



MINISTERIO DE EDUCACIÓN

# Cuaderno de Formación Continua:

# APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR

Itinerarios Formativos para Maestras y Maestros







**Ciclo:** "La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos" **Cuaderno:** "Aplicaciones de la Tecnología Nuclear"

#### Coordinación:

Dirección General de Formación de Maestros - DGFM Unidad Especializada de Formación Continua – UNEFCO Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

#### Equipo de Redacción y Dirección:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear – ABEN Pabon Vivian Capítulos 1 y 4 Pacheco Teresa Capítulos 2 y 5 Fernández Sergio Capítulo 3

#### Apoyo Técnico y Revisión:

Zuleida Laime Mamani Directora de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico – ABEN

Luis Fernando Cáceres Director de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear – ABEN

#### Ilustración y Diagramación:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

#### Cómo citar este documento:

Ministerio de Educación (2021). "La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos Cuaderno de Formación Continua. ABEN - UNEFCO.

La venta de este documento está prohibida. Denuncie al vendedor a la Dirección General de Formación de Maestros, Tel. 2442144 o a la Unidad Especializada de Formación Continua: unefco@unefco.edu.bo

www.minedu.gob.bo http://unefco.minedu.gob.bo/ https://unefco.edu.bo www.aben.gob.bo Cuaderno de Formación Continua:

# APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR

# Índice

Presenta	ación	
Datos ge	enerales de la guía de estudio	V
Objetivo	Holístico del Čiclo	V
Objetivo	Holístico del Curso	∨
Capítul	o 1: Aplicación de la Tecnología Nuclear en Salud	. 1
Actividad	des de Inicio	
1.1	Física médica	3
1.1.1	Antecedentes	
1.2	Dosimetría y Radiobiología	
1.2.1	Unidades	
1.2.2	Unidades de intensidad: actividad y exposición	7
1.2.3	Exposición	8
1.2.4	Energía cinética liberada por unidad de masa en aire ionizado (K)	10
1.2.5	Radiobiología	16
1.3	Medicina Nuclear y Radiofarmacia	18
1.3.1	Radiofarmacia	
1.3.1.1	Radiofármacos	19
Actividad	des	20
Capítul	o 2: Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en	
Agricult	tura – Alimentación	21
Actividad	des de Inicio	22
2.1.	Introducción	23
2.2.	Irradiación Gamma	23
2.3.	Irradiación de alimentos	24
2.4.	Irradiación de hierbas especias y otros vegetales para sazonado	26
2.5.	Desinfestación de granos	27
2.6.	Irradiación para fitomejoramiento	27
2.6.1.	Reproducción del material genético sometido a	
	tratamientos de irradiación	28
2.6.2.		
2.0.2.	La división FAO / OIEA y la base de datos de variedades	
2.0.2.	La división FAO / OIEA y la base de datos de variedades genéticas y mutantes	
2.7.		30
	genéticas y mutantes Fertilización de suelos y nutrición vegetal	30
2.7.	genéticas y mutantes Fertilización de suelos y nutrición vegetal Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola	30 32 32
2.7. 2.7.1. 2.8.	genéticas y mutantes Fertilización de suelos y nutrición vegetal	30 32 32 33
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad	genéticas y mutantes	30 32 32 33 34
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad	genéticas y mutantes	30 32 32 33 34
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad <b>Capítul</b> Actividad	genéticas y mutantes	30 32 32 33 34 35 36
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad	genéticas y mutantes  Fertilización de suelos y nutrición vegetal  Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola  Manejo de Plagas  Sugerida  O 3: Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en la Industria  Aplicaciones en la industria	30 32 32 33 34 <b>35</b> 36 37
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad <b>Capítul</b> Actividad	genéticas y mutantes  Fertilización de suelos y nutrición vegetal  Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola  Manejo de Plagas  d Sugerida  o 3: Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en la Industria  des de Inicio  Aplicaciones en la industria  Esterilización mediante la radiación ionizante	30 32 32 33 34 <b>35</b> 36 37 38
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad Capítul Actividad 3.1 3.1.1 3.1.2	genéticas y mutantes  Fertilización de suelos y nutrición vegetal  Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola  Manejo de Plagas  Sugerida  O 3: Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en la Industria  des de Inicio  Aplicaciones en la industria  Esterilización mediante la radiación ionizante  Hidrología isotópica	30 32 32 33 34 <b>35</b> 36 37 38 39
2.7. 2.7.1. 2.8. Actividad <b>Capítul</b> Actividad 3.1 3.1.1	genéticas y mutantes  Fertilización de suelos y nutrición vegetal  Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola  Manejo de Plagas  d Sugerida  o 3: Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en la Industria  des de Inicio  Aplicaciones en la industria  Esterilización mediante la radiación ionizante	30 32 32 33 34 <b>35</b> 36 37 38 39 40

3.1.5	Medidores	41
3.1.6	Técnicas Nucleares más usadas en la industria minera	
	y petrolera	42
3.1.7	Isotopos y radioisótopos	44
Actividad	des	44
	o 4: Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en Energía	45
	<b>a y No Eléctrica</b> des de Inicio	
4.1	Fuentes de energía	
4.2	Reacciones nucleares para obtener energía	
4.2.1	Fisión nuclear	
4.3	Reactores nucleares	
4.3.1	Ciclo de combustible nuclear	
4.3.2	Centrales nucleares	
4.4	Reactores nucleares de investigación	
4.5	Fusión nuclear	
4.5.1	Fusión por Confinamiento Magnético (FCM)	
4.5.2	Fusión por Confinamiento Inercial (FCI)	
4.6	Aplicaciones no eléctricas de energía nuclear	
Actividad	des	56
	o 5: Protección Radiológica y Salvaguardias	
	des de Inicio	
5.	Introducción	
5.1	Comisión Internacional De Protección Radiológica (ICRP)	59
5.2	El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)	
5.3	Salvaguardias	
5.4	Protección Radiológica	
5.4.1	Objetivos de la Protección Radiológica	
5.4.2	Principios de la Protección Radiológica	
5.4.2.1 5.4.2.2	Justificación Optimización o principio ALARA	
5.4.2.2	Limitación de dosis	
5.4.2.3	Herramientas básicas de la Protección Radiológica	
5.4.3.1	Distancia	65
5.4.3.2	Tiempo	66
5.4.3.3	Blindaje	66
5.5	La protección Radiológica en la actualidad	
5.6	Regulación de las aplicaciones nucleares en Bolivia	60 60
5.6.1	Atribuciones y responsabilidades de la AETN	
	d Sugerida	
	as de Aplicación	
	afía	

## **Presentación**

Con la Agenda Patriótica 2025 se llegará al Bicentenario del Estado Plurinacional de Bolivia con un país transformado y listo para avanzar en el siglo XXI como uno de los más grandes del continente. En ese sentido el Programa Nuclear Boliviano (PNB), llevado a cabo por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) se hace presente en el proceso docente educativo de todo el país, sobre la base de un modelo profesional enseñanza - aprendizaje enfocado en la curricula educativa de los maestros y futuros maestros, quienes además tendran la tarea de transmitir los conocimientos adquiridos en el área nuclear a los estudiantes de todos los colegios de nuestro país; maestros capacitados con el empleo de cartillas impresas y digitales y recursos audiovisuales e informáticos modernos.

El PNB es el instrumento y mecanismo mediante el cual se desarrolla el cuarto pilar de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 "Soberania científica y tecnológica con identidad propia".

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
DIRECTORA GENERAL EJECUTIVA
AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Uno de los factores más importantes para la calidad educativa es el trabajo de las maestras y maestros, asumido con compromiso, profesionalidad y dedicación.

En el "2021 AÑO POR LA RECUPERACIÓN DEL DERECHO A LA EDUCACIÓN", el Ministerio de Educación de acuerdo a lo establecido en la Constitución Política del Estado (Arts. 78, I, II y III; 96, II) y en el marco del Sistema Plurinacional de Formación de Maestros (D.S. Nº 156/2009) viene implementando una estrategia sistemática y sostenible de Formación Continua para garantizar que maestras y maestros de todo el país tengan posibilidades de fortalecer sus cualidades, habilidades y actualizarse en forma permanente.

Los Itinerarios Formativos para Maestros son una modalidad formativa desarrollada por el Ministerio de Educación, a través de la UNEFCO enfocada en la práctica educativa, y la mejora de los procesos, con el objeto de fortalecer la implementación de la Ley de Educación N° 070/ "Avelino Siñani — Elizardo Pérez" y el Modelo Educativo, según los niveles, especialidades y pertinencia tanto cultural como lingüística.

Lic. Rosa Amanda Calisaya Flores
COORDINADORA NACIONAL UNEFCO

Los Cuadernos del Ciclo Formativo "La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos", en el campo de las aplicaciones pacificas de la energía nuclear, constituyen importantes materiales de apoyo para los procesos formativos, que desarrollarán aspectos teórico-prácticos para una educación de calidad, a partir de los lineamientos establacidos por el actual Modelo Educativo.

Sobre la base de estos Documentos de Trabajo, facilitadoras, facilitadores y participantes en general, podrán adecuar contenidos, o estrategias formativas de acuerdo a la realidad de cada contexto.

# Datos generales de la guía de estudio

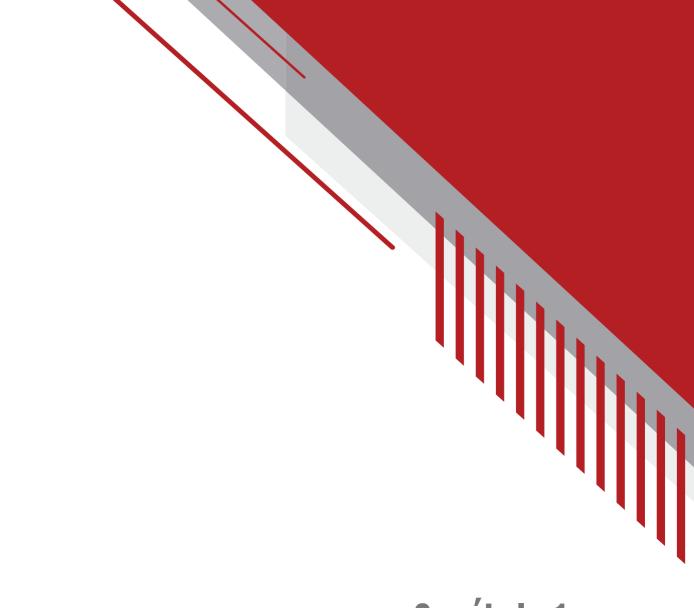
CICLO	CURSO		
"La Tecnología	CURSO 1	Energía Nuclear y Universo	
Nuclear en Procesos	CURSO 2	Aplicaciones de la Tecnología Nuclear	
Educativos"	CURSO 3	Tecnología Nuclear en Bolivia	

#### **Objetivo Holístico del Ciclo**

Promovemos la valoración y concientización sobre nuevas tecnologías científicas, comprendiendo los alcances de las aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos, mediante el análisis y desarrollo de prácticas educativas para fortalecer la seguridad y cultura nuclear, que aporte a la soberanía científica y tecnológica del Estado Plurinacional.

#### **Objetivo Holístico del Curso**

Desarrollamos una actitud responsable y consciente, conociendo las bases físicas y químicas de las ciencias nucleares y su presencia en el mundo que nos rodea, a través de leyes fundamentales, explicaciones comparativas y desarrollo de ejercicios, valorizando la importancia del conocimiento científico en el desarrollo de aplicaciones nucleares que contribuyen a la soberanía científica y tecnológica del país.



# Capítulo 1:

Aplicación de la Tecnología Nuclear en Salud

# **Actividades de Inicio**

Organizados en grupos comunitarios dialogamos y respondemos las preguntas en el siguiente cuadro:

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿Cuáles son los casos de cáncer más comunes en Bolivia?	
¿Qué sabe usted, sobre la medicina nuclear?	
Mencione los beneficios de la tecnología nuclear en la medicina	

#### 1.1 Física médica

La física médica es la rama de la física que comprende la aplicación de los conceptos, leyes, modelos, técnicas y métodos de la física para la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Actualmente, la física médica desempeña una importante función en la asistencia médica, la investigación biológica y médica, y la optimización de ciertas actividades sanitarias. [1], [2]

La física médica incluye las áreas de: [2]



Figura 1. Aplicaciones de la física médica. [54]

- Radioterapia
- Diagnóstico por imágenes (medicina nuclear, radiodiagnóstico, resonancia magnética, ultrasonido, etc.)
- Protección radiológica

El físico médico es miembro del equipo multidisciplinario a cargo del diagnóstico y tratamiento de pacientes con radiaciones, contribuyendo al uso seguro y preciso de la radiación para conseguir los mejores resultados mediante el procedimiento médico prescrito, tanto diagnóstico como para tratamiento. Evalúa las dosis de radiación y los riesgos asociados para los pacientes y el personal. Además, desempeña un papel importante en la protección radiológica y la capacitación de los profesionales de atención en salud, así como desarrollar actividades de investigación destinadas a asegurar un alto estándar de calidad del servicio en el medio hospitalario.

La responsabilidad esencial es la práctica clínica del físico médico que consiste en optimizar el uso de las radiaciones para desarrollar procedimientos de diagnósticos y/o tratamiento de calidad.

La Física Médica proporciona los fundamentos físicos de múltiples técnicas terapéuticas, así también la base científica para la comprensión y desarrollo de las modernas tecnologías del diagnóstico médico y establece criterios para la correcta utilización de las radiaciones ionizantes empleadas en Medicina.

#### 1.1.1 Antecedentes

- Leonardo da Vinci es considerado el primer físico médico, por su interés en la mecánica del movimiento humano.
- Los trabajos del electromagnetismo del siglo XIX permitieron a los físicos hacer contribuciones al diagnóstico y tratamiento médico.
- El físico D'Arsonval introdujo el uso terapéutico de corrientes eléctricas de altas frecuencias y señaló el camino hacia el desarrollo de instrumentos para mediciones eléctricas. [2]
- La física médica inició su auge en el siglo XX, con el trabajo de Roentgen, Becquerel y Marie Curie, quienes descubrieron los rayos X y las sustancias radiactivas.
- Víctor Despeigne irradió con rayos X al primer paciente con fines terapéuticos.
- Luego de la primera guerra mundial aparecieron fármacos basados en el radio (Ra). Los fragmentos de las metralletas podían causar infección y la muerte, pero eran difícil detectarlos, para facilitar la identificación, la científica Marie Curie ideó la unidad móvil de rayos X conocidas como "Petite Curie".
- Luego de surgir la Comisión de Energía Atómica en 1946, los científicos mostraron interés por aplicar principios de la física nuclear a los sistemas biológicos en cooperación con biólogos y médicos.
- En 1959, en el Congreso Internacional de Radiología en Múnich, se discutió por primera vez la necesidad de formar una organización internacional dedicada a la física médica, hecho que se concretó en la reunión en Montreal en 1963.
- Actualmente los físicos médicos cuentan con un ente representativo a nivel internacional: la Organización Internacional para la Física Médica (IOMP, International Organization for Medical Physics).

Resaltar el gran aporte de los físicos médicos en el desarrollo de los aceleradores lineales, las cámaras gamma y la tomografía computarizada, el Premio Nobel de Fisiología o Medicina ha sido concedido dos veces a físicos médicos en 1979, a A.M. Cormack – junto a G. Hounsfield – por el desarrollo de la tomografía computarizada, y en 2003, a Sir Peter Mansfield – JUNTO A p. Lauterbur por avances que permitieron obtener imágenes del cuerpo humano usando resonancia magnética nuclear.

En conclusión, la física médica, es una de las ciencias desarrolladas durante el siglo XX, y cobra impulso en el siglo XXI, en un comienzo está dedicada al estudio del fenómeno especifico de la radiación ionizante en humanos, en la actualidad tiene una amplia

gama de aplicaciones, [3] que abarca todo el espectro de radiaciones e inventos afines, todos ellos interrelacionados (ver figura 2); con expertos cuya preparación debe ser rigurosa y demanda largo tiempo, el físico médico pone su conocimiento al servicio de la seguridad y la calidad hospitalarias en pro de la protección del paciente.



Figura 2. Aspectos principales interrelacionados de la Física Médica. Elaboración propia.

#### 1.2 Dosimetría y Radiobiología

El crecimiento constante del uso de radiaciones ionizantes en el diagnóstico por imágenes y tratamientos, nos obliga a mantener una adecuada gestión de las dosis impartidas a los pacientes en los estudios realizados. Por otro lado, se debe garantizar la seguridad tanto del personal como de los pacientes expuestos a las radiaciones. La dosimetría es un tema de vital importancia para una adecuada estimación de las dosis con las que se trabaja.

El organismo humano no puede percibir directamente muchos agentes físicos del mundo que le rodea; entre ellos están las radiaciones ionizantes, análogamente el hombre ha ideado procedimientos y aparatos para detectar, medir y analizar las radiaciones ionizantes a fin de prevenir sus posibles efectos perjudiciales y poder, en cambio, sacar ventaja de sus múltiples aplicaciones.

#### 1.2.1 Unidades

Uno de los primeros pasos en dosimetría, es la definición de un sistema de unidades cuantitativas con las que trabajar. Por razones históricas, en dosimetría existen principalmente dos sistemas de unidades.

#### Curie, Roentgen, Rad y rem:

Constituyen el sistema convencional de unidades. La radiactividad es un fenómeno que el hombre conoce desde hace más de un siglo. En un principio los efectos de la radiación no se comprendían bien y, como consecuencia, surgió un sistema de unidades que no era del todo consistente, pero que se ha utilizado en la práctica hasta ahora. Estas unidades se usan, por ejemplo, en las regulaciones gubernamentales sobre radiación y en la calibración de muchos instrumentos de medida.

