vitro* de microorganismos que producen pudrición en frutas y vegetales.

Decidió a que el mayor obstáculo de estudios *in vitro* es la falta de un método conveniente para estimar el tamaño de la población, las esporas han sido consideradas como la estructura fúngica disponible más conveniente para los estudios de dosis-respuesta. De esta manera, al ser individuales, las esporas pueden ser fácilmente cuantificadas.

Comúnmente la irradiación no logra inactivar a las esporas de la fruta, ya que es sabido que las esporas son muy resistentes y se requieren dosis mucho mayores que afectarían la calidad del producto y no sería económicamente permisible. Para establecer las curvas de dosis-respuesta para las esporas de las enfermedades postcosecha, hay que realizar gráficas donde se esquematice la relación existente entre el porcentaje de sobrevivientes y la dosis absorbida en kilorads. De esta manera es posible observar más claramente la dosis que será necesaria para inactivar el porcentaje de población que se requiera. Es lógico que no será posible inactivar al 100% de la población ya que requeriríamos de dosis mayores y podría resultar en el daño del producto, ya sea disminuyendo su textura, aumentando su grado de ablandamiento, o alterando sus características organolépticas, como se mencionó en el capítulo de los efectos de la irradiación sobre las frutas y vegetales. Además, como se ha mencionado, las frutas y vegetales crecen en un medio no estéril, donde son fácilmente contaminadas y sería muy difícil poder eliminar el total de los microorganismos que las contaminan. (Moy J.H. 1977).

La figura (3.1) ilustra las dosis requeridas para inactivar cualquier célula en poblaciones de varios tamaños de la condia de Mucilina frutícola donde se utilizaron 20 replicas para cada población y cada dosis.

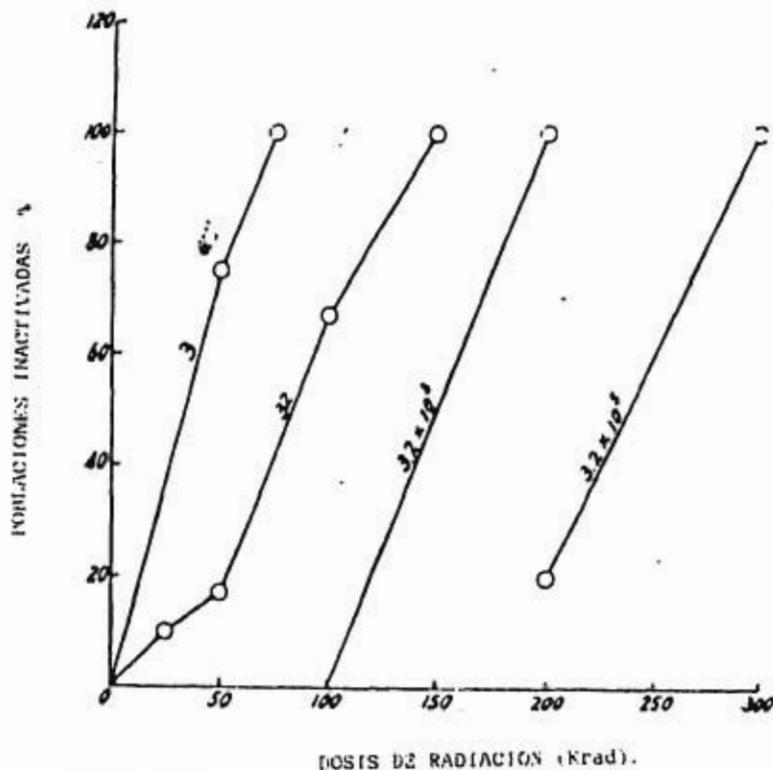


FIGURA (3.1)  
 DOSIS PARA LA INACTIVACION DE VARIAS POBLACIONES DE "Gonilla  
 fruticola". (ADAPTADO DE SOMMER N.F. AND FORTLAGE R.J. EN:  
 "ADVANCES IN FOOD RESEARCH", VOL. 15, CHICHESTER, C. O. MRAK, E.M.,  
 AND STEWART C.F., 1966, ACADEMIC PRESS, NEW YORK, 147)

En esta figura es posible observar que para inactivar un 80% de la presencia del contaminante en diferentes tamaños de población se tienen diferentes dosis. Por ejemplo, para una población de 32 esporas, se requiere de una dosis de aproximadamente 150 Krad. El tener este tipo de graficas facilita el analisis y la aplicacion de la irradiacion para la radicación de frutas y vegetales. (Sommer N.F. y Fortlage R.S. 1966).

d) Tratamientos de Irradiación en frutas y vegetales.

Para alcanzar el objetivo de controlar las enfermedades postcosecha en frutas y vegetales por irradiación a un nivel de radurización, la dosis de radiación utilizada debe ser tal que el huésped no se vea afectado. Esto es, en muchos casos, la dosis usada estará determinada por el huésped más que por el patógeno. Por lo tanto, esto se va a complicar debido a que se tienen diferentes especies y variedades de huéspedes que tienen distintos grados de tolerancia a la irradiación. Además que el estado de madurez en el momento del tratamiento y la disponibilidad al almacenamiento influirán también en la dosis que tolere el huésped. (Maxie E.C. et al. 1965).

Moy J.H. (1983) menciona que las frutas que van a ser destinadas al almacenamiento usualmente limitarán a una dosis baja de irradiación.

Una gran cantidad de frutas y vegetales han sido irradiados para diferentes propósitos. Algunos han sido para probar el efecto de la radiación ionizante en el huésped o para controlar algunas respuestas específicas como la madurez o la germinación. Algunas otras fueron irradiadas para estudiar la relación entre el tratamiento y el control de enfermedades. (Moy J.H. 1983).

A continuación se presentan algunos estudios que muestran a los posibles candidatos para el tratamiento de radiación en el control de enfermedades:

b.1) Frutas de bayas:

Generalmente, las bayas son alimentos muy perecederos, y la irradiación se dirige hacia el control de la pudrición de hongos.

Desafortunadamente, estos alimentos pueden tolerar dosis no mayores a 2-3 kGy si no se desea un ablandamiento excesivo de la fruta. (Maxie E.C. et al. 1965).

Es posible realizar un análisis del efecto de la irradiación sobre el desarrollo de hongos en fresas si se observa la figura (3.2). En esta figura se puede obtener la relación entre la dosis y la extensión de la vida de las fresas incluyendo el efecto que pudiera tener el empaque (0.03 mm. de una película de polietileno perforado) para reducir las infecciones después de la irradiación. Se puede observar que las dosis hasta 0.5 Mrad lograron extender la vida de más del 50% de la muestra, mientras que como se esperaba, al proteger con la película plástica al producto, se logró extender la vida de la fruta por un factor de 3.

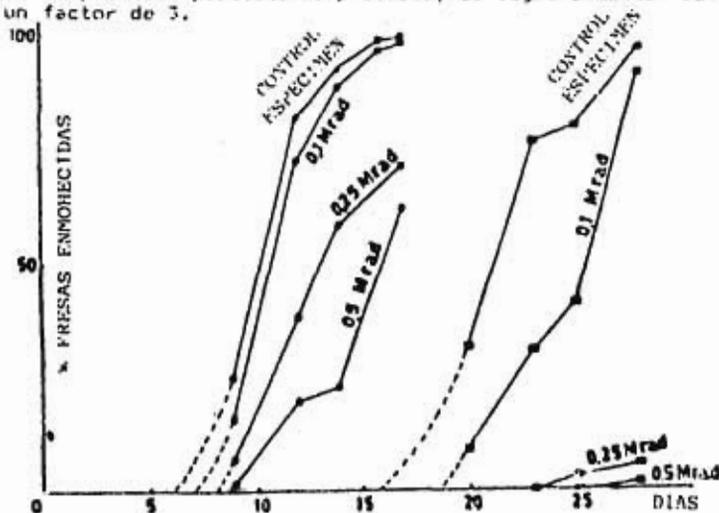


FIGURA (3.2).  
EFECTO DE LA IRRADIACION SOBRE EL DESARROLLO DE HONGO EN FRESAS  
ALMACENADAS A 15°C. OCURRIÓ UNA INFECCION SECUNDARIA EN FRESAS NO  
PROTEGIDAS CON UNA PELICULA DE POLIETILENO PERFORADA DE 0.03 MM.  
INFECCION SECUNDARIA: SIN INFECCION SECUNDARIA. FUENTE:  
HERNECOTIS M. Y PROOST DE M., FOOD IRRADIATION (SACLAY) 4(1-2).  
A15(1963).

Las fresas son frecuentemente atacadas por B. cinerea Pers. ex. Fr. el cual causa la enfermedad llamada "moho gris" (Moy, J.H. 1983). Este hongo tiene la capacidad de esparcirse vigorosamente de una fruta a otra, y su crecimiento se puede disminuir, solo bajo condiciones de refrigeración.

Moy 1983, menciona el efecto de los tratamientos de 100-300Krad sobre B. cinerea y B. nigricans en las fresas. El período de incubación de estos hongos se extendió de 2 a 7 días con los tratamientos de 200 a 300 Krads. En general, los resultados de los estudios de laboratorio han indicado que el tratamiento de fresas frescas a 200 Krad combinado con almacenamiento refrigerado es la condición óptima para aumentar la vida de anaquel. (Moy J.H. 1983). Además del ablandamiento, la irradiación a dosis mayores de 3 KGy, puede causar cambios de sabor y color. (Urbain W.M. 1986).

Se puede decir que la aplicación de la irradiación en las fresas puede tener aceptación, ya que en nuestro país, la fresa es uno de los productos de mayor exportación, por lo que se beneficiaría en gran medida al disminuir las pérdidas por ataque de hongos.

#### b.2) Cítricos.

El Objetivo de la radurización de las frutas cítricas es el control de la podredumbre del tallo debido a los hongos Penicillium italicum y P. digitatum. La dosis requerida para controlar este tipo de infección esta relacionada al estado de la infección en el tiempo de irradiación. El organismo específico presente también afecta el requerimiento de la dosis, por ejemplo, la Alternaria citri en las tangerinas, no es afectada con dosis hasta 7.5 KGy mientras que el P. italicum y el P. digitatum estan bien controlados por dosis de 1-2 KGy (Urbain W.M. 1986)

Una consecuencia de la radurización es la apariencia de orificios en la piel. El daño en la piel se desarrolla despues de la irradiación y se vuelve evidente en 4 a 5 días con el almacenamiento a temperatura ambiente. Este daño puede ser debido a la despolimerización de las pectinas, lo cual causa que el tejido del albedo se colapse y así, el daño se concentra en el área del tallo. Los compuestos de los terpenos en las naranjas "Ovale" irradiadas aumentan con la dosis, con el tiempo que transcurre despues de la irradiación. La severidad del daño de la piel aumenta con la dosis y el tiempo y la temperatura de almacenamiento. (Moy J.H. 1983).

Se han notado otros efectos en las frutas cítricas. La irradiación causa ablandamiento, el cual se reduce con el almacenamiento. Así, las dosis mayores a 2 KGy generalmente no afectan el sabor seriamente. Sin embargo, las dosis menores a 0.5 KGy, producen cambios detectables en sabor y olor en las toronjas. La reducción del contenido del Acido Ascórbico rara vez excede el 10%, como se demuestra por los datos en la tabla (3.4), pero aumenta con el almacenamiento. Por lo cual, es recomendable si no se desean mayores pérdidas de Ac. Ascórbico, no tener por mucho tiempo en almacenamiento a la fruta irradiada. (Nagai N.Y. y Moy J.H. 1985).

Tabla (3.4)

Cambios en el Acido Ascórbico de Mandarinas relacionados a la Irradiación, temperatura de almacenamiento y duración del almacenamiento.

Dosis (Gy)	0 Días		10 Días		20 Días	
	2°C	28°C	2°C	28°C	2°C	28°C
0	31.19	31.39	28.13	27.65	27.71	24.71
400	2.48	32.48	27.68	26.93	25.51	24.78
800	9.19	29.19	26.26	25.88	23.85	23.10
1600	9.42	29.42	25.23	24.07	23.08	20.20

Fuente: R.A. Dennison y E.M. Ahmed. "Effects of Low Level Irradiation upon the Preservation of Food Products," DRD-680. U.S. Atomic Energy Comm., Washington, D.C., 1971.

