



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



FUNDAMENTOS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR

TOMO 2



aplicaciones
en salud



aplicaciones
en la industria



aplicaciones
nucleares



ciclo del
combustible



centro de
investigaciones

Esta publicación fue elaborada por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear – ABEN y se enmarca en la constitución Política del Estado, en los 13 pilares de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 y en el Programa Nuclear Boliviano – PNB.

Primera edición, julio 2022



©AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

DIRECCIÓN GENERAL

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
Directora General Ejecutiva ABEN

ELABORACIÓN DE CONTENIDOS

Equipo técnico ABEN

REVISIÓN DE CONTENIDOS

Ing. Hortensia Jiménez Rivera

EDICIÓN DE TEXTOS

Ing. Sergio Fabian Fernandez Quiroga

DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN

Editorial del Estado Plurinacional de Bolivia

DEPÓSITO LEGAL: 4-1-325-2022 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA

PRESENTACIÓN

“Las tecnologías nucleares son un conjunto de soluciones de ingeniería que permiten utilizar las reacciones nucleares y la radiación ionizante en diversos campos como medicina, industria, agricultura, geología, educación, entre otros, aportando al desarrollo de la economía nacional de los países que las usan con fines pacíficos”. El área más destacada de sus aplicaciones son la energía nuclear y la medicina nuclear.

Bolivia, establece ejes estratégicos, resultados y acciones en el Plan de Desarrollo Económico Social (PDES), articulado con la Agenda Patriótica 2025, siendo uno de sus ámbitos, lograr la soberanía científica tecnológica con identidad propia, que busca “promover e invertir responsablemente en la investigación y desarrollo de tecnología nuclear que nos permita vivir bien”.

En este sentido, el gobierno nacional de Luis Arce Catacora, está desarrollando políticas, programas y proyectos de aplicaciones de la tecnología nuclear que permitan fortalecer y ampliar nuestra base productiva, fomentando la formación y especialización de profesionales, desarrollando conocimiento y constante entrenamiento de los recursos humanos bolivianos.

En ese sentido, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), a través de la implementación del Programa Nuclear Boliviano (PNB); presenta el texto “Fundamentos de Ciencia y Tecnología Nuclear” Tomo 2, teniendo como principal objetivo la difusión de las aplicaciones de la tecnología nuclear en diferentes áreas como: salud, medio ambiente, agricultura, energía y aplicaciones no eléctricas de reactores. Esperamos que este texto ahonde en el conocimiento de las bases fundamentales de la ciencia y tecnología nuclear y sea de utilidad para los bolivianos y las bolivianas que aspiran construir una Bolivia tecnológicamente de avanzada en América Latina.

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

Tabla de contenido

PREFACIO	1
1 CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA SALUD HUMANA	2
1.1 Radioactividad.....	2
1.1.1 Radiación ionizante.....	2
1.2 Producción de radioisótopos para la medicina	3
1.2.1 Producción en ciclotrones	3
1.2.2 Producción en reactores	3
1.3 Medicina Nuclear	4
1.3.1 Investigación	4
1.3.2 Diagnóstico	5
1.3.3 Técnicas terapéuticas	7
1.4 Radioterapia	9
1.4.1 Radioterapia Externa o Teleterapia	9
1.4.2 Radioterapia Interna o Braquiterapia	12
1.4.3 Radioterapia Intraoperatoria	14
1.5 Otras aplicaciones de la tecnología nuclear para la salud humana	15
1.5.1 Técnica del insecto estéril para combatir al Zika y Chinkunguya	15
1.5.2 Radioinmunoanálisis	15
1.5.3 Técnicas nucleares para las pruebas RT-PCR	16
2 NUESTRO ENTORNO	17
2.1 Medio Ambiente	17
2.2 Contaminación ambiental	17
2.2.1 Contaminación atmosférica	17
2.2.2 Beneficios de la energía nuclear	18
2.2.3 Tecnología nuclear para luchar contra la contaminación atmosférica	20

2.2.4	Contaminación del suelo.....	21
2.2.5	Aplicaciones de la tecnología nuclear en beneficio del suelo	22
2.2.6	Erradicación de plagas.....	24
2.2.7	La técnica de insectos estériles (TIE).....	24
2.2.8	Contaminación del agua	25
2.2.9	Aplicación de la Tecnología Nuclear para la Gestión de los Recursos Hídricos	25
2.3	Radiación y medio ambiente	28
2.4	Radiación en el medio ambiente debida a prácticas o accidentes del pasado.....	29
2.5	Protección de las personas y el medio ambiente ante la posibilidad de contaminación	29
2.6	Monitorización del medio ambiente y de las fuentes de radiación con fines de protección radiológica.....	30
2.7	Tecnología para realizar monitorio radiológico ambiental	31
3	AGRICULTURA, ALIMENTOS Y SUS APLICACIONES NUCLEARES	35
3.1	Mejoramiento de plantas	35
3.1.1	Agentes mutagénicos	36
3.2	Rayos gamma	36
3.2.1	Efecto de la radiación ionizante del Cobalto 60 en plantas tratadas	37
3.2.2	Objetivos y material vegetal a utilizar en el proceso de irradiación	37
3.2.3	Sensibilidad a la radiación y factores de modificación	37
3.2.4	Reproducción del material genético sometido a tratamientos de radiación	38
3.3	La División FAO / OIEA y la base de datos de variedades genéticas y mutantes	39
3.4	Fertilizantes	41
3.4.1	Consumo de fertilizantes	42
3.4.2	Efectos ambientales de los Fertilizantes Químicos	43
3.4.3	Aplicación de Fertilizantes marcados	44
3.5	Manejo de plagas	45

3.5.1	Usos indebidos de plaguicida	46
3.5.2	La Técnica del Insecto Estéril (TIE)	46
4	RADIACIONES EN LA INDUSTRIA	50
4.1	Aplicaciones no eléctricas en la industria	50
4.1.1	Uso de radiación ionizante en medidores en la industria	51
4.1.2	Procesos de polimerización	52
4.1.3	Proceso de esterilización	53
4.1.4	Ensayos no destructivos	54
4.1.5	Patrimonio cultural.....	56
4.1.6	Ventajas de la radiación en el patrimonio cultural.....	56
4.2	Técnicas Nucleares más usadas en la industria minera y petrolera.....	57
4.2.1	Investigación Geológica	57
4.2.2	Exploración Geoquímica	58
4.2.3	Diagrafía de pozos	58
4.2.4	Aplicaciones en la extracción de petróleo	58
4.2.5	Trazadores en el tratamiento de minerales	58
5	ENERGÍA.....	59
5.1	¿Qué es la energía?	59
5.2	Generación de la electricidad	59
5.3	Fuentes de energía.....	60
5.4	Fuentes de generación de energía.....	61
5.4.1	Energía termoeléctrica.....	61
5.4.2	Energía hidroeléctrica.....	62
5.4.3	Energía solar	63
5.4.4	Energía eólica	64
5.4.5	Energía nuclear por fisión	65

5.5	Reactores de potencia	67
5.6	Ciclo del combustible nuclear	68
5.7	Aplicaciones no eléctricas de reactores	70
5.8	Reactores de investigación	71
5.9	Reactores modulares pequeños (por sus siglas en ingles SMR)	73
5.10	Fusión nuclear.....	74
5.10.1	Reacciones más comunes de fusión nuclear [93].....	74
	CONCLUSIONES	75
	BIBLIOGRAFIA	78

PREFACIO

Fundamentos de Ciencia y Tecnología emana desde el año 2020 por iniciativa de investigadores de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), cuyo propósito es difundir información científica a la población boliviana en particular y demás interesados en general.

Fundamentos de Ciencia y Tecnología, en su Tomo 2 busca brindar una idea general acerca de varios aspectos en los que se puede aplicar la tecnología nuclear ofreciendo un gran beneficio, como en la salud, el medio ambiente, la agricultura y la energía. De igual manera busca dar un concepto general sobre las principales ventajas y desventajas del uso de diferentes energías, tanto renovables y no renovables. Por último, se muestran algunas de las aplicaciones industriales de la radiación ionizante más empleadas en el mundo.

La ciencia y tecnología se ha vuelto internacionalmente uno de los campos más importantes de investigación, esto se debe a muchas razones como: la generación de talento humano especializado y el conocimiento aplicativo, sin embargo, la principal razón de potenciar el desarrollo tecnológico es “su influencia directa en el desarrollo y crecimiento de un país”.

Debido a ello, la ABEN busca implementar tecnología nuclear avanzada, generando beneficios económicos, sociales y biológicos en Bolivia. A su vez, se pretende cumplir con la Agenda Patriótica 20-25, buscando alcanzar la Soberanía Científica y Tecnológica con Identidad Propia.

1 CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA SALUD HUMANA

1.1 Radioactividad

La radioactividad puede ser definida como una transformación nuclear espontánea conocida como decaimiento, la cual es causada por la inestabilidad de los núcleos y como resultado forman nuevos elementos, también existe decaimiento en algunos núcleos estables como el Uranio-238 con un tiempo de vida media de 4.5 billones de años. Estas transformaciones son caracterizadas principalmente por la emisión de:

- Partículas alfa
- Partículas beta
- Neutrones
- Rayos x
- Rayos gamma

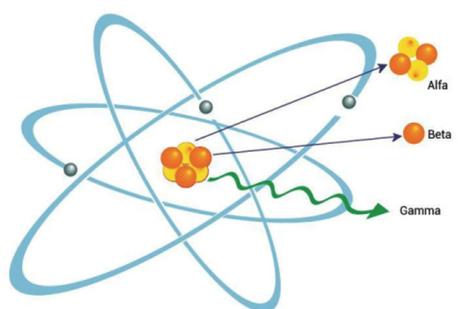


Figura 1. Radiación proveniente del núcleo de un átomo [1]

Cada uno de estos tipos de radiación, con sus diferentes características, fueron descritos en el libro de Fundamentos De Ciencia y Tecnología Tomo 1. [2]

1.1.1 Radiación ionizante

La radiación ionizante, es aquella que tiene suficiente energía para liberar electrones del átomo, por lo tanto, dejan el átomo cargado, como se observa en la Figura 2.

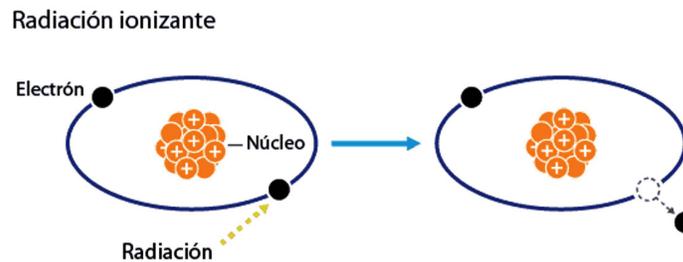


Figura 2. Ionización inducida por la radiación [3]

1.2 Producción de radioisótopos para la medicina

Los radioisótopos se producen mediante reacciones nucleares. La reacción nuclear es la siguiente, un átomo A (blanco) es bombardeado con partículas de alta energía a (proyectil), de manera que si el blanco absorbe el proyectil se forma un núcleo inestable Z, el cual posteriormente se desintegra otro núcleo distinto, B, produciéndose al mismo tiempo otras partículas, b.



En este caso, se pueden dar varios tipos de reacciones las cuales fueron detalladas en Fundamentos de Ciencia y Tecnología Tomo 1 en su capítulo 3 Interacción de la radiación con la materia [4].

1.2.1 Producción en ciclotrones

Un acelerador de partículas conocido como ciclotrón, impulsa partículas cargadas (cationes o aniones) en órbitas circulares en las que se transfiere alta energía acelerándolas a altas velocidades, similares a las de la luz, mediante campos circulares, mediante la alternancia de campos electromagnéticos hasta colisionar con el blanco, provocando una reacción nuclear y produciendo radioisótopos emisores de positrones.

1.2.2 Producción en reactores

Los reactores nucleares también pueden producir radioisótopos para usarlos en la medicina nuclear utilizando dos formas de reacciones nucleares: la captura de neutrones y la fisión de elementos pesados.

1.3 Medicina Nuclear

La medicina nuclear es una rama de la medicina que utiliza una cantidad mínima de material radiactivo para diagnosticar y tratar diversas enfermedades, como el cáncer, los trastornos neurológicos, las cardiopatías, entre otros [5].

La palabra “Medicina Nuclear” se acuñó en 1952, pero sus orígenes se remontan al descubrimiento de los rayos X en 1895; los posteriores experimentos e investigaciones sobre la energía nuclear en los años siguientes contribuyeron a su aplicación médica [6].

Forman parte de la medicina nuclear el estudio de los fenómenos biológicos inducidos por el uso de radioisótopos, así como el uso de ciclotrones y reactores nucleares para producir radioisótopos de uso médico y la aplicación de técnicas de reconstrucción de imágenes y procesamiento de datos. A continuación se presentan ejemplos de la aplicación de esta disciplina [7]:

- Investigación: Investigación básica y aplicada en medicina nuclear utilizando radioisótopos y otras técnicas.
- Diagnóstico: Pruebas funcionales, morfológicas, dinámicas, morfofuncionales y analíticas con el objetivo de conseguir un mejor entendimiento del cuerpo humano en estado de salud o enfermedad.
- Terapéutica: Tratamiento mediante la administración de radiofármacos.

1.3.1 Investigación

La investigación en el área de la medicina nuclear suele ocuparse del descubrimiento de nuevos radiofármacos o de la aplicación de diversos radioisótopos para encontrar nuevas terapias o mejorar las ya establecidas. Además de la posibilidad de utilizar la radiación para curar otras enfermedades, también existe la posibilidad de utilizarla para tratar el cáncer.

También se centra en los métodos de diagnóstico, como la imagen molecular, también en mejorar las técnicas de imagen que se utilizan actualmente reduciendo sus costos y de esa manera ser más accesibles para el público en general.

1.3.2 Diagnóstico

En la medicina nuclear se puede realizar el diagnóstico usando radioisótopos asociados a una molécula para estudios morfológicos y funcionales de varios órganos. Para esto se usan radiofármacos (fármacos que contienen un radioisótopo), los cuales tienen una afinidad a un tejido o una función específica.

Para su uso efectivo se deben cumplir algunas condiciones [8]:

- Fácil disponibilidad: Dado que los isótopos de vida corta no son resistentes a un transporte de larga distancia, el radiofármaco debe ser sencillo de fabricar, de bajo coste y fácilmente disponibilidad.
- Período de semidesintegración corto: Teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde la administración hasta la obtención de la imagen, la semidesintegración debe ser relativamente corta y no superar el tiempo necesario para la muestra. En general, se busca un equilibrio entre un tiempo lo suficientemente largo para que el radioisótopo se acumule en el órgano diana y un tiempo lo suficientemente corto para evitar que la radiación dañe los tejidos.
- Tipo de radiación emitida: Los radioisótopos emisores de rayos gamma se utilizan en aplicaciones de diagnóstico como la gammagrafía y la SPECT, ya que eso es lo que detectan los equipos. La PET, en cambio, utiliza radioisótopos que emiten radiación beta negativa. Ambos métodos se detallaran más adelante.

Además, cuando se utilizan en seres humanos, los radiofármacos no deben ser perjudiciales y deben eliminarse rápidamente, factores que pueden variar en función del estado del paciente y que deben investigarse en cada caso. Dado que la dosis de radiación utilizada es igual o menor que la empleada en las pruebas radiológicas normales, estos procedimientos de diagnóstico no suponen ningún riesgo ni dolor para el paciente, y los efectos secundarios son insignificantes [8].

1.3.2.1 Equipos utilizados

Consiste en utilizar una fuente emisora de radiación gamma y una unidad receptora de radiación, para obtener fotografías del órgano u órganos a examinar. Este medio emisor es un radiofármaco que se elige en función del tejido investigado.

Los radiofármacos se introducen al paciente, normalmente por vía intravenosa, pero también por la vía digestiva o inhalación. Debido a su afinidad, los radiofármacos se unen a un tejido, órgano o sistema específico y emiten radiación gamma, que puede captarse desde el exterior del cuerpo mediante un dispositivo especial (cámara gamma). Las señales se procesan en un ordenador, lo que permite crear una imagen o visualizar imágenes sucesivas para evaluar la funcionalidad del órgano investigado.

Los dos equipos más comunes son:

- SPECT/CT: Este equipo, viene de sus siglas en inglés de Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones Únicos (SPECT) y Tomografía Computada (CT), brinda la posibilidad de adquirir las imágenes anatómicas CT y funcionales SPECT en un único estudio, además es capaz de aportar cada modalidad de imagen. Esta técnica híbrida ha mostrado que mejora la sensibilidad y la especificidad de los estudios, a la vez que acorta los tiempos de adquisición y brinda imágenes corregistradas corregidas por atenuación que facilitan el mejor análisis de las mismas. Este tipo de estudio ha ido ganando cada vez más aplicaciones en el campo de la oncología, en las imágenes de enfermedades óseas malignas y benignas, en el estudio de los procesos infecciosos, en las imágenes de perfusión miocárdica y en el estudio de algunas enfermedades neurológicas.

La obtención de imágenes implica la rotación de una serie de detectores alrededor del paciente para recoger mediciones desde varios ángulos con el fin de determinar la distribución y la concentración del radioisótopo. Principalmente se usa el Tecnecio 99 el cual tiene un tiempo de vida media de 6 horas aproximadamente. Esta técnica es muy usada para estudiar el cerebro, corazón y estudio del cáncer, pues se obtiene una mejor imagen comparada a otros métodos.

- PET/CT: Este equipo utiliza una técnica de imágenes combinadas que permite fusionar la Tomografía por Emisión de Positrones (PET) y la Tomografía Computada (CT) que son adquiridas secuencialmente, permitiendo obtener imágenes tomográficas anatómicas y funcionales de la distribución del radiofármaco dentro del organismo humano, que aportan información anatómica al estudio metabólico, disminuyendo a su vez los tiempos de adquisición. Al desintegrarse los radioisótopos, emiten positrones que penetran el tejido hasta colisionar con un electrón. Entonces estos se aniquilan liberando energía en forma de dos fotones gamma que se disparan en direcciones contrarias, para detectarlos se usan anillos detectores de 360 grados. Tiene una gran utilidad en el área oncológica, neurológica y cardíaca.

- Las aplicaciones clínicas del Tomógrafo por Emisión de Positrones (PET) se basan en la evaluación de un fenómeno metabólico mediante la utilización de radiofármacos. El radiofármaco más utilizado es Fluordesoxiglucosa (FDG) marcada con F-18. Éste permite evaluar la tasa de consumo de glucosa celular y se utiliza sobre todo en estudios oncológicos.

1.3.3 Técnicas terapéuticas

Existen diferentes tipos de terapias, a continuación, se describe brevemente cada una de ellas:

a) Terapia con anticuerpos

La terapia del cáncer con anticuerpos monoclonales marcados se está haciendo cada vez más común.

b) Empleo del Yodo-131

Para tratar enfermedades tiroideas benignas (hipertiroidismo, enfermedad de Graves, bocio tóxico) y para cáncer de tiroides.

- **Terapia con Yodo-131 en forma de lipiodol**

El carcinoma hepatocelular primario (HCC) es el tumor hepático maligno primario más común, y uno de los 10 tumores más frecuentes en el mundo. La infección crónica por el virus de la hepatitis B o C parece ser el factor de riesgo más importante para el HCC.

Un método para tratar el carcinoma hepatocelular primario (HCC) es la inyección intraarterial de yodo-131 en forma de lipiodol. Esta terapia se utiliza en dos situaciones clínicas: como tratamiento para el HCC inoperable, y como terapia complementaria después de la resección del HCC.