#### **Becquerel, Gray y Sievert:**

En los últimos años la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación (ICRP) ha definido un sistema de unidades que es consistente con el sistema métrico decimal o Sistema Internacional de Unidades (SI). Consideremos ahora los distintos fenómenos asociados con la radiación que tienen que ser cuantificados. Es necesario describir cuantitativamente lo que sucede desde que la radiación es emitida por una fuente hasta que produce su efecto final, lo que se puede dividir en cuatro etapas:

- **1.** Definición de intensidad de la fuente radiactiva (Curie, Becquerel). Son necesarias unidades que definan la tasa o razón a la que la radiación está siendo emitida y la cantidad total de radiación que puede eventualmente ser liberada por la fuente.
- **2.** Definición del campo de radiación alrededor de una fuente (Roentgen). La radiación se extiende alrededor de una fuente creando un campo. Se requieren unidades que especifiquen la intensidad de dicho campo en cada punto. Los campos de partículas cargadas (radiación α y β) se extienden a una distancia finita, mientras que el campo de partículas neutras (radiación y, neutrones) disminuye progresivamente con la distancia.
- **3.** Interacción de la radiación con la materia (Rad¹, Gray). El haz de radiación interacciona con la materia. Son necesarias unidades que cuantifiquen la concentración de la energía depositada por unidad de masa y la tasa o razón a la que se deposita.
- **4.** Consecuencias producidas por la energía depositada (rem², Sievert). Este es el paso final y más complicado. La razón está en que, especialmente en el caso del tejido biológico, el término consecuencias incluye una amplia variedad de mecanismos y efectos. Para ilustrar esto, consideremos dos tipos específicos de radiación:

<sup>1</sup> Rad: Radiación absorbida

<sup>2</sup> Rem: Roentgen Equivalent Man

- a) Una fuente de <sup>60</sup>Co emite rayos γ en el rango de ~1,25 MeV. Supongamos que uno de los fotones penetra en la mano de un técnico que maneja la muestra y que a medida que se mueve a través del tejido y los huesos interacciona dos veces y se disipa. En cada interacción transfiere una parte de su energía a los electrones. Los electrones recorren sólo una corta distancia y transfieren su energía cinética al tejido a lo largo de dos cortas trayectorias aisladas.
- **b)** El isótopo  $^{222}$ Rn es un gas que emite partículas  $\alpha$ . Si se inhala y se desintegra, la partícula  $\alpha$  será emitida directamente en el tejido pulmonar. Las partículas  $\alpha$  son pesadas y doblemente cargadas. Al frenarse dejan detrás una corta, pero densa estela de tejido ionizado.

Cabe notar que, incluso si la cantidad de energía depositada por estos dos eventos es idéntica, los respectivos efectos sobre el tejido biológico van a ser completamente diferentes. Este ejemplo ilustra las siguientes diferencias sobre las que queremos llamar la atención:

- 1. Es necesario diferenciar entre campos de radiación internos y externos.
- **2.** Es necesario diferenciar que si la energía se deposita de una forma concentrada o si se distribuye de forma diseminada.
- 3. Es necesario diferenciar en qué tipo de órgano se produce el depósito de energía.

Todos estos efectos deben ser tomados en cuenta a la hora de evaluar el efecto de la radiación ionizante sobre el tejido biológico.

#### 1.2.2 Unidades de intensidad: actividad y exposición

La intensidad puede definirse en términos de actividad al estudiar las leyes de desintegración:

$$A = \frac{N^{o} desintegraciones}{unidad de tiempo} = \lambda^* N$$
 (1)

Donde:

N = Número de átomos de un isótopo radiactivo

 $\lambda$  = Constante de desintegración

### Recordemos que la definición del curie es: 1 Ci = 3,7x10<sup>10</sup> desintegraciones/s.

La unidad de **actividad** en el sistema convencional (CS) de unidades se basa en la actividad de 1 g de Ra.

Esta unidad de fuente resulta ser muy grande, sobre todo para las fuentes de radiación usadas en el laboratorio. Como consecuencia se utiliza una serie de unidades modificadas basadas en el curie. Esto incluye al "mili", al "micro" y al "pico" curie, representando una fracción de 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-6</sup> y 10<sup>-12</sup> curies, respectivamente.

El comité ICRP introdujo el becquerel, que constituye la unidad de actividad en el SI de unidades:

$$1 Bq = \frac{1 \ desintegración}{s} \tag{2}$$

No obstante, el becquerel está en el extremo opuesto al curie y representa una unidad de actividad demasiado pequeña. Esto no sería un inconveniente siempre que estas unidades fueran utilizadas exclusivamente por la comunidad científica y tecnológica. Después de todo, puede adoptarse, y se adopta, la misma práctica que en el caso del curie, sólo que ahora los prefijos significan un cambio opuesto de magnitud usando los prefijos 'kilo' o 'mega' becquerel.

Cuando la radiación pasa a través de la materia, produce ionización de los átomos y moléculas a su paso. Los iones producidos son químicamente activos y son los responsables de los cambios biológicos subsiguientes. Puesto que el daño producido por la radiación depende del número de iones producidos, es natural elegir la ionización como base de la medida.

#### 1.2.3 Exposición

La exposición es una magnitud que cuantifica la capacidad que posee un haz de rayos X para ionizar una masa de aire. Es decir, expresa la cantidad de carga eléctrica de los electrones (Q) que se genera por unidad de masa de aire (m).

En el SI, la unidad es el coulomb (C) por cada kg de aire (C/kgaire). Sin embargo, la unidad tradicional utilizada como unidad de exposición es el Roentgen (R), que equivale a 2,58×10<sup>-4</sup> C/kg.

Esta magnitud es muy utilizada, porque es fácil de medir, pero no ofrece información sobre el daño producido debido a que no tiene en cuenta la radiosensibilidad de los tejidos u órganos que atraviesa.

La denominada "tasa de exposición" es una magnitud que determina la exposición por unidad de tiempo. En radiología, es muy usual medir la cantidad de mR/h detectados antes o después de un blindaje, y muchas cámaras de ionización presentan estas unidades.

La exposición puede ser utilizada para medir la radiación que recibe un chasis, un intensificador de imágenes o del paciente.

La definición formal de la exposición es la siguiente:

$$x = \frac{\Delta Q}{\Delta M} \tag{3}$$

Donde:

 $\Delta Q$  = Suma de todas las cargas eléctricas de los iones producidos en aire.

 $\Delta M$  = Masa cuando todos los electrones liberados por fotones en un elemento de volumen de aire, son completamente detenidos en aire.

#### **EJERCICIO 1.**

Demostrar la equivalencia de la definición anterior del Roentgen.

1. Recordemos que la unidad electrostática (ue) de carga se define como la carga que tienen dos partículas separadas 1 cm y que se ejercen una fuerza de 1 dina.

$$1d = k \frac{1 ue}{1 cm^2}$$

Donde: K es una constante =  $8,9875x10^9$  N\*m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>

$$1(ue)^{2} = \frac{1d^{*}cm^{2}}{K} = \frac{10^{5} * 10^{-4}m^{2}}{8,9875*10^{9} N^{*}m^{2}/C^{2}}$$

$$1(ue)^2 = \frac{10^{-9}}{8,9875*10^9} C^2$$

2. La unidad electrostática de carga es:

$$1 ue = \frac{10^{-9}}{\sqrt{8.9875}} \quad C = 3.33*10^{-10} C$$

3. Por otra parte, la densidad del aire a condiciones normales es de  $\rho$  = 1,293\*10<sup>-3</sup>  $g/cm^3$ . Por lo tanto, la masa de 1cm<sup>3</sup> de aire es m=1,293\*10<sup>-3</sup> g. La dosis de exposición de un cm<sup>3</sup> de aire será:

$$x = \frac{3,33*10^{-10} C}{1,293*10^{3} g} = 2,58*10^{-4} \frac{C}{kg} = 1 Roetgen(R)$$

#### 1.2.4 Energía cinética liberada por unidad de masa en aire ionizado (K)

Cuando se utiliza el Sistema Internacional (SI), para transformar la exposición en dosis absorbida es necesario utilizar factores de conversión, es por esta razón, que, en lugar de la exposición, se utiliza la magnitud conocida como *Kerma (Kinetic energy released per unit of mass)*.

El *Kerma* en aire se define como la energía cinética (en Joules (J)) transferida por los fotones de rayos X a los electrones liberados por unidad de masa (kg) de aire ionizado. La unidad es Grey, Gy (que es igual a J/kg). [4]

#### **Dosis Absorbida (D)**

Es una magnitud que expresa la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de un material. Es una magnitud definida para cualquier tipo de radiación o material, es utilizado en radiobiología para estimar el daño producido por la radiación de un órgano que ha sido irradiado por un tipo específico de radiación. Su unidad es Gray.

Su ecuación es:

$$D = \frac{E_{ab}}{\Delta m} \tag{4}$$

Donde:

 $E_{ab}$  = Energía absorbida, no la emitida (J)

 $\Delta m = \text{Cantidad de masa (kg)}$ 

Muchas veces es importante conocer la evolución de la dosis absorbida con respecto al tiempo, a este cociente se denomina tasa de dosis absorbida:

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \tag{5}$$

#### **Dosis Equivalente (H)**

Las investigaciones en radiobiología demuestran que, para un mismo valor de dosis absorbida, los daños biológicos son diferentes en función de la radiación incidente. La magnitud como dosis equivalente introduce factores de peso que ponderan estos efectos biológicos en función de la radiación. Por lo tanto, la dosis equivalente se define como el producto entre uno de estos factores de peso y la dosis absorbida. La dosis equivalente es un indicador primario de protección radiológica, porque especifica los límites de radiación para los trabajadores ocupacionalmente expuestos. Su unidad es Sievert (Sv).

$$H = D^* w_{\scriptscriptstyle R} \tag{6}$$

Donde:

D = Dosis absorbida

 $w_R = Factor de ponderación dependiente de la radiación$ 

Tabla 1. Factor de ponderación dependiendo al tipo de radiación

Tipo de Radiación	$W_R$
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones con energías	
<10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
>10 keV a 2 MeV	20
>2 MeV a 20 MeV	10
>20 MeV	5
Protones, salvo los de retroceso, de E>2MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión y núcleos pesados	20

#### Dosis Equivalente en un órgano o Tejido (H<sub>T</sub>)

Es la dosis al órgano corregida por un factor de ponderación del tipo de radiación que tiene en cuenta la eficacia biológica relativa de la radiación incidente para producir efectos estocásticos. Y se define como el producto de la dosis absorbida (D) en el órgano o tejido T y el factor de ponderación de la radiación. La unidad de la magnitud de la dosis equivalente en un órgano o tejido recibe el nombre de Sievert (Sv).

$$H_{TR} = W_R * D_{TR} \tag{7}$$

Sumando todos los tipos de radiación:

$$H_{T} = \sum_{R} w_{R} * D_{TR} = \sum_{R} H_{TR}$$
 (8)

Donde:

 $D_{TR}$  = Dosis absorbida en el órgano o el tejido

 $w_R$  = Factor de ponderación dependiente de la radiación

#### **Dosis Efectiva (E)**

La probabilidad de aparición de efectos estocásticos en un determinado órgano o tejido depende no solo de la dosis equivalente recibida por dicho órgano o tejido, sino también de radiosensibilidad del órgano irradiado, por esta razón, se ha adjudicado un factor de peso (wT) a cada órgano, mostrado en la tabla 2. La unidad de la dosis efectiva es Sievert.

$$E = \sum_{T} H_{T} * W_{T} \tag{9}$$

Donde:

 $H_T$  = Dosis equivalente en el órgano o el tejido

 $w_T$  = Factor de ponderación dependiente de los tejidos

O también

$$E = \sum_{T} w_{T} * \sum_{R} w_{R} * D_{TR}$$
 (10)

Donde:

 $H_T$  = Dosis equivalente en el órgano o el tejido

 $w_T$  = Factor de ponderación dependiente de los tejidos

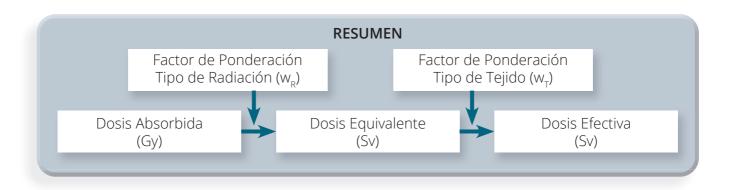
 $\vec{w_R}$  = Factor de ponderación dependiente de la radiación

 $D_{TR}$  = Dosis absorbida en el órgano o el tejido

Tabla 2. Coeficientes de radiosensibilidad según los diferentes órganos y tejidos.

Tejido / Órgano	$w_{_T}$
Mama	0,12
Médula ósea roja	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Gónadas	0,08
Tiroides	0,04
Vejiga	0,04
Hígado	0,04
Esófago	0,04
Piel	0,01
Cerebro	0,01
Superficie ósea	0,01
Glándulas salivales	0,01
Resto del organismo	0,12

Cada coeficiente representa un porcentaje de la irradiación en el cuerpo entero (100%) y su suma total es igual a 1. Cabe resaltar que estos coeficientes son genéricos y se extraen de numerosas estadísticas realizadas desde hace años en el área de radiobiología.



#### **EJERCICIO 2.**

Un trabajador queda accidentalmente expuesto a 100 R de rayos X de 200 keV. Evaluar la dosis absorbida y equivalente.

1. Una exposición de 1 R (1 Roentgen) de rayos X o gamma produce en un tejido blando una dosis absorbida de 1 rad.

Entonces, 100 R da lugar a 100 rad de dosis absorbida.

2. Para la dosis equivalente el factor de la fuente de radiación de rayos X de 200 keV es 1. Utilizando la ecuación (6)

$$H = D^* w_{\scriptscriptstyle R}$$

Reemplazando

$$H = 100*1$$

#### **EJERCICIO 3.**

$$H = 100 \text{ rem}$$

En un laboratorio de física se utiliza una fuente de <sup>137</sup>Cs de 10 microcuries. En cada desintegración se emite un rayo gamma de 0,66 MeV. Suponga que el estudiante se traga esta fuente radiactiva.

- a) Suponiendo que la mitad de los rayos gamma son absorbidos por el estudiante, ¿Cuánta energía absorbería éste en un año?
- b) Si su masa es 20 kg, ¿Cuál es la dosis absorbida por año en rads?
- c) Suponiendo un factor de calidad de 0,8 hállese la razón de esta dosis equivalente a la dosis media anual debida a fuentes naturales, que vale 88 mrem.

#### SOLUCIÓN

Para el inciso a)

1 Curie = 3,7 \* 
$$10^{10}$$
  $\frac{desintegraciones}{segundo}$ 

La fuente tiene 10 microcuries

$$10 * 10^{-6} * 3,7 * 10^{10} = 3,7 * 10^{5} \frac{des}{s}$$

Entonces en un año absorbe

$$\frac{0,66}{2} * 3,7 * 10^{5} \frac{des}{s} * \frac{365 d}{1 a} * \frac{24 h}{1 d} * \frac{3600 s}{1 h} = 3,85 * 10^{12} MeV$$

La dosis absorbida en Joule

$$D = 3.85 * 10^{12} MeV * \frac{1.6 * 10^{-13} J}{1 MeV} = 0.616 J$$

Para el inciso b)

$$1 \ rad = 0.01 \ \frac{J}{kg}$$

Dosis:

$$D = \frac{0,616 \, J}{20 \, kg} * \frac{1 \, rad}{0,01 \, (J/kg)} = 3,08 \, \text{rad}$$

Para el inciso c)

1. Utilizando la ecuación (6) y el dato del factor de calidad dado en el ejercicio.

$$H = D*w_R$$
 $H = 3,08 \ rad * 0,8$ 
 $H = 2,46 \ rem$ 

#### 2. La razón es:

$$Raz \acute{o}n = 2,46 \ rem * \frac{10^3 \ mrem}{1 \ rem} * \frac{1}{88 \ mrem} = 28$$

Como se puede ver, con el uso de las ecuaciones de las dosis y las tablas, se puede determinar los efectos de la radiación ionizante en el cuerpo humano, siendo una herramienta esencial para la toma de medidas preventivas.

#### 1.2.5 Radiobiología

La radiobiología es la ciencia que se encarga del estudio de los efectos de la radiación ionizante en el ser humano para conocer de una manera más precisa la respuesta esperada con el fin de utilizar de manera más segura los beneficios de las radiaciones ionizantes.

Desde el descubrimiento de la radiactividad existe un interés general en conocer el efecto de la radiación sobre un medio particular: el tejido biológico; para ser más concretos: el efecto de la radiación sobre nosotros.

La interacción de la radiación en el tejido biológico y sobre él son muy complejos, pero el tema va más allá de la complejidad técnica, ya que la preocupación social sobre su peligrosidad ha conducido a los cuerpos gubernamentales a promulgar leyes y regulaciones sobre este tema. El científico y, en general, cualquier persona en contacto frecuente con la radiación debe conocer dichos efectos y regulaciones legales al respecto. La falta de información y el sensacionalismo que rodea este tema (medios de comunicación, televisión, etc.) complican aún más las cosas y contribuyen muchas veces a crear un clima que no favorece a la objetividad. Por esta razón, es fundamental abordar este tema de una forma objetiva y científica.

Los efectos de la radiación en los tejidos se clasifican en 2 categorías:

- Efectos estocásticos (o probabilísticos)
- Efectos no estocásticos (o no probabilísticos)

Los efectos **no estocásticos** se relacionan con la superación de un umbral de dosis. Es decir, si se ha depositado una dosis equivalente suficientemente alta aparecerán cierto tipo de consecuencias.

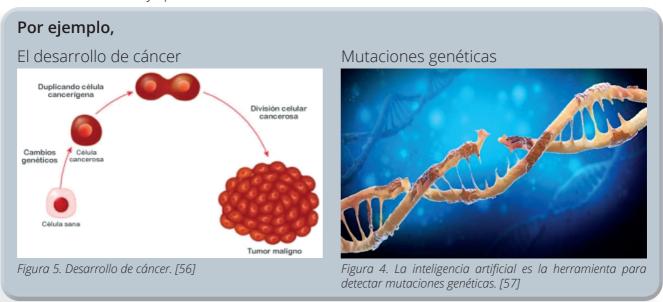
#### Por ejemplo,

Si una dosis equivalente de rayos X excede 1 sievert (Sv), se observará un enrojecimiento de la piel; pero después de cierto nivel de dosis, se producirán cataratas en los ojos.



Figura 3. Enrojecimiento por exposición de Rayos X. [55]

Los **efectos estocásticos** son aquellos cuya posibilidad de aparición aumenta con l0a dosis de radiación, pero la gravedad es la misma (no depende de la dosis), es algo que ocurre al azar y que es de naturaleza aleatoria.