Mientras que haya alguna variación en la respuesta en diferentes variedades de cítricos, la dosis de radurización para controlar la podredumbre del tallo parece ser no menor a 1.5 kGy. A esta dosis pueden ocurrir daños inaceptables en la fruta, especialmente a la cáscara, y por esta razón, no es muy factible este uso de la irradiación. (O'Mahony M. y Goldstein L.R. 1987).

b.3) Frutas de hueso o Drupas.

Las frutas de hueso, representadas por los chabacanos (Prunus armeniaca L.), nectarinas (P. persica L.), duraznos (P. persica L.) y ciruelas (P. cerasifera L.) son infectados principalmente por dos hongos: M. fruticola y B. stolonifer que causan la podredumbre del café, tanto antes como después de la cosecha. (Sommer N.F. y Fortlage R.S. 1966).

Las condiciones climáticas húmedas hacen que la podredumbre de la fruta se extienda aún con una película que la proteja (Sommer N.F. y Fortlage R.S.

1966).

Para el caso de los chabacanos, se ha recomendado una dosis en el rango de 1-4 kGy. Se ha logrado controlar la podredumbre; además, se ha observado que las características sensoriales de la fruta no cambian significativamente. De la misma manera, las dosis en el rango de 1-4 kGy, logran la extensión de la vida de las nectarinas y las cerezas. Sin embargo, en las cerezas, el efecto del ablandamiento causado por la irradiación es el principal factor limitante y también en las nectarinas se ha observado un efecto adverso en el sabor, aunque la firmeza y el color no son afectados.

(Massey L.M. et.al. 1965.-Somogyi et.al. 1964).

Normalmente, cuando se irradia a los duraznos en estado casi maduro, se ablandan, pero en el almacenamiento tienen la misma firmeza que una fruta no irradiada. Se ha observado que es posible asegurar un control efectivo de la pudrición combinando inmersiones en agua caliente e irradiando con dosis de sólo 0.75 kGy, o simplemente con la pura irradiación a dosis de 1.5 kGy. Esto, nos puede indicar que es posible utilizar la irradiación para este tipo de frutas ya que las características sensoriales casi no se ven alteradas y se logra mejorar la calidad. (Tilton E.W. y Burditt A.K. Jr. 1983).

#### b.4) Frutas de Fornos

Dentro de este grupo es posible encontrar a las manzanas y las peras.

La pudrición de las manzanas resulta de las infecciones producidas por el Penicillium spp, Gloeosporium spp., Aspergillus niger, Botrytis spp. y otros. Una dosis de 2 kgy, puede ser adecuada para controlar a estos organismos (Urban W.M. 1986). Sin embargo, se han encontrado varios efectos adversos de la irradiación de manzanas, entre las cuales se puede encontrar un ablandamiento y un rompimiento interno, (esto es muy común en estas frutas también cuando ocurren daños mecánicos). De esta forma, a menos que exista mayor información disponible, parece que la irradiación de manzanas no sea muy práctica ni recomendable. (Moy J.H. 1983) De la misma forma, para el caso de las peras, una dosis de 2-3 kGy va a detener significativamente la aparición de los puntos de podredumbre causados por la Botrytis cinerea. Sin embargo, aquí también ocurren efectos adversos como ablandamiento, manchas en la piel y sensación de arenosidad en la pulpa. Así, tampoco se recomienda la irradiación de las peras por no permitir el mejoramiento de su calidad de consumo. (Moy J.H. 1977).

#### b.5) Frutas Tropicales

En este grupo se encuentran los plátanos, dátiles, higos, guayabas, mangos y papayas. Aquí se puede presentar un amplio interés por parte de nuestro país, debido a la amplia gama de productos tropicales con los que contamos y al gran interés existente a nivel mundial de importar este tipo de frutas. Puede tener un amplio potencial de aplicación para el control de microorganismos contaminantes en este tipo de productos. Se van a ir analizando uno por uno debido a lo que se acaba de mencionar. (Kader A.A. 1986).

##### -Plátanos.

Normalmente, se acostumbra cosechar a los plátanos en el estado de maduro verde. De esta manera, mientras que la contaminación por bacterias y levaduras usualmente existe, el crecimiento de estos organismos no ocurre en el estado verde, a menos que existan lesiones. Así, el papel del crecimiento bacteriano en relación a la pudrición del plátano no ha sido muy clara. Los síntomas usuales están asociados con el crecimiento de varios hongos, entre los cuales se encuentran: Colletotrichum musae, Botryodiplodia theobromae, Nigrospora muzei, N. sphaerica, Rhizopus spp., Thielaviopsis paradoxa, Ceratocystis paradoxa y Fusarium roseum. Estos hongos comenzarán su crecimiento cuando la fruta madura. Además, presentarán diversos patrones de crecimiento causando diversos tipos de pudrición, los cuales incluyen la antracnosis, pudrición en la corona, y terminación en la corona (Ferguson W.E. et.al. 1965).

De esta forma, las dosis necesarias para inactivar a los hongos que se encuentran en los plátanos, se encuentran en el rango de 2.5 kGy (Moy J.H. 1983). La irradiación bajo esas dosis causa un oscurecimiento de la piel, ablandamiento y aceleración de la pudrición. (Urban W.M. 1986). Se han sugerido

dosis menores de 0.05 a 0.10 kGy para aumentar la vida del producto, pero en relación a lo que se ha mencionado pudiera no ser muy práctica la utilización de la irradiación como método de control microbiano en los plátanos. (Ferguson W.E. et.al. 1966).

-Dátiles.

Afortunadamente, se ha encontrado que los dátiles toleran dosis hasta 5 kGy sin que se alteren sus cualidades. La pudrición por causa de microbios se reduce con dosis de 0.9 kGy. (Urbain W.M. 1986). En este caso, se puede concluir que en esta fruta si tenemos un potencial muy bueno para la aplicación de la irradiación debido a la baja susceptibilidad del dátil a la irradiación. (Kader A. 1986).

-Higos.

Normalmente, los higos se pudren debido al crecimiento de levaduras superficiales. Se encontró que las dosis en el rango de 2-4 kGy reducen la pudrición sin presentar cambio alguno en la calidad. Sin embargo, a dosis mayores, en el rango de 8-12 kGy, se presenta un ablandamiento. (Urbain W.M. 1986).

Si se sumerge a los higos en agua a 50°C por 5 minutos, además de irradiarlos a una dosis de 1.5 kGy, se extiende la vida de 3-4 días a 20-32°C y de 8-10 días a 15°C. (Moy J.H. 1983).

-Guayabas.

Las guayabas irradiadas con dosis de 0.3 kGy y almacenadas a T° ambiente, han logrado durar por más de una semana. Además, las propiedades sensoriales no se han visto afectadas. (Kader A. 1986).

-Mangos.

En algunas variedades de mangos, las dosis desde 0.5 kGy causan daños en la fruta. Además, así como en otras frutas, las dosis excesivamente altas promueven más que inhiben la pudrición, posiblemente a partir del daño en la fruta que la hace más vulnerable al ataque de hongos. El tratamiento más efectivo de irradiación parece ser una combinación de una dosis de radiación de 0.75 kGy con un baño de 5 minutos en agua de 50-55°C. Este tipo de tratamiento junto con el mantenimiento de la temperatura a 11°C durante el transporte, provee de una vida del producto hasta de 30 días, lo que sería de una semana a temperatura ambiente. (Dennison R.A. y Ahmed E.M. 1967).

-Papaya.

La papaya es una de las pocas frutas que tolera bastante bien la irradiación. Los estudios de Moy J.H., 1977, han mostrado que la irradiación para la desinfección y para el alargamiento de la vida de anaquel es bastante buena. La máxima dosis tolerada por las papayas es de 1 kGy. Las dosis mayores a ésta, causan sabores y olores amargos. Esta dosis es demasiado baja para tener un efecto suficiente para inactivar a los hongos presentes. Debido a esto, no se puede utilizar a la irradiación por sí sola y se ha utilizado el siguiente procedimiento:

1) Cosecha de la fruta en el punto en que un cuarto está madura (Rompimiento del color).

2) Inmersión en agua a 48°C/20 minutos.

3) Irradiación con una dosis de 0.75 kGy. (Burditt A.K. 1982).

-Uvas.

Se ha encontrado que si se sumerge a las uvas en agua a 50°C por 5 minutos además de irradiarlas con 1 kGy, se logra la extensión de la vida del producto tanto a temperatura ambiente y de refrigeración (Moy J.H. 1977).

-Tomates.

Moy 1983, reporta que cuando se irradiaba a los tomates a 300 kRad, se reduce la pérdida en el almacenamiento de algunos lotes, aunque el tratamiento causa pigmentación dispareja y un ablandamiento de la fruta. (Kader A. 1986).

b.4) Tubérculos, Raíces y Vegetales.

Se ha realizado un trabajo muy limitado para el control de enfermedades en el almacenamiento. En general, los estudios se dedican más a la inhibición de la germinación ya que las dosis necesarias para el control de enfermedades son altas y causan modificaciones en la calidad volviendo a estos muy susceptibles a la pudrición. (Brownwill L.E. et.al. 1957).

c) Tratamientos combinados.

Como se mencionó anteriormente en este capítulo, dentro de la Tecnología de la Radurización, se puede tener también una compatibilidad técnica en cuanto a los procesos de conservación por medio de la Irradiación.

De esta manera, el beneficio que se quiera obtener a partir del tratamiento con radiación ionizante en frutas y vegetales, vaya a verse aumentado o simplemente, se permita la utilización de este proceso en ciertos tipos de fruta que no soportan las dosis necesarias para el efecto que realmente se desea. Así, podemos tener una combinación de la irradiación con cuatro distintos principios que normalmente ya son utilizados por sí solos como métodos de conservación en frutas y vegetales. (Moy J.H. 1977).

Estos son :

1) Combinación de tratamientos de inmersión del producto en agua caliente y luego irradiando a distintas dosis según el producto del que se trate. (Ver cuadro (3.1) que se presenta a continuación).

2) Utilización de ciertas sustancias químicas previas a la irradiación.

3) Combinación de atmosferas controladas con irradiación. Aunque se ha observado que no se logra mejorar el efecto que este proceso da por sí mismo.

4) Combinación de radiaciones ultravioleta con irradiación. Tampoco se ha observado ninguna mejora en la vida de anaquel de las frutas. (Burditt A.K. 1982).

A continuación se presenta un cuadro donde se pueden observar algunas de las aplicaciones que se han llevado a cabo en tratamientos combinados con la Radurización:

Cuadro (5.1)  
Tratamientos combinados con Radurización.

Proceso de Conservación a combinar	M.O.a controlar	Producto	Dosis de irradiación	Resultado
Inmersión en agua 45-55C	Moho gris <u>B.cinerea pers.</u>	fruta	200 rRad	El calor sensibiliza al m.o. haciendolo más débil a la irradiación.
Inmersión en agua 45-55C de 4-5 minutos		papas plátanos mangos papayas uvas higos	10 KRad 25-35 " 50 " " 75 " " 100 " " 150 "	Se obtienen resultados aceptables
Uso del Diphenyl (Trat.químico)	<u>P.digitatum</u> <u>P.italicum</u>	Naranjas	<100KRad	Mejores resultados a la irradiación por sí sola.
Atmósferas controladas CO2 0.035-10.46% O2 4.79-21.5%	<u>Botrytis</u>	fruta "Shasta"	200Krad	El efecto no mejora los resultados que se obtienen con la pura irradiación.
Radiaciones U.V.	Hongos	Papaya		No se ven mejoras en la vida de anaquel de la fruta.

De: Burditt A.K., 1982, Akamine & Moy, 1983, Somogyi Et. Al. 1964.

A partir de este cuadro es posible darse cuenta que si es posible aplicar la irradiación en algunos productos además de que realizando la combinación con otros procesos de conservación se logran mejorar los efectos, o en algunos casos no se observan mejoras.