- **Terapia con Yodo-131 en forma de MIBG**

El yodo-131 en forma de MIBG (metayodobencilguanidina) se utiliza para tratar los tumores neuroendocrinos, principalmente feocromocitomas, tumores carcinoides, paragangliomas, neuroblastomas y cáncer medular de tiroides, los cuales son relativamente raros en los adultos. Entre la población pediátrica, el neuroblastoma es el tumor sólido más común en niños menores de un año.

c) Terapia con Fósforo-32 para enfermedades mieloproliferativas

La terapia con Fósforo-32 para tratar enfermedades mieloproliferativas refractarias es un método de tratamiento que viene siendo ampliamente aceptado durante más de 30 años. Entre las enfermedades mieloproliferativas se incluyen la policitemia vera rubra y la trombocitopenia esencial, una familia de trastornos caracterizados por una mayor producción de células sanguíneas. El uso de fósforo-32 para el tratamiento de estas enfermedades está disminuyendo debido al desarrollo de nuevos productos quimioterapéuticos. Generalmente el uso del fósforo 32 está reservado para pacientes mayores de 70 años.

d) Terapia con Renio-188 para el alivio del dolor óseo

En pacientes con neoplasias avanzadas la paliación del control del dolor causado por metástasis óseas plantea un desafío. El hidroxietilidino difosfonato con renio-188 (188Re-HEDP) es un radiofármaco novedoso y atractivo que se capta en las zonas de metástasis óseas y emite partículas beta con energía suficiente para producir un efecto terapéutico. Este tratamiento proporciona un alivio inmediato y considerable del dolor óseo en un gran número de pacientes, sin toxicidad hematopoyética ni efectos secundarios significativos. Esto permite a muchos pacientes dejar de tomar analgésicos después del tratamiento.

e) Terapia con Samario-153 para el alivio del dolor óseo

Las metástasis en esqueleto se desarrollan a partir de una amplia variedad de tumores malignos. Los pacientes con metástasis óseas plantean una serie de problemas. Estos pacientes a menudo ven notablemente disminuida su calidad de vida a causa del dolor y de la morbilidad asociada con diversos fármacos paliativos del dolor. El samario-153 en forma de EDTMP, de reciente introducción, se acumula en hueso, mediante un mecanismo similar al del estroncio- 90, es decir, sustituyendo al calcio de la matriz ósea.

f) Terapia con Estroncio-89 para el alivio del dolor óseo

Las metástasis en esqueleto se desarrollan a partir de una amplia variedad de tumores malignos. Los pacientes con metástasis óseas plantean una serie de problemas. Estos pacientes a menudo ven notablemente disminuida su calidad de vida a causa del dolor y de la morbilidad asociada a diversos fármacos paliativos del dolor. El agente radioterapéutico más utilizado en la actualidad es el cloruro de estroncio-89. Debido a su excelente analogía química con el calcio, el estroncio sustituye a éste en la matriz ósea.

g) Microesferas de Itrio-90

La radioterapia interna selectiva es una técnica que consiste en embolizar con microesferas radiactivas de itrio-90 en la irrigación arterial del hígado, como alternativa al yodo-131 lipiodol. Esto tiene muchas similitudes con la terapia de lipiodol, pero se puede utilizar para tratar tumores hepáticos primarios y secundarios. Por lo general, se utiliza en pacientes con carcinoma colorrectal metastásico, pero se ha empleado en patologías malignas más raras, tales como los tumores neuroendocrinos metastásicos, con buenos resultados. Se cree que su efecto terapéutico se debe no sólo a la radiación beta, sino también al efecto oclusivo que produce en el árbol arterial hepático.

h) Sinovectomía por radiación con Silicato de Itrio-90

Las enfermedades inflamatorias de las articulaciones son muy comunes. Muchas de estas enfermedades se pueden tratar con sinovectomía para detener la progresión de la enfermedad y mejorar la función articular. La inyección intra-articular de silicato de itrio-90 para la articulación de la rodilla, de sulfuro coloidal renio-186 para las articulaciones de tamaño medio y de coloide de citrato de erbio-169 para las pequeñas articulaciones, proporcionan una mejoría en los síntomas y en la función en aproximadamente el 60-80% de los pacientes.

1.4 Radioterapia

La radioterapia es una especialidad en medicina que a través de la radiación ionizante, es utilizada para la destrucción de células tumorales. La radiación puede ser entregada de 2 maneras [9]:

1.4.1 Radioterapia Externa o Teleterapia

Se denominan así porque existe una distancia desde la fuente de radiación al volumen a irradiar. Los equipos utilizados son:

1. Bomba de Cobalto-60.
2. Aceleradores lineales.

La radioterapia externa tiene varias modalidades como ser:

1.4.1.1 Radioterapia conformacional 3D

La radioterapia conformacional 3D utiliza computadoras y técnicas de imágenes, como: tomografía computarizada, resonancia magnética o PET para determinar la localización del tumor, su tamaño y forma, así también de los órganos circundantes.

Debido a que los tumores no tienen forma regular, a través de la técnica 3D el tratamiento se puede ajustar a cada paciente [10].

1.4.1.2 Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT)

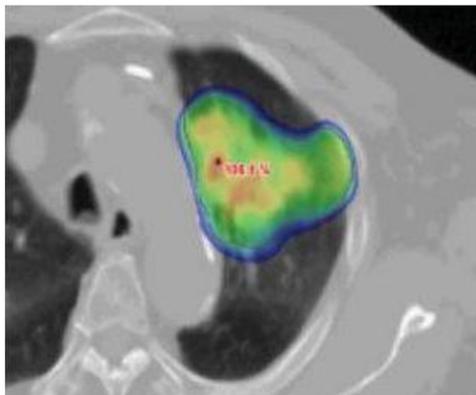


Figura 3. Radioterapia de intensidad modulada [11]

Es capaz de ajustar la forma y la intensidad del haz de radiación a la forma y la posición del tumor, lo que permite centrar la atención en el tejido enfermo mientras se preserva el tejido sano [11].

1.4.1.3 Arcoterapia Volumétrica Modulada (V-MAT)

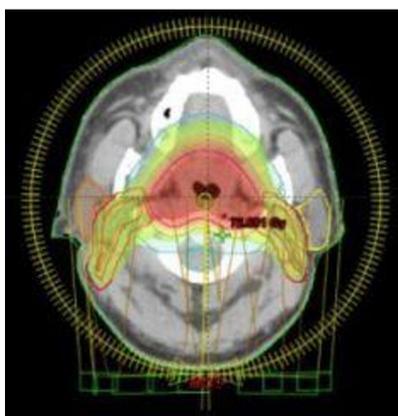


Figura 4. Arcoterapia Volumétrica Modulada [11]

Es una forma de radioterapia de intensidad modulada en la que un acelerador lineal gira alrededor del paciente entregando la energía de manera conformada, modulada, al mismo tiempo, cambiando la intensidad de la radiación y la velocidad de rotación. Con los aceleradores lineales convencionales es posible reducir los largos tratamientos, que pueden durar hasta 30 minutos, a sólo 10 minutos aproximadamente, mejorando los tiempos de tratamiento [11].

1.4.1.4 Radiocirugía intracraneal SRS

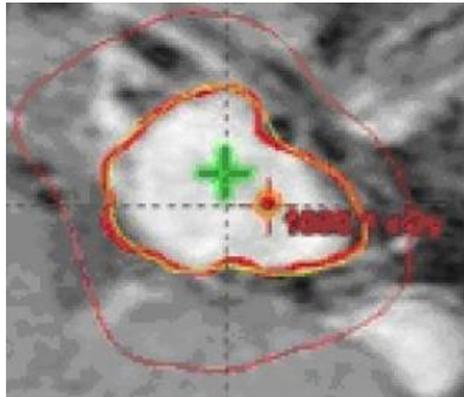


Figura 5. Radiocirugía cerebral [11]

Por su precisión y eficacia, la radiación proporciona resultados similares a la cirugía, con la ventaja añadida de no ser un procedimiento invasivo, no necesita anestesia y es un tratamiento ambulatorio. Su alta precisión, con márgenes de seguridad de aproximadamente una décima de milímetro, permite concentrar dosis masivas de radiación, permitiendo completar el tratamiento en una sola sesión en algunos casos. Las metástasis cerebrales, los cánceres cerebrales, los meningiomas, los schwannomas, los tumores hipofisarios, las malformaciones arteriovenosas, la epilepsia y ciertos trastornos psicológicos son algunas de las afecciones en las que se aplica la radiocirugía [11].

Actualmente este campo mejora, ya que ahora el tratamiento ofrece más comodidad ergonómica al paciente, su duración es corta, ya que dura solo unos minutos donde la mayor parte del tiempo se verifican los parámetros para cumplir todo con exactitud. La administración de la dosis de radiación se realiza en pocos segundos, no es dolorosa y al terminar el procedimiento el paciente puede continuar inmediatamente con su vida cotidiana.

1.4.1.5 Radioterapia Esterotóxica Fraccionada Corporal (SBRT)

La capacidad de fraccionar la dosis mediante sistemas de control de imágenes, así como la extrema precisión con la que se administra la radiación ionizante, ha permitido exportar la radiocirugía a diferentes partes del cuerpo, como el pulmón y el hígado, para tratar

tumores primarios y metástasis que antes se consideraban intratables, incrementando la seguridad y reduciendo los efectos secundarios sobre tejidos sanos [11].

1.4.1.6 Radioterapia Guiada por la Imagen (IGRT)

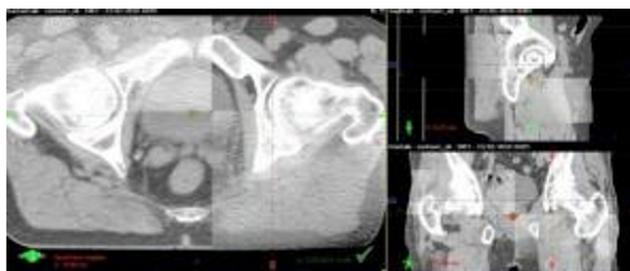


Figura 6. Radioterapia guiada por la imagen [11]

Los sistemas guiados por imagen nos permiten delimitar con precisión la zona de tratamiento, reduciendo los efectos de la radiación ionizante en los tejidos sanos. Ahora disponemos de sistemas modernos que nos permiten tratar órganos en movimiento con la misma precisión que los tejidos y órganos estáticos, sincronizando el haz de radiación ionizante con el movimiento de los órganos. Este método es usado para tratar tumores en órganos en movimiento, como el hígado y los pulmones, que antes provocaban importantes efectos secundarios [11].

1.4.2 Radioterapia Interna o Braquiterapia

Técnica de tratamiento en radioterapia en la que se introduce una fuente de material radiactivo pequeña encapsulada dentro del tumor o en contacto con este. Se utilizan radioisótopos, que liberan radiación beta al desintegrarse. Entre sus ventajas es de corta duración, permite la rápida incorporación del paciente y hay una mejora en la entrega de dosis al tumor y la rápida caída de dosis a los tejidos sanos vecinos [11].

Se pueden clasificar de acuerdo con el método de carga de la fuente, la ubicación del implante, la duración del implante, y la tasa de dosis de la fuente. Las Tablas 1, 2, 3 y 4 resumen estas clasificaciones.

Tabla 1. Clasificación de Braquiterapia según ubicación del implante.

Ubicación del implante	Descripción
Intracavitario	Las fuentes se colocan en una cavidad natural como es el caso de los tratamientos ginecológicos. Se aprovecha la proximidad de la fuente radioactiva a los tejidos a tratar para conseguir una

Ubicación del implante	Descripción
	dosis alta en proximidad y una rápida disminución de la dosis en los tejidos sanos. Los implantes en esta modalidad son siempre temporales.
Intersticial	Las fuentes radioactivas se colocan mediante agujas vectoras o tunos plásticos en el seno del tejido tumoral como en el caso de tumores de próstata o lengua.
Superficial o plesioterapia	Las fuentes se colocan sobre el tejido a tratar a una distancia fija sobre la superficie de la piel o mucosa. Generalmente se colocan sobre una delgada capa (0.5 a 1 cm) de material plástico que las mantiene en posición y evita el contacto directo de la fuente radioactiva con la piel.
Intraluminal	Las fuentes radioactivas se colocan mediante tubos o vectores plásticos en la luz de localizaciones anatómicas, como es el caso de la braquiterapia endobronquial y esofágica.
Intraoperatorio	Las fuentes se implantan en el tejido blanco durante la cirugía
Intravascular	Una sola fuente se coloca en arterias pequeñas o grandes

Tabla 2. Clasificación de Braquiterapia según la duración del implante.

Tipo de implante	Descripción
Temporal	La dosis se administra en un corto periodo de tiempo y las fuentes se retiran después de alcanzar la dosis prescrita. Este tiempo puede ser de varios días en el caso de fuentes radioactivas de baja tasa o de pocos minutos en el caso de alta tasa de dosis.
Permanente	En el que las fuentes radioactivas se dejan en el interior del tumor para que deposite la dosis prescrita en un tiempo infinito en razón de la vida media del isótopo.

Tabla 3. Clasificación de Braquiterapia según el método de carga de la fuente.

Método de Carga de la fuente	Descripción
Carga manual en caliente (Hot loading)	El aplicador esta precargado, contiene las fuentes radiactivas y se implantan directamente (hot loading) en el paciente en tiempo real. Exponiendo al personal médico y la poca precisión en su colocación por la premura de tiempo. Actualmente se encuentra en desuso.

Método de Carga de la fuente	Descripción
Carga Manual Diferida	Para evitar la radioexposición del personal médico, en el caso de la braquiterapia ginecológica se diseñaron aplicadores de carga manual diferida, que se colocaban en la paciente en el radioquirófano y posteriormente se cargan en la habitación de aislamiento en la que la paciente permanece durante unos días.
Carga diferida con proyectores de fuentes	Son máquinas que llevan una fuente radioactiva casi puntual en el extremo de un cable que se aloja en un contenedor. Después de la adquisición de imágenes para corroborar la posición de los aplicadores y completar el cálculo de la dosis, la fuente radioactiva es proyectada hacia los aplicadores o vectores plásticos colocados en el paciente para así administrar la dosis prescrita. Posteriormente y también de manera automatizada se proyecta de nuevo al interior del contenedor para su almacenaje una vez administrada la dosis requerida.

Tabla 4. Clasificación de Braquiterapia según la tasa de dosis de la fuente.

Tasa de Dosis (*)	Valor numérico de la tasa de dosis en el punto(s) especificado de dosis
Baja tasa de dosis (LDR low dose rate)	Entre 0.4 y 2 Gy/h
Mediana tasa de dosis (MDR médium dose rate)	Entre 2 y 12 Gy/h
Alta tasa de dosis (HDR high dose rate)	Mayores a 12 Gy/h

Fuente: Elaboración propia

*Tasa de Dosis es la cantidad de energía absorbida proveniente de una fuente radiactiva por unidad de tiempo.

1.4.3 Radioterapia Intraoperatoria

Consiste en utilizar la radioterapia durante una operación quirúrgica para irradiar el lecho quirúrgico o el sitio donde estaba el tumor y eliminar así células tumorales residuales aprovechando el acceso directo al mismo durante la intervención.

1.5 Otras aplicaciones de la tecnología nuclear para la salud humana

1.5.1 Técnica del insecto estéril para combatir al Zika y Chikungunya

Existen diferentes aplicaciones de la tecnología nuclear para la salud humana, que sirven para combatir enfermedades actuales que afectan a la población.

En ausencia de vacunas y de medicamentos eficaces, inocuos y asequibles para tratar a las personas afectadas por el dengue, el chikungunya y el zika, muchos Estados Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) consideran que el control de los vectores es el enfoque más prometedor para manejar el problema y están desarrollando y validando la Técnica del insecto estéril (TIE) como parte de sus programas nacionales integrados de reducción de la población de mosquitos [12].

Se trata de una técnica que ya se usó durante varios años para controlar otras plagas, y actualmente se está aplicando esta técnica en algunos países, donde se espera resultados positivos para la lucha contra esas enfermedades que afligen a las poblaciones [12]. Se detallarán más adelante en el subtítulo 3.6.2

1.5.2 Radioinmunoanálisis

Es un método de investigación in vitro que no requiere la exposición del paciente a la radiación. Actualmente se utiliza para identificar y medir sustancias presentes en cantidades muy pequeñas en mezclas complejas como la sangre o la orina. Es una técnica muy sensible y precisa [13]. Esta técnica es la usada para detectar el COVID-19 de una manera exacta y se la conoce como análisis RT-PCR [14] y se detallara más adelante.

Se utiliza un radioisótopo para marcar una cantidad conocida de antígeno, que luego se deja unir a un anticuerpo de alta afinidad. Cuando se aplica el líquido de prueba a la mezcla, los antígenos no marcados desplazan a los antígenos marcados. La radiactividad de los antígenos no unidos se determina tras su aislamiento [13].

La cantidad de antígeno marcado que se ha unido al anticuerpo puede determinarse midiendo la radiactividad de los antígenos no unidos. El porcentaje de unión antígeno-anticuerpo marcado puede representarse mediante una curva frente a las concentraciones de un antígeno uniforme

no marcado, y la concentración de antígeno en la muestra puede calcularse a partir de la curva.

1.5.3 Técnicas nucleares para las pruebas RT-PCR

La RT-PCR en tiempo real es una aplicación de la tecnología nuclear que detecta la presencia de material genético específico de ciertos patógenos, como los virus. Al principio se usaron métodos que utilizaban marcadores de isótopos radiactivos los cuales detectaban materiales genéticos específicos sin embargo, tras la mejora, el marcado isotópico se sustituyó por marcadores especiales, que suelen ser colorantes fluorescentes. A diferencia de la RT-PCR convencional, que solo arroja los resultados al final, esta técnica permite a los científicos observar los resultados de manera casi inmediata mientras el proceso sigue en curso.

Actualmente la RT-PCR en tiempo real es el método que más se utiliza para detectar el coronavirus, sin embargo muchos países necesitan del conocimiento para utilizar esta técnica correctamente [14].

2 NUESTRO ENTORNO

2.1 Medio Ambiente

El medio ambiente, es el conjunto de componentes físico, químico y biológicos externos con los que interactúan los seres vivos [15]. Éste abarca la interacción de todas las especies vivas, el clima, y los recursos naturales que afectan la supervivencia humana y también repercuten en la economía mundial [16].

Durante miles de años, las sociedades humanas han ido modificando los ecosistemas locales con el consecuente cambio del clima de las localidades. Actualmente, estos cambios han alcanzado una escala mundial, debido al rápido crecimiento poblacional en las últimas décadas, consumo excesivo de energía, intenso uso de la tierra, comercio, entre otras actividades humanas.

2.2 Contaminación ambiental

Consiste en la presencia de compuestos dañinos (ya sean estos químicos, físicos o biológicos) en el medio ambiente. Estos representan un perjuicio, dañando a los seres vivos que lo habitan.

La contaminación ambiental esta originada principalmente por actividades humanas que pasan a ser parte de los ciclos biológicos, geológicos y químicos [17].

2.2.1 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica suele estar causada por actividades industriales, agrícolas y otras actividades antropógenas [18].

En los últimos 50 años han aumentado considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la producción de energía, principalmente la generada a partir de los combustibles fósiles. Hoy el sector de la energía produce más de dos terceras partes de los gases de efecto invernadero en el mundo. Por ende, las energías limpias, incluida la nuclear, pueden contribuir al logro de los objetivos mundiales relativos al cambio climático y a la prevención de problemas de salud relacionados con la contaminación del aire.

La contaminación atmosférica es una de las principales causas prevenibles de muertes y enfermedades. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la polución del aire causó siete millones de muertes prematuras en 2016, el 88% de ellas en países de ingresos bajos y medianos. Según esa organización, más de 150 millones de personas en América Latina viven en ciudades en las que la cantidad de partículas contaminantes en el aire supera el máximo recomendado en sus Guías de calidad del aire.

La polución del aire y el cambio climático están estrechamente relacionados. Los gases que se emiten durante la extracción y la quema de combustibles fósiles afectan al medio ambiente y son nocivos para el ser humano.

Se trata, por tanto, de un doble problema. Por un lado, la polución del aire produce diversos problemas de salud. Cuando respiramos, absorbemos diminutas partículas tóxicas invisibles presentes en el aire contaminado. Una vez en los pulmones, estos contaminantes alcanzan el torrente sanguíneo y afectan a otras células del cuerpo. Según la OMS, dichos contaminantes son la causa de alrededor de un tercio de las muertes producidas por accidentes cerebrovasculares, enfermedades respiratorias crónicas y cáncer de pulmón; y de una cuarta parte de los fallecimientos por infarto.

Por otro lado, la contaminación atmosférica afecta al medio ambiente. Los contaminantes climáticos de corta vida (CCCV), como el metano, el carbono negro, el ozono al nivel del suelo y los sulfatos en aerosol, son causantes del calentamiento global a corto plazo. Junto con el dióxido de carbono, los CCCV se encuentran entre los principales gases de efecto invernadero.

2.2.2 Beneficios de la energía nuclear

La energía nuclear seguirá siendo crucial en los intentos por reducir la emisión de contaminantes en el aire y las emisiones de gases de efecto invernadero mientras la demanda mundial de electricidad siga en aumento. A diferencia del carbón, el petróleo o el gas, la energía nuclear no libera ningún gas de efecto invernadero en sus operaciones de rutina. Tras analizar datos sobre la producción histórica de energía, El Organismo Internacional de Energía Atómica afirmó en un estudio de 2019 que gracias a la energía nuclear el mundo se había evitado el equivalente a 60 gigatoneladas de dióxido de carbono en forma de gases de efecto invernadero durante los últimos 50 años. Según un

artículo de la NASA titulado Coal and Gas are Far More Harmful than Nuclear Power, dos millones de personas dejaron de tener problemas de salud letales producto de la contaminación atmosférica.

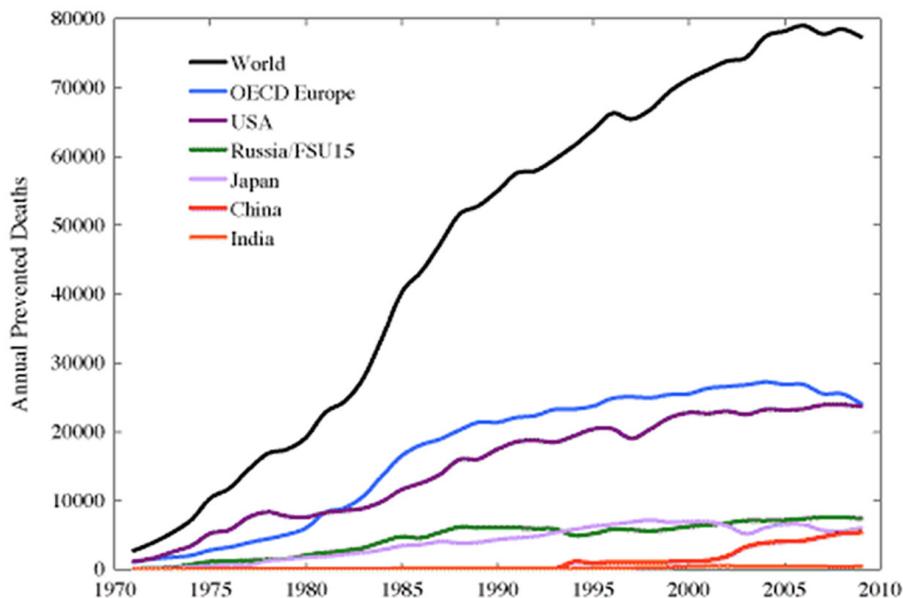


Figura 7. Promedio de muertes que se evitaron cada año gracias a la energía nuclear entre 1971 y 2009 en varios países y regiones [19]

“Durante decenios, la energía nucleoelectrica ha sido una fuente fiable de electricidad con bajas emisiones de carbono y pocos contaminantes atmosféricos. Aprovechar esos beneficios comprobados puede ayudar a los países a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible” explica Mikhail Chudakov, Director General Adjunto y Jefe del Departamento de Energía Nuclear del OIEA. “Debido a que se espera que la demanda de electricidad aumente considerablemente en los próximos años, no cabe duda de que la energía nuclear podrá ser una opción” [19].