Los efectos no estocásticos que pueden ocurrir a ciertas dosis se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Efectos sobre algunos tejidos y órganos expuestos según la dosis

Órgano	Dosis media absorbida (Gy)	Efectos
Piel	5	Alopecia
Piel	2 a 5	Eritema
Testículo	> 4	Esterilidad permanente
Testículo	0,15 a 4	Esterilidad temporal
Ovarios	> 3	Esterilidad permanente
Ovarios	> 0,6	Esterilidad temporal
Cristalino	> 2	Cataratas
Médula ósea	0,25	Decrecimiento plaquetario

#### 1.3 Medicina Nuclear y Radiofarmacia

Lamedicina nuclear es una especialidad médica que utiliza radionúclidos (isótopos radiactivos) para el diagnóstico y tratamiento de gran variedad de enfermedades. Los estudios de la medicina nuclear se llaman gammagramas, gammagrafías o centellografías, las cuales emplean técnicas no invasivas para el organismo humano que son seguras, inocuas y requieren dosis mínimas de radiación. [5]

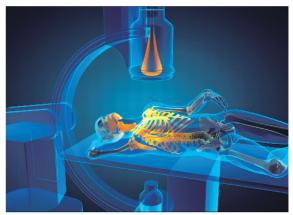


Figura 6. Tratamiento de cáncer con uso de la radiación. [58]

Las imágenes obtenidas mediante un estudio por medicina nuclear, a diferencia de la mayoría de las obtenidas en radiología, son imágenes funcionales, es decir, muestran cómo están funcionando los órganos y tejidos explorados o bien revelan alteraciones de los mismos.

Muchos equipos actuales llamados híbridos superponen las imágenes de medicina nuclear con las de tomografía computarizada (TC) o resonancia magnética nuclear (RMN), las cuales permiten al médico correlacionar e interpretar información de dos exámenes diferentes en una misma imagen (anatómicos y funcionales). Esto conduce a un diagnóstico más preciso y más exacto.

Los gammagramas son imágenes del funcionamiento del órgano que se desea estudiar y se forman a base de los rayos gamma detectados (fotones) que provienen del material radiactivo inyectado y localizado en el órgano a estudiar. Después de ser detectados, estos fotones son procesados en una computadora y luego representados como puntos en la matriz de la imagen de la pantalla.

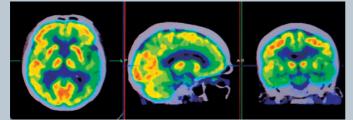


Figura 8. Gammagrafía Cerebral. [59]

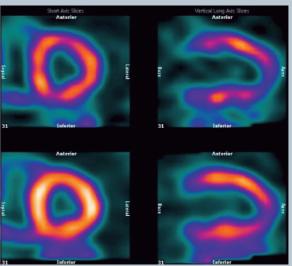


Figura 7. Gammagrafía Cardiaca. [59]

#### 1.3.1 Radiofarmacia

La radiofarmacia es la especialidad sanitaria que estudia los aspectos farmacéuticos, químicos, bioquímicos, biológicos y físicos de los radiofármacos, tanto en su vertiente

industrial como hospitalaria. [6] En otras palabras, la radiofarmacia es la metodología que se ocupa del diseño, la preparación, la dosificación y el control de calidad de radiofármaco que se administra a humanos para el diagnóstico o tratamiento en medicina nuclear. La radiofarmacia aplica:

#### Conocimiento en:

- · Procesos de diseño, producción
- · Control de calidad
- · Dispensación de los radiofármacos

### Su vertiente asistencial son:

- · Diagnóstica y terapeútica
- Investigación
- · Gestión de buenas prácticas radiafamacéuticas

### Sus responsabilidades son:

- · Procesos de diseño, producción
- · Control de calidad
- · Dispensación de los radiofármacos

Figura 9. Aspectos de la radiofarmacia. Elaboración propia

#### 1.3.1.1 Radiofármacos

Los radiofármacos son radioisótopos adheridos a moléculas biológicas que tienen la capacidad de actuar en órganos, tejidos o células concretos del cuerpo humano. Estos fármacos radiactivos se emplean en el diagnóstico y cada vez más en el tratamiento de enfermedades.

Así, cuando los médicos quieren conocer el lugar exacto del sangrado intestinal, ellos pueden radiomarcar (añadir átomos radiactivos) a una muestra de glóbulos rojos tomada del paciente, luego reinyectan la sangre y utilizan el SPECT<sup>3</sup> para seguir la ruta de la sangre en el paciente.



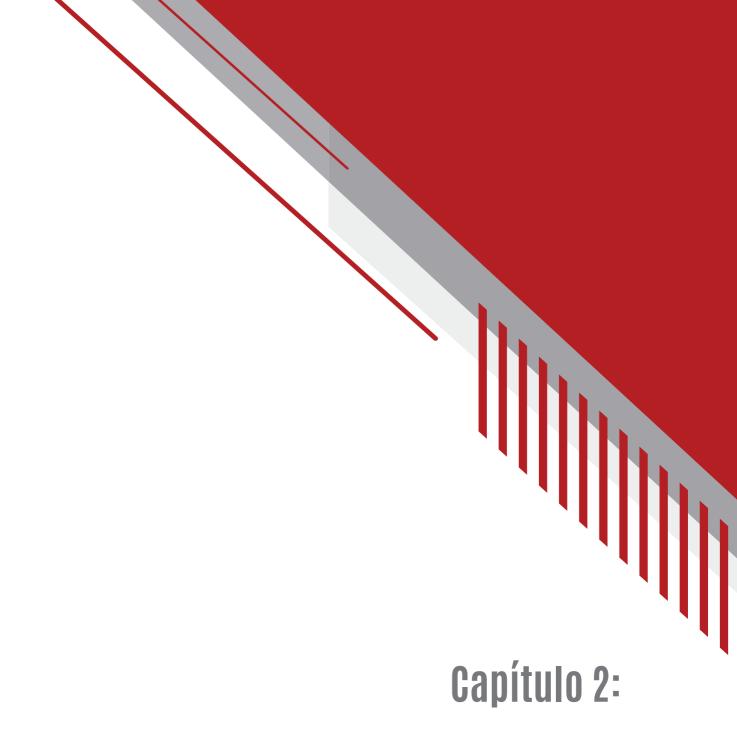
Figura 10. Equipo SPECT. [60]

Los radiofármacos pueden administrarse al paciente por varias vías, dependiendo del tipo de estudio que se desea realizar y de la forma física del trazador. Así, tenemos la vía oral (para radionúclidos en forma de solución o cápsulas, tales como el <sup>131</sup>I o la vitamina B12 marcada con <sup>57</sup>Co para estudiar la tiroides y la anemia respectivamente); la vía intravenosa, que sin duda es la más frecuente (para administración de radiofármacos en solución de compuestos tales como MDP - <sup>99m</sup>Tc para estudiar huesos).

<sup>3</sup> Tomografía por Emisión de Fotón Único (SPECT, por las siglas en inglés de Single-Photon Emission Computed Tomography)

# **Actividades**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿Qué es la Tomografía por Emisión de Positrones (PET)?	
¿Cómo es el método de radiomarcación?	
¿Para qué se utiliza el <sup>99m</sup> Tc y <sup>18</sup> F-FDG?	



Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en Agricultura - Alimentación

# **Actividades de Inicio**

Organizados en grupos comunitarios dialogamos y respondemos las preguntas en el siguiente cuadro:

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Observa el siguiente video: http://hdl.	
handle.net/20.500.12010/5661 ¿Cuán útil te parece el uso de la tecnología nuclear en la agricultura?	
Lee la siguiente nota: https://www.lavanguardia.com/comer/materia-prima/20200207/473101169831/irradiacion-de-alimentos-alimentos-irradiados-tecnologia-de-los-alimentos-radiacion-seguridad.html	
Y comenta ¿cuáles son los beneficios del uso de la tecnología nuclear en los alimentos?	

#### 2.1. Introducción

En 1964 se creó la División Mixta FAO/ OIEA de Energía Atómica en Agricultura y la Alimentación, ubicada en la Sede del OIEA en Viena, dicha división tiene proyectos de investigación en todo el mundo en las diferentes áreas de aplicación, como en el empleo de isotopos, aplicación de radiación en



Figura 11. Logo de FAO [7]

fitotecnia, mejoramiento de suelos, mediante irradiación el tratamiento de plagas e insectos, tratamiento de residuos químicos y contaminación, mediante irradiación la conservación de alimentos, aplicación en riegos y cultivos [7].

En más de 50 países se utiliza tecnología nuclear como una medida de las autoridades nacionales para mejorar la inocuidad de los alimentos por problemas de residuos nocivos y contaminantes en productos alimenticios, mejorando sistemas de trazabilidad con análisis de isótopos estables. Se utiliza la tecnología nuclear en programas de mejoramiento de cultivos, para ayudar a países en vulnerabilidad garantizando así la seguridad alimentaria, adaptación al cambio climático y hacer frente al hambre estacional.

#### 2.2. Irradiación Gamma

Los rayos gamma se emiten desde formas radiactivas del elemento cobalto (60Co) o del elemento cesio (137Cs). La irradiación gamma es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, los fotones gamma tienen cerca de 10.000 veces más energía que los fotones en el rango visible del espectro electromagnético, los fotones gamma no tienen masa ni carga eléctrica, son pura energía electromagnética.

Esta irradiación se aprovecha para desbacterizar y esterilizar diversos productos como alimentos deshidratados, materiales desechables de uso médico y quirúrgico, productos herbolarios, envases diversos, medicamentos y cosméticos, entre otros. Debido a su alta energía, fotones gamma viajan a la velocidad de la luz y puede cubrir cientos de miles de metros en el aire antes de gastar su energía.

Esta irradiación difiere con la luz visible o las ondas de radio en que tiene una longitud de onda muy corta y debido a estas diferencias, la irradiación gamma es más penetrante en ciertos materiales, puede atravesar en la materia más profundamente que radiaciones alfa o beta, tanto, que solo pueden ser frenados por placas bastante gruesas de plomo u hormigón como se observa en la figura 12 [8].

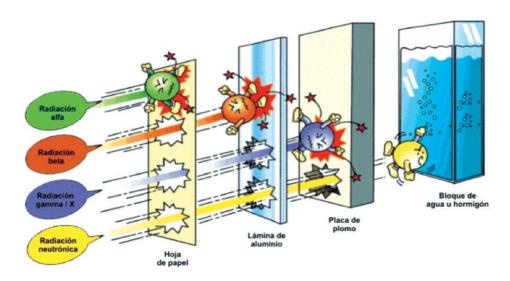


Figura 12. Tipos de radiación ionizantes. [9]

En general la fuente más común que se utiliza de rayos gamma es el 60Co. La instalación donde se alberga este tipo de irradiación es conocida como irradiador o planta de irradiación. La unidad de dosis absorbida es conocida como gray (Gy) en el sistema internacional de medidas; esta unidad de medida equivale a un joule por kilogramo, y es la energía que proporciona la radiación ionizante a una masa de materia. Antes la medida de la radiación era en rads o en kilorads (kr). Un gray corresponde a 100 rads.

#### 2.3. Irradiación de alimentos

Un método físico de conservación de alimentos actual es la utilización de irradiación gamma, esta técnica tiene dos beneficios grandes que son: alargar la vida anaquel de los productos y aumentar la calidad higiénico-sanitaria de los mismos. Para la conservación de alimentos tradicionalmente se utilizan métodos en los que por ejemplo se emplea calor como son la pasteurización y la esterilización en autoclave donde se trabajan con elevadas temperaturas, o en los que se emplea frio como la refrigeración, congelación y liofilización, comparado a este tipo de métodos, el tratamiento por irradiación tiene

la ventaja de que no produce cambios significativos en los alimentos, conserva la textura, sabor, aromas, color, entre otras características [10]. Este tipo de aplicación se realiza gracias a la amplia investigación de varias instituciones con colaboración de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el



Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y en base a esas investigaciones se cuenta hoy en día con una larga lista de microorganismos, bacterias, insectos, entre otros que son susceptibles a ser eliminados utilizando radiaciones gamma. Algunos de los productos alimenticios irradiados a escala industrial son: Frutas, vegetales, miel, carne, cereales, entre otros [11].





Figura 13. Fotografía de una fruta con el logo de producto irradiado (Radura) [12].

El Codex de estándares generales para alimentos irradiados establece que en la etiqueta de los alimentos que han sido tratados por irradiación ionizante deben llevar la declaración escrita de este tratamiento [13]. En la figura 13 se observa en la fruta el símbolo internacional de alimento irradiado, el mismo es opcional, y cada país decide la utilización del mismo o no, pero cuando se utiliza debería estar próximo al nombre del alimento.

En la Tabla 4 se muestra algunos casos de productos irradiados, en base al efecto que se busca y la dosis aplicable.

Tabla 4. Rango de dosis para distintas aplicaciones. Fuente CAE- CNEA

Producto	Efecto buscado	Rango de dosis (kGy)
Sangre	Inactivar linfocitos	0,02 - 0,04
Papas, ajos, cebollas	Inhibir germinación	0,05 - 0,15
Artrópodos	Control de plagas	0,10 - 0,50
Frutas finas	Extender vida	1,00 - 4,00
Pollo, carne, pescado	Reducir su deterioro por pasteurización en frio	1,00 - 7,00
Cosméticos, Fármacos	Reducir carga microbiana	3,00 - 20,00
Especias e ingredientes	Reducir carga microbiana, inactivar insectos, esterilización	1,00 - 30,00
Envases, materiales laboratorio, productos médicos	Esterilización	11,00 - 35,00
Modificación de polímeros	Entrecruzamiento, degradación, curado	1,00 - 250,00

En cuanto a exportación de frutas frescas a nivel Bolivia, se tiene un registro para el año 2014-2015 de más de 1 millón de toneladas de producción de bananas, duraznos, mandarinas, naranjas, piñas y uvas [14]. Sin embargo, Bolivia tiene un mayor potencial para abastecer de frutas frescas al mundo, y la técnica de conservación por irradiación gamma es una opción muy beneficiosa.

#### 2.4. Irradiación de hierbas especias y otros vegetales para sazonado

Entre las aplicaciones de la irradiación de alimentos, la descontaminación de especias, condimentos y hierbas deshidratadas tienen el potencial de aplicación más inmediato en muchos países.

Desde que se comenzó a emplear la irradiación en alimentos, la industria alimentaria vio un principal potencial en el uso de especias y condimentos de origen vegetal seco. Estos productos se utilizan para la elaboración de alimentos listos para su consumo, como es el caso de los enlatados, además juegan un rol importante en la contaminación por hongos de los productos cárnicos. Los mayores componentes de contaminación por hongos tanto en especias como medicinas herbales son aquellos pertenecientes al género de aspergillus y penicilium, aunque también se ha encontrado una alta incidencia de hongos tóxicos en otros casos [15]. Para ser empleados deben

cumplir con normas microbiológicas y este tipo de especias y condimentos son elaborados en países en desarrollo de manera tradicional de manipulación, lo que conlleva a contaminación con varios tipos de microorganismos patógenos, en algunos casos reciben tratamiento químico o térmico. Los enlatados que contengan estos ingredientes contaminados tendrán menor tiempo de vida y una disminución en su calidad.



Figura 14. Ají de origen boliviano (Sucre) que se plantea irradiar [74]

Antiguamente, se empleaba óxido de etileno y el óxido de propileno para eliminar microorganismos presentes en las especias y condimentos secos, pero desde 1991 debido a que se descubrió que estos productos son cancerígenos y por la seguridad de los propios trabajadores, se prohibió el uso de los mismos [16]. Por ello, la mejor técnica alternativa resultó ser la irradiación, ya que libera de los microrganismos a las especias y condimentos sin afectar su calidad, sabor, aroma y textura.

## 2.5. Desinfestación de granos

La gran variedad de granos (trigo, cebada, arroz, maíz, avena), están susceptibles al ataque de insectos, que en almacén podrían ocasionar el deterioro total del producto, por eso es necesario disponer de métodos eficaces de control, no sólo para evitar que se pierdan como alimento, sino también para conservarlos limpios y en buen estado, más aún si son objeto de comercio internacional. La irradiación de estos productos presenta una vida de almacenamiento superior al grano no irradiado o tratado por otros medios, porque puede prolongarse por más de 8 meses [17].

## 2.6. Irradiación para fitomejoramiento

La ciencia y tecnología va en avance en el sector agrícola y es fundamental considerar las técnicas nucleares que solas o en combinación con otras herramientas como la biotecnología, permite generar nuevas variedades de semillas a partir de la generación de las mutaciones inducidas, en pos de cubrir la demanda de alimentos para la población consumidora, cabe aclarar que estos no son transgénicos.



Los primeros alimentos modificados genéticamente no son creaciones humanas, esto se demuestra a través de un estudio publicado el 2015 en PNAS (The genome of cultivated sweet potato contains Agrobacterium T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop) [18], donde se demuestra que la modificación genética también se produce en la naturaleza, se ha descubierto que en el genoma del camote (batata), se integra material genético de la bacteria Agrobacterium y que este fue introducido hace miles de años, por lo que se considera al camote un alimento transgénico natural. [19]



Figura 15. Diferentes variedades de camote (batata). [20]

Este estudio comprueba que las mutaciones ocurren en la naturaleza, la implementación de la técnica de irradiación simplemente acelera este proceso, que de manera natural ocurriría en muchos años.

Esta técnica de fitomejoramiento está basada en la irradiación de especies vegetales, con el objetivo de mejorar sus características genéticas logrando así plantas más resistentes y productivas.



Figura 16. Cultivo de trigo en Viacha. Elaboración propia

En el país ya se cuenta con cierta experiencia en la utilización de las radiaciones para el mejoramiento genético de variedades de valor nutritivo y comercial. Por ejemplo, en el laboratorio de Servicios Nucleares (ex IBTEN), ahora pertenecientes a la ABEN, se viene trabajando hace años ya, en un programa de mejoramiento genético de cultivos andinos como la papa, tarwi, quinua y trigo, cuyo

propósito es el de generar nuevas variedades con mayor rendimiento y tolerancia a factores adversos (plagas, enfermedades, sequía, heladas, etc.). En el caso de la quinua, se trabaja en busca de líneas avanzadas (a futuro variedades), que tengan menor contenido de saponinas, a partir de semilla irradiada con rayos gama en su primera generación.