### 3.2.3 Retardo en la Maduración y Senescencia de Frutas Cosechadas.

Un factor muy importante que contribuye a la baja disponibilidad de frutas y vegetales, son las pérdidas debido a la pudrición de estas durante la producción, transporte y almacenamiento. de esta forma, aproximadamente un tercio de los productos cosechados se deshecha debido a la pudrición que se presenta por causa de un manejo inapropiado. (Akamine E.K. y Moy J.H. 1983). En los otros usos para la preservación por medio de la irradiación, los blancos de la radiación son los distintos organismos que contaminan a los alimentos. Sin embargo, para usar la irradiación en el retardo de la maduración y senescencia de las frutas, el mismo alimento es la muestra de experimentación. Además, aunque las frutas ya han sido cosechadas, están respirando y están llevando a cabo distintos procesos metabólicos. De esta manera, para poder asegurar el retardo en la maduración y senescencia es necesario alterar estos procesos. (Burditt A.K. 1982). Cuando se cosecha a las frutas antes de llegar a su madurez, pueden seguir dos caminos:

- 1) Una velocidad de respiración lenta que va a ir disminuyendo lentamente, ó,
  - 2) Primero tener un descenso de la velocidad de respiración y después un aumento que coincide con el inicio de la maduración. La velocidad de respiración alcanza un pico que subsecuentemente declina. ( Fig., (3.3))
- (Dennison R.A. y Ahmed E.M. 1967).

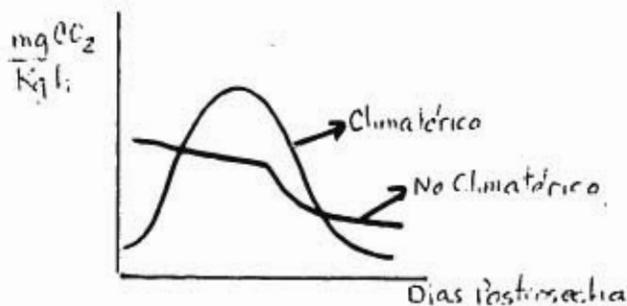


Figura (3.3)

Patón Respiratorio de Frutas

Fuente: Fenemina C.R. "Introducción a la Ciencia de los Alimentos"  
E.J. Reverte, 1982

Las frutas que siguen el primer proceso son denominadas No climatericas, y como no siguen la maduración postcosecha, deben ser cosechadas en la etapa de madurez completa. por el otro lado, las frutas que siguen el segundo proceso, son las frutas climatericas, estas pueden ser cosechadas cuando todavia no han llegado a la madurez completa y con las condiciones ambientales apropiadas, como es la temperatura, maduraran con el tiempo.(Ferguson W.E.et.al. 1966). De esta forma, las frutas maduras tanto climatericas como no climatericas tienen un descenso en la velocidad de respiracion y finalmente exhiben cambios de degradacion, comunmente identificados como senescencia, que es una forma de muerte. (Urbain W.M. 1986).

Solo las frutas que pertenecen a las climatericas, pueden tener un retardo en su maduración por medio de la irradiación. Debido a que el retardo extiende la vida postcosecha de la fruta, el procedimiento es apropiadamente identificado como preservación. Además, la irradiación también retarda la senescencia. No todas las frutas climatericas responden a la irradiación de la misma forma. Debido a esto, cada fruta y cada variedad, tiene que ser considerada en una base individual.(Kader A. 1986).

Otro factor importante es el estado fisiológico de la fruta, particularmente en referencia a la fase climaterica. esto es, la aplicación de la radiación después del inicio del aumento de la respiración climaterica, generalmente es inefectiva en influir el proceso de maduración. Además, las condiciones de postirradiación, especialmente la temperatura, también tienen efectos significativos en los resultados finales.(Massey L.M. et.al. 1965).

La producción de etileno esta asociada con la maduración de las frutas climatericas. El papel del etileno en la maduración no se ha entendido adecuadamente, esto es, si es la causa de la maduración, o simplemente un producto de este proceso. El efecto de la irradiación sobre la producción de etileno varia con el tipo de fruta. ( Urbain W.M. 1986). Por ejemplo, la irradiación de peras climatericas, con dosis de 1 o 2 KGr aumentan la velocidad de producción de etileno. Sin embargo, dosis mayores la reducen. (Kader A.

1986). La irradiación de otras frutas rinde diferentes patrones. Por ejemplo, los duraznos y nectarinas, son estimulados a madurar, posiblemente debido al aumento en la producción de etileno. Por el otro lado, los plátanos, ciruelas, papayas y mangos, exhiben un retardo en la maduración. (Moy J.H. 1983). Algunas frutas no climatéricas como los cítricos, al ser irradiadas exhiben algunas de las respuestas usuales de las frutas climatéricas. La irradiación de naranjas y toronjas maduras resulta en el aumento de las velocidades de respiración y de producción de etileno. (Nagai N.Y. y Moy J.H. 1985). Los limones verdes irradiados se vuelven amarillos mucho más rápido de lo normal (Somogyi, et.al. 1964).

La acción de la irradiación en retardar la maduración es compleja. La información disponible indica que para que haya éxito con este uso de la irradiación se requiere un entendimiento de los procesos fisiológicos postcosecha de las frutas y de los tratamientos que se apliquen en ciertas etapas del desarrollo de las frutas. (Kader A.A. 1986).

El retardo de la senescencia normalmente envuelve la retención de la firmeza de la fruta más de la que se obtiene sin la irradiación. De esta forma, este efecto de la irradiación parece estar asociado a la interferencia con los procesos normales de conversión de los polímeros de carbohidratos a moléculas más pequeñas, las cuales son la base de la firmeza de las frutas. (Urbain W.M. 1986).

En la determinación del efecto de la irradiación para retardar la madurez, se pueden utilizar ciertos criterios, entre los cuales se puede mencionar: (Somogyi et.al. 1964).

a) Sensoriales:

-cambios en el color, los cuales son de verde a otro color como el amarillo ó el rojo. Esto envuelve la pérdida de clorofila y la formación de antocianinas ó pigmentos carotenoides.

-Desarrollo de sabor y aroma, un aspecto crucial de la maduración que esta asociada con la formación de sustancias volátiles.

b) Químicos:

-Aumento en el ablandamiento o pérdida de firmeza (se puede considerar también un cambio físico), frecuentemente asociada con los cambios en las sustancias pécticas para formar pectinas solubles.

--Aumento en el contenido de azúcar, como cuando se convierte el almidón en azúcar.

-Aumento en la producción de etileno, (cambio bioquímico), el cual esta asociado con el proceso de maduración de frutas climatéricas.

-Aumento en la velocidad de respiración (bioquímico), que ocurre cuando la maduración comienza.

-Aumento de los sólidos hidrosolubles totales con la maduración. (Nagai N.Y. y Moy J.H. 1985)

A continuación se presenta un cuadro sinóptico que muestra las aplicaciones de la irradiación en frutas, donde se pretende retardar la maduración y senescencia.

Se puede observar que no todas las frutas son aptas para irradiarse ya que se producen transformaciones sensoriales y físicas, como cambios de sabor y reblandecimiento, además de otros, por ejemplo en el caso de las manzanas y chabacanos.

Peró de todas maneras, se observa que si es posible retardar la maduración de peras, cerezas, aguacates, plátanos y dátiles, entre otros.

## cuadro (3.2)

Retardo en la Maduración y Senescencia de frutas cosechadas.

Tipos de frutas	Dosis	Resultados.
<b>Frutas de Baya</b>		
fresas	150 Krad y almacen de 4.4-15.6 C	Control de los mohos pero existe cierto ablandamiento de la fruta.
<b>Frutas de Pomo</b>		
manzanas	150 krad 0-5C/3-6 meses	Se reblandecen y pierden sabor.No se recomienda.
peras "Bartlett"	3 KGy en el preclimaterio	Se inhibe el ablandamiento normal provocado por la ma- duración y las peras almace- nadas ya irradiadas son más firmes que las que no se irradian.
<b>Frutas de Hueso "Drupas"</b>		
Chabacanos	3 KGy	Tampoco es recomendable la irradiación ya que ocurren ablandamientos,puntos oscu- ros,daños internos y otros.
Cerezas	2-4 KGy a 5 C	Se logra detener la madura- ción.
Duraznos	0.5-3 KGy	Se aumenta la vel. de respi- ración, y se acelera la ma- duración. Si se irradia a las frutas verdes maduras, se causa el ablandamiento inme- diato de la fruta. Sin embargo, si se irradia en Edo. de ma- durez completa, solo hay poco ablandamiento, pero pérdida de sabor y aroma.
Ciruelas	5 KGy	Se inhibe el desarrollo del color normal de la piel, resul- tando un debilitamiento en piel.
<b>Frutas Tropicales y Subtropicales:</b>		
Aguacates "Nabal"	0.35 KGy 0.5-1.0 KGy 30 Gy/trata- tamiento de	Aceleración en maduración. No hay ningún efecto. Se extiende la vida por varios días a temperatura ambiente.

		agua 46C/10min.
Plátanos	0.25 KGy 0.5 KGy	Se retarda la maduración por varios días. Ya no hay retardo.
Variedades:		
"Dwarf Cavendish"	0.3-0.4 KGy	Extensión de vida por 8 días.
"Giant Cavendish"	0.35-0.4 KGy	7-8 días de extensión
"Full Basket"	0.25-0.35 KGy	8-9 días de extensión.
"Red"	0.4-0.5 KGy	7-8 días de extensión
"French plantain"	0.2-0.3 KGy	14 días de extensión
		Dosis mayores que las máximas tolerables, pueden causar oscurecimiento de piel, separación de la cáscara y la pulpa y ablandamiento en la pulpa.
Dátiles	2.7-5.4 KGy	La calidad no se afecta. El efecto de irradiación varía con la variedad y estado de desarrollo del dátil, pero sí se obtienen buenos resultados.
Guayabas	0.3 KGy	Se logra retardar la maduración de 3-5 días almacenadas de 25-32°C. y su firmeza aumenta con la irradiación.
Mangos	0.75 KGy	Se asegura un retardo en la maduración. La extensión de la vida del producto almacenado a 11°C. es de 1 semana.
Papayas	0.5-0.75 KGy	Las papayas preclimatéricas llevan un retardo en la maduración con dosis en este rango. Dosis mayores a 1 KGy provocan escaldes en la piel.
Piña	0.5 KGy 1-3 KGy	Se retarda la maduración de 2-3 días y se almacenan a temperatura ambiente. Se aumenta la susceptibilidad a daño por hongos y hay oscurecimiento en piel.
Tomates	<0.5 KGy	La fruta se ablanda y causa daño severo en el transporte. No se recomienda la irradiación debido a la fragilidad y ablandamiento provocados.
Pepinos	50 Rad	Tampoco se recomienda ya que sufren ablandamiento.
Chiles		La irradiación causa ablandamiento y descoloración.

#### 1.2.4 Inhibición de la Germinación de Tubérculos y Bulbos.

Una de las aplicaciones de la radiación ionizante que tienen mayor futuro en la preservación de alimentos es la inhibición de la germinación de tubérculos y bulbos. Esto es, debido a la factibilidad tecnológica que existe porque sólo son requeridos bajos niveles de dosis. (Ussuf K.K. et.al. 1972).

En las primeras etapas de investigación en radiación varios investigadores han sugerido el posible uso de la irradiación para estimular el crecimiento de las plantas y la germinación de semillas a dosis bajas. (Lee M.S. y Kim H.L. 1972). De esta forma, se ha buscado la aplicación de la irradiación a algunos tipos de vegetales. Por ejemplo, las papas y las cebollas son consumidas en grandes cantidades en muchos países. Así, las papas proveen de nutrientes importantes como son carbohidratos, ácido ascórbico y vitaminas B. Y las cebollas, ajos y otras raíces, son preferidos principalmente por su sabor y olor característicos. (Burton W.G. et.al. 1957). Además, como las raíces son vegetales estacionales, se ha buscado una tecnología que ayude a reducir las pérdidas por almacenamiento. En la mayoría de los países, hay tres principales razones por las que se producen pérdidas:

a) Germinación de tubérculos.

b) Encojimiento debido a las pérdidas de humedad.

c) Enfermedades debidas a microorganismos (MacQueen K.F. 1965).

Como se mencionó anteriormente, la germinación puede controlarse por medio de dosis bajas de irradiación. De esta manera, los tratamientos de irradiación de los tubérculos y bulbos facilitan la reducción de las pérdidas durante el almacenamiento. (Mullins W.R. 1961).

Debido a que los vegetales continúan con sus procesos metabólicos después de la cosecha, normalmente se observan varios cambios en estos. Así, todos estos cambios tienen una gran influencia sobre la aceptación del consumidor y hasta cierto grado, también va a determinar su vida de anaquel. (Urbain W.M. 1986)

Entre los cambios que se presentan en los vegetales, que pudieran relacionarse a la irradiación, podemos encontrar:

- cambios de color
- cambios de textura
- cambios en sabor y aroma
- crecimiento
- maduración
- germinación (Matsuyama A. y Ueda K. 1983).