La energía nucleoelectrica es una fuente de energía de bajas emisiones de carbono. En 2018, produjo alrededor del 10 % de la electricidad mundial. Junto con las fuentes de energías renovables, cada vez más numerosas, y el cambio del carbón por el gas como combustible, el aumento en la producción de energía nucleoelectrica contribuyó a estabilizar las emisiones de CO₂ a escala mundial en 33 gigatoneladas en 2019. Es evidente que la energía nucleoelectrica, en cuanto fuente de electricidad de bajas emisiones de carbono distribuable, puede desempeñar un papel clave en la transición hacia un futuro de energía limpia. [20]

La energía nuclear puede hacer una contribución significativa a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo, al mismo tiempo que satisface las crecientes

demandas de energía de una población mundial en crecimiento y apoya el desarrollo sostenible global. La energía nuclear tiene un potencial considerable para hacer frente al desafío del cambio climático al proporcionar electricidad, calefacción urbana y calor de alta temperatura para los procesos [21]

2.2.3 Tecnología nuclear para luchar contra la contaminación atmosférica

Las aplicaciones no energéticas, como la tecnología de la radiación, pueden tener un papel importante a la hora de purificar el aire contaminado para cumplir normas y proteger el medio ambiente.

Gracias a los aceleradores de haces de electrones, la tecnología nuclear puede usarse para luchar contra la contaminación del aire mediante la eliminación simultánea de varios contaminantes atmosféricos, como el dióxido de azufre SO_2 , óxidos de nitrógeno NO_x e hidrocarburos aromáticos policíclicos, en un solo paso y sin generar desechos. Si bien existen otros métodos más convencionales con los que se puede lograr el mismo efecto, su costo de instalación y mantenimiento es mucho más elevado; además, generan desechos que requieren un manejo especial [22].

Los gases de combustión que producen las centrales eléctricas (función con combustible fósil) salgan por la chimenea de la central, se someten a un proceso de “limpieza” denominado “depuración en seco con haces de electrones”. Durante ese proceso, los gases se enfrían con un rociador de agua hasta que alcanzan entre 70°C y 90°C y luego se desvían a una cámara de reacción. En ella, los gases rociados se exponen a radiación de electrones de baja energía proveniente de un acelerador. A continuación, se añade amoníaco NH_3 para neutralizar el SO_2 y los NO_x , lo que hace que se modifique su forma química y pasen a ser aerosoles sólidos. Una máquina de alto rendimiento reúne y filtra esas partículas pegajosas y las transforma en abono de alta calidad. Los gases “limpios” restantes salen por la chimenea. Aunque se emplee la radiación para tratar los gases, no queda radiación residual ni en el gas depurado ni en el abono resultante [23].

Este abono residuos que quedan en los filtros pueden ser utilizados como fertilizante mineral de alta calidad para ser usado en la agricultura [24]



Figura 8. Acelerador de electrones de pulso, desarrollado por científicos de la Universidad, Politécnico de Tomsk [25]

Las técnicas isotópicas y nucleares también pueden usarse para definir las trayectorias de las partículas y los gases de efecto invernadero en la atmósfera, predecir su distribución y evaluar sus efectos en los ecosistemas [22].

Los científicos utilizan los isótopos para estudiar las muestras históricas, como los testigos de hielo, e intentar conocer cómo era el mundo a otras temperaturas y concentraciones de dióxido de carbono, lo que a su vez puede resultar útil para predecir situaciones futuras [26].

2.2.4 Contaminación del suelo

La contaminación del suelo provoca una reacción en cadena. Altera la biodiversidad del suelo, reduciendo la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro. También se contamina el agua almacenada en el suelo y el agua subterránea, provocando un desequilibrio de sus nutrientes [27].

Es importante resaltar el papel que juega el suelo en la posible aparición de sustancias contaminantes en la cadena alimentaria del hombre.

La agricultura emplea las mayores cantidades de productos químicos que penetran en el suelo

como fertilizantes o plaguicidas. Los plaguicidas venenosos deben probarse cuidadosamente para garantizar su descomposición en productos que no representen amenaza para el hombre o los animales.

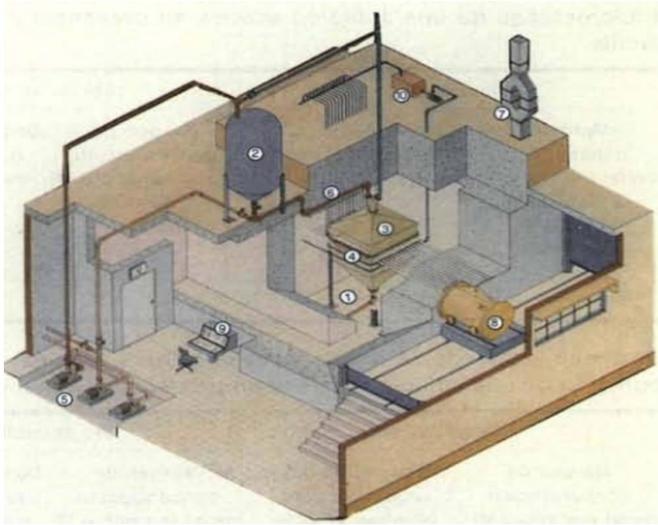
Otro problema agrícola medioambiental es el de los fertilizantes no utilizados que se descomponen en productos de oxidación del nitrógeno y que por lo tanto pueden convertirse en un problema grave [28].

2.2.5 Aplicaciones de la tecnología nuclear en beneficio del suelo

Una aplicación importante de los isótopos es determinar la descomposición de los productos químicos y su destino.

Las técnicas nucleares son ideales para evaluar con exactitud la contaminación y, en muchos casos, permiten determinar la fuente exacta de la misma. Existen muchas formas de contaminación del suelo que ocurren todos los días, como la filtración de tuberías que contienen por ejemplo excrementos humanos o petróleo, o los derrames superficiales de productos químicos transportados, con respecto a las cuales los métodos isotópicos desempeñan un papel importante [28].

Una aplicación concreta de las radiaciones ionizantes (irradiación gamma, haces electrónicos, rayos X) en los lodos cloacales. Estos lodos contienen metales pesados orgánicos y múltiples contaminantes patógenos. Estos lodos una vez desinfectados pueden ser utilizados como abonos agrícolas. La eliminación de patógenos (desinfección) puede realizarse mediante irradiación, la cual se realiza una vez el lodo ha sido sometido a un proceso de secado [29].



Instalación de investigaciones para la irradiación del lodo en Baroda, India. Como se muestra en el esquema, la instalación consta de la celda de irradiación 1); el silo de almacenamiento 2); la vasija de irradiación 3); el conjunto de la fuente 4); el alojamiento de la bomba 5); las líneas de recirculación 6); la salida del gas insalubre 7); el contenedor de transporte 8); la consola de control 9); y el sistema refrigerante de la fuente 10).

Figura 9. Tecnologías de las radiaciones para el tratamiento de desechos [30]



En el Canadá se cultiva la lechuga en terrenos fertilizados con lodo irradiado en el Ontario Agricultural College como parte de las actividades de investigación. (Cortesía: Centro de Investigaciones Atómicas de Bhabha, India; Prof. Thomas Bates, Bates, Departamento de Ciencias de Recursos de la Tierra, Universidad de Guelph, Canada).

Figura 10. Tecnologías de las radiaciones para el tratamiento de desechos [30]

Dosis de 15 kGy de radiación gamma destruyen en lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (90% industrial y 10% municipal), en promedio: grasas y aceites (33%), detergentes (92%), demanda química de oxígeno (11%), fenoles (50%) y más del 99% de la cuenta total de microorganismos.

La irradiación del lodo por el método de irradiación gamma industrial, con fuentes de cobalto-60. Donde la dosis de radiación absorbida por el lodo, se determinó colocando dentro del contenedor de la muestra, con dosímetros distribuidos en posiciones representativas del volumen total del lodo. El contenedor, se colocó en un recipiente, en el cual el lodo se trasladó hacia la cámara de irradiación. Los tiempos de exposición, se consideran en base a la actividad de la fuente radiactiva y considerando los adecuados para impartir al lodo residual una dosis promedio de

15 kGy destruye en el lodo, en promedio: grasas y aceites (33%); detergentes (92%), fenoles (50%) y más del 99% de la cuenta total de microorganismos.

El lodo irradiado mezclado con suelo franco arenoso en determinadas proporciones, se puede emplear como acondicionador de suelos en diferentes cultivos obteniendo resultados satisfactorios [31].

2.2.6 Erradicación de plagas

Si bien algunos insectos son importantes para mantener el equilibrio ecológico natural, también hay que tener en cuenta que compiten con el hombre por la obtención de alimentos y amenazan la salud de los animales y de los seres humanos. Algunos insectos destruyen valiosos cultivos alimentarios, estimándose que a escala mundial las pérdidas de las cosechas ocasionadas por los insectos pueden ascender a más del 10% de la cosecha total.

Tradicionalmente la lucha contra las plagas de insectos se ha realizado empleando productos químicos (insecticidas). Ello ha creado a veces problemas de contaminación ambiental y de presencia de residuos tóxicos en nuestros alimentos. Además, muchos insectos han desarrollado resistencia a los insecticidas, lo que se traduce en la utilización de cantidades cada vez mayores de estos productos. Por lo tanto, hace ya muchos años que era evidente la necesidad de nuevos criterios y metodologías de lucha contra los insectos [28].

2.2.7 La técnica de insectos estériles (TIE)

Para la TIE los insectos cuya plaga se quiere erradicar, se producen en grandes plantas de cría para posteriormente esterilizarlos sexualmente con radiación gamma y liberarlos al medio ambiente. Cuando los insectos estériles se aparean con los insectos silvestres no se producen crías, lo que hace que la población de insectos (plaga) disminuya progresivamente.

La TIE es una técnica muy eficaz y respetuosa con el medio ambiente, ya que sólo se verá afectado el insecto que se quiere erradicar. La técnica es más eficaz cuando menor es la densidad de insectos en la plaga. Además, la TIE puede utilizarse junto con métodos más tradicionales, como el uso de insecticidas.

Son muchos los insectos que han sido erradicados con la TIE, algunos de ellos son [28]:

- Gusano barrenador del nuevo mundo.
- Mosca de la fruta mediterránea.
- Mosca tsé tsé.
- Mosquito transmisor de la malaria.
- Polilla gitana.

2.2.8 Contaminación del agua

La escasez y degradación del agua son causa de creciente preocupación para los países de todo el mundo. Hoy día, más de un billón de personas no tiene acceso a agua limpia. Según la FAO la demanda de agua dulce se está duplicando cada 21 años. A medida que la contaminación industrial, agrícola y doméstica amenaza los recursos finitos, el agua resulta un recurso cada vez más valioso.

El agua es uno de los bienes más preciados que tenemos, ya que, sin agua, no hay vida.

Está claro que si no se organizan mejor los recursos hídricos podría producirse una reducción del crecimiento económico y plantearse peligros potenciales para la salud humana y el medio ambiente. [28]

2.2.9 Aplicación de la Tecnología Nuclear para la Gestión de los Recursos Hídricos

La hidrología isotópica (trazadores) permite conocer el comportamiento del agua y ayuda a establecer las bases para un uso racional de este valioso recurso. Los isótopos radiactivos, tanto naturales como artificiales, pueden resolver o ayudar a resolver importantes problemas hidrológicos. Una ventaja de las técnicas nucleares es que pueden ofrecer una respuesta

definitiva en poco tiempo, sin afectar al ambiente, ni a la salud [28].

Los trazadores constituyen una valiosa herramienta que permite obtener un mayor conocimiento de la dinámica de masas de agua superficiales, subterráneas y atmosféricas o de fluidos en general, conocimiento que se obtiene mediante el monitoreo de estos trazadores, que existen en el sistema hidrogeológico o se inserten en dicho sistema [32].

Los trazadores radiactivos pueden ser de gran utilidad para impulsar el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en cualquier lugar. Estas técnicas proporcionan información inestimable sobre las fuentes, el movimiento y el volumen de agua en distintos medios, incluidos ríos y lagos y resultan particularmente útiles para investigar las reservas de agua que existen bajo la superficie de la tierra, las aguas subterráneas.

La aplicación de trazadores isotópicos en hidrología va a permitir obtener información muy valiosa sobre las aguas subterráneas, en lo que se refiere a su origen, edad, distribución, calidad del agua, presencia y mecanismos de recarga o existencia de interconexiones entre los cuerpos de agua subterránea (acuíferos). Estas técnicas también pueden ayudar a conocer mejor aspectos muy diversos de las aguas superficiales, como son la dinámica de lagos y embalses, posibles filtraciones de las represas, descargas de los ríos, transporte de sedimentos suspendidos y del fondo, la tasa de sedimentación y otros datos sobre litología, porosidad y permeabilidad de acuíferos.

En el caso de algunos manantiales, los isótopos pueden ofrecer indicaciones preliminares de las trayectorias de flujo y orígenes del agua.

Isótopos naturales como el tritio (^3H) y el radiocarbono (^{14}C) se producen en ínfimas cantidades en la atmósfera. Estos isótopos son radiactivos, lo que significa que se desintegran con el tiempo. Estos se infiltran en las aguas subterráneas con las precipitaciones y pueden medirse con equipos sensibles especializados. El hecho de conocer el periodo de semidesintegración de estos isótopos permite medir sus concentraciones para interpretar su “edad” o tiempo de permanencia en las aguas subterráneas. El tiempo de permanencia indica la tasa de renovación y la velocidad de flujo de las aguas subterráneas. Así, registrando los niveles de tritio radiactivo en el suelo a diversas profundidades, se puede medir la tasa de recarga de las aguas subterráneas, aspecto crítico en la gestión de recursos hídricos, como ser: determinar

la edad del agua, la contaminación del agua. Los isótopos ayudan a aprovechar las reservas de agua potable [28].

Otra aplicación de la tecnología nuclear se ha venido utilizando en la desinfección de aguas potable y agua residual con máquinas de haces de electrónicos en los procesos industriales. [29]



Figura 11. Instalación de tratamiento de aguas residuales de tecnología de haz de electrones - China [33]

China en la actualidad cuenta con una instalación de tratamiento de aguas residuales de tecnología de haz de electrones que puede tratar 30 millones de litros de aguas residuales industriales por día y generará un ahorro anual de 4.5 Mil Millones de litros de agua.

Esta instalación utiliza tecnología de haz de electrones para tratar el agua contaminada con residuos de tintes industriales, cuyas moléculas son demasiado difíciles de manejar para descomponerlas con bacterias o productos químicos. Mediante el uso de la tecnología de haz de electrones, estas moléculas largas y complejas en las aguas residuales pueden descomponerse y el agua tratada puede reutilizarse. Este método ofrece un método de tratamiento de aguas residuales altamente eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Los haces de electrones de alta energía que producen los aceleradores de haces de electrones pueden usarse para tratar las aguas residuales: reducen al mínimo los contaminantes nocivos y eliminan colores y olores indeseados.

Durante el proceso de tratamiento, un acelerador de electrones genera radiación ionizante en forma de partículas aceleradas a través del haz de electrones [34].

El agua atraviesa una cámara que se expone a radiación ionizante proveniente del acelerador. Esto induce la generación de radicales activos a partir de la molécula de agua para reaccionar con los contaminantes orgánicos nocivos que se encuentran en las aguas residuales [33].

Así, se producen reacciones químicas en los contaminantes, que los descomponen en fragmentos más fáciles de gestionar y de tratar.

A continuación, el agua se somete a un tratamiento de biodegradación que degrada estos componentes todavía más antes de dar salida al agua tratada o de reutilizarla. Con este método, el agua no se vuelve radiactiva ni queda radiación residual [34].

En las plantas de tratamiento de agua residuales se ha generalizado nuevamente el empleo de sistemas de irradiación con rayos ultravioleta en sustitución al cloro [29].

2.3 Radiación y medio ambiente

Radiación es la energía que viaja por el espacio (se propaga en forma de onda). Las radiaciones ionizantes de origen natural están presentes en la naturaleza que nos rodea desde el momento de su formación de la tierra y se encuentra en ella y en el resto del universo. Además de la radiación cósmica, se producen radiaciones ionizantes como consecuencia de la presencia de materiales radiactivos existentes en la corteza terrestre. Tres cuartas partes de la radiactividad que hay en el medio ambiente proceden de los elementos naturales [35].

Diariamente el hombre se ve rodeado de radiación ionizante que proviene de la naturaleza, estas se conocen como radiación natural o de fondo [36].

En nuestras casas también puede existir radiactividad, procedente principalmente del gas radón. Este gas se produce como consecuencia de la desintegración del uranio que contienen las rocas. La cantidad de gas radón que se acumula en una casa depende de su situación, de los materiales que se han utilizado en su construcción y de nuestra forma de vida. El radón emana de las rocas y se concentra en los lugares cerrados, por lo que es muy recomendable que las viviendas y los lugares de trabajo estén bien ventilados.

Por otro lado, la radiación cósmica se genera en las reacciones nucleares que ocurren en el interior del sol y en las demás estrellas. La atmósfera filtra estos rayos y nos protege de sus efectos peligrosos, ya que fuera de la atmósfera, en el espacio, la radiactividad es mucho mayor. Cuando ascendemos a una montaña, esa protección disminuye y la radiación cósmica es más intensa. Lo mismo ocurre cuando viajamos en avión, que estamos más expuestos a las radiaciones.

También existen elementos radiactivos en múltiples alimentos y en el agua potable. Incluso nuestros cuerpos son una fuente de radiación, ya que almacenan pequeñas cantidades de potasio radiactivo, un producto necesario para el cuerpo humano.

Las radiaciones también se pueden producir de forma artificial. Una vez que empezaron a conocerse las propiedades y la potencialidad de la radiación se fueron desarrollando sus aplicaciones, así como las técnicas para obtener materiales radiactivos artificiales [35].

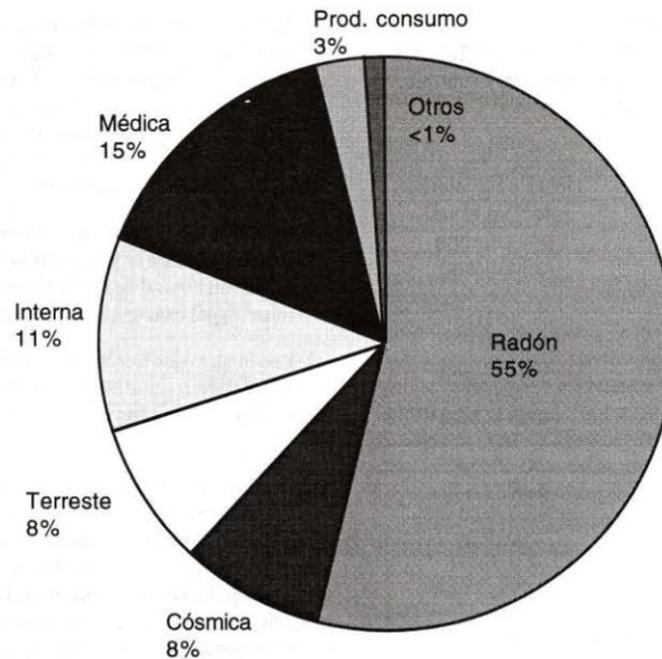


Figura 12. Porcentaje de contribución de diferentes fuentes de radiación al hombre Fuente: Mettler F. and Upton A. [36]

2.4 Radiación en el medio ambiente debida a prácticas o accidentes del pasado

Además de la radiación natural, los ensayos con armas nucleares y accidentes nucleares como los ocurridos en Chernóbil en 1986 y en Fukushima en 2011 generaron radiación adicional que, actualmente, también está presente en el medio ambiente.

En los accidentes a gran escala se liberan a la atmósfera materiales radiactivos, que se distribuyen ampliamente por todo el medio ambiente en el que vivimos. También hay descargas autorizadas, de instalaciones nucleares y de otro tipo, que liberan materiales radiactivos al medio ambiente. Estas descargas son objeto de un control estricto para proteger el medio ambiente y garantizar que el público que puede estar expuesto a ellas esté adecuadamente protegido [37].

2.5 Protección de las personas y el medio ambiente ante la posibilidad de contaminación

Las personas pueden verse expuestas a mayores niveles de radiación si se produce una emisión radiactiva o un accidente que coadyuve a la contaminación del medio ambiente. En tales situaciones puede ser necesario aplicar medidas reparadoras para mitigar las consecuencias radiológicas, como la restricción del acceso a determinadas zonas, la limpieza de suelos y superficies y la búsqueda de alternativas a la producción agrícola, medidas que pueden ser necesarias para reducir los niveles de radiación a dosis tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta los factores sociales, económicos y ambientales [38].

2.6 Monitorización del medio ambiente y de las fuentes de radiación con fines de protección radiológica

El monitoreo radiológico ambiental es el conjunto de mediciones y evaluaciones de la concentración de actividad de radionucleidos y de tasa de dosis debidas a la posible presencia de fuentes de radiación de origen natural y/o artificial en sitios de interés.