La cañahua, es un cultivo que tiene un problema fisiológico muy particular; la formación del grano es de forma escalonada (de abajo hacia arriba), razón por la que al madurar tiende a desprenderse de la planta (desgrane). Se pretende encontrar, de forma similar al anterior

caso, líneas avanzadas que tengan una maduración de grano uniforme, o que no se desprenda el grano de la planta cuando madure.

En el caso del tarwi, se busca reducir el contenido del sabor amargo presente en la semilla. En el caso del trigo, el objetivo es el de conseguir un genotipo adaptado a condiciones de altitud.



## 2.6.1. Reproducción del material genético sometido a tratamientos de irradiación

Para tener una reproducción de cultivos mejorados de plantas, la variación genética y la selección de las plantas son los principios básicos que se deben tomar en cuenta. La desventaja de este proceso es que es lento y laborioso. Debido al avance en los últimos años en cuanto al desarrollo del cultivo de células, tejidos y vegetales, ha logrado que parte del trabajo que se llevaba a cabo en terreno se traslade al laboratorio. A partir de todas las diferentes investigaciones realizadas, han surgido nuevas ramas de la fitotecnia, como la "biotecnología de plantas" y la "ingeniería genética", ciencias que se basan en la totipotencia celular, es decir, la capacidad para regenerar plantas totalmente desarrolladas a partir de órganos aislados (meristemas), cortes de tejidos, células individuales y protoplastos.

El efecto que pueda tener la radiación ionizante a nivel celular depende del lugar de interacción con la célula, si afecta a la membrana el efecto se puede ver en el cambio en su permeabilidad y como reaccione depende de sus mecanismos de reparación, si la radiación afecta al núcleo se presentará consecuencias mayores que pueden llegar a la muerte celular. En resumen, estos daños que ocurren en la célula se agrupan en: muerte en interfase, retraso mitótico y fallo reproductivo.

Debido a todos estos cambios que suceden en el ADN las plantas con la radiación, el estudio de las mismas es prolongado para obtener una nueva variedad de cultivo que sea resistente y tenga buenas características, este tiempo de estudio va alrededor de 12 a 15 años de esfuerzos intensivos, y mucho depende del material de inicio con el que se cuenta (semilla o tejidos in vitro). En la Tabla 5 y Figura 17 se detallan las etapas a ser cumplidas.

Tabla 5. Datos generales de la fitotecnia por mutaciones. Elaboración pro	Tabla 5. Datos g	enerales de la fitot	ecnia por mutaciones	s. Elaboración pro	opia
---	------------------	----------------------	----------------------	--------------------	------

Generación	Caracterización
	Semillas, polen, partes vegetativas, o cultivos de tejido tratados con mutágenos físicos (radiación) o químicos
$M_1 (M_1 V_1)$	Plantas desarrolladas a partir de semillas tratadas (M₁) o mediante propagación vegetativa (M₁V₁)
M <sub>2</sub> (M <sub>1</sub> V <sub>2</sub> )	Poblaciones de plantas obtenidas de semillas $(M_2)$ o partes vegetativas $(M_1V_2)$ cosechadas a partir de $M_1$ o $M_1V_1$ , respectivamente. La selección de mutantes deseados puede comenzar en esta generación o más tarde.
$M_3 - M_8 $ $(M_1 V_3 - M_1 V_8)$	Selección continua, confirmación genética, multiplicación y estabilización del rendimiento de las líneas de mutantes sobre el terreno.
a 3 generaciones siguientes	Análisis comparativo de líneas de mutantes en años y lugares diferentes.
a 3 generaciones	Ensayo oficial antes de difundir una nueva variedad.



Figura 17. Aplicación de técnicas nucleares en la fitotecnia. Elaboración propia

## 2.6.2. La división FAO / OIEA y la base de datos de variedades genéticas y mutantes

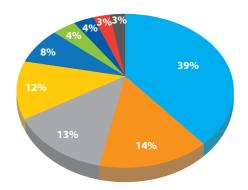
En 1964 en Viena, se conformó la división de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura conformada de manera conjunta por la FAO y la OIEA, la cooperación entre ambas partes está formada por objetivos en común, cofinanciación, gestión conjunta y distintas actividades para llevar a cabo la gestión de esta división. Esta división cuenta con una sección de fitomejoramiento y genética, lo que promovió y estimuló, a nivel mundial, el uso de tecnologías de mutación en el fitomejoramiento, proporcionando servicios de información, irradiación, capacitación y desarrollando proyectos internacionales de colaboración.

La base de datos de variedades mutantes de la división FAO/OIEA se ha incrementado vertiginosamente. En sus primeros años, hasta 1969 se lanzaron 77 variedades mutantes, que ya para el año 1989 tuvo un incremento a 1 330 variedades mutantes, ya para el 2009 se tenía el dato de 3 100 variedades mutantes cultivadas en 190 especies de plantas que estaban incluidas en la Base de datos FAO/OIEA de variedades mutantes y cepas genéticas. Estos estudios, según datos en países asiáticos, han tenido un mayor enfoque en tener la mayor cantidad de variedades mutantes en cultivos de cereales de granos pequeños.

En esta base de datos se puede consultar las especies por nombres latinos o comunes, así como la metodología de reproducción, país, continente y por fechas. Se tienen también las descripciones fenotípicas incluyendo fotografías. La mayoría de las variedades mutantes, de hecho, más de la mitad de la base de datos se encuentran en Asia (especialmente en India, Japón y China), seguidas de Europa, América del Norte, África, América Latina y la región de Australia/Pacífico. (Figura 18b)

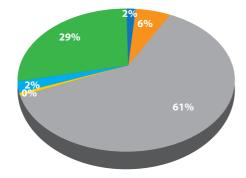
La mayoría de las variedades mutantes que se encuentran en la base de datos, están definidas como una variedad que lleva un gen mutante conocido, pero que no necesariamente es producto directo de un tratamiento de mutación, ya que hay mutaciones que ocurren de manera espontánea. En la Figura 18a, se describe la cantidad de variedades mutantes por especie, en el que los valores no son exactos ya que en el caso de algunas especies los valores no se reportan ya que se consideran información confidencial.

#### (a) Las nueve principales variedades mutante



Nro. de variedades mutantes	Porcentajes%	Especie
853	39,1	Arroz
306	14,0	Cebada
285	13,1	Crisantemo
265	12,1	Trigo
181	8,3	Soya
89	4,1	Maíz
79	3,6	Maní
67	3,1	Rosa
57	2,6	Frijol

#### (b) Distribución regional de las variedades mutantes



Cantidad	Porcentaje%	Continente
53	1,6	América Latina
209	6,2	Norte América
2052	61,0	Asia
9	0,3	Australia/Oceanía
82	2,4	África
960	28,5	Europa

Figura 18. Variedades mutantes y sus distribuciones (2021) [21]

Esta técnica de reproducción de mutaciones de plantas ha sido ampliamente utilizada durante más de medio siglo, y desde que se fundó la División Mixta FAO/OIEA ha colaborado a países en desarrollo con la innovación rápida de avances en tecnología que colaboren al manejo y desarrollo de estas mutaciones, este enfoque hizo posible el uso en conjunto de la tecnología de mutación y la liberación de variedades mutantes registradas en más de 170 especies de plantas diferentes hasta la fecha. Algunos de estos cultivos mutantes han revolucionado la agricultura no solo en los países en desarrollo densamente poblados, sino también en los países avanzados en agricultura.

Actualmente se sigue utilizando las mutaciones clásicas para el beneficio de las comunidades, pero en los últimos años se trabaja en paralelo con la aplicación de herramientas genómicas modernas para para la inducción y descubrimiento de mutaciones en laboratorios avanzados.

Las mutaciones inducidas por técnicas de mutagénesis, como los rayos gamma y otros mutágenos físicos y químicos, ha logrado obtener una gran variabilidad genética y gracias a estos cambios genéticos se ha podido mejorar los cultivos, un mejor entendimiento de los estudios genéticos de varias especies y sus rutas bioquímicas.

## 2.7. Fertilización de suelos y nutrición vegetal

Los nutrientes son necesarios para que nuestros cultivos puedan crecer de manera satisfactoria, y además, tener un producto de alta calidad.

Con la innovación y puesta en marcha de la tecnología nuclear con fines pacíficos, se ha desarrollado en los últimos años, una tecnología muy útil para desarrollar su aplicación en investigación en áreas agrícolas, particularmente en estudios sobre fertilidad de suelos y nutrición de plantas. Los isótopos contribuyen a mejorar la nutrición de los cultivos y a detectar cultivos bien adaptados a suelos poco fértiles o que aprovechan los nutrientes de una manera especialmente eficaz, lo que es fundamental para optimizar el rendimiento y la calidad, y mejorar la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático.

La FAO menciona 2 principales aplicaciones de la tecnología nuclear en esta área: mejora del equilibrio del suelo y del agua, así como la prevención estacional del hambre [22].

## 2.7.1. Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola

En agricultura también se usan isótopos radiactivos como trazadores. Gracias a moléculas marcadas con isótopos radiactivos de nitrógeno, fósforo y potasio, se ha podido seguir el mecanismo de asimilación de estos nutrientes, lo que ha permitido una utilización más eficaz de los fertilizantes. Asimismo, por ejemplo, con  ${\rm CO_2}$  marcado con  ${\rm ^{14}C}$  o el fosfato ( ${\rm PO^{-3}}_4$ )marcado con  ${\rm ^{32}P}$ , se ha conseguido seguir las rutas de la fotosíntesis, y comprender mejor la importancia de esta función en las plantas [23].

El uso de isótopos es una forma eficaz de obtener una medida cuantitativa directa en las plantas que están bajo la influencia de varios factores, a fin de conocer aspectos puntuales como, por ejemplo, eficiencia de uso de fertilizantes de un cultivo en particular, la contaminación de los suelos y la conservación de este recurso, entre otros.

Para el efecto se emplean isótopos estables, utilizando fuentes enriquecidas como <sup>15</sup>N o aprovechando la abundancia natural del mismo en atmósferas naturales. Bajo esta metodología se enriquece al suelo mediante dilución isotópica con el isótopo marcado, que será absorbido por la planta y luego se le sigue la pista al elemento tanto en el suelo como en la planta, para cuantificar la cantidad del elemento que absorbió la planta, cuanto quedó en suelo y cuanto del elemento se lixivió a capas fuera del sistema radicular. Por otro lado, también se puede distinguir cuanto de nitrógeno proviene del fertilizante, de la atmósfera a través de la fijación biológica y del suelo producto de la mineralización de la materia orgánica [24]. De esta forma, los resultados alcanzados llevan a optimizar el uso del fertilizante, uso eficiente del agua, cuidar el medio ambiente, e incrementar la producción y productividad de alimentos. Por último, se recomienda el uso de isótopos para estudios ambientales, conservación de suelos y manejo de cultivos.

Entre otros estudios tenemos los siguientes:

- Recuperación de fertilizantes por los cultivos.
- Ubicación y fraccionamiento de fertilizantes.
- Evaluación de fuentes de fertilizantes.
- Dinámica de nutrientes minerales en suelo: Procesos de pérdida y ganancia en la disponibilidad para las plantas.
- Efecto residual de fertilizantes y manejos de cultivos.
- Fijación simbólica de Nitrógeno por leguminosas.
- Distribución de patrones de actividad radicular.
- Estudios sobre descomposición de materia orgánica del suelo.

## 2.8. Manejo de Plagas

Se ha estimado que las pérdidas de cosechas ocasionadas por insectos pueden llegar a equivaler al total de la cosecha de países como Estados Unidos de América, que representa alrededor de un 10% de la cosecha mundial, como por ejemplo la polilla de la mosca de la fruta.

La ventaja de tener un método de control biológico es que son específicos para el insecto que se desea atacar y la ventaja también de contribuir a proteger el medio ambiente, ya que reduce en gran medida el uso de insecticidas. De esta manera nace la

llamada técnica del insecto estéril (TIE) que resulta ser muy útil, y comprobado ya en algunos casos de gran magnitud [25].

La técnica del insecto estéril (Figura 19) consiste en administrar a los insectos machos, mismos que han sido criados en laboratorio, dosis esterilizantes de radiación ionizante. Así los machos esterilizados se liberan en elevadas cantidades en las zonas infestadas donde se aparean con las hembras silvestres, pero sin producir descendencia. Realizando repeticiones de liberación de machos esterilizados, es notoria la reducción de la plaga de insectos en las zonas infestadas.

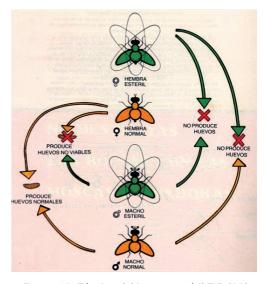


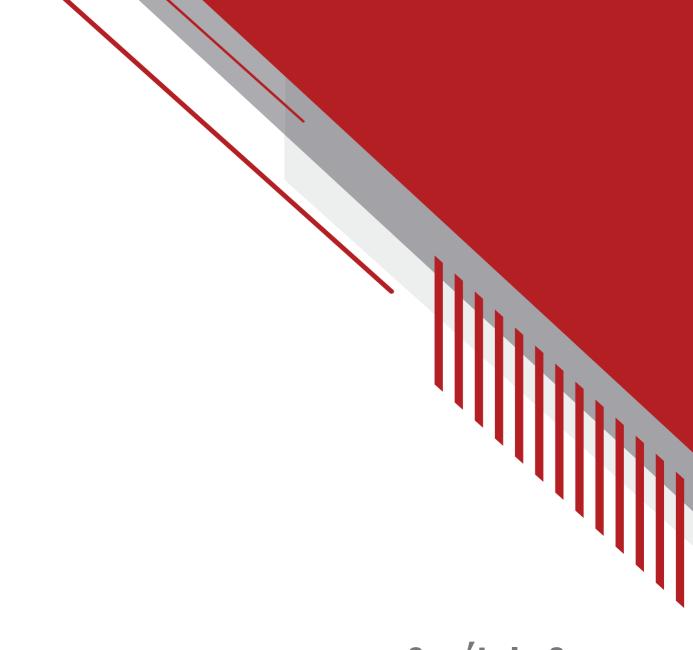
Figura 19. Técnica del insecto estéril TIE. [28]

El uso de esta técnica tuvo su primer caso exitoso con la mosca gusanera, que es una plaga de insectos que vive en las heridas de los animales de sangre caliente. Se aplicó la TIE a moscas gusaneras macho y se las dejó en libertad en la isla de Curacao, en el Caribe [26]. Después de varios ciclos de reproducción, la plaga desapareció. Esta experiencia sirvió de base para atacar otras plagas, también consiguiendo resultados exitosos, evitándose así cuantiosas pérdidas económicas. Gracias a estos resultados se pusieron en marcha muchos proyectos de investigación, estudiándose más de 200 especies de insectos.

## **Actividad Sugerida**

Tomando en cuenta el contexto educativo, identificamos un cultivo en el que se considere necesario aplicar una de las técnicas nucleares estudiadas y argumentamos la importancia para el desarrollo productivo del país.

Cultivo y Tecnología Nuclear Aplicada	lmportancia para el desarrollo productivo



# Capítulo 3:

Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en la Industria

## **Actividades de Inicio**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿En qué áreas piensa usted, que se puede aplicar la tecnología nuclear (sin contar la generación núcleo eléctrica)?	
¿Conoce las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la vida cotidiana?	

## 3.1 Aplicaciones en la industria

Existen muchas aplicaciones en las que se usa la tecnología nuclear en la actualidad, mediante la radiación ionizante de algunos elementos, o las diferentes propiedades de algunos isotopos; es posible aplicarla en diversos campos. Éstas, se aplican en varias industrias como la minería, las industrias, petroleras, manufactureras, seguridad, eléctrica entre otros.

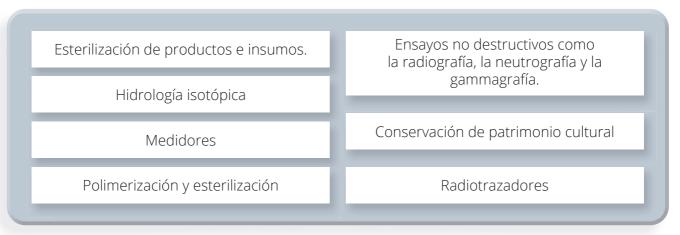


Figura 20. Tecnología nuclear. [79]

Las principales cualidades de la radiación ionizante de utilidad para su aplicación en la industria son:

- Atravesar o penetrar la materia. Las diferentes radiaciones ionizantes tienen diferentes capacidades para penetrar diferentes materiales. Por lo tanto, dependiendo de la aplicación que se requiera en la industria, se identificará el tipo de radiación ionizante adecuada. Clasificando de acuerdo a la capacidad de penetración de mayor a menor: los neutrones son la radiación más penetrante, seguida por rayos gamma, rayos X; las radiaciones beta tienen menor capacidad de penetración que las anteriores, y las partículas alfa son las que tienen la menor capacidad de penetración.
- **Detección rápida, fácil y precisa.** Es posible hacer mediciones más precisas y veloces, usando radiación ionizante. Teniendo un alcance que antes no se imaginaba. Se explicarán los tipos de medidores que utilizan radiación ionizante con más detalle en el cuadro 1.

Las aplicaciones con mayor relevancia de la radiación ionizante en la industria no energética son [29]:



Cuadro 1. Aplicaciones de la radiación ionizante en industria no energética. Elaboración propia

#### 3.1.1 Esterilización mediante la radiación ionizante

A través de la radiación ionizante, se puede generar una acción bactericida, es decir se obtiene la capacidad de exterminar microorganismos patógenos.

Gracias a esta acción se puede esterilizar una gran variedad de materiales y en grandes cantidades, tales como: material médico-quirúrgico, alimentos, sangre, materiales plásticos entre otros. Por lo tanto, se la puede usar en diversos ámbitos como:

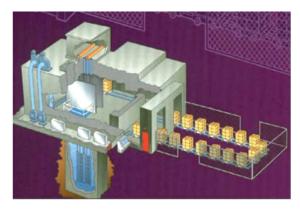


Figura 21. Esterilización por radiación ionizante. [67]

**Uso Industrial** 

**Agricultura** 

Médico

Conservación del patrimonio cultural

¿Cómo funciona?: Mediante radiación gamma, rayos X o haces de electrones; se puede realizar este proceso. La técnica más usada es a través de los rayos gamma del Cobalto-60 (técnica que Bolivia usará en el CIDTN).