La irradiación va estar relacionada a todas estas transformaciones debido a que puede afectar a todos los procesos biológicos involucrados a estos cambios. De esta manera, como se puede anticipar, todos estos efectos van a ser dependientes de las dosis. (Ussuf K. et.al. 1972). Por consiguiente, dosis relativamente bajas pueden causar la estimulación de un cierto proceso, mientras que dosis mayores pueden llevar, por el contrario, a una inhibición. Por esta razón, la dosis necesaria para obtener un resultado particular usualmente es muy específica. (Brownell et.al. 1957). Además, los diferentes vegetales pueden tener requerimientos particulares de dosis para un cierto tipo de efecto. (Kader A. 1986).

Se debe tomar en cuenta, que existen similitudes entre las frutas y los vegetales para estos efectos, pero existen diferencias intrínsecas entre estos dos grupos de alimentos las cuales van a provocar variaciones significativas. Por ejemplo, para las frutas el retardo en la maduración va a ser el fenómeno más importante, mientras que para los vegetales, la inhibición de la germinación y el retardo de la senescencia han sido los más importantes. (Tateuni et.al. 1976).

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones que para este tendiendo la irradiación en algunos vegetales. Se van a mencionar no en forma numerada como en el caso anterior, sino relacionando un vegetal con otro para permitir la comparación de un efecto con otro.

-Aplicación de la Irradiación en vegetales para la inhibición de germinación y retardo en la senescencia:

Debido a que la irradiación puede inducir cambios indeseables en el color de estos vegetales, la aplicación de la irradiación en ellos se ha visto muy limitada. Por ejemplo, la dosis de 1 o 2 KGy causan amarillamiento de los pepinos verdes, y este efecto interfiere con el uso de la irradiación para el control de microorganismos que los dañan. (Kader A. 1986). Similarmente, los pimientos también se tornan amarillos cuando son irradiados con dosis de 1.25-5 KGy. Sin embargo, si se piensa en los pimientos rojos donde se desea la estimulación del cambio de color para acelerar el aumento de la formación de pigmentos, que es el propósito del proceso de postmaduración, aquí sí podrá ser posible la aplicación de la irradiación. (Urbain W.M. 1986). La figura (3.4) muestra el cambio en el contenido de capsantina en pimientos en relación al tiempo durante el proceso de postmaduración y a la dosis. Se puede observar que la dosis es crítica en este proceso. Esto es debido a que las dosis menores a 100 Gy, aceleran el aumento en la pigmentación, mientras que dosis mayores inhiben la formación de pigmentos.

Figura (3.4)

Cambio en el contenido de capsantina Vs. tiempo.

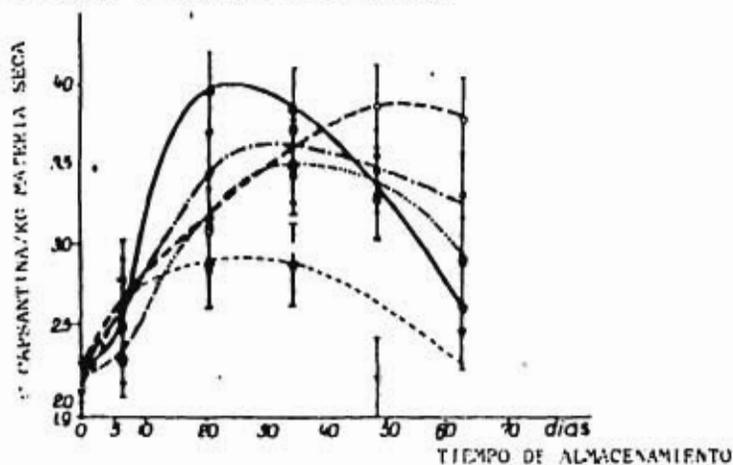


FIGURA (3.4) CAMBIO EN EL CONTENIDO DE PIGMENTO EXPRESADO COMO CAPSANTINA, DE PIMIENTO ROJO (*Capsicum annuum*) IRRADIADO, EN RELACION AL TIEMPO DE ALMACENAMIENTO. ○, NO IRRADIADO; ●, 80 RAD; △, 2 KRAD; ▲, 10 KRAD; ▽, 100 KRAD. DE J. FARAS, LEISS, AND E. ANDRASSY, "EFFECTS OF RED PEPPER (*Capsicum annuum*) AS AFFECTED BY IONIZING RADIATION. IN "FOOD IRRADIATION, PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM, KARLSRUHE", INT. ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1966.

Otro ejemplo son las papas blancas. Estas también pueden ser tratadas con dosis de 100 Gy (esta dosis es la misma que se requiere para inhibir la germinación), y de esta manera, retardar el enverdecimiento. Además, las pérdidas de la piel que se han asociado con el enverdecimiento, también se ha visto reducidas. (Burton W.G. et.al. 1955).

Otra aplicación de la irradiación se presenta en el caso de los espárragos. Estos muestran una elongación postcosecha que no es muy bien recibida por el consumidor. Para este efecto, se ha utilizado la irradiación. Esto se puede observar en la figura (3.3) donde es posible analizar el crecimiento de espárragos irradiados en relación a la dosis. A medida que se aumenta la dosis, el crecimiento se ve retardado. Sin embargo, a dosis mayores de 0.5 kGy se presentan daños incluyendo la separación de la terminación plana, epidermis resbalosa, apariencia cocinada y oscurecimiento de las puntas. Es importante mencionar que la irradiación no va a lograr retardar la dureza a la que tienden a desarrollar los espárragos a medida que transcurre el tiempo después de la cosecha (Takano H. et.al. 1974; Umeda K. et.al 1969).

figura (3.3)  
Crecimiento de espárragos irradiados en relación a las dosis

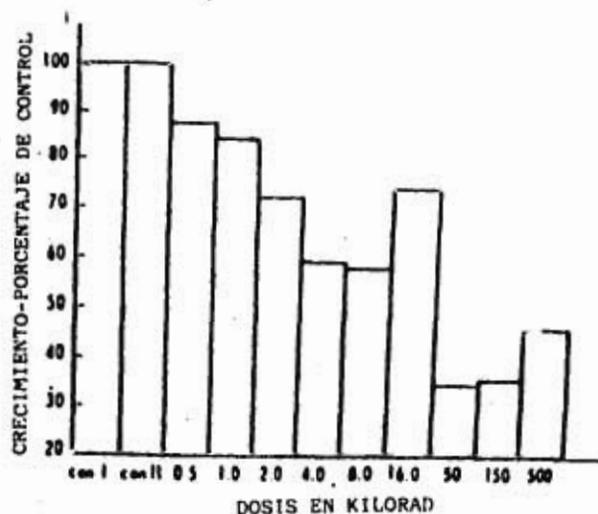


FIGURA ( ).  
CRECIMIENTO DE PUNTAS DE ESPÁRAGOS IRRADIADOS. INDICADO COMO UN PORCENTAJE DE PUNTAS CONTROL NO IRRADIADAS. DE: MAXIE E.C., SOMMER N.F. Y FROWN D.S., "RADIATION TECHNOLOGY IN CONJUNCTION WITH POSTHARVEST PROCEDURES AS A MEANS OF EXTENDING THE SHELF LIFE OF FRUITS AND VEGETABLES", UCD-34-P80-6 U.S. ATOMIC ENERGY COMM., WASHINGTON, D. C., 1970.

Existe otro tipo de vegetales los cuales son raíces de ciertas plantas y que cuando son almacenados tienen posibilidad de germinar. Por consiguiente, los cambios que resultan de la germinación pueden hacer que estos alimentos sean inaceptables y de esta manera, la germinación puede limitar su vida de almacenamiento. Además, como lo hemos mencionado, la irradiación puede retardar o prevenir la germinación. Así, se puede decir que existen varias razones del porque el uso de la irradiación ha atraído un gran interés por todo el mundo, entre las que se puede mencionar:

- 1.-Sirve un propósito muy útil en la preservación de cierto tipo de alimentos importantes como las papas y cebollas.
- 2.-Los requerimientos de dosis están entre los mas bajos que se emplean en la irradiación de alimentos; de esta manera, los daños inducidos por radiación son mínimos además de que los costos son bajos.
- 3.-Es dramáticamente efectivo.
- 4.-Reemplaza a los químicos que normalmente se utilizan en el control de la germinación. (Workman M. et. al. 1960).

Para comenzar a analizar el efecto que tiene la irradiación para el control de la germinación, es importante tomar en cuenta el efecto que puede tener la variación de las dosis sobre ciertos vegetales. Esto es, por ejemplo, para las papas blancas, cuando son irradiadas con dosis menores a 10 Gy, la germinación se ve estimulada mientras que con dosis de 30-150 Gy, no se produce germinación durante el almacenamiento. Normalmente la inhibición es irreversible, y comparando con los tratamientos químicos, donde son necesarios varios, con un simple tratamiento de irradiación es suficiente, para asegurar la inhibición de la germinación (Tatsumi et. al. 1976).

Existen varios mecanismos que se han propuesto para explicar la acción inhibidora de la germinación por parte de la irradiación. Entre los cuales podemos mencionar: (Matsuyama A. y Umeda K. 1983).

1. La interferencia con la síntesis de Acidos Nucléicos en el tejido meristemático de los brotes o botones del vegetal.
2. Algunos cambios que pudieran suceder en el proceso de fosforilación.
3. Inhibición de la formación de auxinas y Acido Indol Acético.
4. Cambios cronocósmicos en las células del tejido meristemático lo cual detienen la división y crecimiento celular normal.

Es importante señalar que en algunas papas irradiadas y almacenadas, se han observado que los brotes salen deformados y se presenta necrosis del tejido donde se encuentran los puntos de crecimiento. (Brownell et. al. 1957). Además, para ser más efectiva, la irradiación de las papas blancas debe ser llevada a cabo durante un cierto período después de la cosecha. Este período, varía enormemente entre cada variedad. Entonces, en algunos lugares este requerimiento es muy difícil de lograr ya que en algunas papas, la germinación ya ha comenzado durante el tiempo de la cosecha. Este tipo de germinación es posible controlarla si se utilizan dosis mayores por ejemplo, para la variedad "Alpha", una dosis de 140 Gy logra lo mencionado anteriormente. (Workman et. al. 1960). La irradiación de las papas, no sólo logra inhibir la germinación sino que va a tener ciertos efectos posteriores que van a afectar la calidad del producto. Esto es, las operaciones de cosecha y de manejo usualmente causan daños mecánicos como pueden ser cortes y golpes. Normalmente estos cicatrizan durante el almacenamiento posterior. Sin embargo, la irradiación va a interferir con los procesos de cicatrización y las lesiones se transforman en sitios de invasión de los microorganismos, los cuales causarán la pudrición de la papa. De esta forma, es necesario retrasar la irradiación por un período de varias semanas después de la cosecha para asegurar la curación de las lesiones. Además, de que cualquier manejo adicional debiera ser minimizado. (Hendel et. al. 1961).

Las condiciones que se presentan después de la irradiación van a tener efectos

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

importantes en la calidad y vida de las papas. A las temperaturas bajas de almacenamiento como 5°C van a ayudar a la preservación pero van a aumentar la degradación de los azúcares. (Hendel C.E. et.al. 1961). El manejo durante y después de la irradiación puede causar nuevas heridas las cuales no cicatrizan y que llevan a la pudrición. Estos cambios y otros que afectan la composición química de las papas van a limitar la vida útil en el almacenamiento. Usualmente el tiempo de duración puede ser de 8 a 9 meses desde la cosecha. (Mullins W.R. y Burr H.K. 1961).

Como se mencionó anteriormente, la irradiación también se ha aplicado a otro tipo de vegetales, que también pueden llevar a cabo una germinación durante su almacenamiento. Entre estos vegetales se encuentra la cebolla (Mullins & Burr 1961).

El uso de la irradiación para inhibir la germinación de las cebollas, también ha atraído un gran interés mundial (Takano H et.al. 1974). Después de la cosecha, el período de latencia en las cebollas es muy corto. Cuando comienza la germinación, el crecimiento progresa desde la base, empujando a través de las hojas y emergiendo hasta la capa exterior del bulbo. Si la radiación es aplicada después de que el crecimiento se inicia, es menos efectivo además que se requerirán dosis mayores. Adicionalmente si ha comenzado el crecimiento del tejido merismático, la irradiación causará la muerte de este y con un consecuente oscurecimiento. (Kume T. et.al. 1977).