Se realiza para controlar el desempeño ambiental de determinadas actividades o prácticas a lo largo del tiempo y para verificar que los límites de dosis establecidos por los organismos reguladores no sean excedidos [39].

La emisión controlada de radionucleidos en la atmósfera y el medio acuático es una práctica legítima de gestión de los desechos en la industria nuclear y sus instalaciones conexas. Normalmente, las descargas controladas de materiales gaseosos y particulados que contienen radionucleidos se efectúan a través de chimeneas, si bien en las instalaciones pequeñas pueden realizarse a través de conductos o campanas de ventilación, por ejemplo. La emisión controlada de líquidos suele efectuarse por tuberías que descargan en ríos o lagos o bien en el mar, pero en el caso de los establecimientos pequeños se realizan a través de los sistemas de alcantarillado normales. Un elemento importante y fundamental del control de las descargas es la monitorización regular – tanto en la fuente de la descarga como en el medio receptor – para garantizar la protección de la población y del medio ambiente.

La emisión no controlada de radionucleidos en la atmósfera y en los medios acuático y terrestre puede producirse como resultado de accidentes nucleares o radiológicos. La monitorización de la emisión accidental en su fuente, y en particular la monitorización directa de la contaminación ambiental con radionucleidos, es necesaria tanto para la evaluación y aplicación de medidas de protección de la población y de contramedidas a más largo plazo como para la protección radiológica ocupacional en las emergencias. En estos casos puede justificarse la monitorización individual. En zonas históricamente contaminadas con radionucleidos de período largo la función de la monitorización es fundamental tanto para proteger a la población como para llevar a cabo actividades de restauración [40].

2.7 Tecnología para realizar monitorio radiológico ambiental

En la actualidad existe una gran variedad de instrumentos que permiten medir las radiaciones ionizantes [41].

En beneficio del medio ambiente se debe considerar como prioridad el monitoreo radiológica ambiental para verificar constantemente y permanente de los materiales radiactivos que se pudieran encontrar en sitios y materiales de origen natural, tales como el aire, el agua, la tierra y los alimentos.

Para realizar el monitoreo de la radiación en el medio ambiente existe una amplia gama de sensores y soluciones de red, incluyendo la medición de la tasa de dosis gamma, el análisis espectroscópico y la monitorización del aire. Existen sondas y estaciones dedicadas a varias aplicaciones: alrededor de instalaciones nucleares, vigilancia de áreas, sistemas de alerta temprana a nivel nacional, soluciones móviles y de despliegue rápido para escenarios de emergencia [42].

Como ejemplo se tiene las los siguientes instrumentos y estaciones de vigilancia



El MiniTRACE es un medidor de topografía diseñado específicamente para la medición de radiaciones X y Gamma, así como para la mejora de la seguridad de los empleados en áreas controladas de centrales nucleares, instalaciones de reprocesamiento, centros de tratamiento y hospitales.

Figura 13. El MiniTRACE es un medidor de radiaciones X y Gamma [43]

Ligero y resistente, mide la exposición personal, junto con las radiaciones X y Gamma, para mejorar la seguridad de los trabajadores en entornos peligrosos.

De acuerdo con el principio ALARA (tan bajo como sea razonablemente posible), el medidor permite la evaluación del riesgo de exposición personal que enfrentan los trabajadores en zonas controladas de plantas de energía nuclear, instalaciones de reprocesamiento, centros de tratamiento y hospitales, etc. para ayudarlos mejor Adaptar su trabajo diario según el riesgo.



SpectroTRACER es un sistema de medición de funcionamiento continuo para la detección específica de nucleidos del nivel más bajo de contaminación gamma en el aire y en líquidos (agua).

Figura 14. PECTROTRACER - Sonda Espectrométrica [42]

Este equipo realiza un análisis espectroscópico de la medición para identificar los radionucleidos detectados. Se utiliza para el control de la radiación cuando un monitor de tasa de dosis gamma estándar no es lo suficientemente eficiente y cuando se requiere para calificar la naturaleza de la radiación gamma. [42]



El monitor ambiental SA se utiliza para la medición continua de la actividad de los aerosoles en todos los efluentes gaseosos. Puede integrarse completamente en sistemas de monitoreo de radiación ambiental.

Figura 15. SA - Estación de Monitoreo de Aire [42]

Esta estación de monitoreo de aire está diseñada para completar los sistemas de monitoreo de radiación gamma en redes ambientales, donde se requiere un monitoreo continuo de las partículas con identificación de nucleidos.

Combina las actividades de aerosol β , γ y la medición del espectro en el medio ambiente. La estación tiene como objetivo monitorear las actividades de partículas al aire libre como parte de una red ambiental nacional o regional, alrededor de instalaciones nucleares y sitios nucleares [42].

La instalaciones de vigilancia radiológico ambiental proporcionan datos de la detección en tiempo real de la radiación gamma de fondo proveniente de la atmósfera, ya sea dentro de un territorio o provenientes de otro país [44].

La sonda de detección gamma, muestra en conjunto con el sistema de interpretación de datos, recolecta en forma autónoma información de diversas variables radiológicas y físicas del sitio de instalación, tales como temperatura, humedad relativa y presión barométrica.

Los datos adquiridos por la sonda se almacenan en una memoria no volátil para su posterior consulta desde una computadora personal a través de una interfaz alámbrica, o bien de forma inalámbrica por medio de un transmisor de radiofrecuencia. Los parámetros de adquisición de la sonda, como niveles de alarma y tiempos de integración, se configuran desde el centro primario de datos, lo que permite configurar diversas topologías de redes de monitoreo.

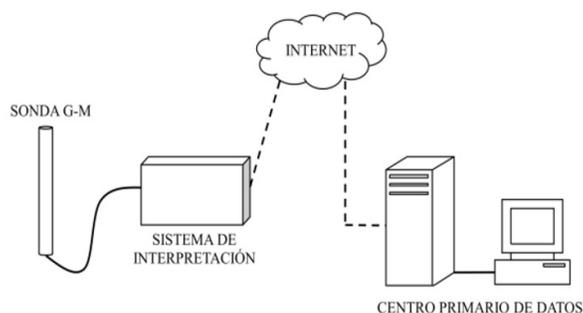


Figura 16. a) Diagrama esquemático del sistema utilizado en la RENAMORA, b) Equipo instalado que compone la RENAMORA [44].

Este es un sistema confiable de detección e información en tiempo real de radiación gamma de fondo ambiental en el aire de todo un territorio [44]

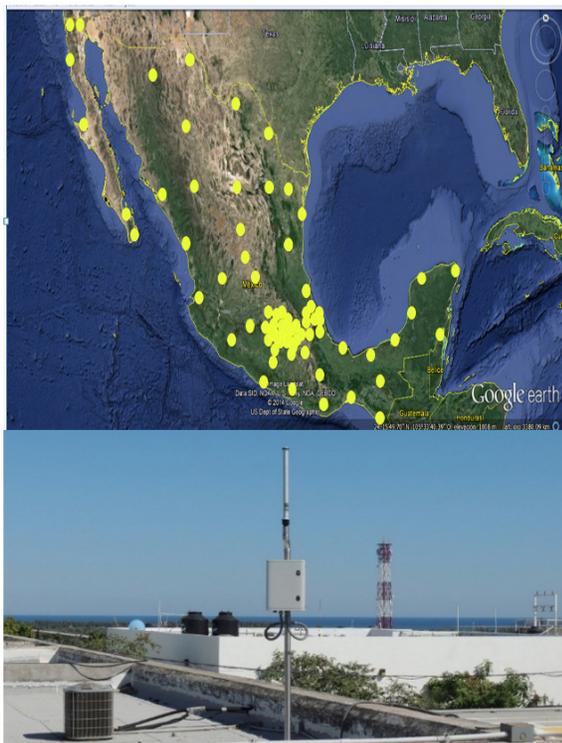


Figura 17. Estación de la RENAMORA en San José del Cabo B.C.S. [44].

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) opera el Sistema Nacional de Vigilancia Radiológica Ambiental, cuyo objetivo es conocer los niveles de radiación ambiental a los que está expuesta la población de nuestro País. Una de las herramientas más importantes de las cuales la CNSNS se vale para vigilar los niveles de radiación ambiental en el territorio nacional es la Red Nacional Automatizada de Monitoreo Radiológico Ambiental (RENAMORA), el propósito de esta red es la medición de los niveles de radiación gamma ambientales en diferentes puntos del territorio mexicano, la RENAMORA está constituida por 91 estaciones distribuidas por todo el país, remotas cada una de las cuales cuenta con un arreglo que consta de equipo de detección-módulo de comunicación, para detección y medición de la radiación gamma ambiental y para la transmisión de la información a la CNSNS.

Los objetivos Generales de la RENAMORA son:

La caracterización radiológica de los niveles de equivalente de dosis ambiental por radiación gamma.

Identificar de manera inmediata los cambios en el perfil radiológico del territorio nacional por encima de valores que ameriten una investigación o una intervención.

Mantener la vigilancia continua y en tiempo real de los niveles de radiación ambiental, de tal manera que en caso de algún evento radiológico, permita a la CNSNS tomar prontamente las decisiones más adecuadas para salvaguardar la integridad de la población

3 AGRICULTURA, ALIMENTOS Y SUS APLICACIONES NUCLEARES

3.1 Mejoramiento de plantas

En 2002 se da a conocer que la alimentación de las personas depende en un 93% principalmente de los productos vegetales y en un 7% de los productos animales, pero éstos también provienen indirectamente de las plantas. Por lo tanto aproximadamente el 99% de la comida es producida en la tierra y sólo el restante 1 % en los océanos y en las aguas interiores. El 80% de la población a nivel mundial usa exclusivamente plantas o derivados de éstas para tratar diferentes enfermedades; alrededor de 7.000 compuestos químicos medicinales provienen de especies vegetales. Los biocombustibles, algunos materiales para la construcción, ropa, insecticidas, herbicidas, también se derivan de las especies vegetales. Ya que las plantas tienen una amplia variedad de productos o usos, no es sorprendente que los humanos se hayan preocupado desde tiempos antiguos y, siga preocupándose por obtener genotipos seleccionados o mejorados para satisfacer sus necesidades [45].

El hombre aprendió no sólo a comer los mejores frutos que hallaba sino también a cultivar las semillas de algunos de ellos. La genética se convirtió en una ciencia básica de la fitotecnia después que el monje J.G. Mendel [46] descubriera las leyes en el siglo XIX. Posteriormente, con el desarrollo del método de hibridación, la fitotecnia evolucionó aún más.

El objetivo que se tenía, era combinar las mejores propiedades de varias plantas en una sola, reemplazando la simple selección entre plantas buenas y malas. Este método, casi siempre se integra usando el plasma germinal que se puede obtener usando la mutación inducida, actualmente es el más usado para la multiplicación de las plantas por reproducción sexual. Sin embargo, algunos cultivos de reproducción vegetativa, como el manzano, banano, sobre todo los que son totalmente estériles sin semillas. Para éstos se creó diferentes métodos y técnicas de manipulación con tejido somático, fitotecnia por mutaciones y biotecnología [47].

La ciencia y tecnología están en un constante desarrollo en el sector agrícola y es fundamental considerar las técnicas nucleares que individualmente o en combinación con otras herramientas como la biotecnología, permiten 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.

3.1.1 Agentes mutagénicos

Un agente mutagénico, es un agente capaz de alterar o cambiar la información genética (ADN) de un organismo.

Los agentes artificiales utilizados para generar mutaciones se pueden dividir según su naturaleza en dos grandes grupos: físicos o químicos [48].

- Químicos Estos compuestos son capaces de alterar estructuras del ADN de una manera brusca como, por ejemplo, la Azida de sodio (NaN_3), que pueden aumentar varios cientos de veces las tasas de mutación espontánea. El mutágeno químico que más se ha utilizado es el metanosulfonato de etilo (EMS).
- Físicos Son todas las radiaciones que pueden alterar la secuencia y estructura del ADN, creando una variabilidad genética, las cuales no existen en la naturaleza, como los rayos gamma, los rayos X, los neutrones, los protones y las partículas alfa, cada una de ellas con diferente poder de ionización y de penetración.

3.2 Rayos gamma

Es un tipo de radiación que puede ser emitido por la cadena de desintegración del Cobalto radiactivo, este tiene la facultad de poder causar un menor daño en las células vegetales. Los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética, que debido a las altas energías que poseen constituyen un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta. La radiación gamma tiene una naturaleza similar a la luz visible o al de las ondas de radio, con la diferencia de tener una longitud de onda muy corta y por tanto un nivel de energía más alto. Por lo tanto, su nivel de penetración es más profundo en ciertos materiales [49].

Los procesos de irradiación, también conocidos como radiación ionizante. Usan una fuente emisora de rayos gamma, donde la más común en la industria es el Cobalto – 60, el Cesio era usado antes pero su uso disminuyó significativamente debido a que este se encontraba en forma de polvo, lo cual generaba un mayor riesgo en caso de accidentes. Los diversos productos y sustancias que se quieren irradiar, son tratados en una instalación llamada planta de irradiación gamma, que usualmente también cuentan con laboratorios, dentro de estos el principal equipo es el irradiador autoblandado usado en la irradiación de semillas [49].

3.2.1 Efecto de la radiación ionizante del Cobalto 60 en plantas tratadas

El efecto de la radiación gamma en plantas, generalmente es morfológico, es decir que influye en la reducción de altura, cambios en la forma de hojas y en el diámetro del tallo. También se debe resaltar que algunos cambios por la mutación pueden ser: la precocidad y el rendimiento, también la resistencia a microorganismos, insectos, adaptación, la facilidad de cosecha y la resistencia al frío.

Cabe recalcar que estas mutaciones son diferentes de los productos transgénicos debido a que en un producto transgénico se insertan genes de otras especies o se quita genes del mismo. En cambio el organismo mutante nace igual que en la naturaleza por un mecanismo genético de codificación errónea en el ADN dando lugar a nuevas características del organismo, entonces en estos casos la radiación solo acelera este proceso [50].

3.2.2 Objetivos y material vegetal a utilizar en el proceso de irradiación

Todas las partes de la planta pueden ser irradiadas por un método u otro, pero algunas son más fáciles de tratar que otras. Además de las semillas y polen comúnmente tratados, también pueden irradiarse plantas enteras, esquejes, tubérculos, bulbos, tejidos de órganos y estolones, o células cultivadas in vitro, por lo que se puede irradiar todas las partes de una planta con la diferencia del método a usar, pues no todas las partes tienen la misma radio sensibilidad. Las reacciones varían según las condiciones fisiológicas antes, durante y después de la irradiación. [51]

3.2.3 Sensibilidad a la radiación y factores de modificación

La respuesta de las células vegetales superiores a los mutágenos físicos y químicos se ve afectada por muchos factores biológicos, ambientales y químicos en diversos grados. Estos factores cambian la potencia y la eficacia de los mutágenos en las células vegetales superiores. Los mecanismos involucrados son poco conocidos, pero es importante monitorear estos factores de cerca porque

pueden interferir con el proceso de radiación. Los dos factores de modificación más importantes para la irradiación de semillas son el contenido de oxígeno y humedad. Para los tejidos activos, factores como la etapa de desarrollo (incluida la relación con la síntesis de ADN y la tasa de dosis) son más importantes. Factores como el volumen de los núcleos y los cromosomas en interfase también son importantes para los tejidos activos y estáticos. Los factores que modifican la respuesta de las semillas a la radiación ionizante se pueden dividir en dos categorías: factores ambientales, como la atmósfera (aeróbica y anaeróbica), la humedad de las semillas, el almacenamiento y la temperatura después de la irradiación. Y factores biológicos, como las diferencias genéticas, el tamaño de los cromosomas nucleares y los cromosomas de interfaz, etc. [51]

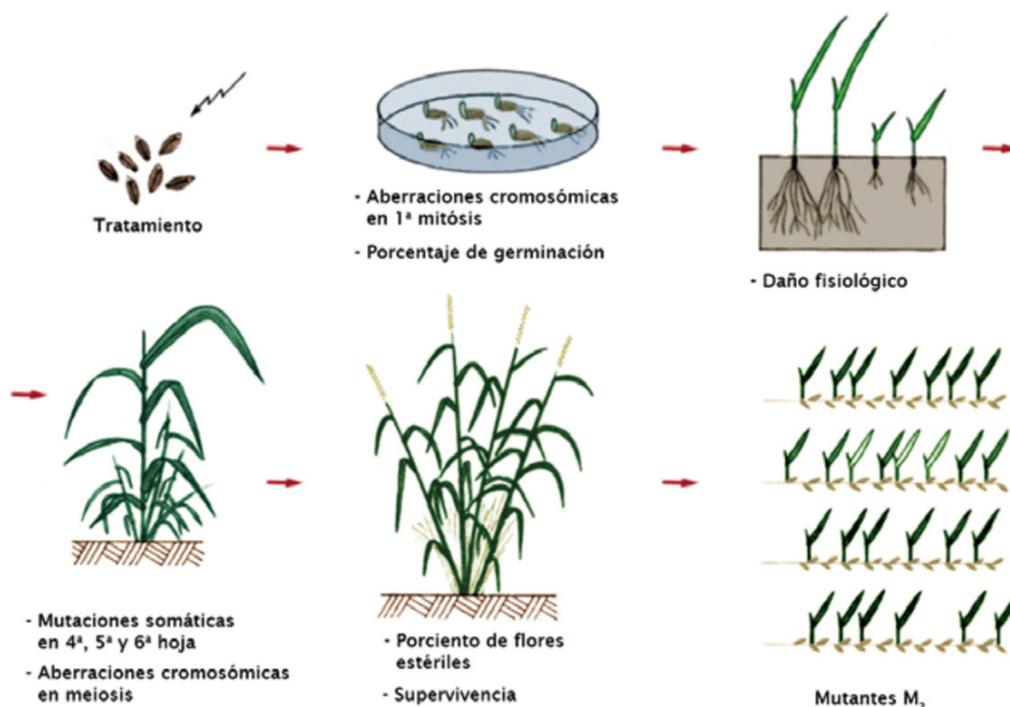


Figura 18. Esquema de las principales etapas en que se registran los efectos de los tratamientos mutagénicos. [52]

3.2.4 Reproducción del material genético sometido a tratamientos de radiación

La reproducción de plantas mejoradas se fundamenta principalmente en dos principios: la variación genética y la selección. Este proceso necesita mucha labor, además es lento y requiere también un alto trabajo intelectual y manual, como se muestra en la Figura 11.

Sin embargo, proceso del desarrollo del cultivo de células tejidos y vegetales que se ha dado en las últimas 2 décadas, ha permitido transferir al laboratorio parte del trabajo de reproducción que se llevaba a cabo sobre el terreno. Gracias a las amplias investigaciones realizadas han surgido nuevas ramas de la fitotecnia, como la “biotecnología de las 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.

Para lograr la reproducción de un nuevo tipo de cultivo, se puede llegar a necesitar entre 12 a 15 años de gran esfuerzo, todo depende del material inicial con el que se está partiendo (semilla o tejidos in vitro). De manera general este proceso es en extremo laborioso, lento y requiere mucho trabajo intelectual y manual.

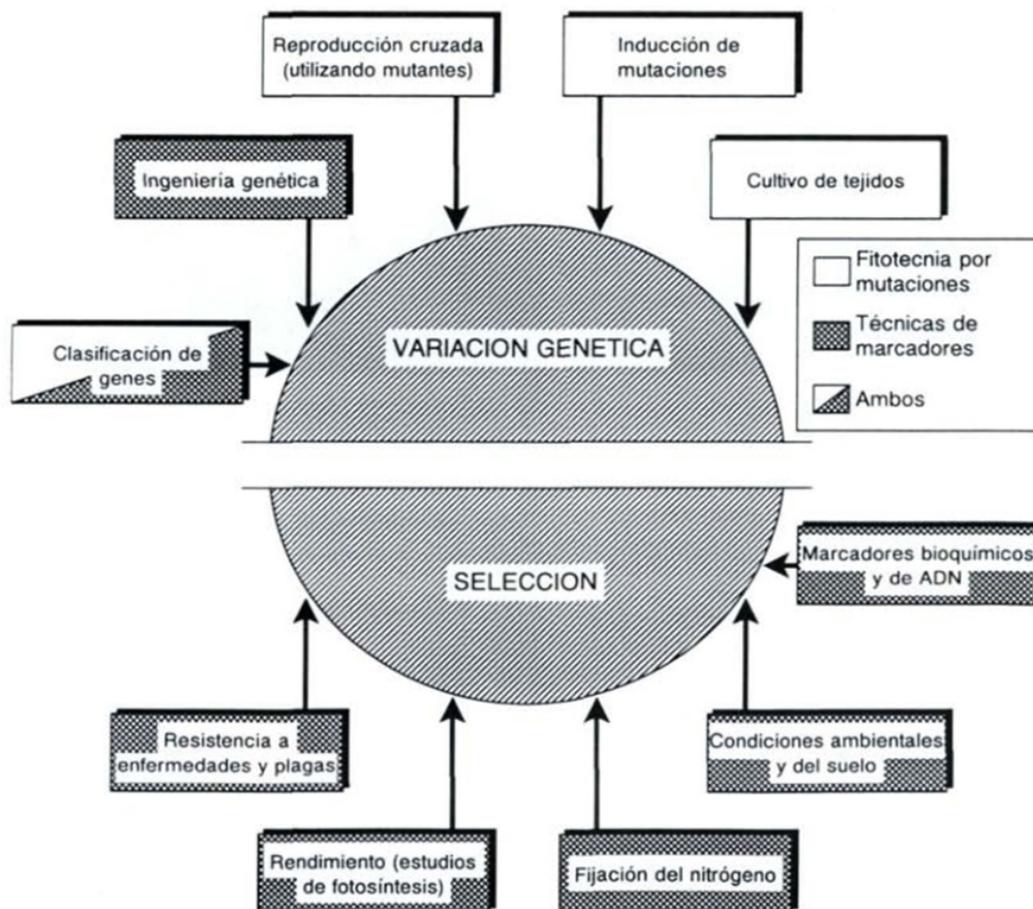


Figura 19. Aplicación de técnicas nucleares en la fitotecnia [47]

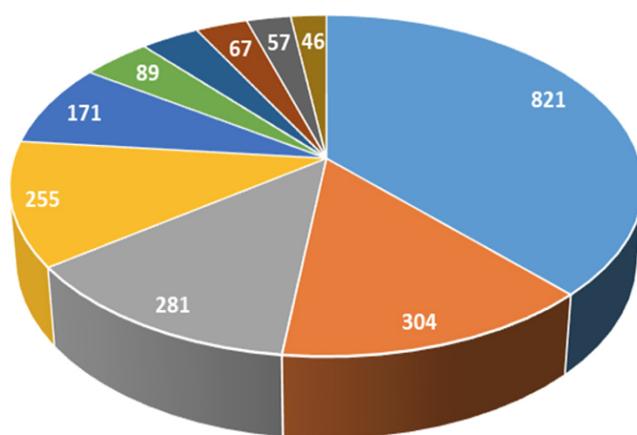
3.3 La División FAO / OIEA y la base de datos de variedades genéticas y mutantes

La División Mixta FAO / OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura se estableció en el OIEA, Viena, con una Sección de fitomejoramiento y genética. Esto promovió y estimuló la aplicación mundial de tecnologías de mutación en el fitomejoramiento, proporcionando servicios de información, irradiación, capacitación y desarrollando proyectos internacionales de colaboración.