Uno de los procesos más comunes para irradiar alimentos que se usa, es el de mover los productos mediante una cinta (como se ve en la Figura 21) estas cajas ingresan a la cámara donde la fuente de Cobalto se encuentra sumergida en una piscina de agua y al momento de la irradiación es removida de la piscina por el tiempo necesario (según el tipo de producto que se quiere irradiar), posteriormente los productos salen de la cámara de irradiación y están listos para su despacho.

- **1. Agricultura:** Este método es usado para alimentos, donde se eliminan los microorganismos e insectos contenidos en éstos, dando una mejor calidad, seguridad e incrementando la vida útil de estos alimentos.
- **2. Médico:** Es usado para la esterilización de insumos médicos de un solo uso como jeringas y guantes quirúrgicos, así mismo, dispositivos de uso médico. Una de las grandes ventajas es su esterilización en productos ya empaquetados, neutralizando organismos dañinos y gérmenes que pueden causar enfermedades.
- **3. Conservación del patrimonio cultural:** Esta tecnología no deja ningún residuo en el artefacto tratado. Cabe recalcar que los artefactos no se vuelven radiactivos.

Por lo tanto, no existe riesgo para los conservadores / restauradores, curadores de museos y registradores u operadores de instalaciones de irradiación.

## 3.1.2 Hidrología isotópica

La hidrología isotópica, está directamente relacionada a estudios de recursos hídricos, actualmente es un medio muy útil a través del cual se logran técnicas adecuadas para obtener modelos conceptuales fenomenológicos; se puede tomar como un material de validación de otras técnicas hidrogeológicas, y contra problemas de la calidad del agua es altamente eficaz. Las técnicas nucleares se basan en el ciclo hidrológico, utilizando tantos isotopos estables como radiactivos para seguir los movimientos del agua en dicho ciclo.

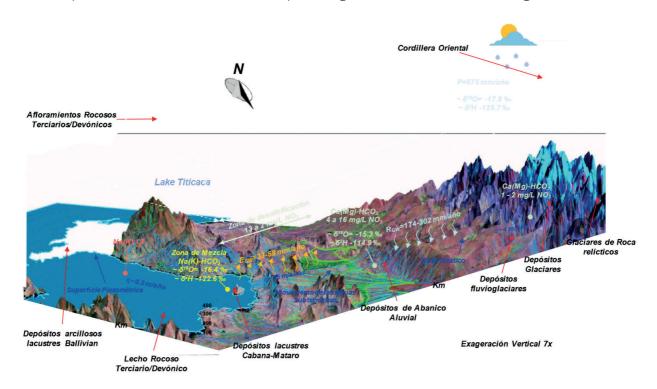


Figura 22. Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de la Cuenca Katari y Lago Menor mostrando las zonas donde las aguas subterráneas no muestran alteraciones antropogénicas (Piedemonte superior), muestran alteraciones antropogénicas moderadas a fuertes (Piedemonte inferior), y una zona de atenuación natural. También se consideraron los datos de contenidos isotópicos de muestras correspondientes al lago, precipitación, y aguas subterráneas. [66]

La hidroquímica, es una rama de la hidrogeología a través de la cual se puede caracterizar acuíferos, lo cual ayuda a tratar los riesgos relacionados con la contaminación del agua, ya que permite el estudio de los componentes que pueda tener ésta.

La técnica de la hidrología isotópica emplea isótopos de los elementos del agua: Tritio, Deuterio y Oxigeno-18 (³H, ²H, ¹8O), que son utilizados como trazadores naturales. Este trabajo se realiza en conjunto con hidroquímica. Ambas técnicas se combinan para realizar adecuados estudios hidrogeológicos.

Para poder tener información sobre la recarga de las aguas en los acuíferos, identificación del origen y edad del agua, cómo se conectan varios acuíferos, si los acuíferos tienen a la contaminación, el flujo de los acuíferos, de las aguas marinas en los acuíferos entre otros se hace el estudio de los elementos disueltos como los isótopos del agua.

"edad" del agua es el tiempo transcurrido desde el momento en que una gota de agua llega a un sistema hidrológico cualquiera hasta que alcanza un lugar específico en dicho sistema.

## 3.1.3 Arqueometría

Esta es una disciplina científica que estudia la arqueología, mediante la utilización de

métodos tanto químicos como físicos. Entre estos métodos están los estudios por ejemplo de antropología, botánica, sedimentología, análisis de los distintos materiales y arqueozoología.

El principal objetivo de esta técnica es determinar la fecha de origen de los yacimientos arqueológicos (objetos y restos), caracterizando estos materiales a través de sus propiedades químicas y físicas, determinando el lugar de origen de dichos materiales.

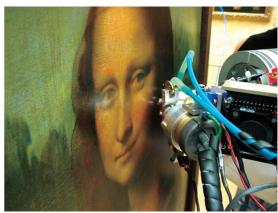


Figura 23. Aplicación de rayos gamma para proteger el patrimonio artístico. [71]

Para el estudio de la antropología, en la actualidad, se cuenta con técnicas nucleares que tienen algunas ventajas respecto a los métodos tradicionales para estudios antropológicos.

Tradicionalmente se emplea la técnica del Carbono-14 que permite conocer la antigüedad de elementos orgánicos. Este elemento radiactivo posee un tiempo de vida media de 5730 años, es decir que la cantidad de carbono-14 disminuirá en 50% pasado ese tiempo, por lo que midiendo con precisión la actividad y cantidad de dichos isótopos contenida en un cuerpo orgánico, se puede determinar los años que tiene la muestra, teniendo así por ejemplo las caracterizaciones de huesos, cerámicas, pigmentos y diferentes materiales arqueológicos, y así tener la data le la antigüedad de los mismos. La ventaja con la técnica nuclear es que se necesitan muestras más pequeñas, incluso menores a un gramo; en el caso de lienzo o pinturas, a diferencia de la técnica tradicional, en la técnica nuclear se utiliza todo el lienzo como tal sin tratamiento previo ni causar ningún deterioro al realizar el estudio, y se tienen datos más precisos acerca de los elementos que componen las muestras (de partes por millón).

## 3.1.4 Formación de polímeros

La polimerización por injerto permite la formación de materiales híbridos funcionales. Estos se obtienen mediante la inclusión de cadenas poliméricas logrando propiedades adecuadas de la superficie de este, el uso de éstos viene creciendo rápidamente durante los últimos años. El método de injerto inducido por radiación ionizante es una de las técnicas más prometedoras, por ser simple, económicamente viable, de fácil control y garantiza el injerto de una variedad de monómeros que son difíciles de polimerizar por métodos convencionales [30].

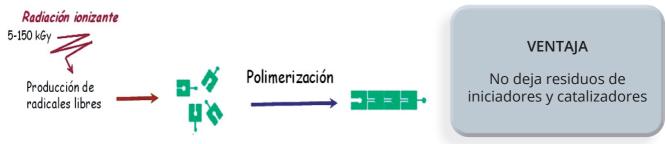


Figura 24. Polimerización por radiación ionizante. [68]

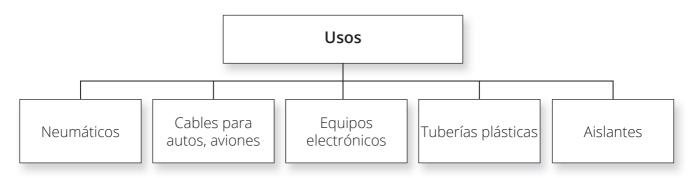


Figura 25. Usos de la polimerización. Elaboración propia.

Con la polimerización mejoramos las propiedades de algunos materiales, por lo que se pueden obtener materiales con mayor resistencia al calor y a la oxidación, con mejores propiedades de corte y con mayor estabilidad mecánica.

#### 3.1.5 Medidores

Las radiaciones ionizantes se pueden en varios tipos de instrumentos de medición, como se describe a continuación:

Tabla 6. Tipos de medidores que utilizan radiación. [29]

Tipos de Instrumentos	Industrias donde se aplica	Característica medida
Sondas de espesor	Papelera	Espesor
	Plástico	
	Chapas de acero	
Densitómetros	Petrolera	Densidad
	Minera	
	Tabaquera	
	Carbón	
	Revestimiento	
	Metalúrgica	
Medidores de nivel	Química	Nivel
	Petrolera	
	Farmacéutica	
	Minera	
Sondas neutrónicas	Construcción	Humedad
	Seguridad	

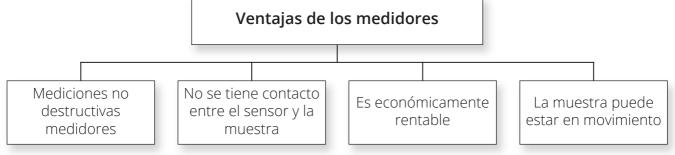


Figura 26. Ventaja de los medidores. Elaboración propia.

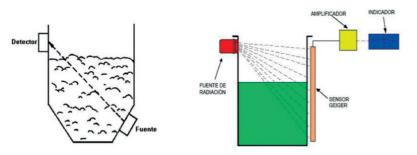


Figura 27. Medidor de Nivel. [72]

Por ejemplo, en la Figura 27 se muestra un medidor de nivel, compuesto por una fuente de radiación ionizante, un detecto, sensor (tubo de fibra óptica) y un amplificador.

## 3.1.6 Técnicas Nucleares más usadas en la industria minera y petrolera

La tecnología nuclear puede ser muy útil en varias áreas de la minería y en la industria petrolera, usando distintos métodos para las diferentes etapas como la exportación, extracción y tratamiento.

A continuación se describirán algunas áreas de la minería y como la tecnología nuclear contribuye en ésta [31]:

#### Investigación Geológica

La exploración minera se basa en conocimientos generales de los procesos geológicos y de la geología del área a estudiar. La tecnología nuclear ayuda en estos estudios, al poder determinar la edad y distribución de elementos de diferentes rocas o suelos.

Para esto se usa el análisis por activación neutrónica (AAN); este método es muy sensible y puede determinar en muestras muy pequeñas más de 40 elementos es bastante utilizado en la actualidad para encontrar tierras raras, oro, platino, uranio y torio [31].

#### **Exploración Geoquímica**

Usando la técnica de AAN en sedimentos orgánicos, inorgánicos y agua, se puede lograr la búsqueda de mineralizaciones de valor rentable. Ya que al analizar las composiciones químicas de estos podemos determinar la composición de rocas adyacentes [31].

### Diagrafía de pozos

Al realizar la exploración de petróleo o minerales, se deben realizar muchas perforaciones con el fin de reunir la mayor cantidad de información analítica de estos. Mediante la fluorescencia X basados en la dispersión de energía se pueden realizar esos análisis in situ sin la necesidad de ir hasta un laboratorio, obteniendo un registro detallado, también se puede utilizar sondas gamma-gamma. [31]

## Aplicaciones en la extracción de petróleo

Cuando la presión de un pozo es muy baja y el petróleo no brota espontáneamente, se puede inyectar agua para así incrementar la presión del pozo. Y mediante trazadores nucleares podemos analizar su recorrido así determinar la eficacia del proceso [31].

#### Trazadores en el tratamiento de minerales

Los trazadores radiactivos pueden ser empleados para el estudio del flujo, la mezcla y el triturado de los materiales. Así también se emplea para analizar las reacciones físico químicas de la separación del metal y su escoria, finalmente empleado en el control de calidad para determinar que no se tengan inclusiones no metálicas en estos [31].

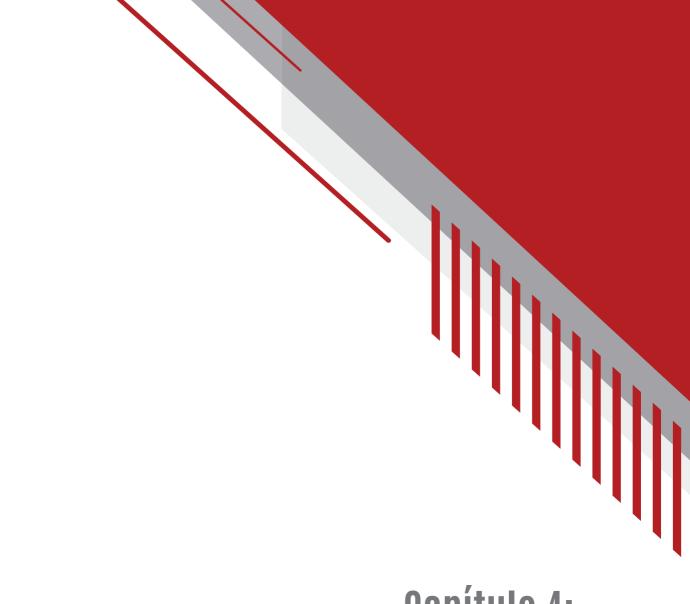
## 3.1.7 Isotopos y radioisótopos

En la actualidad, en la industria moderna se emplea el uso de los isotopos y radiaciones, para desarrollary mejorar algunos procesos, como el control de calidad y automatización. Es tan útil su uso que varias industrias los requieren en diversas ramas:

- **Trazadores:** Son sustancias que se utilizan en algún proceso industrial, y gracias a su radiactividad se puede determinar su trayectoria. De esta manera se puede detectar alguna variable en los diferentes procesos como ser filtraciones, fugas, entre otros, gracias a esta información se puede optimizar el tiempo de vida de estos equipos industriales.
- Radiografías de la estructura interna de las piezas: Estas radiografías se realizan con rayos gamma o neutrones, es una aplicación que sirve para el control de calidad, se conocen como gammagrafías o neutrografías, este método no daña el material a analizar y permite ver la calidad en soldaduras, cerámicas u otros.
- **Mejorar la calidad de determinados productos:** Se utiliza la irradiación para la mejora de calidad de ciertos productos, se puede utilizar para la polimerización en la fabricación de plásticos y para esterilizar materiales o productos que serán de un solo uso.
- Inyección de zinc (64Zn) en el refrigerante de los reactores nucleares: Hace que disminuya la dosis radiactiva y además mitiga el agrietamiento por corrosión.

## **Actividades**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Nombre y describa 3 aplicaciones de la tecnología nuclear	
Mencione y describa 2 aplicaciones en la industria petrolera y minera	
¿Qué técnica nuclear se puede usar en la conservación del patrimonio cultural? ¿Cuáles son sus ventajas?	



# Capítulo 4:

Aplicaciones de la Tecnología Nuclear en Energía Eléctrica y No Eléctrica

## **Actividades de Inicio**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿Qué conoce sobre un reactor nuclear?	
¿Cuál es la diferencia entre un reactor de investigación y un reactor de potencia?	
¿Cuáles son las aplicaciones de un reactor de investigación?	

## 4.1 Fuentes de energía

Una fuente de energía es un recurso a través del cual se extrae energía con distintos fines, principalmente comerciales. Antiguamente, el hombre utilizó los recursos naturales para cubrir sus necesidades, actualmente utilizamos recursos naturales o artificiales que dan lugar a las fuentes de energía, las cuales son explotadas en centrales eléctricas o industrias.

Los tipos de fuentes de energía se clasifican en dos y se describen en los siguientes cuadros:

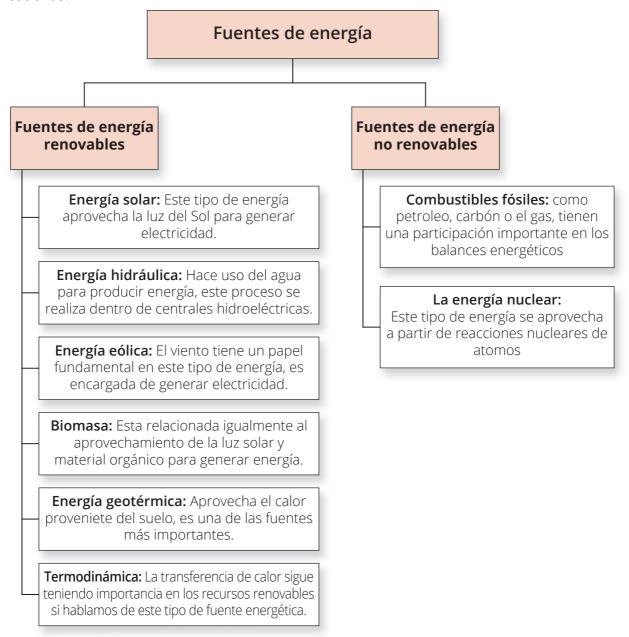


Figura 28. Clasificación de las fuentes de energía. Elaboración propia.

## 4.2 Reacciones nucleares para obtener energía

Una de las fuentes de energía mostradas en la figura 28, es la **energía nuclear**, es aquella energía contenida en el núcleo de un átomo (neutrones y protones), existen dos formas de liberar esta energía: fisión nuclear y fusión nuclear. Cuando se produce una de estas dos reacciones nucleares, los átomos experimentan una ligera pérdida de masa, esta masa que se pierde se convierte en una gran cantidad de energía calorífica y de radiación, la energía calorífica producida es utilizada para producir vapor y el mismo es utilizado para mover las turbinas que generan electricidad. [32]

#### 4.2.1 Fisión nuclear



Figura 29. Fisión nuclear del Uranio (235U). [61]

Es una reacción nuclear en la cual un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se convierte en un núcleo inestable y se descompone en dos núcleos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, al mismo tiempo se libera energía, más la emisión de dos o tres neutrones. [33]

Cuando los neutrones son emitidos en la división del núcleo, estos son capaces de provocar otras fisiones al interaccionar con otros núcleos cercanos. Una vez que

los neutrones provoquen otras fisiones, los neutrones que se desprenderán de estos generarán aún más fisiones, así sucesivamente generando gran cantidad de energía.

#### 4.3 Reactores nucleares

El reactor nuclear es una instalación que tiene la capacidad de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión nuclear en cadena, con los medios adecuados para extraer el calor generado. El reactor nuclear consta de varios elementos y cada uno de ellos tiene un papel importante en la generación de energía. [34]

Como se muestra en la figura 30, es un recipiente muy resistente hecho de acero donde se introduce el combustible nuclear y tiene lugar la fisión.