Para evitar problemas asociados con la necrosis del tejido merismático, la irradiación deberá llevarse a cabo poco después de la cosecha, probablemente en un período dentro de 4 semanas. El período de latencia puede extenderse almacenando las cebollas a bajas temperaturas antes de la irradiación. Las dosis de 20-150 Gy pueden prevenir la germinación, pero las dosis prácticas se consideran de ser de 60-120 Gy. (Takano H. et.al. 1974).

Las pérdidas en el almacenamiento pueden ser resultado de:

- 1- Germinación
- 2- Podredumbre por causa de microorganismos
- 3- Pérdidas de humedad.

Las características sensoriales de las cebollas con poco afectadas por la irradiación en el rango de 20-150 Gy (Kume T. et.al. 1977).

Para el caso de los ajos, se ha observado que se tiene un patrón muy similar al de las cebollas. Los bulbos de ajos irradiados con dosis de 100 a 150 Gy y almacenados de 0 a 5°C desarrollan germinación interna a los 2 meses, pero no exhiben germinación externa (Urbain W.M. 1986). Para otro tipo de vegetales de raíz donde se prevenga la germinación se ha encontrado poca información. Se resumen los datos de las dosis para la inhibición de la germinación de varias raíces en la tabla (3.6).

Tabla (3.6)  
Dosis de Irradiación para la germinación de raíces.

Producto	Dosis (Gy)
Patata	50-150
Zanahoria	190
Genjibre	10
Alcachofa de Jerusalem	50-150
Chirivia	190
Echalote	60-120
Camote	60-500
Nabo	50-190

(Urbain W.M. 1986)

### 3.2.5 Desinfestación de Insectos.

Se puede decir que en general existen dos propósitos principales para la utilización de radiación de manera tal que se logre la desinfección de insectos de las frutas frescas: (Burditt A.K. Jr. 1982):

- 1) Prevenir el daño por parte de los insectos de las frutas.
- 2) Que lo podamos utilizar en cierta forma como una medida de control en cuarentena.

De esta forma, aunque la muerte del insecto siempre nos permita cumplir con los dos propósitos anteriores, algunas veces la letalidad no será un requerimiento esencial. Esto es, la radiación ionizante, puede inhibir la autoalimentación de los insectos y aunque este puede permanecer vivo por cierto período, este se verá incapacitado para dañar el alimento. (Kader A., 1986) Además, en la cuarentena la inhabilidad para reproducirse nos permite reafirmar nuestro propósito. Como se ha mencionado antes, aunque la letalidad no siempre es necesaria, normalmente, con los otros procedimientos que se usan para el control de los insectos se llega a ésta. En comparación a la irradiación, a menos que se utilicen dosis extremadamente mayores, generalmente no se logre la muerte inmediata de los insectos, y por esta razón, los usos de la radiación ionizante para el control de insectos, están basados en dosis menores, las cuales no causan la muerte instantánea sino que limitan la posibilidad de reproducción de los insectos. (Maxie et al. 1965).

Entre los insectos que se presentan más comúnmente en las frutas frescas, se pueden encontrar los siguientes: (Es importante recordar que las especies de insectos van a variar en función del producto y del lugar donde se encuentren):

La mosca oriental de la fruta, Dacus dorsalis; La mosca mexicana de la fruta, Anastrepha ludens; la mosca de la fruta del olivo, Dacus oleae; la mosca de la fruta de Queensland, Strumeta trivittata; la mosca del mediterráneo, Ceratitis capitata; la mosca del mango, Cheatomacus ferrugineus; la mosca del Caribe, Anastrepha suspensa; y, la mosca del melón, Dacus cucurbitae; Además, se pueden encontrar otros insectos de interés para la irradiación como el gusano Cydia pomonella; el gorgojo del mango, Cryptorhynchus mangiferae (F), y las termitas como la Panonychus citri y Tetranychus telarius (L). (Balock J.W. 1963 y Benschoter C.A. et al. 1964).

En la mayoría de las frutas las etapas en las que se encuentran los insectos antes de la irradiación pueden ser: huevos, larvas y posiblemente pupas. Sin embargo, en el mango, las formas de adulto van a constituir una parte importante de la población. (Burditt A.K. Jr. 1982).

La dosis mínima para la prevención del desarrollo de huevos y larvas de las moscas es de aproximadamente 0.21 KGy. Siendo la dosis para el gorgojo del mango de 0.33 KGy y del gusano 0.23 KGy. Las termitas hembra y macho van a requerir aproximadamente 0.32 KGy para la esterilización. (Burditt A.K. 1982). De esta manera, todas estas dosis van a ser toleradas por plátanos, guayabas, lychees, papayas, piñas, y tomates, aunque es posible que algunas variedades puedan sufrir algunos daños. (Tilton E.W. y Burditt A.K. Jr. 1983).

Los aguacates son muy sensibles a las radiaciones. Esto se observa pues presentan un oscurecimiento de la pulpa y la piel hasta con dosis tan pequeñas como 0.10 KGy, mucho menores a las necesarias para la desinfección. Otra fruta en la que no se recomiendan las irradiaciones son las manzanas, en las que con dosis menores a 0.25 KGy presentan cambios inaceptables. (Tilton E.W. y Burditt A.K. Jr. 1983).

Para el caso de los cítricos, se presentan picaduras en la piel y escaldes a dosis necesarias para la desinfección. (Burditt A.K. Jr. 1982).

Con los mangos también se presentan cambios indeseables como áreas negras, pero en general, si toleran la irradiación cuando se utilizan bajos niveles de dosis. (Burditt A.K. Jr. 1982).

Es importante tomar en cuenta que como las frutas son alimentos vivos, los manejos pre y postcosecha tienen una influencia importante en los efectos que pueda tener la radiación sobre ellas. De esta forma, entre las variables de

manejo más importantes, podemos encontrar la edad y madurez de la fruta en la cosecha, los tiempos y temperaturas que transcurran antes y después de la irradiación y los manejos mecánicos que se lleven a cabo. Así, algunos daños provocados por la irradiación serán aparentes sólo después de un tiempo (Urbain W.M. 1986). De todas formas, se pueden tomar en cuenta a la irradiación como un método útil y efectivo en la desinfestación de algunas frutas. (Burditt A.K.Jr).

Para el caso de los vegetales, se ha observado que no se le ha dado tanta importancia en comparación a las frutas. (Urbain W.M. 1986). De todos modos, existen algunas posibilidades dentro de la desinfestación de estos. Por ejemplo, los pimientos verdes, son huéspedes comunes de algunos insectos como la mosca del mediterráneo y van a requerir desinfestación antes de ser enviados a los lugares de comercialización. (Tilton y Burditt 1983). Otro ejemplo, es el insecto de la papa *Pthorimaea operculella* (Zeller) que causa pérdidas sustanciales en diferentes países. Así, como consecuencia de la falta de atención del uso de la irradiación, existe muy poca información al respecto.

Se ha encontrado que una dosis de 100 Gy previene la aparición del insecto de la papa, *Pthorimaea operculella* en las papas blancas. Y como se mencionó en un capítulo anterior, una dosis de 100 Gy también inhibe la germinación de las papas, así que se tendría un doble efecto al aplicar radiación a estas. (Urbain W.M.1986). El crecimiento de gorgojos en los ajos también se ha logrado inhibir aplicando dosis de 140-200 Gy. (Tilton E.W. y Burditt A.K. Jr. 1983).

### 3.3 Resumen del Capítulo Tercero

En este capítulo se han revisado los efectos generales de la Irradiación en las frutas y vegetales. Se ha podido concluir que la irradiación no funciona para todas las frutas y vegetales, sino que sólo es aplicable en aquellas donde no se ven alteradas las características sensoriales y de comercialización. Sin embargo, en los productos donde sí se puede aplicar, como los tubérculos como la papa, zanahoria, y los bulbos, como cebolla y ajos se han logrado grandes avances en la inhibición de la germinación. Otro ejemplo es para el caso del retraso en la maduración de frutas como el plátano y papaya o la inhibición del crecimiento de espárragos y champiñones. Se ha mostrado el amplio campo existente de aplicación de la Radiación Ionizante en las frutas y Vegetales y algunos de los experimentos que se han llevado a cabo con los productos en particular. De esta forma, es posible concluir que este es un método más que se puede emplear como procedimiento de conservación de algunos tipos de frutas y vegetales, y en base a la información que se encuentra disponible se podrá decidir si es conveniente su utilización.

### 3.4 Bibliografía

- AJLOUNI S. & HAMDY M.K. 1988.  
Effect of Combined Gamma Irradiation and Storage on Biochemical changes in sweet potato. J. Food Science 53 (2).
- AKAMINE E.K. & MOY J.H. 1983.  
Delay in Postharvest Ripening and Senescence of Fruits. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. Preservation of Food by Ionizing Radiation. Vol. III, CRC Press, Florida.
- BALOCK J.W. ET.AL.  
Effects of Gamma Radiation on various stages of three fly species.  
J. Econ. Entomol. 56:42.
- BENSCHOTER C.A.  
Effects of Gamma Rays on immature stages of the mexican fruit fly.  
J. Econ. Entomol. 57:690.
- BURDITT A.L. 1982.  
Food Irradiation as a Quarantine Treatment of Fruits.  
Food Technology, November.
- BROWNWILL L.E. ET.AL. 1957.  
Storage Properties of Gamma Irradiated potatoes.  
Food Technology 11,306.
- BRUTON W.G. & HANNAN R.S. 1957.  
Use of Gamma radiation for preventing the sprouting of potatoes.  
J. Science Food Agric. 8,707.
- CLARKE I.D. 1971.  
Effects of Radiation Treatments. In: ED. HULME A.C. The Biochemistry of Fruits and their products. Vol.2, p.687, A.Press, N.Y.
- DENNISON R.A. & AHMED E.M. 1967.  
Irradiation effects on the ripening of Kent mangoes.  
J. Food Science 32,702.
- FERGUSON W.E. ET.AL. 1966.  
The effects of gamma radiation on bananas.  
Food Technology 20,105.
- HENDEL ET.AL. 1961.  
Treatment of potatoes with gamma rays: effects of delay between harvest and irradiation. Food Technology, 15,218.  
IFT 1983.  
Radiation Preservation of Foods.  
Food Technology (2).
- KADER A. 1986.  
Potential Applications of Ionizing Radiation in Postharvest Handling of fresh fruits and vegetables.  
Food Technology (6) 117.
- KUME T. ET.AL. 1977.  
Effects of dose and dose rate of gamma radiation on the sprout inhibition of onions. J. Food Science and Technology 24,37.
- LEE M.S. & XIM H.L. 1972.  
Effects of Ionizing Radiation on Sprout Inhibition and nutritive value of potato tubers. J. Food Sci. Technology 4,29.
- MACQUEEN K.F. 1965.  
Sprout Inhibition of Vegetables using gamma radiation. In: Radiation Preservation of Foods, National Research Council-National Academy of Sciences, Washington D.C.
- MASSEY L.M. ET.AL. 1965.  
Effect of Gamma Radiation upon cherries.  
J. Food Science 30,759.
- MATSUYAMA A. & UMEIDA K. 1983.  
Sprout Inhibition in Tubers and Bulbs. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food by Ionizing Radiation. CRC Press, Florida.

MAXIE E.C. ET.AL. 1965.  
Irradiation of Fruits and Vegetables. In: Radiation Preservation of Foods. Proceedings of an International Conference, Boston, Mass., Publication 273, Nat. Academy of Sciences, Washington D.C.

MAXIE E.C. ET.AL. 1965.  
Food Irradiation-physiology of fruits as related to feasibility of the Technology. In: CHICHESTER C.D., MRAK E.M. AND STEWART G.F. EDS. Advances in Food Research, Vol 15, A. Press, N.Y.

MOY J.H. 1983.  
Radurization and Radicidation: Fruits and Vegetables. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food by Ionizing Radiation, Vol. III, CRC Press, Florida.

MOY J.H. 1977.  
Potential of Gamma Irradiation of Fruits: a Review. J. Food Technology 12, 449, 1977.

MOY J.H. ET.AL.  
Radiation Disinfestation of California Stone Fruits infested by Med-Fly-Effectiveness and Fruit Quality. J. Food Science (48).