Según las cifras de FAO / OIEA, se lanzaron 77 variedades mutantes en 1969, que crecieron dramáticamente a 1,330 en 1989. Para 2009, aproximadamente 3,100 variedades cultivadas mutantes en aproximadamente 190 especies de plantas estaban incluidas en la Base de datos de Variedades mutantes y cepas genéticas. El mayor número de variedades mutantes se encuentra en los cultivos de cereales de grano pequeño, según informe de los países asiáticos, como en la figura 20.

La base de datos FAO / OIEA puede ser interrogada por nombres latinos o comunes de especies, metodología de reproducción, ubicación (país y continente) y por fechas. Se proporcionan descripciones fenotípicas, incluyendo fotografías. Más de la mitad de las variedades mutantes 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, como en la figura 20 b. La base de datos define una variedad mutante como una variedad que lleva un gen mutante conocido, y no es necesariamente el producto directo de un tratamiento de mutación. De forma similar también se describe en la figura 20 a, el número de variedades mutantes por especie, cuyos valores no reflejan la veracidad exacta porque, por ejemplo, en el caso de flores u ornamentales, los obtentores no lo registran o no lo reportan voluntariamente por considerarse información confidencial.

(a) Las nueve principales variedades mutantes



Nro. de variedades mutantes	Porcentaje %	Especie
821	37,89	Arroz
304	14,03	Cebada
281	12,97	Crisantemo
255	11,77	Trigo
171	7,89	Soya
89	4,11	Maíz
76	3,51	Maní
67	3,09	Rosa
57	2,63	Frijol
46	2,12	Otros

(b) Distribución regional de las variedades mutantes

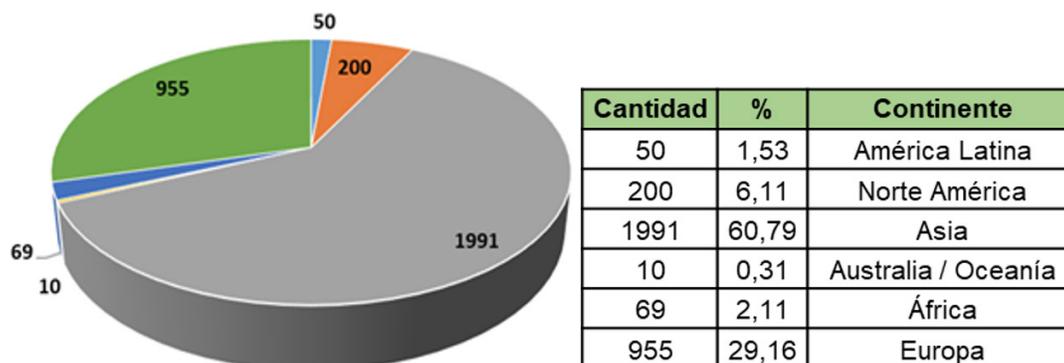


Figura 20. Distribución de variedades mutantes (a) por especie, (b) entre continentes [53]

Las mutaciones inducidas han desempeñado un papel importante en el fitomejoramiento, contribuyendo al aumento de la producción de alimentos en las economías desarrolladas y en desarrollo. La reproducción de mutaciones clásicas continúa siendo utilizada para el beneficio de las comunidades en paralelo con la aplicación de herramientas genómicas modernas para la inducción y descubrimiento de mutaciones en laboratorios avanzados. Esta herramienta, ha demostrado ser flexible, viable y lista para ser utilizado en cualquier cultivo si los objetivos y los métodos de selección están claramente identificados. Las mutaciones inducidas no solo han desempeñado un papel sin precedentes en el desarrollo de nuevos cultivares y nuevos productos de cultivos existentes, sino que también contribuyen cada vez más a la comprensión de la función de los genes y las rutas bioquímicas. Junto con las nuevas técnicas “ómicas” emergidas, las mutaciones inducidas están contribuyendo al desarrollo del nuevo tema emergente de la biología de sistemas.

3.4 Fertilizantes.

Como se conoce generalmente los fertilizantes son como nutrientes en formas químicas, saludables y asimilables por las raíces de las plantas, se administran con la intención de optimizar el crecimiento de las plantas. Las plantas no necesitan compuestos complejos, pues sintetizan todo lo que precisan, de hecho, estas solo demandan algunos elementos químicos que deben presentarse en una forma que la planta pueda absorber. Estos pueden ser clasificados en tres importantes grupos:

- Nitrógeno, el cual ayuda a que las plantas crezcan y sean más verdes.
- Fosforo, este estimula el crecimiento de las flores y raíces.
- Potasio, favorece al vigor de las plantas.

Existen otros micronutrientes que normalmente es el suelo que lo proporciona como el Mo, Fe, Cu, etc. Estos se los puede proporcionar a la planta solo cuando se realiza cultivo hidropónico, o in vitro [54].

3.4.1 Consumo de fertilizantes.

Entre 2004 y 2010, como se observa en el Cuadro 1, el consumo de fertilizantes por hectárea en Bolivia se ha incrementado en 78,2%. Sin embargo, en comparación con los países limítrofes, el consumo de fertilizantes en Bolivia es muy bajo, toda vez que por ejemplo Argentina que presenta los menores niveles entre estos países, en 2010 registró un consumo de fertilizantes de 40,4 kg/Ha., monto superior en cuatro veces y medio al registrado por Bolivia de 9.0 kg/Ha en el mismo año. [55]

Cuadro 1. Consumo de fertilizantes en Bolivia en kg/Hay los países vecinos 2004-2010 [55]*

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Argentina	45,3	36,4	41,4	49,3	35,4	23,3	40,4
Bolivia	5,1	6,5	4,4	6,8	5,6	6,1	9,0
Brasil	153,5	122,1	127,9	166,5	141,9	108,4	142,5
Chile	491,4	434,8	475,8	532,4	691,5	437,1	543,3
Paraguay	78,4	65,8	72,7	94,3	74,9	66,2	87,3
Perú	91,6	82,6	93,1	110,5	81,8	105,5	100,3

* Solo se consideran los fertilizantes nitrogenados, el abono potásico y los fertilizantes fosfatados y no se incluyen los nutrientes tradicionales (abono animal y vegetal).

* Estos datos son válidos para el concepto de año civil (enero a diciembre).

En los últimos años se han generado políticas y mecanismos de apoyo que tienen y tendrán efectos positivos en el consumo de fertilizantes. Uno de ellos es la participación de Insumos Bolivia en la distribución y comercialización de fertilizantes a pequeños productores a precio justo, esto favoreció a los productores con precios más bajos que los mercados. Otro aspecto muy importante es la implementación de la planta de urea, la cual produce 650.000 Toneladas/año, aproximadamente 100.000 Toneladas/año serán para consumo interno y más de 500.000 Toneladas/año para la exportación. Finalmente, con la planta piloto de cloruro de potasio en Uyuni, el país pronto será autosuficiente con relación a este fertilizante y por ende se eliminará la necesidad de importar este producto. [55]

3.4.2 Efectos ambientales de los Fertilizantes Químicos

A continuación se describen los diferentes efectos ambientales negativos que ocasiona el uso de fertilizantes químicos cuando son usados sin procedimientos y normativas [56]:

a) Infertilidad de los suelos

En algunos casos que los fertilizantes químicos contienen niveles de nutrientes anormalmente altos, estos pueden saturar el suelo lo cual decrece la eficacia de otros nutrientes vitales y hasta llega a anularlos.

b) Suelos ácidos

El ácido sulfúrico y clorhídrico es muy común en varios fertilizantes, por lo que usarlos seguido o en cantidades altas, resultara en causar un daño grave a los microorganismos. Esto puede cambiar el pH del suelo de manera brusca y afectar negativamente el crecimiento de la planta.

d) Aumento de los microorganismos

Por otra parte, cuando se usa demasiado nitrógeno, genera un efecto contrario al ácido y se genera un exceso de microorganismos. En cantidades excesivas, estos microorganismos, en lugar de ayudar y contribuir con el crecimiento de las plantas, les harán daño, ya que se consume toda la materia orgánica y los nutrientes en el suelo circundante.

e) Contaminación de las aguas subterráneas

Cuando se aplica en exceso un fertilizante químico, no todos los nutrientes del fertilizante contribuirán al crecimiento y buen desarrollo de una planta. Por el contrario, el fertilizante excedente que no sería consumido por las plantas, se filtrará en el suelo y podría desplazarse con la lluvia, hasta los arroyos, ríos, lagos, y océanos. Los componentes químicos de estos fertilizantes llegarían a contaminar los suministros de agua potable y modificar ecosistemas.

f) Quemaduras de sal

Otro efecto negativo del uso excesivo de los fertilizantes, es que pueden provocar quemaduras de sal en las plantas. Esto ocurre cuando una saturación de sal hace que en ciertas áreas de la planta se deshidraten los tejidos de la planta y hará que la misma se seque.

g) Exceso de crecimiento

Debido a que los fertilizantes químicos son muy potentes, a veces pueden hacer que las plantas crezcan demasiado, siendo esto contraproducente para su propia salud. Por ejemplo al ser más grandes su peso incrementaría y podría afectar a sus raíces.

3.4.3 Aplicación de Fertilizantes marcados

Los experimentos con fertilizantes marcados con radioisótopos e isótopos estables son un método directo y rápido para obtener la respuesta final a las siguientes preguntas: dónde, cuándo y en qué forma se debe aplicar el fertilizante. En los últimos 20 años, los fertilizantes etiquetados con ^{32}P y ^{15}N se han utilizado ampliamente en la investigación de varios programas de investigación coordinados de la FAO / OIEA sobre arroz, maíz y trigo. La tecnología de isótopos implica la aplicación de fertilizantes marcados a los cultivos y la determinación de la proporción de nutrientes extraídos de los fertilizantes químicos en los cultivos. Afortunadamente, hay muchos isótopos que se pueden utilizar como trazadores para las relaciones suelo-planta y la investigación relacionada. En muchos países del mundo, la adopción de estos métodos mejorados de fertilización ha dado como resultado un ahorro de fertilizantes de millones de dólares cada año [57].

Así también la tecnología de isótopos proporciona un método rápido y confiable para obtener información sobre la distribución de raíces activas, la ubicación de áreas con mayor densidad de raíces absorbentes y los cambios estacionales de estos elementos. La colocación de los fertilizantes cerca de la zona de mayor actividad de raíces y en el momento en que éstas están más activas sería de utilidad directa, por lo tanto, para la formulación de prácticas de fertilización racionales en plantaciones de árboles de cultivo. Se ha desarrollado una técnica de inyección del suelo utilizando solución de fosfato marcada con ^{32}P , que se ha utilizado para determinar la distribución de las raíces de diversos árboles de cultivo de importancia económica para los países en desarrollo [57].



Figura 21. Rendimiento vs Fertilizante añadido [58]

El nitrógeno 15 se usa para determinar la cantidad de fertilizante que se requiere en los suelos y en los cultivos de varias especies, la cual debe hacerse de manera eficiente debido a su alto costo, todo con el propósito de mejorar la productividad de las tierras cultivadas mediante la identificación y desarrollo de prácticas adecuadas de manejo del suelo, agua y los nutrientes requeridos por los cultivos.

Expertos de todo el mundo usan esta tecnología nuclear para ayudar a los agricultores a mejorar el rendimiento de los cultivos, mejorar el uso de fertilizantes modernos, evaluar la calidad del arroz, los cereales y las verduras para determinar la calidad del abono [59]. Según algunos estudios, las plantas absorben menos del 40% de los fertilizantes utilizado en todo el mundo y el 60% restante se pierde en el aire o las aguas subterráneas o permanece en el suelo sin ser absorbidos [58].

3.5 Manejo de plagas

Las plagas son organismos vivos que afectan la calidad de los productos e inciden en la producción, cosecha y en los sistemas de producción agrícola limitando el comercio interno y externo.

El aumento constante de la demanda alimentaria en el mundo, generó que se incremente la producción de alimentos en Sud América, en especial (Argentina, Chile, Bolivia, Paraguay y Uruguay), transformándolos en una potencia en esta área, en especial en cereales y frutas. Sin embargo, este crecimiento se ve afectado por varios factores, entre ellos el incremento en la aparición de plagas y enfermedades en los cultivos a consecuencia del cambio climático. [60]

Una de las plagas que más afecta a la economía, no solamente a Bolivia, si no a nivel mundial, es la mosca de la fruta, estos son insectos del orden Diptera, familia Tephritidae, en Bolivia, la mosca de la fruta ataco por primera vez a durazneros y perales en 1942 en los valles de Tarija. Posteriormente, en los Yungas de La Paz, otras especies similares se identificaron [61].

3.5.1 Usos indebidos de plaguicidas

Para el control de plagas, normalmente se recurre al uso de diferentes plaguicidas, que son productos sintéticos de alta toxicidad, los cuales son aplicados en varias regiones del país, pero estos causan riesgo a la salud humana y al medio ambiente, contaminando agua y suelos debido al uso indebido de estos.

A continuación se explican algunos de los factores más comunes que causan este uso indebido [62]:

- Falta de conocimiento del agricultor;
- Falta de equipos de protección personal;
- Desconocimiento de los efectos residuales de los plaguicidas en el medio ambiente.
- Tendencia al uso excesivo y no necesario de plaguicidas de etiqueta roja (Sumamente peligroso y nocivo) y amarilla (Nocivo, altamente peligroso)

En Bolivia en el año 2002, se funda la empresa de Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria (SENASAG), con la tarea de proteger la sanidad agropecuaria y forestal, previniendo, controlando y erradicando las plagas y enfermedades que afectan a la flora y fauna [61].

3.5.2 La Técnica del Insecto Estéril (TIE).

Existen también otras alternativas para el control de las plagas y una de las que no se requiere ningún tipo de aplicación de productos químicos, es la Técnica del Insecto Estéril (TIE), la cual ya ha tenido éxito en diferentes países de Latinoamérica y otros continentes, principalmente para atacar la mosca de la fruta.

El jefe de la Sección de Lucha contra Insectos y Plagas de la División Mixta FAO/OIEA, menciona que fue H.J. Muller en el decenio de 1920 quien planteó que los rayos X o las radiaciones gamma podían ocasionar suficientes daños genéticos a los sistemas reproductivos de los insectos como para inducir la esterilidad. De acuerdo a esta técnica, si un número de especies objetivo de insectos se criaba, esterilizaba y soltaba en el campo, los insectos estériles se

aparearían con los silvestres. De estos apareamientos no surgirían descendientes, con los que se lograría un descenso de la población. Si se soltaba un número suficiente de insectos estériles, la tasa de reproducción de la población silvestre descendería rápidamente hasta llegar a cero. En otras palabras, ello equivalía al control de la natalidad de los insectos. El resultado fue la esterilización por irradiación [63].

Esta técnica fue usada por primera vez para la erradicación de la mosca gusanera de la isla holandesa de Curacao en 1954. Así, el proyecto inicial de TIE fue internacional y desde entonces han seguido así la mayoría de los proyectos que se han venido ejecutando en esta esfera. Actualmente, la TIE se utiliza para combatir aproximadamente 10 especies de insectos. Se están realizando actividades de investigación y desarrollo en relación con otras especies y se espera que en el futuro se difunda más el uso de esta técnica. La TIE puede aplicarse para la erradicación de los insectos en grandes zonas, con fines fitosanitarios y, en algunos casos, de control [64].

3.5.2.1 Modo de acción de la TIE

La TIE está basada en la producción de una gran cantidad de insectos de la especie objetivo en plantas de cría masiva, utilizando dietas artificiales. Los insectos producidos son esterilizados mediante radiaciones ionizantes a partir de Cobalto 60. Una vez que los insectos son esterilizados, estos son liberados en una región donde se localiza la población de la plaga que se quiere controlar. Se debe liberar un número de insectos estériles lo suficientemente grande para que asegure que la mayoría de los individuos de la población silvestre se apareará con insectos estériles, evitando así su reproducción. Usualmente se deben realizar continuas liberaciones de insectos estériles, de tal manera que la relación entre estériles a silvestres vaya aumentando en cada generación próxima. A medida de que la población silvestre va decreciendo la probabilidad de que se realicen apareamientos entre individuos silvestres es menor, de esa manera se va controlando la plaga, hasta poder eliminarla [65].

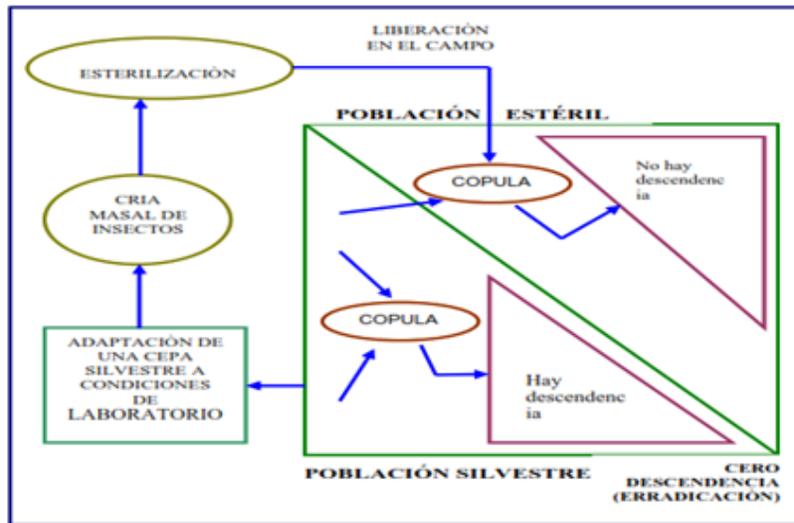


Figura 22. Esquema de funcionamiento de la TIE. [66]

3.5.2.2 Control de otros insectos que atacan al ser humano

El OIEA, reporta que la técnica de los insectos estériles se ha utilizado eficazmente contra muchas plagas de insectos. Se está adaptando este método respetuoso con el medio ambiente para reducir las poblaciones de mosquitos transmisores de enfermedades (Los mosquitos Aedes pueden transmitir los virus que causan el dengue, el chikungunya y el zika) [12]. Estos métodos serán aplicados en Bolivia en la lucha contra estas enfermedades que afligen a la población.



Figura 23. Técnica de los insectos estériles (TIE). Un método de control biológico [12]

Para los mosquitos, solamente pueden soltarse insectos macho, debido a que las enfermedades se transmiten a través de la picadura de las hembras, de esta forma la liberación de mosquitos macho no contribuiría en la propagación de las enfermedades sino todo lo contrario, reduce la propagación. Para poder soltar únicamente insectos macho estériles, es necesario separarlos de las hembras y este proceso ya está bien establecido en varios países [12].

Se siguen efectuando investigaciones y ensayos de campo para estudiar la eficacia de la técnica en las especies de mosquitos que transmiten los virus del Zika, el chikungunya y el dengue, varios países están incorporando la TIE a los programas integrados de control de mosquitos [12].

4 RADIACIONES EN LA INDUSTRIA

4.1 Aplicaciones no eléctricas en la industria

Las aplicaciones de la radiación ionizante en la industria para fines no energéticos, son muchas y diversas. Estas, se aplican en varias industrias como la minería, la industria manufacturera, seguridad, entre otros.

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

- Atravesar o penetrar la materia. Como se describió en el Tomo 1 [2], 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 identificara 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 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 explicaran los tipos de medidos con radiación ionizante con más detalle en el cuadro 2.

Las aplicaciones con mayor relevancia de la radiación ionizante en la industria no energética son [67]:

- Medidores en la industria.
- Polimerización y la esterilización.
- Ensayos no destructivos como la radiografía, la neutrografía y la gammagrafía.
- Radiotrazadores.