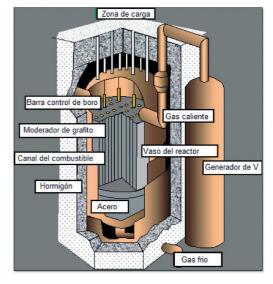


Figura 30. Partes de un reactor nuclear. [62]

Entre los elementos más importantes están:

#### **Combustible**

Es un material fisionable, generalmente un compuesto de uranio, en forma de barras delgadas de un centímetro de longitud, en el que tienen lugar las reacciones de fisión; por lo que es la fuente de generación de energía.

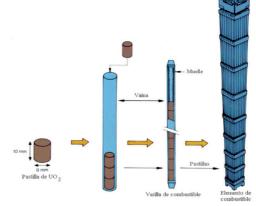


Figura 31. Elemento de combustible nuclear. [63]

#### Moderador

Los neutrones producidos en la fisión tienen una energía cinética ya que tienen velocidades relativamente altas. La función del moderador es disminuir la velocidad de los neutrones rápidos producidos en la fisión nuclear, convirtiéndolos en neutrones lentos y térmicos, conviene disminuir su velocidad para aumentar la probabilidad de que sean "capturados" por otro átomo fisionable y no se rompa la reacción en cadena. Se emplean como moderadores el agua, el grafito y el agua pesada.

### Refrigerante

Su función es la extracción rápida del calor generado por el combustible del reactor. Generalmente se usan refrigerantes líquidos, como el agua ligera y el agua pesada, o gases como el anhídrido carbónico y el helio, porque no son corrosivos para los elementos del combustible ni para otras partes del reactor con las que esté en contacto. [34]

#### Barras de control

Para controlar que un reactor nuclear funcione a mayor, o menor, potencia, se requiere la introducción de absorbentes de neutrones en el núcleo por medio de barras, es un medio rápido y eficaz. Es decir, su función es controlar en todo momento la población del reactor, haciendo que sea crítico durante su funcionamiento y subcrítica durante las paradas.

#### Vaso del reactor

Aloja el combustible, los elementos de control y el moderador, permitiendo el paso indispensable del refrigerante.

### Blindaje

Cuando un reactor nuclear está en operación producen todas las formas de radiación atómica, entre los de mayor penetración están los rayos gamma y los neutrones, que imposibilitan trabajar en las proximidades del reactor, por esta razón es importante tener la protección adecuada para evitar el riesgo a las radiaciones, es decir, un blindaje. Los materiales más utilizados para construir un blindaje en un reactor son hormigón, el agua y el plomo. [34]

#### 4.3.1 Ciclo de combustible nuclear

El único elemento usado hoy en día como combustible para las centrales nucleares es el uranio. Pero este debe pasar por una serie de etapas para ir desde el yacimiento hasta la central. Esto se conoce como el ciclo del combustible y también se incluye tratamiento posterior de los desechos y reprocesamiento del combustible gastado. [35]

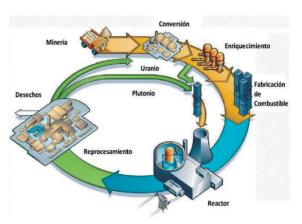


Figura 32. Ciclo del combustible. [35]

- El proceso parte con la extracción del uranio en una mina.
- · Luego pasa por las etapas de molienda y conversión.
- El material va a una etapa de enriquecimiento y finalmente la fabricación del combustible.
- En el último el uranio está listo para ser utilizado como combustible de una central nuclear.
- Cuando el combustible esta gastado, pasa a la etapa de reprocesamiento para el reciclaje o el deposito definitivo de desechos. [35]

### **4.3.2 Centrales nucleares**

Las centrales nucleares son instalaciones utilizadas para la generación de energía eléctrica a partir de energía térmica producida mediante reacciones de fisión en el vaso del reactor nuclear. [36]

El funcionamiento de una central nuclear se basa en el aprovechamiento del vapor para mover la turbina, la cual está conectada a un generador eléctrico, como se ve en la figura 33.

El proceso de generación de energía eléctrica se puede simplificar en cuatro fases: [37]

- **1.** La fisión del uranio se lleva a cabo en el reactor nuclear, liberando una gran cantidad de energía que calienta el agua hasta evaporarla.
- **2.** Este vapor se transporta al conjunto turbina-generador mediante un circuito de vapor.

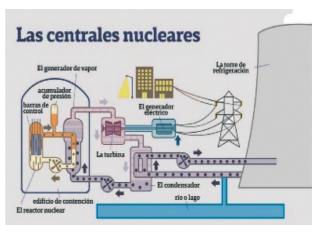


Figura 33. Partes de una central nuclear. [36]

- **3.** Una vez ahí, las aspas de la turbina giran por la acción del vapor y mueven el generador, que transforma la energía mecánica en electricidad.
- **4.** Cuando el vapor de agua ha pasado por la turbina, se envía a un condensador donde se enfría y se vuelve líquido. Después, el agua se transporta para volver a conseguir vapor, cerrando así el circuito de agua.

## 4.4 Reactores nucleares de investigación



Figura 34. Reactor nuclear de Investigación TRIGA Mark III. [64]

Aunque la magnitud de la industria de centrales nucleares para producción de electricidad es inmensa, no es la única aplicación de la energía nuclear; la energía de fisión se ha empleado desde los inicios de la ciencia y la tecnología nuclear para fines de investigación que han permitido obtener valiosos beneficios y avances en el conocimiento y el bienestar de las personas en todo el mundo.

Los reactores nucleares de investigación son instalaciones que permiten aprovechar la energía que se produce durante la fisión nuclear, en objetivos distintos a la generación de energía eléctrica. En este sentido, estos reactores están construidos para aprovechar más los neutrones generados durante la fisión que el calor. [38]

Este tipo de reactores suelen ser más pequeños que las centrales nucleares, y por lo general no alcanzan temperaturas tan altas. Estas instalaciones poseen adaptaciones técnicas que permiten utilizar la radiación y los neutrones que se liberan durante la fisión nuclear para producir radioisótopos o para estudiar sus efectos sobre distintos materiales.

### **Aplicaciones**

Como se mencionó, los reactores de investigación utilizan la energía nuclear para lograr avances en materia de ciencia y tecnología, entre las principales acciones que podemos realizar gracias al uso de estas instalaciones, se encuentran:

- Educación e innovación científica
- Capacitación de personal
- Medicina: diagnóstico y tratamiento médico
- Industria
- Agricultura (control de plagas, etc.)
- · Análisis ambientales para la detección de contaminantes en agua, aire y suelo.
- Física forense
- Protección de bienes culturales
- Diversos ensayos científicos que buscan mejorar el rendimiento de las centrales nucleares.

#### 4.5 Fusión nuclear

La fusión nuclear es una reacción nuclear en la que dos núcleos de átomos ligeros, en general el hidrogeno y sus isotopos (deuterio v tritio), se unen para formar

otro núcleo más pesado, generalmente liberando partículas en el proceso. La fusión al igual que la fisión se genera energía, pero tiene a su favor de que sus productos no son radiactivos.

Para que tenga lugar la reacción de fusión, es necesario alcanzar altas cotas de energía que permitan que los núcleos se aproximen a distancias muy cortas en las que la fuerza de atracción nuclear

Deuterio
Isótopo
FUSIÓN
Neutrón
Helio
Tritio
Isótopo
Energía

Figura 35. Reacción de fusión nuclear. [40]

supere las fuerzas de repulsión electrostática. Para ello, se deben cumplir los siguientes requisitos: [39]

**1.** Para lograr la energía necesaria se pueden utilizar aceleradores de partículas o recurrir al calentamiento a temperaturas muy elevadas, este último consiste en

calentar los átomos hasta lograr una masa gaseosa denominada plasma, compuesta por electrones libres y átomos altamente ionizados.

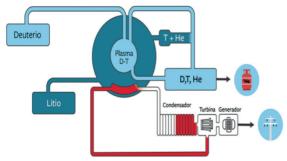
- **2.** Es necesario garantizar el confinamiento y control del plasma a altas temperaturas en la cavidad de un reactor de fusión el tiempo necesario para que se produzca la reacción.
- **3.** Asimismo, es necesario lograr una densidad del plasma suficiente para que los núcleos estén cerca unos de otros y puedan dar lugar a las reacciones de fusión.

Se piensa que la fusión pudiera ser una fuente de energía bastante prometedora a causa de la disponibilidad de isótopos ligeros y porque el proceso no produce desechos radiactivos, es decir, no constituye una amenaza para el ambiente. [40]

Empero, la fusión no se utiliza actualmente para la generación de energía, debido a los retos técnico, ingenieriles y científicos en la construcción de un reactor de fusión nuclear, como, por ejemplo, la resistencia de materiales a temperaturas tan altas (150 millones °C).

Los confinamientos convencionales como las paredes de una vasija, no son factibles debido a las altas temperaturas. Por este motivo se encuentra en desarrollo dos métodos de confinamiento para el desarrollo comercial de la fusión explicados en los dos siguientes puntos.

## **4.5.1 Fusión por Confinamiento Magnético (FCM)**



Está basado en confinar las partículas del combustible (deuterio, tritio) a través de un campo magnético; las partículas eléctricamente cargadas del plasma son atrapadas en un espacio reducido por la acción de un campo magnético. El dispositivo más desarrollado tiene forma toroidal y se denomina Tokamak.

Figura 36. Esquema de una planta de fusión nuclear. [65] En la figura 36, se muestra el esquema de un reactor de fusión nuclear, se comienza de un plasma de deuterio y tritio, que son los reactivos de la fusión nuclear, en el interior del reactor que se encuentra a temperaturas de cientos de millones de grados, con una presión elevada, mediante campos magnéticos.

Al estar el plasma a altas temperaturas, el combustible se disocia en partículas con cargas positivas y negativas, que por la aplicación de campos magnéticos se mueven a grandes velocidades siguiendo un movimiento helicoidal a lo largo de las líneas de campo.

#### ¿Sabías que?

Existe una gran abundancia de deuterio en el agua de la Tierra que se puede obtener mediante un proceso de enriquecimiento

### 4.5.2 Fusión por Confinamiento Inercial (FCI)

Consiste en crear un medio tan denso que las partículas no tengan casi ninguna posibilidad de escapar sin chocar entre sí, es decir, el confinamiento inercial trata de fusionar los núcleos tan rápido como sea posible para que no tengan tiempo de dispersarse. Para ello se impacta una pequeña esfera compuesta por deuterio y tritio por un haz de láser provocando su implosión. Así, se hace cientos de veces más densa que en su estado sólido normal permitiendo que se produzca la reacción de



Figura 37. Esfera de tritio – deuterio. [41]

fusión. Actualmente hay reactores de investigación con el objetivo de producir energía a través de este proceso.

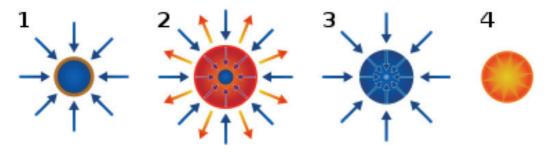


Figura 38. Proceso de implosión. [41]

Para comenzar con la fusión se lleva a cabo el proceso de implosión, mostrado en la figura 38 liberando la energía de un capsula de combustible de fusión. El proceso es: [41]

- 1. El rayo láser calienta rápidamente la superficie del objetivo que va generando plasma a su alrededor.
- 2. El objetivo es comprimido, esto se debe a la expulsión del material que lo rodeaba en su superficie.
- 3. Se produce la implosión de la micro cápsula, alcanzando a obtener una densidad de 20 veces a la del plomo y hace ignición a 100 000 000 °C.
- 4. La reacción termonuclear se distribuye por el combustible, provocando una salida de varias veces la energía entrante, después se generará un efecto parecido al de una supernova.

## 4.6 Aplicaciones no eléctricas de energía nuclear

Las aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear pueden aportar soluciones sostenibles a una serie de problemas que llegarán a afrontar las generaciones futuras. Entre las aplicaciones no eléctricas está la desalación de agua de mar, la calefacción urbana. [42]

#### Desalación nuclear

Consiste en la producción de agua potable a partir de agua de mar en una instalación donde el reactor nuclear es utilizado para el proceso de desalación. Esta instalación puede dedicarse exclusivamente a la producción de agua potable. La desalación es un proceso térmico mediante el cual se separa el agua de las sales mediante el uso de energía térmica o eléctrica.

La desalación puede entenderse como un proceso por el cual se reduce la salinidad del agua hasta un nivel en que pueda ser utilizable. Este proceso maneja tres flujos:

- · Agua de mar o salina a ser tratada (alimentación).
- · Agua de baja concentración en sal (producto).
- · Agua rechazada conteniendo alta concentración de sales (salmuera).

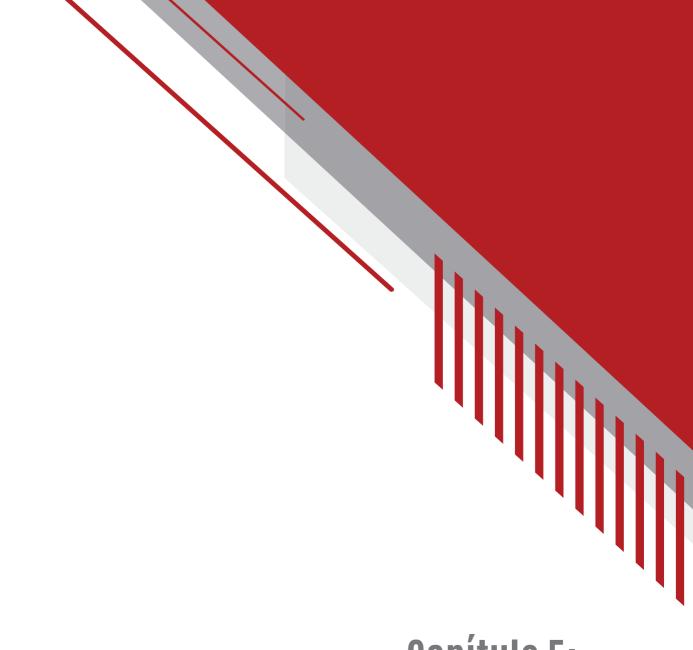
Para elegir un proceso de desalación es fundamental determinar la calidad del agua de alimentación aportada al proceso de desalación

#### Calefacción urbana

Una de las aplicaciones del calor generado por los reactores nucleares es la calefacción urbana. El empleo del calor de baja temperatura y del calor residual de las centrales nucleares puede ser un paso hacia el aprovechamiento más racional de los recursos energéticos. La temperatura relativamente baja del calor residual de las centrales nucleares hace que sus aplicaciones sean limitadas, siendo la más importante la calefacción de viviendas. La utilización de grandes fuentes térmicas, como los reactores de potencia, con fines de calefacción, tiene como meta un sistema para dar calor a grandes zonas urbanas, con una extensa red de distribución. [43]

## **Actividades**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Describa los principales componentes de un reactor nuclear	
Mencione 3 aplicaciones no eléctricas de los reactores nucleares	
Describa el proyecto ITER.	



# Capítulo 5:

Protección Radiológica y Salvaguardias

## **Actividades de Inicio**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Observe el video https://www. dailymotion.com/video/x7a9ce, acerca de la historia de los rayos X y realice un resumen	
Describa cuales son los efectos de rayos x y gamma	

#### 5. Introducción

A raíz de los incidentes ocasionados por las explosiones nucleares durante la Segunda Guerra Mundial, surge la necesidad de reformular el uso de la tecnología nuclear para fines pacíficos. A partir del discurso "Átomos para la Paz" del Presidente Eisenhower de los EE.UU. ante la Asamblea General de las Naciones Unidas, el 8 de diciembre de 1953, bajo este contexto se potencia la cooperación y transferencia tecnológica que hacen posible el uso de estos conocimientos para contribuir a la salud y diversas áreas generando prosperidad alrededor del mundo. Sin embargo, la tecnología nuclear también puede utilizarse para el desarrollo de armas nucleares, motivo por el cual nacen organismos reguladores del uso de este tipo de tecnología, de los cuales los principales son los siguientes:

- · La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).
- El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

## 5.1 Comisión Internacional De Protección Radiológica (ICRP)

La Comisión Internacional De Protección Radiológica, ICRP por sus siglas en inglés, tuvo origen en el II Congreso Internacional de Radiología (Estocolmo, 1928), congreso en el que se creó el Comité Internacional para la Protección contra los Rayos X y del Radio; formado por destacados científicos, encargados de realizar recomendaciones para la protección contra los rayos X y del Radio.

Se conforma una Comisión con un máximo de 12 miembros, una Secretaría Científica para la coordinación de la Comisión y 4 comités permanentes, que cubren las siguientes áreas:

- Efectos de las radiaciones, en especial, los riesgos de cáncer a bajas dosis.
- Límites derivados, modelos dosimétricos y el hombre de referencia.
- Protección en medicina, uso de radiofármacos, lesiones radioinducidas.
- Aplicación de las recomendaciones, dosis crónicas y residuos radiactivos. [44]

## **5.2** El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) o IAEA por sus siglas en inglés (International Atomic Energy Agency), es creado en 1957 por las Naciones Unidas, con sede en Viena. El origen del organismo se remonta al discurso que el presidente estadounidense Eisenhower realiza en 1953: "Átomos para la Paz" [45], este organismo

responde ante la Asamblea General y el Comité de Seguridad de las Naciones Unidas, su misión principal es fomentar la cooperación científica y técnica en el ámbito del uso de tecnología nuclear con fines pacíficos a nivel mundial. Primordialmente implementa un conjunto de medidas técnicas, llamadas "salvaguardias", para verificar el compromiso legal de un Estado de no desviar material nuclear de actividades nucleares pacíficas hacia el desarrollo de armas nucleares u otros dispositivos explosivos nucleares de uso bélico.

Para lograr esta misión, el OIEA se basa en tres áreas de trabajo: 1) Seguridad tecnológica y física, 2) Ciencia y tecnología y 3) Salvaguardias. El OIEA trabaja en conjunto con las autoridades reguladoras de cada país, por lo que contribuye en la revisión de normas y otros trabajos de cooperación [46].

Los órganos de gobernación del OIEA son los siguientes: La Conferencia General y La Junta de Gobernadores.