NAGAI N.Y. AND MOY J.H. 1985.  
Quality of Gamma Irradiated California Valencia Oranges. J. Food Science Vol 50.

O'MAHONY M. ET.AL. 1985.  
Sensory Evaluation of Navel Oranges tested with low doses of Gamma Irradiation. J. Food Science (50).

O'MAHONY M. & GOLSTEIN L.R. 1987.  
Sensory Techniques for Measuring Differences in California Navel Oranges treated with Doses of Gamma Radiation below 0.6 kGy. J. Food Science, Vol 52(2).

SOMOGYI ET.AL. 1964.  
Irradiation Induced textural change in Fruits and its relation to pectin metabolism. J. Food Science, Vol. 52 (2).

SOMMER N.F. & FORTLAGE R.S. 1966.  
Ionizing Radiation for Control of Postharvest diseases of Fruits and Vegetables. In: CHICHESTER C.D., MRAK E.M. & STEWART G.F. EDS. Advances in Food Research, Vol 15, A. Press, N.Y.

TAKANO H. ET.AL. 1974.  
Sprout inhibition of potatoes by ionizing radiation. Effect of irradiation on the reducing sugar and amino acid content and quality of crisps produced from irradiated potatoes. J. Food Science Technology 21, 484.

TATSUMI ET.AL. 1976.  
Studies on the Browning of Potato tubers by gamma radiation. II.-The relationship between the browning and the changes of D-diphenol, ascorbic acid and the activities of polyphenol oxidase and peroxidase in irradiated potato tubers. J. Food Science Technology 19, 308.

TILTON E.W. & BURDITT A.K. Jr. 1983.  
Insect Disinfestation of Grain and Fruits. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Foods by Ionizing Radiation, Vol. III, CRC Press, Florida.

UMEDA K. ET.AL. 1969.  
Sprout inhibition of potatoes by ionizing radiation. II.-Radiation treatment of Norin-ichigo and the effect of irradiation on the crisps made of irradiated potato. J. Food Sci. Technology 16(515).

URBAIN W.M. 1986.  
Food Irradiation. Academic Press Inc. (London) LTD.

USSUF K.K. & NAIR P.M. 1972.  
Metabolic changes induced by sprout inhibiting dose of gamma irradiation in potatoes. J. Agric. Food Chemistry 20, 282, 1972.

WORKMAN M. ET.AL. 1960.  
The utilization of Ionizing Radiation to increase the storage life of white potatoes. Food Technology 14, 395.

## CAPITULO CUARTO

### Análisis Comparativo de la Irradiación con los Procesos de Conservación

A través de todo este trabajo, se ha vislumbrado a la Irradiación como un "Proceso". De esta manera, podemos juzgarlo de la misma forma que todos los demás métodos de procesamiento de los distintos alimentos.

Se sabe que a medida que la historia de la humanidad ha transcurrido, los procesos de conservación de los alimentos han logrado desarrollarse desde un proceso de cocción hasta los que actualmente se llevan a cabo. Esto es, procesos como escaldado, pasteurización, esterilización, secado, congelación, fermentación y otros. Todos estos procesos pueden causar diferentes cambios en los alimentos tanto en valor nutricional como en el estado físico, composición química, características organolépticas, etc.

Al comparar a estos procesos con la Radiación Ionizante, podríamos tener claro que este es un proceso como cualquier otro que puede ofrecer grandes ventajas como desventajas, y que la elección dependerá de las posibilidades energéticas y los aspectos ecológicos, como son las posibles contaminaciones como la influencia que se pudiera tener sobre los ecosistemas existentes. Además son muy importantes la capacidad y la disponibilidad económica.

Entre las ventajas que tiene la irradiación sobre los otros procesos es que produce productos estables al almacenamiento y son lo mas cercanos al estado fresco en textura, color y sabor. Esto es, claro esta, cuando el producto soporta las radiaciones y no se ve alterado en sus características organolépticas, siendo esta una de las principales desventajas con las que nos encontramos: no todos los productos son capaces de ser irradiados, algunos presentan ablandamientos, alteraciones en textura y en sus características sensoriales por lo que no es factible la utilización de la irradiación.

Otra ventaja de la Irradiación, es que los productos pueden empacarse en estado seco, no hay pérdidas de los jugos naturales, y se pueden usar contenedores de mayores tamaños.

La Irradiación puede ser usada en lugar de los químicos que se utilizan para la fumigación de algunos alimentos. Como se sabe, la seguridad de los fumigantes químicos ha sido cuestionada, así, utilizando radiaciones ionizantes, podemos eliminar los efectos tóxicos, así como las excusas que muchos países utilizan para no aceptar productos que han sido fumigado químicamente. Aunque aquí, es muy importante tomar en cuenta, que la irradiación también ha sido cuestionada debido a los productos radiolíticos que pudieran formarse. (Kline O.L. et.al. 1965).

Cuando el alimento es irradiado, la radiación es absorbida por los constituyentes del alimento y esto provoca el inicio de una secuencia compleja de reacciones químicas. De esta manera, el resultado es que después de la irradiación, el alimento contiene un número de sustancias químicas las cuales no estaban presentes anteriormente. Estas sustancias son llamadas "Productos radiolíticos" los más comunes son los derivados de los constituyentes principales de los alimentos (proteínas, grasa y carbohidratos), pero también se presentan aunque en menor cantidad, los derivados de los constituyentes traza de los alimentos. Internacionalmente, ha habido una tendencia a comparar a la Radiación Ionizante en alimentos con el uso de los aditivos, esto es debido a que el uso de aditivos también provoca la aparición de nuevas sustancias químicas en los alimentos. Sin embargo, nosotros consideramos que la irradiación debe ser clasificada como un proceso y no como un aditivo ya que los cambios químicos en el alimento y la posibilidad de que ocurran efectos tóxicos son sucesos comunes a cualquier procesamiento de alimentos.

Es necesario considerar que existen algunos hechos importante acerca de los productos radiolíticos que se presentan en los alimentos irradiados.

Primeramente, la mayoría de ellos no son únicamente provocados por la Irradiación sino que ocurren naturalmente en algunos alimentos o como resultado de algún método convencional de procesamiento como la cocción.

Segundo, la concentración total de productos en un alimento irradiado con una dosis de 10 kGy podría ser del orden de 300 mg/kg de alimento, siendo esta menor a la concentración de los mismos productos que han sido procesados convencionalmente. (Report on the Safety and Wholesomeness of Irradiated Food 1983).

Finalmente, para algunos componentes de alimentos, particularmente las grasas poliinsaturadas, los radicales libres formados por la irradiación provocan la iniciación de reacciones en cadena de autopropagación, las cuales continúan por semanas después de que se ha concluido con la irradiación y pueden llevar a mayores concentraciones de productos radiolíticos presentes. Pero en esta situación, la radiación lo único que provoca es acelerar los cambios oxidativos normales que llevan a la rancidez de las grasas cocinadas o almacenadas.

La radiación ionizante, también puede reducir la cantidad de algunos aditivos de alimentos, así como también puede ser aplicada en el procesamiento como la congelación, enlatado y secado, donde no se produce una reducción significativa en la calidad nutricional de las proteínas, lípidos, carbohidratos y constituyentes minerales. (Moy J.H. 1977).

Es muy claro que para asegurar los efectos de la irradiación que deseamos, necesitamos asegurar la cantidad suficiente de radiación ionizante. Sin embargo, en algunos casos, existen límites para la cantidad de radiación a emplear en función de los cambios que pudieran sufrir los alimentos. Por ejemplo, algunas frutas no pueden tolerar las dosis necesarias para inactivar a los hongos presentes en ellas. (Kader A. 1986).

De esta manera, se ha experimentado utilizar además de dosis pequeñas de radiación, algún otro proceso o agente con el cual se logre el efecto deseado. Además, de esta manera, los costos se ven reducidos ya que estos son proporcionales a las dosis empleadas.

La combinación de calor y radiación puede ser empleada para reducir las dosis de radapertización (esterilización por radiación). Por ejemplo, el jamón calentado de 65 a 70°C y subsecuentemente irradiado con sólo 5 kGy se ha reportado que queda estéril (Urbain W.M. 1986). Las frutas calentadas a 70°C e irradiadas con dosis de 4 kGy son estables (Kader A. 1986).

El calor y la irradiación pueden combinarse para tratar a las frutas donde se desea controlar las infecciones postcosecha causadas por hongos. Por ejemplo, las papayas son dañadas por dosis de 2.5-6 kGy, necesarias para inactivar a los hongos presentes. Y si se combina un proceso de una dosis de 0.75 kGy con un baño de 20 minutos en agua a 48°C se logran evitar daños a la fruta y se preserva (Moy J.H. 1983).

Por último, es necesario tener un buen empaque del alimento irradiado, ya que si no se hace, los efectos de la irradiación se verán nulificados. Esto es, el empaque constituye una barrera física a la recontaminación o como protección a los daños mecánicos provocados por el manejo posterior (Kader A.A. 1986).

Finalmente, ya que se han mencionado los procesos de conservación en comparación a lo que es la irradiación, podemos analizar las perspectivas de las Técnicas de Irradiación y el futuro de este proceso de Conservación:

#### 4.1 Perspectivas de las Técnicas de Irradiación.

El potencial de aplicación de la Irradiación en las frutas y vegetales es sumamente amplio.

Como se revisó en este trabajo, se puede aplicar en la inhibición de la germinación de tubérculos, bulbos y vegetales de raíz, inhibición del crecimiento postcosecha de espárragos y champiñones, desinfestación de insectos, alteración de la madurez y senescencia en frutas, y control de las enfermedades postcosecha. (Urbain W.M. 1986).

Todos los trabajos que se han realizado desde hace 30 años, no sólo se han encaminado al tratamiento de productos en fresco, también se ha buscado la forma de utilizarla en el procesamiento de alimentos o en la modificación de estos para obtener mayores alimentos. En el caso del procesamiento de frutas y vegetales, se ha aplicado para la esterilización de jugos de frutas. (Josephson y Peterson 1983).

Moy J.H. 1983, menciona un trabajo donde se irradia a jugos de frutas. Debido

a que las levaduras son el principal organismo causante de las pérdidas de jugos de frutas, se encontró que la levadura más resistente, la *Saccharomyces cerevisiae* requería 1.8 Mrad para detener su crecimiento por un período de 20 días. Además, cuando se calienta un jugo de manzana a 50°C y luego se irradia a 0.3 Mrad, se puede almacenar por más de un año a temperatura ambiente.

Es muy posible alterar a ciertos alimentos por medio de la irradiación, de tal forma que podamos obtener ciertos efectos benéficos; muchas veces estos efectos no se pueden obtener de ninguna otra manera y así cada día un investigador puede proveernos de algún producto nuevo. Entre las alteraciones más benéficas se tienen las que envuelven la degradación de los componentes de proteínas o de carbohidratos obtenidos a partir de algunos cambios químicos, y de esta forma, se puede decir que existen dos tipos de efectos benéficos, los del producto o los del proceso. (Kader A. 1986).

Cada producto puede ser mejorado en función de lo que uno este buscando realmente. Por ejemplo, el tiempo que toma rehidratar a los vegetales deshidratados varía con los diferentes vegetales y a veces tarda tanto que se convierte en una inconveniencia. Por otro lado, la irradiación, en proporción a la dosis, reduce el tiempo que se requiere para la rehidratación. Esto es, seleccionando una dosis particular para cada vegetal de una mezcla, el tiempo de rehidratación puede asegurarse, y así de esta manera, una mezcla para sopa puede ser rehidratada rápida y uniformemente (Kader A. 1986). En la tabla (4.1) podemos observar las dosis que reducen los tiempos de rehidratación para los vegetales. En esta tabla se puede observar que las cebollas son las que requieren menor dosis (3 kGy) en comparación a los ejotes y los cubos de betabel que pueden requerir hasta dosis mayores a 40 kGy.

Tabla (4.1)

Dosis para reducir el tiempo de deshidratación de vegetales deshidratados de 10 a 20 minutos hasta 1 a 2 minutos.

Vegetal	Dosis (kGy)
Hojuelas de cebolla blanca	3
Hojuelas de tomate	6
Papa picada	10
Zanahoria picada	20
Chícharos frescos	20
Pimiento verde picado	25
Hojuelas de col	30
Hojuelas de apio	33
Frijoles	30
Ejotes cortados	40
Pedazos de okra	40
Cubos de betabel	>40

Fuente: Kader A. 1986.