4.1.1 Uso de radiación ionizante en medidores en la industria

Cuadro 2. Diferentes medidores que usan radiación [67]

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

Fuente: Elaboración propia

Las mediciones del cuadro 2 tienen las siguientes características:

- Mediciones no destructivas,
- No se tiene contacto entre el sensor y la muestra,
- Es económicamente rentable,
- La muestra puede estar en movimiento.

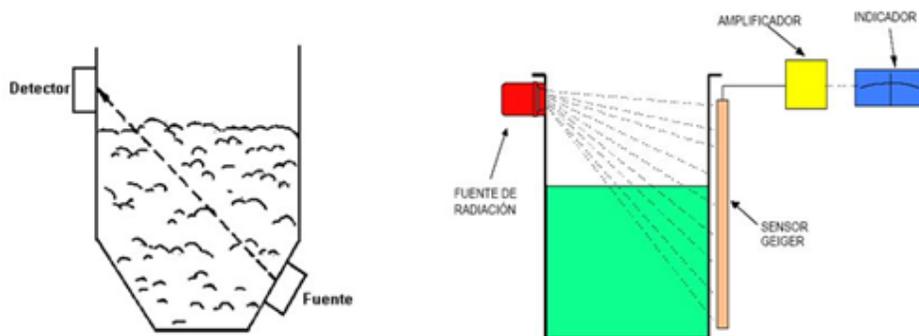


Figura 24. Medidor de nivel [68]

Por ejemplo en la figura 24 se muestra un medidor de nivel, compuesto por una fuente de radiación ionizante, un detector, sensor (tubo de fibra óptica) y un amplificador.

4.1.2 Procesos de polimerización

A través de la polimerización se mejoran las propiedades de algunos materiales, por lo que se pueden obtener materiales con mayor resistencia al calor y/o a la oxidación, con mejores propiedades de corte y con mayor estabilidad mecánica.

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. Con la ventaja de que este método no deja residuos de iniciadores y catalizadores. [69]

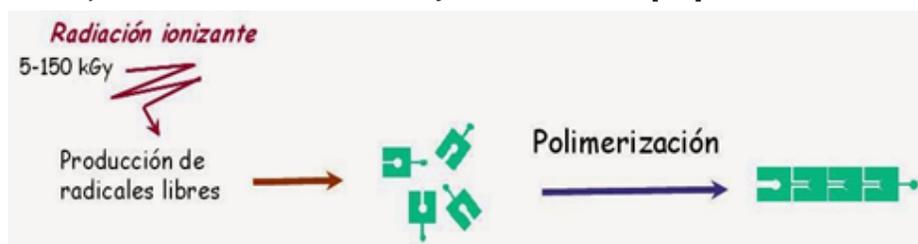


Figura 25. Polimerización por radiación ionizante [67]

A través de la tecnología de polimerización se obtienen los siguientes productos: neumáticos, cables para autos, aviones o para instalaciones industriales, equipos electrónicos, tuberías plásticas o plásticos aislantes, todos estos con mejores propiedades químicas, mecánicas, etc.

4.1.3 Proceso de esterilización

Esto se basa en la acción bactericida por medio de la radiación ionizante, es decir su capacidad para exterminar microorganismos patógenos.

La radiación ionizante permite 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 lo puede usar en diversos ámbitos, como el industrial, médico, patrimonio cultural, etc.

Las radiaciones ionizantes usadas en este proceso son: la radiación gamma, los rayos X y los haces de electrones. Estos tipos de radiación son aceptados por organismos internacionales como la FAO, la OMS y el OIEA [70]

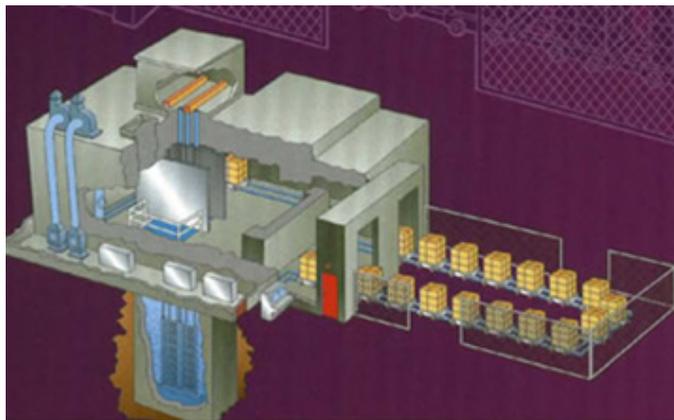


Figura 26. Esterilización por radiación [71]

Se puede observar en la figura 26 como es el proceso de esterilización de insumos médicos y/o alimentos. Estos productos ingresan, empacados (cabe resaltar que no necesitan salir de su empaque para realizar esta técnica), a una sala de irradiación donde son irradiados (con rayos gamma principalmente) durante un cierto periodo para su posterior retiro. Para la emisión de

rayos gamma se utilizan principalmente los siguientes radionucleidos: el cobalto-60 (^{60}Co) y el cesio-137 (^{137}Cs), aunque las nuevas instalaciones optan por usar el cobalto, debido a que el cesio se encuentra como polvo, lo cual lo hace más fácil su dispersión a diferencia del cobalto que viene en pellets sellados.

Existen varios tipos de irradiadores, a continuación se describirá uno de los procesos más comunes para irradiar alimentos que se usa, es el de mover los productos empacados mediante una cinta industrial (como se ve en la Figura 26) 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, son etiquetados (etiquetas especiales que indican que el producto fue irradiado) y están listos para su despacho, (pese a que esta barra es pequeña y no contiene grandes cantidades de cobalto-60, si una persona estuviera expuesta a ella sin ninguna barrera, equipo de protección personal y sin la protección del agua, la persona moriría en cuestión de minutos, por ello se tienen muchas barreras de seguridad), un dato curioso es que el fondo de la piscina tiene un brillo azul (efecto Cherenkov, es una radiación de tipo electromagnético producida por el paso de partículas cargadas eléctricamente en un determinado medio a velocidades superiores a la velocidad de fase de la luz en ese medio) [72].

4.1.4 Ensayos no destructivos

Estos ensayos son usados para certificar que los productos estén en estado óptimo, encontrando los pequeños defectos que son invisibles al ojo humano. Por ejemplo, es usado para la inspección de fisuras en una estructura, tubería, soldadura, etc.

Para realizar este tipo de ensayos, se debe irradiar el material a estudiar, estos absorben parte de la energía de radiación de manera proporcional a su espesor, densidad del material y su densidad relativa. Entonces mientras más denso, espeso y menor número atómico tenga el material, este absorberá más energía y menos energía llegará a la placa fotográfica que se encuentra por detrás, dando un tono más claro en una escala de blanco al negro. Por lo tanto, si la fotografía es oscura, esto significa que la radiación ha atravesado un material de poca densidad o poco grosor, lo cual indica que este presenta fallas o desperfectos en esas áreas.

Existen estos tipos de ensayos:

- Radiografías (rayos X)
- Gammagrafías (rayos gamma)
- Neutrografías (neutrones)

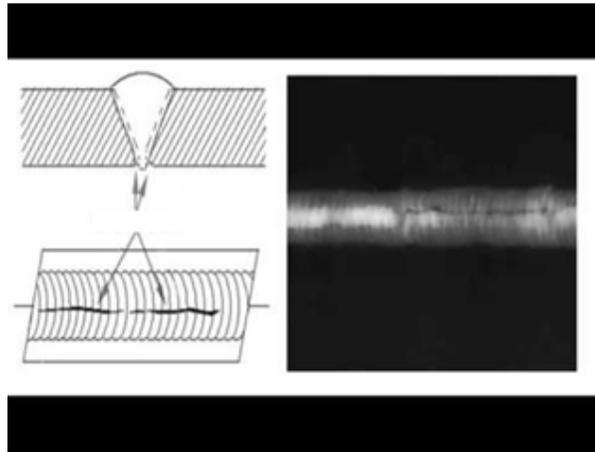


Figura 27. Rayos X en una tubería [73]

En la figura 27 se puede ver la línea negra en medio de la tubería, esto muestra que el material presenta un corte interno y que podría estar a punto de quebrarse. Estos ensayos sirven para verificar que las instalaciones están en óptimas condiciones o si requieren mantenimiento o cambios.



Figura 28. Rayos X en los aeropuertos [67]

En la figura 28 se puede observar el uso de rayos X en los aeropuertos para detectar objetos peligrosos y/o no permitidos dentro de los aviones.

4.1.5 Patrimonio cultural

El patrimonio cultural es el legado, de algunos objetos físicos y también de atributos intangibles de un grupo o sociedad, los cuales se vienen heredando de las generaciones pasadas y se deben mantener para el conocimiento y beneficio de las generaciones futuras. Todo lo tangible se resume principalmente: en obras de arte, artefactos coleccionables de los museos, libros, manuscritos, dibujos, instrumentos musicales, objetos etnográficos, hallazgos arqueológicos, colecciones de historia natural, edificios históricos, lugares históricos, monumentos y objetos del patrimonio industrial. Hoy en día los museos se han convertido en instituciones muy importantes para cada país y no solo por la cultura, sino también para el turismo, la economía y por supuesto para la identidad nacional.

La preservación del patrimonio cultural de cada país sigue siendo un desafío actual, teniendo muchas condiciones diferentes a enfrentar como: almacenamiento incorrecto, el cambio climático o diversas adversidades como las inundaciones conducen al deterioro o la pérdida de esta herencia histórica. Previamente se utilizaron métodos químicos y físicos para el tratamiento y la restauración del patrimonio cultural. Sin embargo, estos métodos utilizan productos químicos y estos dejan sub productos no deseados, y los métodos físicos usualmente necesitan condiciones extremas, los cuales no siempre son adecuados para todo tipo de material. El OIEA realizó y continua realizando varios proyectos para apoyar la aplicación de la radiación ionizante [74], este método ya ha sido aceptado para el cuidado y preservación del patrimonio cultural, sin tener los efectos negativos de los otros métodos.

4.1.6 Ventajas de la radiación en el patrimonio cultural

La preservación del patrimonio cultural mediante técnicas de radiación tiene características específicas y ventajas indiscutibles sobre los procedimientos clásicos.

La primera ventaja es la inofensividad, esto debe resaltarse y explicarse ampliamente para contrarrestar la resistencia pública a las áreas relacionadas con la energía nuclear. En general, el dominio nuclear es vasto, la radioterapia ^{60}Co (una de las pocas formas de combatir el cáncer) o la esterilización por irradiación (un método que trajo dispositivos médicos considerablemente más baratos).

Esta tecnología no deja ningún residuo en el artefacto tratado así como tampoco causa algún daño al medio ambiente. 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, y no hay riesgo para el medio ambiente.

Otra ventaja importante es la eficacia. Esto se basa en dos hechos:

- La radiación gamma penetra en cualquier material y es efectiva hasta su profundidad de penetración, que depende de la densidad del material y la cantidad de la carga.
- El efecto biocida se controla mediante un único parámetro de procesamiento, la dosis absorbida, comúnmente llamada dosis. Puede ser fácilmente calculado, entregado a un nivel conocido, medido y certificado.
- Otra ventaja es que los artefactos se pueden irradiar sin sacarlos del paquete o contenedor, utilizado para su transporte.

Se pudo mostrar varias ventajas y diversos usos para la radiación ionizante y no ionizante. Cabe recalcar que esta tecnología cada vez es más avanzada y muy segura para la población. Hoy en día estas tecnologías son usadas por personal muy capacitado, y además con el avance de la tecnología estas aplicaciones presentan sistemas de seguridad muy avanzados los cuales protegen ante casi cualquier situación o condición anormal.

4.2 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 [75]:

4.2.1 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 puede determinar la edad y distribución de elementos de diferentes rocas o suelos.

Para esto se usa el análisis por activación neutrónica (AAN) que se detallará en el subtítulo 5.7. Este método es muy sensible y puede determinar en muestras muy pequeñas más de 40 elementos. Este método es muy usado en la actualidad para encontrar tierras raras, oro, platino, uranio y torio [75].

4.2.2 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 subyacentes o adyacentes [75].

4.2.3 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 pueden realizar estos análisis con otros métodos como las sondas gamma-gamma que son detectores de centelleo usados para la medición de la radiación gamma, mediante la intensidad de radiación gamma que retorna se pueden detectar porosidades de rocas donde hay petróleo, gas o minerales metálicos de alta densidad [75].

4.2.4 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 [75].

4.2.5 Trazadores en el tratamiento de minerales

Los trazadores radiactivos pueden ser usados para el estudio del flujo, la mezcla y el triturado de los materiales. También se usan para analizar las reacciones físico químicas de la separación del metal y su escoria, finalmente usado en el control de calidad para determinar que no se tengan inclusiones no metálicas en estos [75].

5 ENERGÍA

En este capítulo presentarán las diferentes y principales fuentes de generación de energía actual en el mundo, y se enfocará principalmente en la energía nuclear por fisión.

La energía está presente en todo lo que sucede al alrededor, desde usar un electrodoméstico, hasta salir a pasear en auto por la ciudad. Sin embargo se debe entender primero que es la energía [76].

5.1 ¿Qué es la energía?

La energía es la capacidad de realizar un trabajo, el trabajo es la fuerza que actúa sobre un objeto provocando su desplazamiento.

A menudo se ve la frase “consumo de energía”, sin embargo esta energía nunca se consume, solo se transfiere entre estados de una forma u objeto a otro.

5.2 Generación de la electricidad

En la figura 29, se muestra el sistema de suministro eléctrico de la energía eléctrica, desde la generación hasta el consumo final por clientes industriales o residenciales.

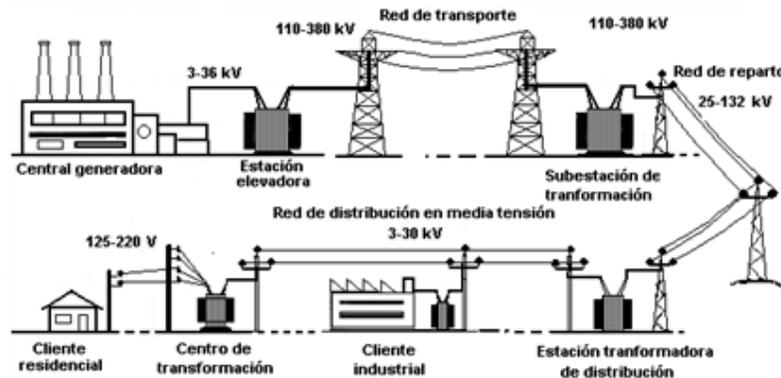


Figura 29. Generación y distribución de la energía eléctrica [77]

En la figura 29 se observa que en primer lugar se requiere una central de generación de energía (sin importar la fuente de la que provengan), generalmente el generador provee electricidad en media tensión, motivo por el cuál se requiere un transformador elevador para incrementar la tensión a alta o extra alta tensión (115 a 220 kV). La electricidad generada se transporta a través de líneas de transmisión de alto voltaje con el objetivo de reducir pérdidas en grandes distancias. Posteriormente la electricidad reduce su voltaje mediante un transformador reductor

donde se proveerá energía a consumidores de subtransmisión, a consumidores primarios y finalmente a consumidores secundarios los cuales son de consumo doméstico en ciudades o pueblos.

5.3 Fuentes de energía

Las fuentes de energía se pueden clasificar en dos tipos dependiendo de su origen.

- Fuentes de energía no renovables
 - ◇ Combustibles fósiles:
 - Carbón.
 - Gas natural.
 - Petróleo.
 - ◇ Combustible nuclear:
 - Energía nuclear por fisión.
 - Energía nuclear por fusión.
 - ◇ Fuentes de energía renovables:
 - Energía solar.
 - Energía eólica.
 - Energía mareomotriz.
 - Geotérmica.
 - Biomasa.
 - Hidroeléctrica.



Figura 30. Tipos de energía renovable y no renovable [78]

En la figura 30 se puede apreciar los tipos de energía, renovable y no renovable. Y se puede ver cómo llegan al mismo objetivo, siendo en éste caso “la producción de energía eléctrica o energía térmica”, en dependencia del uso que se requiera.

La contribución de los diferentes tipos de energía a nivel mundial en el año 2019 está reflejada, en la figura 31 y la tabla 6.

Tabla 6. Contribución en la generación de electricidad según la fuente de energía año 2019

Carbón	Aceite	Gas Natural	Biocombustible	Residuos	Nuclear	Hidroeléctrica	Geotérmica	Solar	Eólica
36.74%	2.77%	23.52%	2.01%	0.42%	10.34%	16.04%	0.34%	2.52%	5.29%

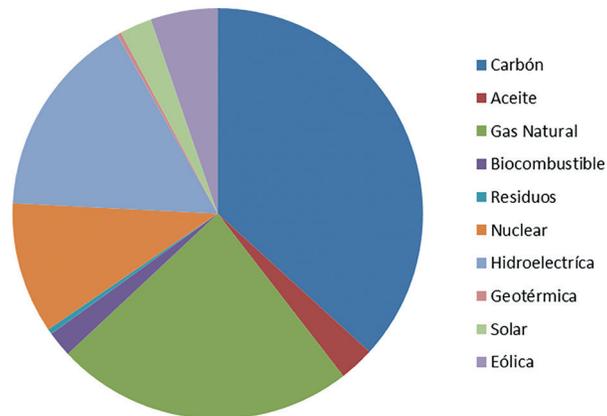


Figura 31. Contribución en la generación de electricidad según la fuente de energía año 2019 [79]

En la figura 31 se muestra que aproximadamente; el 68.22% de la producción mundial de energía es generada por la energía termoeléctrica, el 17.38% por la energía hidroeléctrica, el 12.32% por la nuclear y el restante 2.08% por energías renovables. Estas diferentes fuentes de energía serán detalladas adelante.

5.4 Fuentes de generación de energía

5.4.1 Energía termoeléctrica

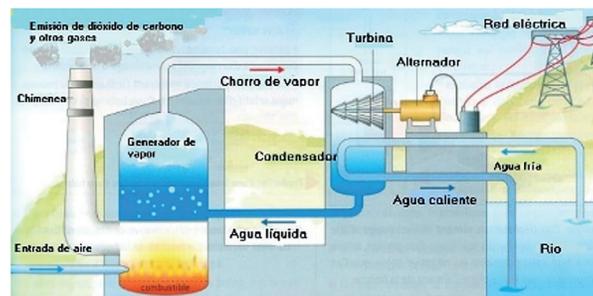


Figura 32. Diagrama de centrales térmicas [80]

Las centrales termoeléctricas generan energía quemando gas o carbón principalmente como se

ve en la figura 32. Estas centrales producen aproximadamente el 68% de la energía mundial y casi todos los países la usan a continuación se explican algunas de sus ventajas y desventajas:

- Ventajas
 - ◊ Son capaces de generar grandes cantidades de electricidad en una locación.
 - ◊ Costo beneficio.
 - ◊ El combustible es estable.
 - ◊ El tiempo de construcción es menor.
- Desventajas
 - ◊ La sobreexplotación de combustibles fósiles ya ha iniciado su agotamiento.
 - ◊ Emiten gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, contribuyendo en el calentamiento global.
 - ◊ Tiene un efecto negativo en la capa de ozono influyendo negativamente al ecosistema.
 - ◊ La extracción de carbono conlleva a la destrucción de grandes áreas afectando a las personas que viven cerca.
 - ◊ Crean olores desagradables en la zona en la que están instaladas y las cercanas.

5.4.2 Energía hidroeléctrica

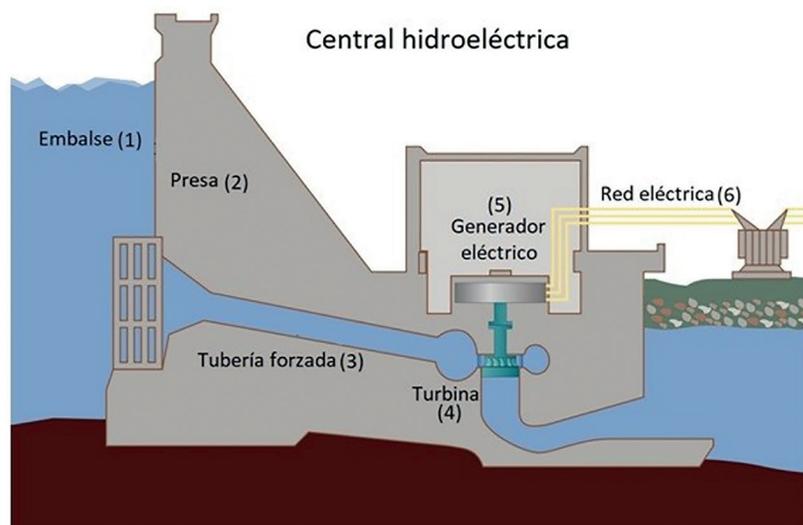


Figura 33. Diagrama de plantas hidroeléctricas [81]

Las plantas hidroeléctricas aprovechan la energía potencial que produce el agua al bajar una pendiente ya sea natural o artificial, esta energía potencial se transforma a energía cinética y al mover una turbina esta energía cinética se transforma en energía mecánica, la que final-

mente va a un generador y produce energía eléctrica. En la figura 33 se puede observar la pendiente por la que el agua baja y va ganando velocidad hasta chocar con la turbina. A continuación, se explican algunas de sus ventajas y desventajas:

- Ventajas
 - ◊ La fuente empleada (agua) para generar energía es gratuita.
 - ◊ Generan energía continuamente.
 - ◊ Usan una fuente renovable.
 - ◊ No emiten gases de efecto invernadero.
- Desventajas
 - ◊ Se inundan grandes superficies de terreno, principalmente en bosques y selvas.
 - ◊ Cambian el régimen de las aguas subterráneas.
 - ◊ Salinización de la tierra, lo cual perjudica en la agricultura.
 - ◊ Acumulación de contaminantes en los sedimentos
 - ◊ Evaporación del agua, creando un cambio del clima regional.
 - ◊ Grandes represas pueden afectar los ecosistemas de los ríos y comunidades cercanas.
 - ◊ Requieren tiempos de construcción e inversión elevados.