Los cinco departamentos técnicos son: 1) Ciencia y Aplicaciones Nucleares; 2) Cooperación Técnica; 3) Salvaguardias; 4) Energía Nuclear y 5) Seguridad Nuclear y Física [47].

El OIEA cuenta con normas de seguridad que comprenden nociones fundamentales de seguridad, requisitos y guías que ellos aplican para las buenas prácticas, y recomiendan que todos los países involucrados en el tema utilicen estas normas.

## 5.3 Salvaguardias

Se conforman acuerdos de salvaguardias entre los Estados miembros y el OIEA, para lograr el objetivo principal que es la No Proliferación de Armas Nucleares.

Los Estados no poseedores de armas nucleares (ENPAN), que forman parte del Tratado sobre la No Proliferación de armas nucleares (TNP), tienen la obligación de concertar un Acuerdo Salvaguardias Amplias (ASA) con el OIEA, este organismo ejerce las bases de los ASA en relación con el TNP a través de los fundamentos de estructura y contenido de los acuerdos entre los Estados y el Organismo requeridos en relación con el Tratado sobre la **No Proliferación de las Armas Nucleares.** 

De acuerdo a un ASA, cada Estado se compromete a cumplir las salvaguardias del OIEA, con relación a todos los materiales y las actividades relacionadas con tecnología nuclear con fines pacíficos desarrolladas en su territorio. La obligación del OIEA es hacer que se cumplan de la manera más efectiva estas salvaguardias, de tal forma que no se haga uso de materiales empleados en la fabricación de armas nucleares o de dispositivos nucleares explosivos [48].

Cada Estado de acuerdo a sus necesidades puede concertar un protocolo a su Acuerdo de Salvaguardias Adiciona (ASA). Para ello el OIEA ha desarrollado documentos de modelo de protocolo adicional al acuerdo entre Estados y el OIEA, que son base para desarrollar estos protocolos adicionales.

La creación del OIEA permitió a este Organismo ser el ente rector del régimen internacional de la seguridad nuclear y



radiológica que el mundo necesitaba [49]. Es conveniente aclarar, no obstante, que el OIEA no persigue ser, ni nunca ha sido un "organismo regulador internacional", sino que su papel se limita a elaborar recomendaciones, esto se resume en: normas de referencia sobre seguridad, asistencia a los organismos reguladores nacionales, y ejercer los derechos de inspección contenidos en los acuerdos de salvaguardias firmados por los Estados.

El OIEA tiene tres objetivos de salvaguardias genéricos que se aplican a todos los Estados con ASA:

- a) Detectar toda desviación de materiales nucleares declarados en instalaciones y Lugar Fuera De La Instalación LFI, en el que se utilizan habitualmente materiales nucleares en cantidades inferiores a un kilogramo efectivo.
- b) Detectar toda producción o procesamiento no declarados de materiales nucleares en instalaciones o LFI declarados.
- c) Detectar todo material o actividad nuclear no declarado en el Estado en su conjunto [50].

## 5.4 Protección Radiológica

En 1915 la Sociedad Británica Roentgen adoptó la resolución de proteger a la población, personal de la sobreexposición a los rayos X, este fue seguramente el primer esfuerzo organizado para asegurar protección radiológica.

La protección radiológica es una disciplina científico-técnica que tiene como finalidad la protección de las personas y del medio ambiente frente a los riesgos derivados de la utilización de las radiaciones naturales, ya sean procedentes de fuentes radiactivas o bien de generadores de radiaciones ionizantes.



## 5.4.1 Objetivos de la Protección Radiológica

Los objetivos de la protección radiológica son:

- Evitar que las fuentes de radiación causen efectos biológicos determinísticos no deseados.
- Reducir la probabilidad de ocurrencia de efectos biológicos estocásticos:
  - Efectos individuales
  - Efectos colectivos

#### Personas a proteger:

- Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE).
- Miembros del público.
- Pacientes expuestos a tratamientos médicos.

**Exposición Ocupacional:** Es toda exposición a la radiación de los trabajadores, durante el desarrollo de su trabajo, sin tomar en cuenta las exposiciones excluidas del ámbito de las Normas y de las exposiciones causadas por las prácticas o fuentes exentas con arreglo a las Normas.

**Exposición del Público:** Es toda aquella exposición a la radiación de miembros del público, a causa de fuentes de radiación, excluidas cualquier exposición ocupacional o médica y la exposición a la radiación natural de fondo normal en la zona, pero incluida la exposición debida a las fuentes y prácticas autorizadas y a las situaciones de intervención.

**Exposición Médica:** Es toda exposición a la radiación, de los pacientes en el curso de su propio diagnóstico o tratamiento, médico o dental; exposición de forma consiente por personas que no estén expuestas profesionalmente mientras ayudan voluntariamente

a procurar alivio y bienestar a pacientes; asimismo, la exposición por voluntarios en el curso de un programa de investigación biomédica que implique su exposición.

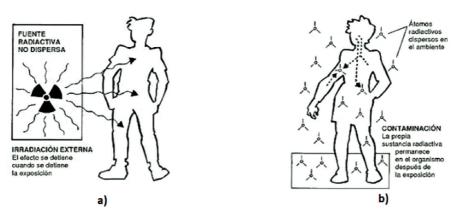


Figura 39. Modalidades de exposición. a) Irradiación externa, b) Irradiación interna (contaminación e incorporación)

## 5.4.2 Principios de la Protección Radiológica

Para cumplir el objetivo fundamental de la Protección Radiológica existen tres principios básicos en los que se basan las recomendaciones de la ICRP son los siguientes:

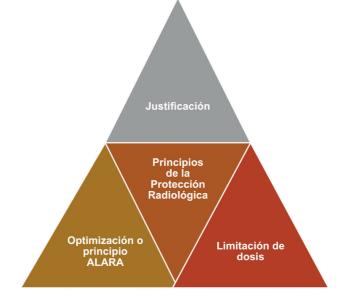


Figura 40. Principios de la Protección Radiológica. Elaboración propia.

## 5.4.2.1 Justificación

Ninguna práctica con radiaciones ionizantes debe ser autorizada si no existen evidencias de que la misma producirá, para el individuo o la sociedad, beneficios que compensen el posible detrimento que puedan generar.

### 5.4.2.2 Optimización o principio ALARA

El principio ALARA por sus siglas en ingles de la expresión "As Low As Reasonably Achievable" que significa "tan bajo como sea razonablemente posible", implica que todas las exposiciones a la radiación tal cual se indica, deben mantenerse a niveles tan bajos como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores sociales y económicos, para reducir el detrimento colectivo asociado a una determinada práctica.

#### 5.4.2.3 Limitación de dosis

Las dosis de radiación recibidas por las personas no deben superar los límites establecidos en la legislación vigente, para:

- Impedir la ocurrencia de efectos biológicos determinísticos
  - Umbrales de dosis
- Limitar la probabilidad de los efectos biológicos estocásticos
  - · Aceptar un cierto orden de magnitud del detrimento

Tabla 7. Límite de dosis anual.

Dosis	Órgano	Órgano Trabajador Ocupacionalmente Expuesto (TOE)	Público
Dosis efectiva	Cuerpo entero	20 mSv*	1 mSv
Dosis equivalente	Cristalino	150 mSV	15 mSv
	Piel	500 mSv	50 mSv
	Manos y pies	500 mSv	

<sup>\* 100</sup> mSv en 5 años en cuerpo entero, 20 mSv al año con tolerancia hasta 50 mSv.

No se debe exceder el límite de dosis, siempre se debe estar por debajo de estos valores y para lograrlo se debe tener una optimización de todas las prácticas, como se observa en la figura 41 valores por encima del límite de dosis se consideran inaceptables, valores por debajo del límite son considerados tolerables.

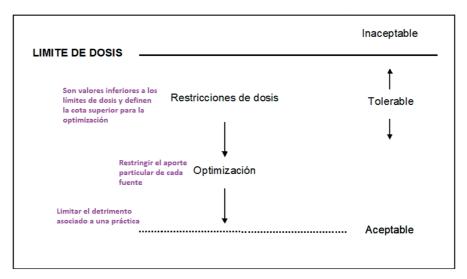


Figura 41. Límite de dosis. Elaboración propia.

#### 5.4.3 Herramientas básicas de la Protección Radiológica

Distancia, tiempo y blindaje son las herramientas básicas de la protección radiológica y están basadas en las características físicas de las emisiones, son efectivos para el control de la exposición externa, como regla general se deben realizar las tareas en el menor tiempo posible, a la mayor distancia e interponiendo algún material blindado adecuado para cada emisión.

Cada uno de estos tres factores debes ser optimizados para una protección efectiva.



Figura 42. Herramientas de protección radiológica: Distancia, tiempo y blindaje. [51]

#### 5.4.3.1 Distancia

A mayor distancia de la fuente, menor intensidad de radiación por unidad de superficie, la intensidad de un campo radiante disminuye con el cuadrado de la distancia, es decir, que, con solo alejarse de la fuente, se disminuye considerablemente la dosis recibida.

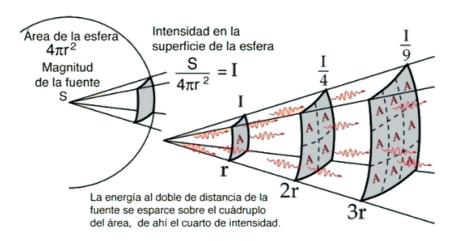


Figura 43. Intensidad de la radiación con el cuadrado de la distancia.

#### 5.4.3.2 Tiempo

La dosis recibida es directamente proporcional al tiempo de exposición, por lo tanto, limitar el tiempo de trabajo es una forma de recibir menos dosis, pero implica planificación y entrenamiento. Las tareas deben ser organizadas de tal forma de permanecer el tiempo mínimo en los campos de exposición. Cuando las tasas de dosis sean muy altas, para situaciones excepcionales, se pueden realizar operaciones cronometradas y realizadas por más de una persona, y de esa manera reducir el tiempo de exposición.

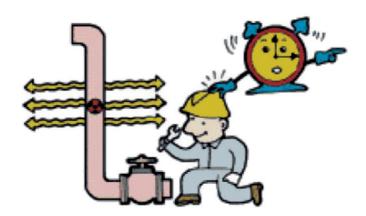


Figura 44. Menos tiempo de trabajo, menor exposición a la radiación.

#### **5.4.3.3 Blindaje**

Es una herramienta práctica de radioprotección. El blindaje es simplemente un objeto utilizado para reducir la cantidad de radiación. En el caso de las partículas  $\alpha$  ó  $\beta$  se requiere muy poco espesor de blindaje para detener las emisiones. La práctica general

es usar blindaje suficiente para absorber completamente las partículas  $\alpha$  y  $\beta$ , sin embargo, para el caso de la radiación  $\chi$  ó  $\gamma$ , es distinto ya que para estos dos tipos de emisión se utiliza blindaje para reducir la cantidad de radiación. Este procedimiento sirve para realizar las tareas de forma segura, pero hay que verificar su cumplimiento, incluso desde el diseño de la instalación.

Como no siempre es posible que la combinación entre tiempo de exposición y distancia den lugar a una dosis admisible, la protección se consigue con el uso de un blindaje contra la radiación.

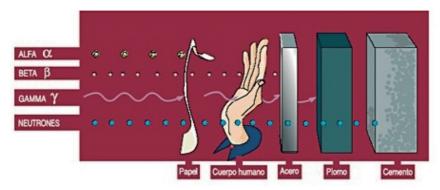


Figura 45. Poder penetrante de los distintos tipos de radiaciones. [52]

- En la figura 45 podemos observar que las radiaciones alfa son menos penetrantes, que las demás, pero son más dañinas ya que tienen un alto LET (Transferencia Lineal de Energía = cantidad de energía transferida por unidad de distancia por una partícula cargada), pueden ser absorbidas fácilmente por todos los cuerpos, bastan para ello unos centímetros de aire o una hoja de papel, por lo que la protección frente a la radiación alfa no necesita ningún blindaje, con tener una distancia prudente sería suficiente.
- La radiación beta, es más penetrante que la alfa, pero tiene un bajo LET, es decir es menos dañina que la alfa, sin embargo, se absorbe también con facilidad, bastando para ello algunos metros de aire, unos milímetros de agua, o un sólido delgado.
- La radiación gamma es muy penetrante, porque en su trayectoria no tiene interacción por cargas, así que, para lograr una protección adecuada, son necesarios blindajes de un material de alta densidad, como por ejemplo el plomo o el hormigón, materiales menos densos requieren mayor espesor para lograr los mismos resultados.
- Los neutrones son muy penetrantes, no son absorbidos por el aire, pero sí por el agua, boro y cadmio, que por su naturaleza son buenos absorbentes de neutrones.

#### 5.5 La protección Radiológica en la actualidad

En la actualidad la protección radiológica tiene un carácter más amplio que los tres principios antes mencionados, para asegurar el cuidado a las personas, el medio ambiente y las generaciones futuras.

Para lograr esta protección de los riesgos asociados a la radiación ya sea en circunstancias normales, en caso de incidentes o accidentes, se basa en los siguientes 10 principios:

**Principio 1:** Responsabilidad de la seguridad

La responsabilidad primordial de la seguridad debe recaer en la persona u organización a cargo de las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones.

**Principio 2:** Función del gobierno.

Debe establecerse y mantenerse un marco de seguridad jurídico y gubernamental eficaz, que incluya un órgano regulador independiente.

**Principio 3:** Liderazgo y gestión en pro de la seguridad.

Deben establecerse y mantenerse un liderazgo y una gestión que promuevan eficazmente la seguridad en las organizaciones que se ocupan de los riesgos asociados a las radiaciones, y en las instalaciones y actividades que los generan.

**Principio 4:** Justificación de las instalaciones y actividades.

Las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones deben reportar un beneficio en general.

**Principio 5:** Optimización de la protección.

La protección debe optimizarse para proporcionar el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar.

**Principio 6:** Limitación de los riesgos para las personas.

Las medidas de control de los riesgos asociados a las radiaciones deben garantizar que ninguna persona se vea expuesta a un riesgo de daños inaceptable.

Deben protegerse contra los riesgos asociados Principio 7: Protección de las a las radiaciones las personas y el medio generaciones presentes y futuras. ambiente del presente y del futuro. Deben desplegarse todos los esfuerzos posibles para prevenir los accidentes Principio 8: Prevención de accidentes. nucleares o radiológicos y para mitigar sus consecuencias. Deben adoptarse disposiciones de Principio 9: Preparación y preparación y respuesta para casos de respuesta en casos de emergencia. incidentes nucleares o radiológicos. Las medidas protectoras para reducir los **Principio 10:** Medidas protectoras para riesgos asociados a las radiaciones existentes reducir los riesgos asociados a las radiaciones o no reglamentados deben justificarse y existentes o no reglamentados. optimizarse.

### 5.6 Regulación de las aplicaciones nucleares en Bolivia

En Bolivia el órgano regulador encargado de las regulaciones de las aplicaciones nucleares en el país es la Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear (AETN), a través de su Dirección de Tecnología Nuclear (DTN), cuyo objetivo es encargarse de la función de regulación y fiscalización de la actividad nuclear en todo lo referente a seguridad tecnológica, seguridad física y de salvaguardias de las instalaciones radiológicas y nucleares, con el objetivo de prevenir los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes sobre las personas y el medio ambiente, esto dentro del marco de la Ley N°1205 de 1° de agosto de 2019 "Ley para las Aplicaciones Pacíficas de la Tecnología Nuclear".

# 5.6.1 Atribuciones y responsabilidades de la AETN

De acuerdo a lo establecido en la Ley N°1205 de 1° de agosto de 2019 "Ley para las Aplicaciones Pacíficas de la Tecnología Nuclear", las principales atribuciones de la Autoridad Reguladora son establecer y vigilar la aplicación de normas y reglamentos de seguridad nuclear, radiológica, física y las salvaguardias, para el funcionamiento de las

instalaciones radiológicas y nucleares, así como el uso, manejo, transporte y posesión del material nuclear y fuentes de radiación, para que se lleven a cabo con la máxima seguridad de los usuarios directos y del público en general.

En virtud de tales atribuciones, la AETN realiza diversas actividades, entre las que se incluyen:

- Elaboración de Normas y Reglamentos;
- Licenciamiento de instalaciones radiológicas y nucleares;
- Evaluación de Programas de Garantía de Calidad y de Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental;
- Realización de auditorías, supervisiones, visitas técnicas, inspecciones y verificaciones a instalaciones radiológicas y nucleares;
- Realización de inspecciones y auditorías relativas a seguridad física y salvaguardias;
- Evaluación y licenciamiento de operadores de instalaciones radiológicas y nucleares;
- Expedición de licencias y permisos para la importación, exportación, devolución, uso, transporte y almacenamiento de material radiactivo;
- Expedición de licencias y permisos para la importación, exportación y uso de equipos generadores de radiación ionizante;
- Evaluación y licenciamiento del almacenamiento temporal para desechos radiactivos;
- Participación en convenios de asistencia técnica y cooperación internacional;
- Ejecución de proyectos de investigación y desarrollo de manera independiente o por asociación con otros organismos reguladores o centros de investigación.

La DTN tiene como propósito apoyar a la Máxima Autoridad Ejecutiva (MAE) de la AETN en proponer la regulación, autorizar, fiscalizar y sancionar en materias relacionadas con las actividades nucleares y radiológicas del país.

Para cumplir con sus objetivos, la DTN tiene bajo su dependencia las funciones de: Regulación, Evaluación y Fiscalización.

# a) REGULACIÓN

Su función central es proponer, para aprobación, reglamentos legales, disposiciones reglamentarias, normativas y guías técnicas sobre la seguridad nuclear, radiológica, física, salvaguardias y desempeño del personal asociado a instalaciones nucleares y radiológicas del país.

### b) EVALUACIÓN

La autoridad debe:

Establecer criterios de seguridad que permitan reducir, a niveles aceptables, los riesgos potenciales de las radiaciones ionizantes.

Evaluar las solicitudes para el emplazamiento, construcción, puesta en servicio, operación, clausura, desmantelamiento u otra actividad pertinente a las instalaciones radiológicas y nucleares.

Evaluar las solicitudes de autorizaciones para la importación, exportación, transporte y transferencia de materiales nucleares y radiactivos.

Evaluar las solicitudes para el desempeño de personal que opere en las instalaciones radiológicas y nucleares.