Existen casos en donde ciertas legumbres conservan su dureza después de rehidratarse. Por ejemplo, si se irradian frijoles, al rehidratarse van a ser más blandos. (Josephson y Peterson 1983).

Otro caso es el de las papas blancas, que cuando se irradian y se almacenan a temperatura ambiente o menores (10-15 C) van a rendir mejor calidad de papas fritas comparadas con las hechas con papas irradiadas y almacenadas en frío (3-4 C). Se le atribuye esto a los azúcares reductores que están presentes en las papas irradiadas. (Urbain W.M. 1986).

Si se aplica la irradiación antes de llevar a cabo algún proceso, se ha visto que logra aumentar los efectos que se desean de este; por ejemplo, la velocidad

La deshidratación de las ciruelas se aumenta si la dosis de irradiación aumenta. Este efecto se puede observar en la figura (4.1).

figura (4.1)  
Efecto de la irradiación en la velocidad de secado de ciruelas "Stanley"

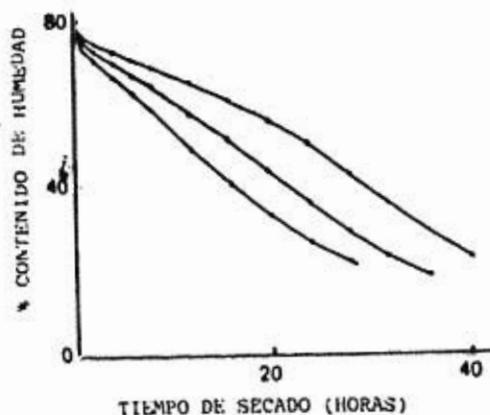


FIGURA (4.1). EFECTO DE LA IRRADIACION EN EL TIEMPO DE SECADO DE CIRUELAS "STANLEY". CURVA SUPERIOR, NO IRRADIADAS; CURVA MEDIA, 2 kGy; CURVA INFERIOR, 4 kGy. DE: P. MARKAKIS, R. C. NICHOLAS, AND H. S. SCHWEIGERT, EN "IRRADIATION PRESERVATION OF FRESH WATER FISH AND INLAND FRUITS AND VEGETABLES", COO-1283-27, U.S. ATOMIC ENERGY COMM. WASHINGTON, D.C., 1965.

En esta figura se observa que se logra un mejor resultado en la deshidratación a medida que se aumenta la dosis y además el tiempo de secado se reduce considerablemente. Es necesario el escaldado con agua a 93 °C/30 segundos, para asegurar la aceleración de la velocidad de deshidratación. Además, la irradiación permite mayor retención de los pigmentos antocianinas (Kader A. 1986).

El rendimiento de jugo de uvas se aumenta con la irradiación. A dosis de 8 a 16 kGy la piel de la uva se adelgaza y se decolora, y la textura se altera. Además, las células de la uva se dañan. Sin embargo, aunque se aumente la dosis, la fermentación del jugo se lleva a cabo de forma normal. Los vinos que se hacen con uvas irradiadas con dosis menores que 5 kGy tienen características sensoriales normales y además, a estas dosis se logra un aumento en el rendimiento del 10 al 12%. (Urbain W.M. 1986).

Hasta este momento hemos hablado de todas las posibles aplicaciones que se pueden realizar para mejorar tanto al producto en fresco como procesado. Sin embargo, no se ha mencionado que el hecho de utilizar la irradiación también puede traer consigo desventajas como:

-Cambios en la calidad del producto. Esto es, en sus características de consumo como son color, aroma, sabor, textura y consistencia.

-El alto costo del equipo y su mantenimiento.

-Aumento del costo del producto en el momento de su comercialización. Debido a que el proceso de irradiación es de mayor costo, esto va a provocar que el precio del producto se vea incrementado.

-Desacuerdo al consumo de estos productos por parte del consumidor. Esto se puede deber a la falta de información que existe sobre lo que es el proceso de irradiación y los efectos que este tiene sobre el alimento. Existe la actitud de no consumir alimentos irradiados debido a la creencia que los productos radiolíticos sean causantes de algunas enfermedades. (Bruhn C.M. et.al. 1986).

Estas son tan sólo algunas de las desventajas por las cuales se pensaría que no es muy factible la aplicación de este proceso. Sin embargo, se ha visto que ya se ha ido aplicando con mayor interés en distintos países como Canadá, Japón, Gran Bretaña, E.U.A. y la U.R.S.S., donde no sólo se maneja a nivel laboratorio sino que ya a nivel industrial, y se han logrado controlar muchas de las variables que modificaban las características finales del producto.

Además, en estos países, la actitud del consumidor se ha ido transformando y se han logrado esclarecer muchas de las dudas acerca de la seguridad de los productos irradiados. (Kline O.L. et.al. 1965).

El costo inicial de una planta irradiadora sí es alto, pero se logran beneficios que a largo plazo retribuyen en mejores productos, mayor calidad y mayor rapidez de producción. Esto, claro está, que es para los productos que resisten la irradiación, porque no se pretende que se deba aplicar a cualquier fruta o vegetal.

En este trabajo se ha visto que existen productos para los que no se recomienda este proceso ya que en lugar de mejorar su calidad, la empeoran.

También se debe tomar en cuenta, como perspectivas de irradiación la posibilidad de instalación de una planta, así como los equipos que pudieran ser utilizados.

Para poder saber si conviene la utilización de la irradiación es necesario:

1.-Saber que el proceso tendrá un efecto positivo sobre el producto, no debe convertirlo en menos aceptable.

2.-El producto debe tener suficiente importancia económica para garantizar

investigaciones posteriores.

3.-El producto debe encontrarse en cantidades suficientes, tanto en el presente como en el futuro, para poder garantizar la aplicación comercial del nuevo proceso. (Report on the wholesomeness of Irradiated Foods 1982).

Ya que sabemos que nuestro producto es apto para este proceso, podemos enumerar el propósito que debe tener la planta de irradiación:

- 1.-Permitir que la Industria pruebe lo que es el proceso de irradiación.
- 2.-Obtener datos técnicos del procesamiento: almacenamiento de los productos irradiados, localización del proceso en una planta ya existente, etc.,
- 3.-Obtener información de los costos de producción del proceso.
- 4.-Proveer al mercado con pequeñas cantidades de alimentos irradiados para sondear la opinión pública. (Kader A. 1986).

Actualmente, el diseño y operación de la irradiación es ya una tecnología bastante desarrollada y avanzada, la cual ya no presenta una barrera para la aplicación futura de la irradiación de alimentos. vamos a realizar una corta revisión de los diseños y operación de los irradiadores de rayos gamma.

#### 4.2 Irradiadores gamma

Los irradiadores generalmente se clasifican en cuatro categorías: de banda transportadora, sistema transportador, sistema a granel y sistema de caja de pallets.

De todos estos, el sistema de caja de pallets es el más adecuado para el procesamiento de alimentos. (Fraser F.M. 1983).

Este irradiador lleva al producto en pallets, que son cargados en bandas suspendidas sobre rieles.

Existen cuatro bandas que pasan junto a la fuente del Cobalto 60, al cual es expuesto cada pallet durante dos ocasiones, antes de completar el ciclo. Esto resulta en una uniformidad excelente en el producto.

El costo de mano de obra es muy bajo debido a que el producto es manejado usando métodos convencionales. Además, el volumen de transportación tan grande, así como la alta velocidad de este irradiador, lo hacen excelente para la aplicación de bajas dosis que se requieren en el procesamiento de alimentos. (Fraser F.M. 1983). Este irradiador se muestra en las figuras (4.2) y (4.3).

#### 4.3 Factores económicos.

El factor económico asociado con la operación de una planta de irradiación varía considerablemente, pero generalmente esta gobernada por los siguientes parámetros:

- 1.-Tamaño de las cajas del producto.
- 2.-Densidad de producto.
- 3.-Capacidad de producto
- 4.-Dosis mínima de esterilización
- 5.-Dosis máxima que el producto pueda soportar sin ser dañado.
- 6.-Operación de la planta (turnos/día, días/semana, semanas/año).
- 7.-Requerimientos de irradiación en base al crecimiento que se espera tener.
- 8.-Facilidad de estandarizar el tamaño de las cajas.
- 9.-Requerimientos de almacenamiento
- 10.-Localización del esterilizador de rayos gamma. (Kader A. 1986).

Los costos de irradiación de un alimento pueden variar de \$0.0015/lb (dólares) para la desinfección de maíz hasta \$ 0.06/lb para la eliminación de Salmonella en aves. (Josephson y Peterson 1983).

Para el diseño y operación de irradiadores es ya una tecnología muy bien desarrollada la cual no presenta una barrera para la aplicación futura de la irradiación.

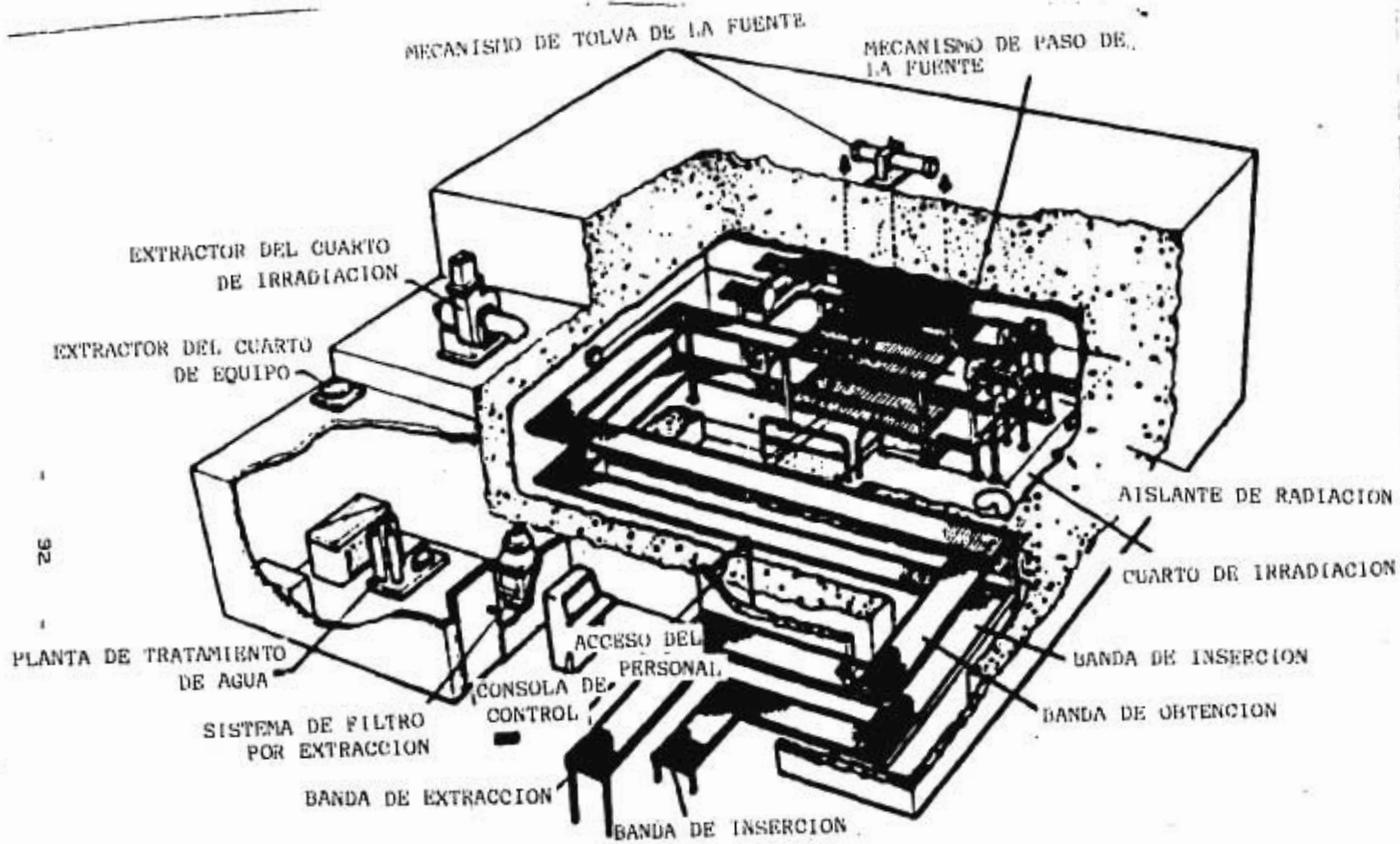


FIGURA ( 4.3 ). IRRADIADOR JS8500 (CONCEPTO POR CAJAS).