5.4.3 Energía solar



Figura 34. Paneles solares [82]

La generación de energía solar, también denominada energía fotovoltaica se realiza mediante el uso de una serie de células fotovoltaicas donde la radiación solar se convierte en electricidad siguiendo el principio de efecto fotovoltaico. Junto con la generación eólica constituyen los dos componentes de mayor crecimiento en cuanto a su implementación

entre las fuentes de generación renovables. A continuación, se nombran algunas de sus ventajas y desventajas:

- Ventajas
 - ◊ La fuente usada para generar energía es gratuita e ilimitada.
 - ◊ Pueden ser empleados en áreas rurales y remotas
 - ◊ No emiten gases de efecto invernadero.
 - ◊ Los costos de generación se están reduciendo debido a una investigación y desarrollo continuo.
 - ◊ Son ampliamente aceptados por la sociedad y muchos gobiernos están invirtiendo grandes cantidades en su implementación a nivel mundial.
- Desventajas
 - ◊ No están disponibles en la noche o en mal tiempo.
 - ◊ Desechos tóxicos como el Cadmio.
 - ◊ Incrementa el Albedo de la zona que es la radiación natural por el sol.
 - ◊ Incrementa la temperatura del aire en la zona.
 - ◊ Ocupa grandes superficies.

Se deben realizar estudios de viento en los posibles sitios de emplazamiento por periodos largos. Se describieron las fuentes de energía más empleadas, también está la energía geotérmica, la energía mareomotriz, la energía por biomasa, etc. Las cuales al igual que todas tienen ventajas y desventajas, pero por su baja participación en la matriz energética mundial no se las mencionará a detalle.

5.4.4 Energía eólica

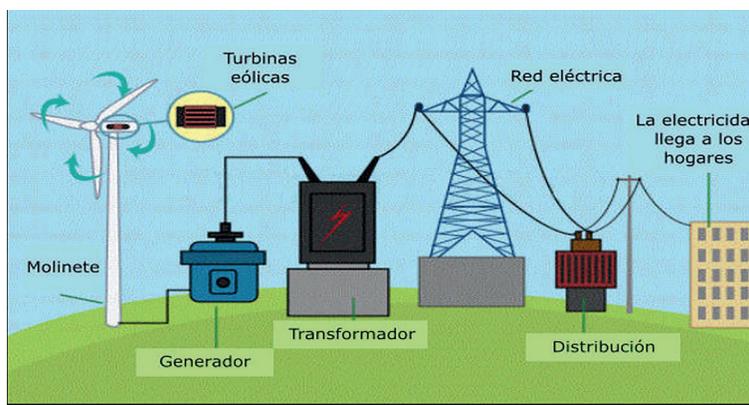


Figura 35. Diagrama del uso de la energía eólica [83]

La energía eólica como muestra la figura 35, es una fuente de energía renovable, se emplea el viento

para girar las palas de un aerogenerador, el cual a su vez pone en funcionamiento una turbina que producirá energía eléctrica, como se mencionó anteriormente junto con la generación fotovoltaica son las que gozan de mayor aceptación e inversión en su implementación. A continuación, se nombran algunas de sus ventajas y desventajas:

- Ventajas
 - ◇ La fuente usada para generar energía es gratuita.
 - ◇ Fuente de energía limpia, no emite gases de efecto invernadero.
 - ◇ Los costos de generación se están reduciendo debido a una investigación y desarrollo continuo.
 - ◇ Son ampliamente aceptados por la sociedad y muchos gobiernos están invirtiendo grandes cantidades en su implementación a nivel mundial.
- Desventajas
 - ◇ Contaminación de ruido.
 - ◇ Producción de aluminio.
 - ◇ Posible impacto en el clima.
 - ◇ Dañino para las aves.
 - ◇ Produce radio interferencias.
 - ◇ Ocupa grandes superficies.
 - ◇ Dependencia del recurso base (viento).
 - ◇ Se deben realizar estudios de viento en los posibles sitios de emplazamiento por periodos largos.

Se describieron las fuentes de energía más empleadas, también está la energía geotérmica, la energía mareomotriz, la energía por biomasa, etc. Las cuales al igual que todas tienen ventajas y desventajas, pero por su baja participación en la matriz energética mundial no se las mencionará a detalle.

5.4.5 Energía nuclear por fisión

La energía eléctrica nuclear por fisión se produce de manera similar a la mayoría de energías con la diferencia de que la energía nuclear produce calor mediante la fisión nuclear dentro del núcleo de reactor en un circuito primario, el mismo es transmitido a un circuito secundario que genera vapor, el cual hace rotar la turbina generando energía eléctrica, el principio de funcionamiento se muestra a continuación en la figura 36. El tipo más común de reactores en operación a nivel mundial son los reactores a agua ligera, que emplean agua como refrigerante y moderador de neutrones.

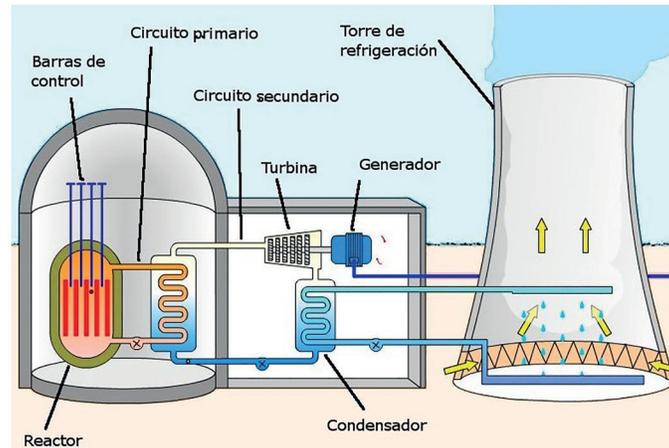


Figura 36. Instalación de una planta de energía nuclear de agua presurizada [84]

En la figura 36 se puede observar que el reactor y el generador de vapor principalmente se encuentran dentro de una estructura de concreto y acero, denominado edificio de contención, el cual impide la emisión de material radiactivo a la atmósfera en caso de accidente.

Estos reactores cuentan con 3 ciclos de agua, el primer ciclo, también conocido como circuito primario en el que el agua pasa por el núcleo del reactor representado en color naranja en la figura previa, el agua que pertenece a este circuito alcanza temperaturas cercanas a los 300 °C y se encuentra en contacto directo con el núcleo del reactor, por tanto no debe filtrarse al circuito secundario o al exterior, puesto que es altamente peligrosa por el contacto directo con el núcleo.

El agua del segundo ciclo, también conocido como circuito secundario, no es radiactiva puesto que no entra en contacto con el núcleo, entra al generador de vapor y a través de un proceso de intercambio de calor con el agua del circuito primario se calienta hasta convertirse en vapor de agua que alimenta la turbina. Ésta comenzará a rotar por la transformación de energía cinética a mecánica, la cual seguirá a un generador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Este vapor después de hacer rotar la turbina pasará a un condensador enfriándose mediante un intercambio de calor con el circuito terciario para posteriormente repetir el ciclo.

El tercer ciclo consiste en el agua que enfriará el agua del segundo ciclo dentro del condensador, al recibir el calor del segundo ciclo esta agua se evaporará y debe ser enfriada en grandes torres de enfriamiento para su recirculación.

5.5 Reactores de potencia

Los reactores de potencia se utilizan principalmente en centrales nucleares para la producción de electricidad, pero tiene usos alternativos como la propulsión de grandes barcos (rompehielos) y submarinos, desalinización de agua de mar y agua salobre. Los reactores de esta categoría tienen una potencia térmica considerable, alcanzando típicamente valores entre 1000 y 1500 MW térmicos.

Los principios de producción de electricidad son los mismos para la mayoría de reactores de potencia, como se explicó previamente.

Los componentes de un reactor de potencia de agua presurizada (PWR) son:

- **Combustible:** El Uranio enriquecido y/o natural son los principales combustibles nucleares empleados en la actualidad, sin embargo los nuevos diseños de reactores consideran el empleo de Torio y combustible nuclear gastado. El combustible basado en uranio, específicamente óxido de uranio UO_2 es procesado en forma de pellets o pastillas con un peso aproximado de 10 gramos y 1 centímetro de alto que son apilados en pequeños tubos qfabricados de una aleación de zirconio (Zircalloy) y son dispuestos en arreglos de 14x14, 15x15 o 17x17 varillas de combustible para formar los ensamblajes de combustible. También existen otros combustibles menos usados: como el plutonio, los óxidos mixtos de plutonio y uranio (por sus siglas en ingles MOX), etc. Por ejemplo, un reactor PWR de 1000 MW contiene aproximadamente 51000 varillas de combustible con más de 18 millones de pellets.
- **Moderador:** El moderador se usa para ralentizar los neutrones, incrementando la probabilidad de absorción de estos por los átomos fisibles de U-235 y sostener la reacción en cadena. Los moderadores más empleados según el tipo de reactor son el agua (H_2O), agua pesada (H_2O^2) o grafito.
- **Barras de control:** Las barras de control se fabrican de un material absorbente de neutrones, su función es la absorción de neutrones libres para el control o detener el proceso de fisión nuclear, su mecanismo de operación es, ser insertados o retirados del núcleo, de esa forma se logra controlar la tasa de reacción de fisión.
- **Refrigerante:** El refrigerante es un fluido que va a través del núcleo del reactor para transferir calor a este y controlar el núcleo a una temperatura estable.
- **Bombas principales de alimentación:** Son las bombas que sirven para inyectar agua fría

al núcleo.

- **Generador de vapor:** El generador de vapor se usa para producir vapor en el circuito secundario, el cual es enviado a las turbinas para la generación de electricidad. Es uno de los componentes más delicados puesto que cuenta con una gran cantidad de tubos de un diámetro reducido para la circulación del agua del circuito secundario. El agua presente en ambos circuitos no debe entrar en contacto en ningún caso.

5.6 Ciclo del combustible nuclear

El ciclo del combustible nuclear, es la progresión del combustible a través de diferentes etapas. Estas etapas pueden ser agrupadas en 3 etapas grandes: la primera etapa es la preparación del combustible, la segunda etapa es durante el periodo de servicio del combustible y la tercera etapa para manejar seguramente el combustible usado o su reproceso (ciclo cerrado) o para su almacenamiento (ciclo abierto).

En la figura 37 se observan las diferentes etapas detalladas en el ciclo del combustible nuclear (CCN).

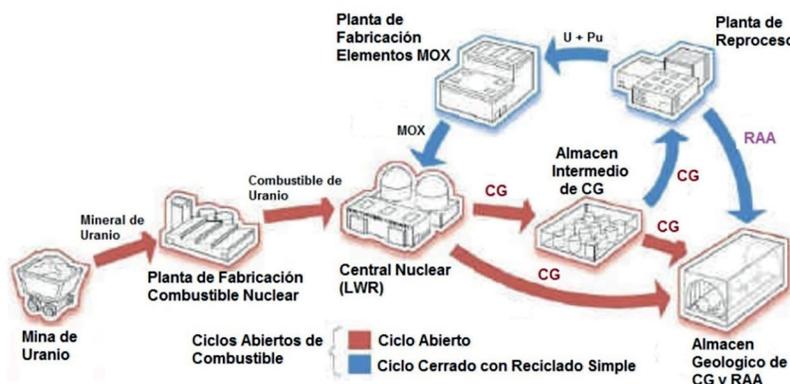


Figura 37. Ciclo abierto de combustible nuclear [84]

Como se ve en la figura 37 el primer paso en el CCN es la extracción del Uranio de las minas, la siguiente etapa es la molienda que consiste en recuperar el uranio mediante procesos químicos y el producto final es la torta amarilla (yellow cake), después se debe hacer la conversión del Uranio y realizar el enriquecimiento de éste para poder utilizar el uranio enriquecido dependiendo del tipo de reactor y el uso que se le dará a ese Uranio. Una vez que el uranio llega al enriquecimiento necesario se procede a la fabricación de combustible el cual será el combustible de una planta de energía nuclear. Una vez que el combustible haya terminado su funcionalidad en el reactor se lo podrá reprocesar o almacenar en un almacenamiento final, el

cual está diseñado para almacenar desechos de alto peligro radiactivo

El ciclo del combustible en su etapa final puede variar entre el ciclo abierto o el ciclo cerrado.

El ciclo de combustible abierto es el modo de operación donde el material nuclear pasa a través de un reactor solo una vez, después de irradiarlo, el combustible usado es almacenado en piscinas de enfriamiento por periodos de entre 5 y 10 años hasta que el calor residual disminuya lo suficiente para permitir su manipulación posterior, llevándolo en última instancia a un depósito geológico.

Este ciclo es utilizado por varios reactores en el mundo, se puede observar en la figura 38.

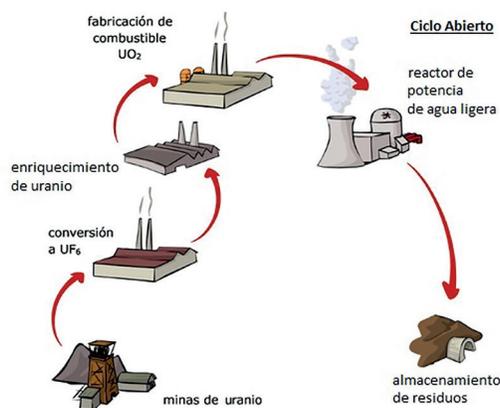


Figura 38 Ciclo abierto de combustible nuclear [86]

En la figura 38 se puede observar que el ciclo va en una sola dirección y que el combustible solo es usado una vez, para posteriormente depositarlo geológicamente.

El ciclo de combustible cerrado es el modo de operación en el cual después de un cierto periodo de enfriamiento del combustible gastado, el mismo es enviado a una planta de reprocesamiento para extraer el Uranio y Plutonio de los productos de fisión. El uranio y plutonio reprocesado se puede emplear nuevamente en reactores de potencia.

Esta estrategia de reprocesamiento ya está siendo usada en reactores de agua liviana, donde parte de su combustible es el MOX o en reactores rápidos que usan combustible reprocesado (uranio y plutonio). El proceso se puede observar en la figura 39.

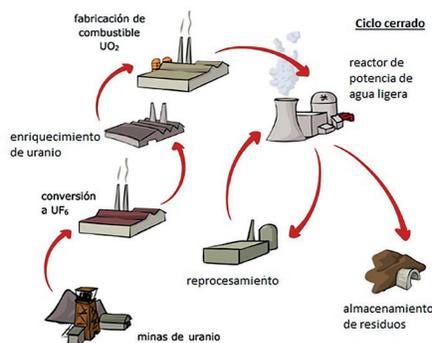


Figura 39 Ciclo cerrado de combustible nuclear [86]

5.7 Aplicaciones no eléctricas de reactores

Las diversas aplicaciones no eléctricas de los reactores nucleares, pueden brindar soluciones sostenibles a diversos problemas que se tendrán que afrontar en generaciones presentes y futuras. Se tiene un interés creciente en todo el mundo por la utilización de la energía nuclear en aplicaciones como la desalinización de agua de mar, la producción de hidrógeno verde, la calefacción urbana y diversas aplicaciones industriales. A continuación se presentan algunas de estas:

- La desalinización del agua empleando energía nuclear es una opción viable para combatir la actual y creciente demanda de agua potable en el mundo y es una medida que podría detener algunos de los problemas que se vieron en el Capítulo 2 de este texto.
- El hidrógeno cumplirá un papel fundamental en muchas aplicaciones industriales y es reconocido como un combustible limpio dado que su combustión no genera gases de efecto invernadero, asimismo, puede emplearse para almacenar energía por periodos largos. La tecnología nuclear para la producción de hidrógeno ofrece un gran potencial con varias ventajas con respecto a otros métodos.
- Suministro de calefacción, calor industrial y residencial.
- Propulsión de cohetes, submarinos, cruceros, rompehielos, etc.
- La medicina nuclear en donde se producen radiofármacos, técnicas de radioterapia para el tratamiento de tumores malignos, la teleterapia es usada en el tratamiento oncológico y la biología radiológica, con la cual se esterilizan insumos médicos.
- En la agricultura produciendo isótopos para incrementar la producción en países en vías de desarrollo. Por otro lado, la tecnología nuclear es usada para control de plagas de insectos y en el máximo aprovechamiento de los recursos hídricos.

- La aplicación nuclear en la alimentación, donde es usada principalmente para incrementar la conservación de los alimentos.
- En el estudio de soluciones a problemas ambientales, donde con la ayuda de isótopos es posible determinar las cantidades exactas de sustancias contaminantes, su lugar exacto y sus causas.

5.8 Reactores de investigación

Los reactores de investigación son reactores nucleares de menores dimensiones, éstos se usan principalmente como fuente de neutrones, la diferencia con los reactores nucleares de potencia, es que son de menor potencia y los mismos no son capaces de producir energía dado que las temperaturas de operación son mucho menores. Asimismo, cuentan con un diseño más simple, funcionan a temperaturas inferiores, requieren menor cantidad de combustible y con diferentes enriquecimientos. Su principal rol es el de la investigación y capacitación de personal, por lo tanto muchos de estos reactores se encuentran en campus universitarios o centros de investigación.

Las potencias de los reactores de investigación son muy inferiores a las de un reactor de potencia, por ejemplo, los de investigación se encuentran entre los 0 MW (megavatios) y 200 MW, a diferencia de un reactor de potencia que puede llegar hasta 3000 MW. La mayoría de los reactores de investigación tienen potencias menores a 1 MW según el OIEA [87], por ejemplo el reactor de investigación con el que contará Bolivia tendrá una potencia de 200 kW.

Los neutrones son partículas subatómicas en todos los átomos con excepción del Hidrógeno (1H), estos pueden ser producidos en un reactor con diferentes fines. Estas partículas se usan en diferentes campos, como la industria, la medicina, la agricultura, la biología, la química, entre otros. A diferencia de los reactores de potencia, los reactores de investigación se pueden usar con el fin de enseñanza y capacitación para generar recursos humanos especializados. Esto se debe a su menor complejidad, lo que significa que sus sistemas y sus diseños usualmente son más sencillos y de fácil entendimiento, por tanto se pueden simular diferentes condiciones del reactor con una completa seguridad. Los reactores de investigación pueden utilizarse para dar formación a los operadores de los reactores, al personal de mantenimiento, operadores de nuevas instalaciones nucleares, personal de protección radiológica, órganos reguladores, estudiantes e investigadores; por lo tanto contribuye grandemente a la formación de personal capacitado.

A continuación, se explicará brevemente los principales usos de un reactor de investigación [88]:

- Educación y entrenamiento: Todos los reactores de investigación pueden ser usados con este fin, donde se puede educar a estudiantes sobre la física de un reactor y al público en general sobre la tecnología nuclear básica.
- Análisis por activación neutrónica: El análisis de activación de neutrones (AAN) es una técnica analítica cualitativa y cuantitativa basado en la medición de la radiación característica de los radionúclidos formados directa, o indirectamente, por la irradiación de neutrones del material, es empelada para poder determinar la presencia de elementos en una variedad muestras complejas. Se puede usar este análisis de varias formas dependiendo de los elementos y la matriz contenedora de los mismos, así como de la naturaleza y el alcance.
- Producción de radioisótopos: Los radioisótopos son elementos inestables que decaen radiactivamente hasta llegar a la estabilidad. Durante este decaimiento los radioisótopos emiten varios tipos de radiación que pueden ser usados en la medicina o la industria.
- Efectos de transmutación: Se usan neutrones y/o radiaciones gamma para provocar un cambio en las propiedades de un material. Para lograr transmutar elementos generalmente se requieren flujos de neutrones significativos para inducir esté efecto en un período de tiempo razonable, por tanto se requieren reactores de potencia intermedia y superior. Además, para producir cantidades suficientes de producto para que sean

Un reactor de investigación puede usarse en diferentes ámbitos según su potencia y necesidad. Los reactores de investigación representan un gran desarrollo tecnológico, pero no se los puede construir inmediatamente, estos deben cumplir con una cantidad de requerimientos y reglamentos de seguridad previos al igual que la infraestructura necesaria.

5.9 Reactores modulares pequeños (por sus siglas en ingles SMR)

Los reactores modulares pequeños, son aquellos reactores con una potencia menor a los 300 MWt por módulo, algunos diseños permiten la interconexión entre módulos logrando producir mayores cantidades de energía, según el requerimiento. El principio de modularidad de los SMR establece que gran parte de sus componentes principales pueden ser manufacturados y ensamblados en fábrica, llegando al sitio de emplazamiento casi listo para su montaje, reduciendo las actividades de ensamblaje especializado en sitio.

Actualmente hay un interés creciente en los SMR, los cuales tienen un diseño simplificado y otros usos como la cogeneración. Este interés en los reactores de energía nuclear pequeños y medianos se debe tanto al deseo de reducir el impacto de los costos de capital inicial, como

a proporcionar energía lejos de los grandes sistemas de redes, tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo.

Se pueden instalar fácilmente en sitios de zonas industriales abandonadas en lugar de plantas de carbón fuera de servicio, en localidades alejadas e incluso sobre plataformas marinas.