## c) FISCALIZACIÓN

La autoridad debe verificar el cumplimiento de las disposiciones legales, reglamentarias y normativas sobre seguridad tecnológica, física y salvaguardias, establecidas como límites y condiciones de operación en las autorizaciones emitidas para cada una de las actividades radiológicas y nucleares de primera categoría que opere en el país [53].

# **Actividad Sugerida**

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Mencione ejemplos distintos a los ya mencionados en el capítulo, sobre qué tipo de material se puede utilizar para blindar los diferentes tipos de radiación alfa, beta, gamma y neutrones.	
Indique si se podría tener algún tipo de riesgos tras la ingesta de un material que emita radiación alfa.	

# Consignas de Aplicación

Tomando en cuenta el área de especialidad de saberes y conocimientos, redacte un ensayo sobre los contenidos abordados, que exprese la reflexión sobre la diversidad de aplicaciones que tiene la energía nuclear con fines pacíficos. Tome en cuenta las siguientes indicaciones:

- 1. El ensayo debe contener una Introducción (uno a dos párrafos), desarrollo (una hasta dos páginas), conclusión (de dos a tres párrafos del desarrollo).
- 2. Para el desarrollo se sugiere seleccionar una aplicación de la tecnología nuclear, donde se puede iniciar por describir en qué consiste, posteriormente mostrar los efectos y/o cuestiones de seguridad, para finalmente presentar la posición del autor ante la temática seleccionada.

# Glosario

**Cobalto – 60 (60Co):** Isótopo radiactivo sintético del cobalto, con un periodo de semidesintegración de 5,27 años.

**Fármaco:** Sinónimo de medicamento.

**Polímero:** Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.

**Radiofármaco:** Son radioisótopos adheridos a moléculas biológicas que tienen la capacidad de actuar en órganos, tejidos o células concretos del cuerpo humano.

**Rads:** Plural del acrónimo dosis absorbida de radiación (del inglés radiation absorbed dose). Unidad de dosis absorbida de radiación ionizante en el sistema cegesimal, que equivale a la energía de 100 ergios por gramo de materia irradiada.

**Trazador:** Sustancia con propiedades atómicas o nucleares, físicas, químicas o biológicas que pueden ayudar a identificar, observar o vigilar el comportamiento de diversos procesos físicos, químicos o biológicos.

# Bibliografía

- 1. U. d. C. Rica, «Escuela de Física,» Física Medica , [En línea]. Available: https://www.fisica.ucr.ac.cr/?q=es/node/79.
- 2. O. I. d. E. Atómica, El físico médico.
- 3. «Fisica medica en la medicina,» [En línea]. Available: https://www.elhospital.com/temas/La-importancia-de-la-fisica-medica-en-la-atencion-hospitalaria+8034866?pagina=2.
- 4. S. B. A. B. D. Andisco, «Radioprotección,» Facultad de Medicina, Universidad de Buenos Aires, [En línea]. Available: https://www.elsevier.es/es-revista-revista-argentina-radiologia-383-articulo-dosimetria-radiologia-S004876191400012X.
- 5. F. N. -. I. n. española, «Medicina nuclear,» [En línea]. Available: https://www.foronuclear. org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-aplicaciones-de-la-tecnologia-nuclear/como-funciona-la-medicina-nuclear/.
- 6. S. e. d. radiofarmacia, «Concepto de Radiofarmacia,» [En línea]. Available: https://radiofarmacia.org/sobre-la-serfa/.
- 7. B. S. &. C. G. Lamm, «Veinte años de colaboración en actividades de I y D en rpo del desarrollo agrícola y la produccion de alimentos,» OIEA Boletin, vol. 26, nº 2, pp. 3-8, 1984.
- 8. webnode, «Ingenieria Quimica UNAM,» 2015. [En línea]. Available: https://ingenieria-quimica9.webnode.es/products/tipos-de-radiaciones-ionizantes-/. [Último acceso: junio 2021].
- 9. Universidad Cooperativa de Colombia, «https://www.ucc.edu.co/,» 2018. [En línea]. Available: https://www.ucc.edu.co/prensa/2016/Paginas/la-importancia-de-cuantificar-las-radiaciones-ionizantes-para-prevenir-sus-efectos.aspx. [Último acceso: julio 2021].
- 10. OIEA, «La irradiación de alimentos en latinoamérica,» de Principios de la irradiación de alimentos, Lima-Perú, 1985.
- 11. OIEA, «Irradiación de alimentos: ¿Realidad o mito?,» Boletín del OIEA, vol. 2, pp. 44-48, 1990.
- 12. Cooperativa Comunicar Ltda, «El diario del dentro del país,» 11 julio 2017. [En línea].

- Available: https://www.eldiariodelcentrodelpais.com/2017/07/11/llegan-nuevos-alimentos-que-usan-radiacion-para-durar-mas/. [Último acceso: mayo 2021].
- 13. Organización mundial de la salud FAO, Etiquetado de los Alimentos, Roma: Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica division de comunicación, 2007.
- 14. IBCE, «https://ibce.org.bo/,» 30 mayo 2016. [En línea]. Available: https://ibce.org.bo/principales-noticias-bolivia/noticias-nacionales-detalle. php?id=65805&idPeriodico=5&fecha=2016-05-30. [Último acceso: marzo 2019].
- 15. Organización Mundial de la Salud, Inocuidad e idoneidad nutricional de los alimentos irradiados, Ginebra: OMS, 1995.
- 16. THE FOOD TECH ©, «thefoodtech.com,» 2021. [En línea]. Available: https://thefoodtech.com/historico/cuidando-la-inocuidad-de-ingredientes-secos/. [Último acceso: agosto 2021].
- 17. E. Adem, «Irradiación de alimentos,» de Desinfestación de granos por irradiación, México D.F., 1990.
- 18. Ciencias y cosas, «https://cienciasycosas.com/,» 2015. [En línea]. Available: https://cienciasycosas.com/2015/04/26/las-patatas-dulces-son-transgenicos-naturales/. [Último acceso: julio 2021].
- 19. Biotecnología SI, «https://biotecnologiasi.tumblr.com/,» 2015. [En línea]. Available: https://biotecnologiasi.tumblr.com/post/140418487581/la-batata-es-un-alimento-transg%C3%A9nico-natural. [Último acceso: agosto 2021].
- 20. A. Vilanova Perez, «Colección de genotipos de batata de sanidad controlada del Instituto de Patología Vegetal,» Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 45, nº 2, pp. 304-3013, 2019.
- 21. I. A. E. A. (IAEA)., «https://mvd.iaea.org/,» 2021. [En línea]. Available: https://mvd.iaea.org/#!Search. [Último acceso: septiembre 2021].
- 22. Foro de la Industria nuclear española, «www.foronuclear.org,» 2021. [En línea]. Available: https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/siete-ejemplos-del-uso-de-la-tecnologia-nuclear-para-mejorar-la-alimentacion-y-la-agricultura/. [Último acceso: septiembre 2021].
- 23. Foro de la inductria nuclear española, «Rincón educativo Energía y Medio Ambiente,» 2021. [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/e\_aplicaciones agroalimentarias.html. [Último acceso: septiembre 2021].

- 24. E. R. Basantes, «Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola, absorción y recuperación de fertilizantes en cultivos,» Revista CIENCIA, vol. 17, nº 1, pp. 137-145, 2015.
- 25. u-238, «http://u-238.com.ar/,» 28 diciembre 2016. [En línea]. Available: http://u-238.com.ar/la-tecnica-del-insecto-esteril-una-forma-combatir-la-plaga-aedes/. [Último acceso: agosto 2021].
- 26. M. V. Terán, «https://www.iaea.org/,» 2021. [En línea]. Available: https://www.iaea.org/sites/default/files/21/03/todo-lo-que-usted-debe-saber-del-gbg.pdf. [Último acceso: agosto 2021].
- 27. «fefefe,» [En línea].
- 28. M. Yusef, «Una mirada a la técnica del insecto estéril para control de plagas,» Hojitas de conocimiento, vol. 3, pp. 357-358, 2020.
- 29. Educativo, Rincon, «Rincon Educativo,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/b\_aplicaciones\_industriales.html. [Último acceso: 28 12 2020].
- 30. Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, «Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares,» 2016. [En línea]. Available: https://www.ipen.br/portal\_esp/portal/interna. php?secao\_id=109&campo=81. [Último acceso: 28 12 2020].
- 31. e. a. J. Rolf, «Nuclear techniques in mineral exploratio, extraction and processing,» Nuclear techniques for peaceful development, pp. 28-32, 1987.
- 32. C. d. s. nuclear, «La energía nuclear,» [En línea]. Available: https://www.csn.es/la-energia-nuclear#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20nuclear%20es%20la,el%20n%C3%BAcleo%20de%20un%20%C3%A1tomo.&text=As%C3%AD%20es%20como%20el%20sol,fisi%C3%B3n%20nuclear%20para%20producir%20electricidad..
- 33. F. d. l. l. N. Española, «Fisión Nuclear,» [En línea]. Available: https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-es-la-fision-nuclear/.
- 34. Foro de la industria nuclear española, «Reactor nuclear y los elementos que lo constituyen,» [En línea]. Available: https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/que-es-un-reactor-nuclear-y-que-elementos-lo-constituyen/.
- 35. Universidad Catolica de Chile, «Ciclo de combustible,» [En línea]. Available: https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno09/nuclear/Ciclo\_del\_combustible.html.

- 36. L. Vanguardia, «¿Como funciona una central nuclear?,» [En línea]. Available: https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20200604/481595147110/central-nuclear-funcionamiento.html.
- 37. TECNATOM, «¿Cómo funciona una central nuclear?,» [En línea]. Available: https://www.tecnatom.es/blog/como-funciona-una-central-nuclear/.
- 38. c. n. d. e. atómica, «Reactores de investigación,» [En línea]. Available: https://www.cnea.gob.ar/campus/mod/page/view.php?id=383.
- 39. C. d. s. nuclear, «Consejo de seguridad nuclear Fusión nuclear,» 2021. [En línea]. Available: https://www.csn.es/fusion-nuclear. [Último acceso: 15 09 2021].
- 40. «Laboratorio químico,» ¿Qué es la Fusión Nuclear?, [En línea]. Available: https://www.tplaboratorioquimico.com/quimica-general/quimica-nuclear/la-fusion-nuclear.html. [Último acceso: 15 09 2021].
- 41. W. -. e. libre, «Wikipedia enciclopedia libre,» octubre 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Confinamiento\_inercial.
- 42. O. I. d. E. Atómica, «Organismo Internacional de Energía Atómica,» Aplicaciones no eléctricas, [En línea]. Available: https://www.iaea.org/es/temas/aplicaciones-no-electricas.
- 43. OIEA, «Calor nuclear para fines industriales y calefacción urbana,» [En línea]. Available: https://www.iaea.org/sites/default/files/16605003337\_es.pdf. [Último acceso: 16 09 2021].
- 44. SEPR y APCNEAN, Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, Madrid, España: Senda Editorial S.A., 2007.
- 45. Organismo Internacional de Energía Atómica, «https://www.iaea.org/,» 1998–2021 OIEA. [En línea]. Available: https://www.iaea.org/es/el-oiea/historia. [Último acceso: septiembre 2021].
- 46. c. d. S. Nuclear, «https://www.csn.es/,» [En línea]. Available: https://www.csn.es/organismos-nucleares-internacionales/oiea. [Último acceso: mayo 2021].
- 47. O. I. d. E. Atómica, «https://www.iaea.org/,» 1998–2021. [En línea]. Available: https://www.iaea.org/es/el-oiea/estructura-organica. [Último acceso: septiembre 2021].
- 48. O. I. d. E. Atómica, «Salvaguardias del OIEA para evitar la proliferación de las armas nucleares,» IAEA Bulletin, pp. 1-19, 2016.
- 49. O. I. d. E. Atómica, Preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica, Viena: Sección Editorial del OIEA, 2018.

- 50. O. I. d. E. Atómica, Orientaciones para los Estados que aplican acuerdos de salvaguardias amplias y protocolos adicionales, Viena: Sección Editorial Organismo Internacional de Energía Atómica, 2015.
- 51. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, «https://espanol.epa.gov/,» junio 2021. [En línea]. Available: https://espanol.epa.gov/espanol/como-protegerse-de-laradiacion. [Último acceso: agosto 2021].
- 52. S. Nuclenor, «https://www.nuclenor.org/,» 2021. [En línea]. Available: https://www.nuclenor.org/aula/222\_07/capitulo5.htm. [Último acceso: julio 2021].
- 53. A. d. F. d. E. y. T. N. (AETN), «https://www.aetn.gob.bo/,» 2014-2020. [En línea]. Available: https://www.aetn.gob.bo/web/main?mid=1&cid=174. [Último acceso: agosto 2021].
- 54. Y. física, «Fisica médica,» [En línea]. Available: https://yessifisica.wordpress. com/2017/10/06/primera-entrada-del-blog/.
- 55. J. Casajus, «Los rayos X,» [En línea]. Available: https://pt.slideshare.net/JlCasajus/los-rayos-x-joel/3?smtNoRedir=1.
- 56. S. I. E. M. D. R. E. S. &. M. C. Ferlay J, « Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer,» [En línea]. Available: https://www.meditip.lat/salud-de-la-a-z/cancer/cancer/.
- 57. q. e. f. n. t. d. atrás, «Inteligencia artificial es la ejor herramienta para detectar mutaciones genéticas,» proyecto GATK, [En línea]. Available: https://www.clubinfluencers.com/una-ia-la-mejor-herramienta-detectar-mutaciones-geneticas/.
- 58. E. n. Latinoamericana, «Las leyes que regulan el uso de la radiación para el tratamiento del cáncer: una oportunidad para la medicina,» ENULA, [En línea]. Available: http://enula. org/2020/04/las-leyes-que-regulan-el-uso-de-la-radiacion-para-el-tratamiento-del-cancer-una-oportunidad-para-la-medicina/.
- 59. G. Scan, «Gammagrafía Zaragoza,» [En línea]. Available: https://www.gammascan.es/gammagrafia-zaragoza/.
- 60. CTAmed, «La nueva tecnología en imagenología disponible con el sistema AnyScan® SPECT-CT-PET,» [En línea]. Available: http://ctamed.com/es/portafolio/mediso-equipos-clinicos/.
- 61. R. Verdes, «Fisión nuclear del uranio,» [En línea]. Available: https://www.renovablesverdes.
- 62. I. d. l. e. nuclear, «Reactor nuclear,» [En línea]. Available: https://www.importancia.org/energia-nuclear.php.

- 63. F. d. l. i. n. española, «Componentes de un reactor nuclear,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/7\_energa\_nuclear.html.
- 64. P. E. Cruz, «Gobierno de Mexico,» RReactor TRIGA Mark III. [En línea].
- 65. N. M. Fernández, FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO, Sociedad nuclear española, 2017.
- 66. e. a. G. Flores, «Insight into the Katari-Lago Menor Basin aquifer, Lake Titicaca-Bolivia, inferred from geophysical (TDEM), hydrogeological and geochemical data,» Journal of South American Earth Sciences, p. 21, 2020.
- 67. Chile Moss, «Chile Moss,» 2006. [En línea]. Available: http://www.chilemoss.com/sterilization.htm. [Último acceso: 28 12 2020].
- 68. Foro de la industria nuclear española, «Rincon educativo,» Aplicaciones industriales, [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/b\_aplicaciones\_industriales.html. [Último acceso: 15 09 2021].
- 69. FAO, «FAO,» [En línea]. Available: http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/1039646/. [Último acceso: julio 2021].
- 70. J. L. Durand, «Cambios inducidos por la radiación ionizante en diferentes sustratos,» de Efectos Biológicos de la radioación ionizante, BAriloche, 2000, p. 29.
- 71. Foro de la industri nuclear española, «¿Qué puede hacer la tecnología nuclear por el patrimonio artístico?,» [En línea]. Available: https://www.foronuclear.org/actualidad/noticias/que-puede-hacer-la-tecnologia-nuclear-por-el-patrimonio-artistico/. [Último acceso: 16 09 2021].
- 72. e. a. N. Naves, Escritor, Uso de las radiaciones ionizantes en medidores. [Performance]. Universidad Autonoma Metropolitana, 2018.
- 73. J. L. Durand, «Cambios Inducidos por la radiacion ionizante en difernetes sustratos,» Efectos biologicos de la radiacion ionizante. [En línea].
- 74. L. r. -. Bolivia, «www.la-razon.com,» 2020. [En línea]. Available: https://www.la-razon.com/financiero/2014/03/23/senapi-otorga-denominacion-de-origen-al-aji-chuquisaqueno-2/. [Último acceso: mayo 2021].
- 75. J. L. Durand, «Cambios inducidos por la radiación ionizante en diferentes sustratos,» de Efectos Biológicos de la radioación ionizante, BAriloche, 2000, p. 29.

- 76. J. G. Jimenez, «La tecnología nuclear en el mejoramiento de plantas,» Ciencia: La radiactividad al servicio del ser humano, 43-52 2004. [En línea].
- 77. J. G. Jiménez, «La tecnología nuclear en el mejoramiento de plantas,» Ciencia: La radiactividad al servicio del ser humano, pp. 43-52, 2004.
- 78. J. G. Jiménez, «La tecnología nuclear en el mejoramiento de plantas,» Ciencia: La radiactividad al servicio del ser humano, pp. 43-52, 2004.
- 79. Dreams time, «Dreams time,» [En línea]. Available: https://es.dreamstime.com/desarrollo-de-la-tecnolog%C3%ADa-nuclear-o-at%C3%B3mica-interacci%C3%B3n-diversos-estudios-ejemplo-isom%C3%A9trico-del-vector-image141032402. [Último acceso: 13 09 2021].
- 80. J. G. Jimenez, «La tecnología nuclear en el mejoramiento de plantas,» Ciencia: La radiactividad al servicio del ser humano, pp. 43-52, 2004.
- 81. J. L. Durand, «Cambios inducidos por la radiación ionizante en diferentes sustratos,» de Efectos biológicos de la radiación ionizante, Bariloche, 2000, p. 29.



#### MINISTERIO DE EDUCACIÓN

# 2021 año por la Recuperación del Derecho a la Educación





https://www.aben.gob.bo/

https://www.unefco.edu.bo/