



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

**“DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS
RADIOACTIVOS DE ORIGEN HOSPITALARIO EN MÉXICO”**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

MÓNICA ALEXIA TORRES CARRANZA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EN C. HUEMANTZIN BALAN ORTIZ OLIVEROS

Toluca de Lerdo, Estado de México; Marzo de 2017.



ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	7
OBJETIVOS	8
Objetivo general	8
Objetivos específicos	8
CAPÍTULO I.	9
MARCO TEÓRICO	9
1.1 LA RADIACIÓN IONIZANTE	9
1.2 ESTRUCTURA DE LA MATERIA Y LA RADIOACTIVIDAD	14
1.3 TIPOS DE RADIACIONES IONIZANTES	21
1.3.1 Decaimiento alfa (α)	21
1.3.2 Decaimiento beta (β)	22
1.3.3 Radiación gamma (γ)	23
1.4 FUENTES DE RADIACIÓN	24
1.4.1 Radiación natural	24
1.4.2 Radiación artificial	25
1.5 DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN	26
1.6 MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS	27
1.7 EFECTOS AMBIENTALES DE LA RADIACIÓN	31
1.7.1 Efectos somáticos	32
1.7.2 Efectos genéticos	33
1.7.3 Efectos deterministas	33
1.7.4 Efectos estocásticos	35
1.8 PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA	35
1.9 USOS Y APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR EN LA MEDICINA	38
1.9.1 Medicina nuclear	38
1.9.2 Áreas de aplicación de la medicina nuclear	43
1.10 RESIDUOS RADIATIVOS	45
1.11 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS	45
1.12 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS DE ACUERDO AL ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, OIEA.	47

1.12.1 Residuos exentos (EW)	47
1.12.3 Residuos de actividad muy baja (VLLW)	48
1.12.4 Residuos de actividad baja (LLW)	48
1.12.5 Residuos de actividad intermedia (ILW)	48
1.12.6 Residuos de actividad alta (HLW)	48
1.13 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA NOM-004-NUCL-2013	50
1.14 GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS	51
1.14.1 Principios básicos para la gestión de residuos radiactivos	51
1.15 ETAPAS DE GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS	53
1.15.1 Pre-tratamiento	54
1.15.2 Clasificación	54
1.15.3 Tratamiento	55
1.15.4 Acondicionamiento	55
1.15.5 Inmovilización	55
1.15.6 Almacenamiento	56
1.15.7 Disposición	57
1.16 PROCEDIMIENTOS PARA LA GESTIÓN FINAL DE RESIDUOS RADIATIVOS	58
1.17 DISPENSA DE RESIDUOS CONTAMINADOS CON MATERIAL RADIATIVO Y OTROS CONCEPTOS.	58
17.1 Dispensa	59
17.2 Exclusión y exención.	59
1.18 NORMATIVIDAD MEXICANA EN MATERIA NUCLEAR	60
1.18.1 LEY REGLAMENTARIA DEL ARTÍCULO 27 CONSTITUCIONAL EN MATERIA NUCLEAR	60
1.18.2 LEY DE RESPONSABILIDAD CIVIL POR DAÑOS NUCLEARES	60
1.18.3 REGLAMENTO GENERAL DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA (RGSR)	61
1.18.4 NORMAS OFICIALES MEXICANAS	62
1.18.4.1 NOM-004-NUCL-2013, Clasificación de los desechos radiactivos	62
1.18.1.5 NOM-028-NUCL-2009, Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas.	62
1.18.1.6 NOM-035-NUCL-2013, Criterios para la dispensa de residuos con material radiactivo.	63
1.18.1.7 NOM-039-NUCL-2011, Especificaciones para la exención de prácticas y fuentes adscritas a alguna práctica, que utilizan fuentes de radiación ionizante, de alguna o de todas las condiciones reguladoras.	63
1.18.1.8 Norma Oficial Mexicana NOM-040-NUCL-2016, Requisitos de seguridad radiológica para la práctica de medicina nuclear.	64
<i>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA</i>	65
<i>CAPÍTULO III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES</i>	69
3.1 INSTALACIONES HOSPITALARIAS QUE GENERAN RESIDUOS RADIATIVOS	69
3.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS	73
3.3 COLECCIÓN Y SEGREGACIÓN	79
3.4 ALMACENAMIENTO Y DECAIMIENTO	90