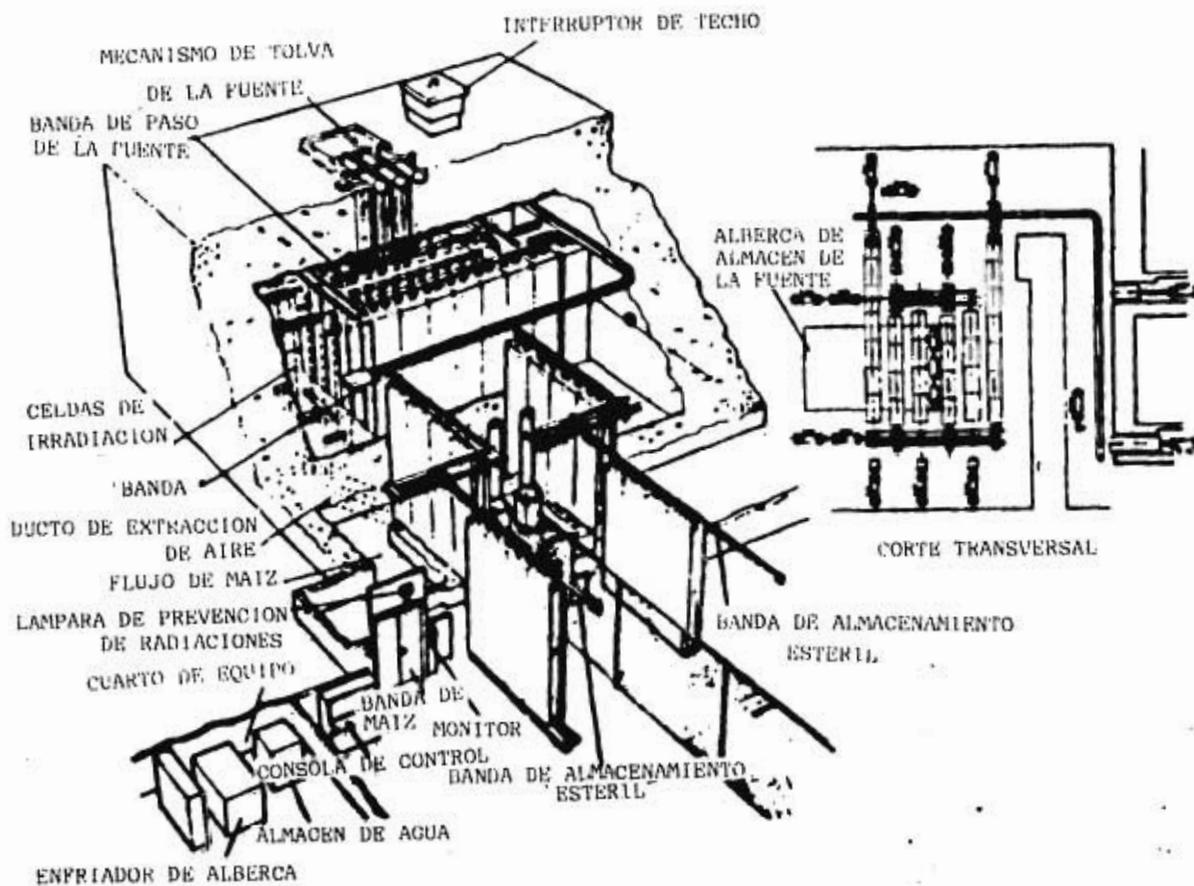


FIGURA (4.2). IRRADIADOR JS800 (CONCEPTO DE BANDA TRANSPORTADORA)

#### 4.4 Bibliografía

- BRUHN C.M. ET.AL. 1986.  
Attitude change toward Food Irradiation among Conventional and Alternative Consumers. Food Technology (1).
- FRASER F.M. 1983  
Gamma Radiation Processing Equipment and Associated Energy Requirements. In: JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS. Preservation of Food by Ionizing Radiation. Vol III, CRC Press, Florida.
- JOSEPHSON E.S. & PETERSON M.S. EDS.  
Preservation of Food by Ionizing Radiation.  
Vol. I, II, III CRC Press, Florida.
- KADER A. 1986.  
Potential Applications of Ionizing Radiation in Postharvest Handling of fresh fruits and vegetables.  
Food Technology (6) 117.
- KLINE O.L. ET.AL. 1965.  
Wholesomeness and Food Legislation,  
Conference Boston Mass, Sep 27-30, Academy of Sciences-National Research Council, Washington D.C.
- MOY J.H. 1977.  
Potential of Gamma Irradiation of Fruits: a Review.  
J. Food Technology 12, 449.
- DEPARTMENT OF HEALTH AND SOCIAL SECURITY 1982.  
Report on the wholesomeness of irradiated foods,  
G.B. London.
- URBAIN W.M. 1985.  
Food Irradiation.  
Academic Press Inc. (London) LTD.

APENDICE A

GLOSARIO DE TERMINOS USADOS EN LA IRRADIACION DE ALIMENTOS

Término	Símbolo	Definición
Absorbedor	-	Cualquier material donde se deposita la radiación y el cual reduce la intensidad de ésta.
Acelerador	-	Equipo utilizado para producir haces de electrones.
Becquerel	Bq	Unidad que indica la intensidad de radioactividad; reemplaza al Curie (1 Bq es igual a una desintegración por segundo; $3.7 \times 10^{10}$ Bq = 1 Ci)
Bremstrahlung	-	Radiación electromagnética formada cuando una partícula a alta velocidad interactúa con un núcleo atómico y parte de la energía cinética de la partícula se convierte a radiación.
Curie	Ci	Unidad antigua que indica la intensidad de radioactividad en un elemento; es reemplazado por el becquerel.
Desinfestación	-	En la irradiación de alimentos, es la inactivación de insectos que nacen en el alimento.
Distribución de dosis	-	Variación de dosis a lo largo del material irradiado
Dosis	D	Cantidad de radiación ionizante absorbida por un material; su unidad es el gray.
Dosis Absorbida de Radiación	Rad	Término usado antiguamente para describir a la dosis absorbida. (1 rad = 100 ergs de energía absorbida por gramo; 1 rad = 100 Gy).
Dosis alta		En alimentos, dosis de 10 kGy o mayores.
Dosis Baja		En alimentos, dosis menores a 1 kGy.
Dosis media		En alimentos, dosis de 1 a 10 kGy.
Dosis de reducción decimal	D10	Dosis de radiación que reduce la población (p.ej. bacterias) por un factor de 10.
Dosimetría	-	El proceso de medir las dosis.
Electron	e-	Partícula elemental cargada negativamente que constituye al átomo. tiene una masa de $9.1 \times 10^{-28}$ g.
Electron acuoso	e-aq	Electron hidratado, es un producto radiolítico del agua.

Electrón Volt	eV	Cantidad de energía cinética ganada por un un electrón acelerado a través de una diferencia de potencial eléctrico de 1 V (1 eV=1.6x10 <sup>-19</sup> J). 1 eV absorbido por gramo=1.6x10 <sup>-16</sup> Gy).
Erg	-	Unidad de energía igual a 1 Dinacm; 10 <sup>7</sup> ergs=1J.
Espesor medio	-	Espesor de un absorbedor que reducirá la intensidad de radiación a la mitad de su valor inicial.
Excitación	-	Consecuencia de la absorción de energía por un átomo (o molécula), el cual mueve a un electrón orbital a un nivel de energía mayor dentro del mismo átomo. A partir de una excitación, pueden ocurrir fenómenos físicos como fluorescencia o formación de calor.
Fotón	-	Un quantum de energía electromagnética.
"G"(valor)	-	Número de moléculas transformadas por cada 100 eV de energía transferida al sistema.
Gray	Gy	Unidad de dosis absorbida en el Sistema Internacional de Unidades, SI. Es igual a 1 J/Kg; reemplaza al Rad (1 Gy=100 Rad).
Haz de electrones	-	Corriente de electrones que se mueve esencialmente en una dirección.
Hertz	Hz	Para la radiación electromagnética, es la frecuencia o ciclos/seg.
Ion	A+ o A-	Un átomo o molécula con carga eléctrica, positiva o negativa; es causada por un exceso o deficiencia de electrones.
Ionización	-	Proceso de agregar o desplazar electrones de átomos o moléculas.
Irradiar	-	Aplicar radiación a un material.
Isótopo	X	Son átomos de un mismo elemento químico que tienen el mismo número atómico pero diferente peso molecular; <sup>60</sup> Co representa el isótopo del Cobalto que tiene una masa atómica de 60.
Neutrón	n	Partícula elemental que no tiene carga y una masa aproximada igual a la del protón.
Número atómico	Z	Número de protones en el núcleo del átomo.
Partícula Alfa		Partícula cargada positivamente emitida desde un núcleo y compuesta de dos protones y dos neutrones.
Partícula beta		Partícula elemental; cargada y emitida desde un núcleo durante un decaimiento radiactivo. Tiene una masa y carga $\pm$ a las del electrón.
Positrón	e+	Partícula elemental con la misma masa que la de un electrón, pero con $\neq$ carga positiva.

Protón	p	Partícula elemental con carga positiva y masa igual a la unidad.
Radapertización	-	Tratamiento de un alimento con una dosis de radiación ionizante suficiente para reducir el número y/o la actividad de todos los microorganismos viables.
Radiación Ionizante	-	Radiación que tiene la capacidad de desplazar a los electrones orbitales de un átomo y de esta manera formar iones.
Radiación Cerenkov	-	Luz emitida cuando una partícula de alta velocidad abandona un medio y entra a otro, de tal forma que la velocidad de la luz en el segundo medio es menor a la del primero.
Radical libre	-	Molécula electricamente neutral con un electrón desapareado en la órbita exterior. El . que se coloca como en el OH., designa al radical libre.
Radición	-	Tratamiento de un alimento con una dosis de irradiación suficiente para reducir el número de bacterias patógenas viables a un nivel donde no se detecten por cualquier método bacteriológico reconocido. El término también se puede usar para parásitos.
Radioactividad	-	Desintegración espontánea de un núcleo atómico que provoca una radiación ionizante.
Radólisis	-	Cambios químicos producidos en una sustancia provocados por la radiación.
Radurización	-	Tratamiento de un alimento con una dosis de irradiación suficiente para mantener la calidad del producto al reducir substancialmente el número de microorganismos viables que causan la pudrición.
Rayo catódico	-	Haz de electrones emitidos por un cátodo de un tubo de gas o por un filamento caliente en un tubo al vacío; también es el haz de electrones generado por aceleradores y utilizado en la irradiación de alimentos.
Rayo Gamma	-	Radiación electromagnética de alta frecuencia producida cuando un núcleo atómico inestable libera energía para ganar estabilidad.
Relación de uniformidad de dosis	U	Relación de la dosis absorbida máxima a la mínima en el absorbedor ( $U = D_{max} / D_{min}$ ).
Roentgen	r o R	Dosis de radiación X o gamma, produciendo pares de iones que llevan una unidad de carga electrostática por cm. cúbico de aire; igual a 88 ergs/g aire.

Unidades (prefijos)

pico	p	$10^{-12}$
nano	n	$10^{-9}$
micro		$10^{-6}$
milli	m	$10^{-3}$
kilo	k	$10^3$
mega	M	$10^6$

Vida media

-

Tiempo necesario para que la cantidad de átomos de un radionucleótido disminuya a la mitad.

X(rayos)

-

Radiación electromagnética de alta frecuencia producida cuando las partículas cargadas de alta energía (e.g. electrones) inciden sobre un material apropiado.

Fuente: Urbain W.M. 1986

---

APENDICE B

TABLA DE CONVERSIONES DE RAD A GRAYS.

CONVERSION DE UNIDADES DE DOSIS ABSORBIDAS

Rad	Kilorad	Megarad	Gray	Kilogray
rad	krad	Mrad	Gy	kGy
100	0.1	0.0001	1	0.001
1,000	1.0	0.001	10	0.01
10,000	10.0	0.01	100	0.1
100,000	100.0	0.1	1000	1.0
1,000,000	1,000.0	1.0	10,000	10.0

Fuente: Urbain W.M. 1986.