La Asociación Nuclear Mundial en un informe en el 2015 destaca que el enorme potencial de éstos se basa en las siguientes características [89]:

- **Modularidad:** El reactor estará conformado por módulos, los cuales podrán ser fabricados en cantidad, reduciendo así el tiempo de construcción del reactor, siendo que pueden ser transportados con mayor rapidez y seguridad.
- **Seguridad:** Muchos diseños consideran la integración de los componentes en el recipiente que contiene el núcleo, simplificando de esta manera la cantidad de piezas (tuberías principalmente) e incluyendo sistemas de seguridad pasivos.
- **Menor capital inicial:** Dado que el reactor será más pequeño, el costo inicial será menor.
- **Flexibilidad:** Al tener una potencia máxima de 300 MW, el reactor podrá adaptarse a redes pequeñas, adicionalmente puede integrarse con mayor facilidad con fuentes de generación renovable

5.10 Fusión nuclear

Es el proceso nuclear que trata de una fuente de energía de gran rendimiento y al mismo tiempo limpia. La energía es generada a partir de la reacción nuclear de dos núcleos de átomos ligeros, se unen para formar otro núcleo más pesado [90], generalmente en el proceso de la reacción se van liberando partículas.

Un ejemplo de la fusión nuclear es la reacción que se lleva a cabo en el sol, donde cada segundo, millones de toneladas de átomos de hidrógeno chocan entre si bajo altas temperaturas (10 millones de grados en su núcleo), esto induce a la fragmentación de los enlaces atómicos y fusionarse para formar el elemento más pesado, en este caso el helio, generando grandes cantidades de energía [91] como se ve en la figura 40.

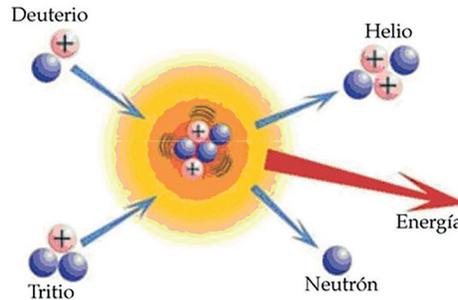


Figura 40. Fusión nuclear con T-D [92]

Las reacciones de fusión pueden emitir o absorber energía dependiendo si los núcleos que se fusionan son más pesados que el hierro la reacción nuclear absorberá energía.



5.10.1 Reacciones más comunes de fusión nuclear [93]



Fusionando un núcleo de Deuterio con un núcleo de Tritio, se obtiene un núcleo de Helio formado por dos neutrones y dos protones, liberando 1 neutrón y 17,6 MeV de energía.



Fusionando dos núcleos de Deuterio, se obtiene un núcleo de Tritio, un protón y 4,03 MeV de energía.

En la ecuación 3 y 4 se muestran las reacciones más comunes para la fusión Deuterio – Deuterio, y su probabilidad de ocurrencia depende directamente de sus áreas efectivas para cada caso. Es por eso que con diferente proporción ambas reacciones pueden ocurrir.

Para que pueda ocurrir la fusión debe superarse una importante barrera de energía producida por la fuerza electrostática. A grandes distancias, dos núcleos se repelen debido a la fuerza de repulsión electrostática entre sus protones, cargados positivamente. Sin embargo, si se pueden acercar dos núcleos lo suficiente, debido a la interacción nuclear fuerte, que en distancias cortas es mayor, se puede superar la repulsión electrostática [94].

CONCLUSIONES

Fundamentos de Ciencia y Tecnología, en su Tomo 2, reseñó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las principales áreas en las que la tecnología nuclear puede ser aplicada en favor del ser humano y su ecosistema.

En el capítulo 1, se explicó brevemente sobre la radiactividad; los métodos de producción de radioisótopos; se describió aspectos generales de la medicina nuclear, desde la prevención hasta el tratamiento de diferentes enfermedades que afectan a gran parte de la población (empleando diferentes métodos); además se hizo referencia a la radioterapia, tipos y beneficios que ésta proporciona, contando siempre con el manejo adecuado y los profesionales capacitados para el empleo de la ciencia, con consciencia.

En el capítulo 2, se trató sobre el medio ambiente, los cambios que van afectando al ser humano, cómo éstos son provocados, y pretende concientizar a los lectores para que sean más cuidadosos con el medio ambiente. También se explicó cómo la tecnología nuclear puede ser usada para cuidar al medio ambiente y manejar efectivamente nuestros recursos hídricos.

En el capítulo 3, se introdujeron los beneficios de la tecnología nuclear empleada en la agricultura, cómo beneficiaron a la humanidad las diferentes mutaciones genéticas que ocurrieron a lo largo del tiempo, y cómo se puede acelerar estas mutaciones creando genotipos más resistentes y mejores en varios aspectos, sin ser dañinos para la población. Así también cómo las plagas afectan a la producción agrícola y cómo se pueden tratar de manera no agresiva con el medio ambiente.

El capítulo 4, se describió varios tipos de aplicaciones de la tecnología nuclear en la industria no eléctrica, se pudo determinar que estas aplicaciones son amplias y son usadas en varias industrias, incluyendo algunas que están presentes en el día a día.

El capítulo 5, se enfatizó en los diferentes tipos de generación de energía, sus ventajas y desventajas, resaltando la energía nuclear como uno de los más beneficiosos; se explicaron sobre los diferentes tipos de reactores nucleares y cómo se los utiliza en el mundo. Así también se proporcionó una información básica sobre la fusión nuclear con la que aún se pretende brindar energía limpia y sana al mundo.

Este tomo reúne varios aspectos relacionados a la tecnología nuclear, sus beneficios en diferentes áreas, desde la medicina hasta la agricultura, pues comúnmente se cree que la tecnología nuclear solo sirve en la producción de energía, siendo éste tan solo uno de los varios beneficios que la misma ofrece.

En el tomo 3 de Fundamentos de Ciencia y Tecnología tratará sobre la tecnología nuclear en Bolivia, cuáles fueron los hitos y los beneficios que se buscan obtener con las construcción del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Ortega, «ABC en el este,» 12 06 2018. [En línea]. Available: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/la-radiactividad-1711581.html>. [Último acceso: 20 11 2020].
- [2] Agencia Bolivia de Energia Nuclear, Fundamentos de Ciencia y Tecnologia Tomo 1, La Paz, 2021.
- [3] Curioseando, «Curioseando,» [En línea]. Available: <https://curiosoando.com/que-diferencia-radiacion-ionizante-y-no-ionizante>. [Último acceso: 20 11 2020].
- [4] Agencia Boliviana de Energía Nuclear, «Interacción de la radiación con la materia,» de Fundamentos de Ciencia y Tecnología Tomo 1, La Paz, 2021, pp. 38-57.
- [5] IAEA, «Nuclear Medicine for Diagnosis and Treatment,» IAEA Factsheet, p. 4, 2017.
- [6] Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular, «SEMNUM,» [En línea]. Available: <https://semnum.es/la-medicina-nuclear/>. [Último acceso: 10 05 2021].
- [7] Energia Nuclear, «Energia Nuclear,» [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/aplicaciones/medicina-nuclear>. [Último acceso: 10 05 2021].
- [8] Nuclear Physics Experience, «NUPEX,» [En línea]. Available: <http://www.nupecc.org/NUPEX/index.php?g=textcontent/nuclearapplications/nuclearinmed&lang=es>. [Último acceso: 10 05 2021].
- [9] Insitute de Técnicas Avanzadas Contra el Cáncer, «iTAcC,» 12 01 2015. [En línea]. Available: <https://itaccancer.es/es/noticias/imrt-igrt-sbrt-radioterapia-en-6-modalidades/>. [Último acceso: 23 05 2021].
- [10] VIDT oncología radiante, «VIDT oncología radiante,» [En línea]. Available: <https://www.vidt.com.ar/tratamiento-rct.php>. [Último acceso: 23 11 2021].
- [11] R. Martinez, «Clinica Universidad de Navarra,» [En línea]. Available: <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos/tratamientos/radioterapia-interna-braquiterapia>. [Último acceso: 10 05 2021].
- [12] IAEA, «Los mosquitos transmisores del virus del Zika,» Nota informativa del OIEA, pp. 1-4, 11 2016.
- [13] S. Ayrál, «Microbe Notes,» 09 12 2017. [En línea]. Available: <https://microbenotes.com/radioimmunoassay-principle-uses-and-limitations/>. [Último acceso: 10 05 2021].
- [14] N. Jawerth, «IAEA,» 14 04 2020. [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/pcr-en-tiempo-real-covid-19#:~:text=La%20RT%20PCR%20en%20tiempo%20real%20es%20un%20m%C3%A9todo%20nuclear,los%20pat%C3%B3genos%20como%20los%20virus..> [Último acceso: 19 05 2021].
- [15] Real Academia Española, «Real Academia Española,» [En línea]. Available: <https://dpej.rae.es/lema-medioambiente#:~:text=Amb.,Tambi%C3%A9n%20se%20describe%20medio%20ambiente..> [Último acceso: 25 04 2021].
- [16] Link Fang, «Link Fang,» [En línea]. Available: https://es.linkfang.org/wiki/Medio_ambiente_natural.

[Último acceso: 28 12 2020].

- [17] IAEA, «Organizacion Internacional de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/contaminacion>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [18] IAEA, «Organizacion Internacional de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/contaminacion-atmosferica>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [19] IAEA, «Organizacion Internacion de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/la-tecnologia-nuclear-puede-contribuir-a-la-lucha-contra-la-contaminacion-atmosferica>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [20] IAEA, «Organizacion Internacional de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/energia-nucleoelectrica-y-cambio-climatico>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [21] IAEA, [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/atoms4climate>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [22] IAEA, «Organizacion Internacion de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/la-tecnologia-nuclear-puede-contribuir-a-la-lucha-contra-la-contaminacion-atmosferica>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [23] N. Jawerth, «SOLUCIONES A LA CONTAMINACION - LOS HACES DE ELECTRONES AYUDAN A LA INDUSTRIA ELECTRICA POLACA, CENTRADA EN EL CARBON, A LIMPIAR LA ATMOSFERA,» Boletín del OIEA, nº 13, pp. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull56-3/5631213_es.pdf, 2015.
- [24] nanova, «nanova,» [En línea]. Available: <https://nanova.org/un-nuevo-acelerador-de-particulas-ayudara-a-limpiar-las-emisiones-de-chp/>. [Último acceso: 2021 diciembre 3].
- [25] Dasha, «Nanova,» Nanova, 2021 05 02. [En línea]. Available: <https://nanova.org/un-nuevo-acelerador-de-particulas-ayudara-a-limpiar-las-emisiones-de-chp/>. [Último acceso: 2021 12 07].
- [26] OIEA, «Organizacion Internacion de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/contaminacion-atmosferica>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [27] FAO, «Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura,» [En línea]. Available: <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1126977/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [28] Rincon educativo , [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/daplicaciones_medioambientales.html. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [29] .. W. P. K. y. S. R. j.f. Swinwood, «Tecnologías de las radiaciones para el Tratamiento de desechos: Una perspectiva global,» BOLETÍN DEL OIEA, 1, vol. 1, nº 1, pp. 1-15, 1994.
- [30] e. a. J.F. Swinwood, «Tecnologías de las raciones para el tratamiento de desechos: Una perspectiva global,» Boletín del OIEA, vol. 1, pp. 11-15, 1994.

- [31] A. C. y. M. G. Jaime Moreno, «Irradiación de lodos residuales y su uso en el cultivo de avena,» revista de la Sociedad Química de México, vol. 44, n° 223, p. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v44n3/v44n3a8.pdf>, 2000.
- [32] C. S. Calvo, *Técnicas Isotópicas en Estudios de Hidrología y Trazadores del Agua*, Lima: IPEN, 2014.
- [33] U-238, «u-238,» 2020 julio 03. [En línea]. Available: <http://u-238.com.ar/haz-de-electrones-para-purificar-agua/>. [Último acceso: 2021 diciembre 3].
- [34] N. Jawerth, «Soluciones a la contaminación - La tecnología de la radiación ayuda a las industrias chinas a descontaminar el agua,» Boletín del OIEA, n° 15, pp. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull56-3/5631415_es.pdf, 2015.
- [35] CSN, «Consejo de Seguridad Nuclear,» [En línea]. Available: <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [36] P. M. Rodriguez, «La radiacion en la vida cotidiana,» Colegio de Medicos y Cirujanos , pp. 1-23, 1999.
- [37] OIEA, «Organizacion Internacion de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/medio-ambiente>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [38] OIEA, «Organizacion Internacional de Energia Atomica,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/emisiones-al-medio-ambiente>. [Último acceso: 26 noviembre 2021].
- [39] Ministerio de salud - Argentina, «ARGENTINA. GOB.AR,» [En línea]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/cnea/tecnologia-nuclear/proteccion-de-radiaciones/proteccion-radiologica-ambienta>. [Último acceso: 2021 DICIEMBRE 3].
- [40] Organizacion Internacional de Energia Atomica, «Guía de seguridad N° RS-G-1.8,» de Monitorización del medio ambiente y de las fuentes de radiación con fines de protección radiológica, viena , 2010, p. 151.
- [41] RINCON EDUCATIVO, «RINCON EDUCATIVO,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/4deteccin_y_medida_de_las_radiaciones_ionizantes.html. [Último acceso: 2021 DICIEMBRE 3].
- [42] BERTIN, «BERTIN,» [En línea]. Available: <https://www.bertin-instruments.com/product/environmental-radiation-monitoring/sa-aerosol-station/>. [Último acceso: 2021 Diciembre 2021].
- [43] Medical Expo, «Medical Expo,» [En línea]. Available: <https://www.medicalexpo.es/prod/bertin-technologies/product-84605-960433.html>. [Último acceso: 07 12 2021].
- [44] J. L. D. M. L. y. J. V. Z. Jaime Aguirre, «RED NACIONAL AUTOMÁTICA DE MONITOREO RADIOLÓGICO,» SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - SBPR, n° 10, p. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22200121>, 2013.
- [45] E. E. Franco Vallejo, «Introduccion,» de Mejoramiento Genetico de Plantas, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 202, pp. 21-22.

- [46] B. A.B., «The mendelian theory of heredity and argumentation of vigor.» Washington, 1910, pp. 627-628.
- [47] F. N. y. H. Brunner, «Fitotecnia: Tecnología de mutación inducida para el mejoramiento de los cultivos,» Boletín del OIEA, vol. 4, pp. 25-26, 1992.
- [48] J. Fernando, «Mutágenos físicos y químicos y biológicos,» de Agentes mutagénicos y su daño en el ADN, Guadalajara, 2006, pp. 42-46.
- [49] Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, «ATSDR,» [En línea]. Available: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs149.html. [Último acceso: 05 12 2020].
- [50] IAEA, «IAEA,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/topics/mutation-induction>. [Último acceso: 05 12 2020].
- [51] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Organismo Internacional de Energía Atómica, «Mutagénesis física,» de Manual de Mejoramiento por Mutaciones, Viena, 2021, pp. 20-22.
- [52] e. G. Levitus, «Mutagenesis, TILLING y EcoTILLING,» de Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 212, p. 222.
- [53] Organismo Internacional de Energía Atómica, «IAEA,» [En línea]. Available: <https://mvd.iaea.org/>. [Último acceso: 28 12 2020].
- [54] Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, Los fertilizantes y su uso, 1992.
- [55] Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas, «Acceso a factores de producción,» de Agropecuario- Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas, 2015, p. 29.
- [56] Grupo Sacsá, «Grupo Sacsá,» 18 04 2015. [En línea]. Available: <https://www.gruposacsá.com.mx/conozca-los-efectos-ambientales-de-los-fertilizantes-quimicos/>. [Último acceso: 10 12 2020].
- [57] F. Z. y. G. Hardarson, «IAEA,» 04 1989. [En línea]. Available: https://www.iaea.org/sites/default/files/31406485560_es.pdf. [Último acceso: 11 12 2020].
- [58] M. Gaspar, «Los isótopos estables del nitrógeno,» Boletín OIEA, vol. Junio, p. 19, 2017.
- [59] IAEA, «Ciencia y tecnología nucleares: Abordar los obstáculos actuales y nuevos en materia de desarrollo,» Boletín del OIEA, vol. Noviembre, 2018.
- [60] I. Quiroga, «Principales Plagas Agrícolas de América Latina 2014-2016,» 2016.
- [61] e. a. Conde-Blanco, «Modelo de fluctuación poblacional de moscas de la fruta *Ceratitis capitata* (Wiedemann 1824) y *Anastrepha* spp (Díptera: Tephritidae) en dos rutas en el municipio de Garanavi, Bolivia,» Selva Andina Research Society, p. 4, 2018.
- [62] Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal, «Justificación,» de PROYECTO DE

INNOVACIÓN Y SERVICIOS AGROPECUARIOS-FORESTALES, La Paz, 2010, pp. 2-4.

- . [63] A. Donald, «Los insectos, los isótopos y la radiación,» OIEA Boletín, pp. 9-12, 1987.
- . [64] F. Cavero, «TECNICA DEL INSECTO ESTERIL,» Quillabamba, 2017.
- . [65] e. a. P. Montoya, «Fundamentos de la Técnica del Insecto Estéril,» de Moscas de la Fruta: Fundamentos y Procedimientos para su Manejo, Mexico D.F., 2010, p. 245.
- . [66] e. J. Vilatuña, «Técnica del Insecto Estéril (TIE),» de Manejo y control de Moscas de la fruta, Quito, 2010, p. 105.
- . [67] Rincon Educativo, «Rincon Educativo,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/b_aplicaciones_industriales.html. [Último acceso: 28 12 2020].
- . [68] e. a. N. Naves, Escritor, Uso de las radiaciones ionizantes en medidores. [Performance]. Universidad Autónoma Metropolitana, 2018.
- . [69] 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].
- . [70] World Health organization, «HO Statement on 2-Dodecylcyclobutanone and Related Compounds,» 2013.
- . [71] Chile Moss, «Chile Moss,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.chilemoss.com/sterilization.htm>. [Último acceso: 28 12 2020].
- . [72] N. Connor, «Radiation Dosimetry,» 05 03 2020. [En línea]. Available: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-radiacion-de-cherenkov-definicion/>. [Último acceso: 28 12 2020].
- . [73] Iowa State University, «Iowa State University,» [En línea]. Available: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.xhtml>. [Último acceso: 28 12 2020].
- . [74] L. Gil, «La cultura y la tecnología nuclear confluyen en el Brasil,» Boletín OIEA, pp. 16-17, 2017.
- . [75] e. a. J. Rolf, «Nuclear techniques in mineral exploratio, extraction and processing,» Nuclear techniques for peaceful development, pp. 28-32, 1987.
- . [76] Tara Energy, «Tara Energy,» [En línea]. Available: <https://taraenergy.com/blog/what-is-energy-a-guide-to-understanding-energy/>. [Último acceso: 22 11 2021].
- . [77] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico. [Último acceso: 20 12 2020].
- . [78] The earth project, «The earth project,» 19 04 2016. [En línea]. Available: <https://theearthproject.com/renewable-energy-sources-101/>. [Último acceso: 21 12 2020].

- [79] IAE, «International Energy Agency,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/fuels-and-technologies/electricity>. [Último acceso: 24 11 2021].
- [80] wordpress, «wordpress,» [En línea]. Available: <https://vecinadelpicasso.wordpress.com/2011/11/14/lectura-central-termica/>. [Último acceso: 25 12 2020].
- [81] Ingeoexpert, «Ingeoexpert,» 22 03 2018. [En línea]. Available: <https://ingeoexpert.com/2018/03/22/como-funciona-una-central-hidroelectrica/>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [82] Abstract Moving Energy, «Abstract Moving Energy,» [En línea]. Available: <https://abstract.energy/10-principales-beneficios-de-usar-paneles-solares-para-tu-negocio/>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [83] Geología web, «Geología web,» [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/recursos-naturales/como-funciona-energia-eolica/>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [84] Med se todo, «Med se todo,» [En línea]. Available: <https://med.se-todo.com/biolog/22404/index.html>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [85] Dyna energia, «Dyna energia,» [En línea]. Available: <https://www.dyna-energia.com/noticias-ES/la-gestion-del-combustible-nuclear-usado-retos-y-perspectivas>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [86] Climantica, «Climantica,» [En línea]. Available: <http://unidades.climantica.org/es/unidades/02/a-enerxia-nuclear/o-uranio/2>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [87] N. J. E. Mattar, «IAEA,» 11 2019. [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/bulletin/reactores-de-investigacion/usos-de-los-reactores-de-investigacion>. [Último acceso: 26 12 2020].
- [88] IAEA, The applications of research reactors, Viena: IAEA, 2001.
- [89] World Nuclear Association, «World Nuclear Association,» 04 2021. [En línea]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>. [Último acceso: 03 05 2021].
- [90] Energias como bienes comunes, «Energias como bienes comunes,» 12 07 2012. [En línea]. Available: <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/07/12/que-es-la-fusion-nuclear/>. [Último acceso: 28 12 2020].
- [91] M. McGrath, «BBC,» 07 11 2019. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50327247>. [Último acceso: 28 12 2020].
- [92] Quantico918, «Quantic918,» 2 07 2016. [En línea]. Available: <https://quantic918.blogspot.com/2016/07/las-reacciones-nucleares-parte-2-la.html>. [Último acceso: 28 12 2020].
- [93] Hyper Physics, «Hyper Physics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/NucEne/fusion.html>. [Último acceso: 2021 05 05].
- [94] Scribd, «Scribd,» [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/356204916/Fusion-Nuclear>. [Último acceso: 29 12 2020].



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



www.aben.gob.bo