3.5 PROPUESTA DE LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS HOSPITALARIOS	93
3.5.1 Etapas de la gestión de residuos radiactivos en medicina nuclear.	93
3.5.1.1 PRE-TRATAMIENTO	94
3.5.1.2 ALMACENAMIENTO	99
3.5.1.3 DISPOSICIÓN FINAL	102
<i>CONCLUSIONES</i>	103
REFERENCIAS	105
ANEXO 1	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Wilhelm Röntgen, descubrimiento de los rayos X.	9
Figura 1.2 Tubo de vacío con el campo eléctrico activado	10
Figura 1.3 Efecto de un campo magnético o eléctrico sobre las radiaciones.	12
Figura 1.4 Explosión de bomba atómica en Hiroshima (izquierda) y Nagasaki (derecha).	13
Figura 1.5 Modelo atómico de Thomson, "budín con pasas".	15
Figura 1.6 Modelo atómico de Rutherford.	16
Figura 1.7 Modelo planetario del átomo propuesto por Bohr.	16
Figura 1.8 Partículas elementales del átomo.	17
Figura 1.9 Esquematización de la formación de iones.	18
Figura 1.10 Isotopos del hidrogeno.	19
Figura 1.11 Curva de estabilidad nuclear.	20
Figura 1.12 Capacidad de penetración de las partículas alfa, beta y de la emisión gamma.	24
Figura 1.13 Porcentaje de radiación recibida en el ser humano.	26
Figura 1.14 Protección radiológica.	36
Figura 1.15 Sistema de clasificación de los residuos radiactivos del OIEA.	49
Figura 1.16 Etapas de gestión de residuos radiactivos.	53
Figura 1.17 Contención en barreras múltiples.	57
Figura 2.1 Metodología de investigación.	65
Figura 2.2 Metodología cuestionario	67
Figura 3.1 Etapas de gestión de residuos radiactivos	94
Figura 3.2 Propuesta de recolección	97
Figura 3.3 Propuesta de segregación	98
Figura 3.4 Propuesta diseño de almacen	101
Figura 3.5 Propuesta de diseño de almacen	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Dosis media de radiación de fuentes naturales. _____	25
Tabla 1.2 Factor de calidad W_R , para diferentes tipos de radiación. _____	30
Tabla 1.3 Factor de ponderación de los tejidos W_T _____	30
Tabla 1.4 Magnitudes y unidades radiológicas. _____	31
Tabla 1.5 Efectos determinísticos y dosis de umbral. _____	34
Tabla 1.6 Clasificación de los efectos biológicos. _____	35
Tabla 1.7 Radionúclidos empleados en la medicina; como fuentes abiertas. _____	38
Tabla 1.8 Radionúclidos provenientes de fuentes selladas. _____	42
Tabla 3.1 Principales instituciones generadoras de residuos radiactivos _____	70
Tabla 3.2 Radioisótopos autorizados en medicina nuclear. _____	73
Tabla 3.3 Propuesta de segregación. _____	96
Tabla 3.4 Propuesta de etiquetado. _____	99
Tabla 3.5 Propuesta de registro. _____	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Años de servicio en medicina nuclear. _____	71
Gráfico 3.2 Personal Ocupacionalmente Expuesto. _____	72
Gráfico 3.3 Radioisótopos de uso médico. _____	74
Gráfico 3.4 Aplicación de unidosis al mes en el año 2015. _____	75
Gráfico 3.5 Material contaminado con radicación. _____	77
Gráfico 3.6 Cantidad de residuos radiactivos generados al mes en el 2015. _____	78
Gráfico 3.7 Unidosis aplicadas y cantidad de material contaminado. _____	79
Gráfico 3.8 Características de los contenedores. _____	81
Gráfico 3.9 Información de la etiqueta. _____	83
Gráfico 3.10 Registro de bitácora. _____	85
Gráfico 3.11 Segregación. _____	87
Gráfico 3.12 Porcentaje de hospitales que generan residuos radiactivos líquidos. _____	88
Gráfico 3.13 Porcentaje de hospitales que cuentan con contenedores para residuos líquidos. _____	89
Gráfico 3.14 Porcentaje de hospitales con almacen temporal. _____	90
Gráfico 3.15 Características del lugar de decaimiento. _____	91

RESUMEN

El uso de radioisótopos provenientes de fuentes abiertas, aplicadas en el sector médico, producen residuos radiactivos sólidos que requieren de una gestión especial para su manejo y disposición final. De hecho, en México el 89%¹ de residuos radiactivos son de origen médico.

Dada la problemática, el objetivo de la presente investigación fue realizar un diagnóstico de la generación y gestión de los residuos radioactivos de origen hospitalario en México, para evidenciar el grado de cumplimiento de las actividades administrativas y operacionales que conlleva la gestión.

Para definir el universo de estudio, se tomó como factor de selección a las instituciones médicas consideradas como las principales generadoras de residuos radiactivos hospitalarios, obteniendo como resultado 22 instituciones médicas de índole público y social.

Respecto al método de recolección de datos, se elaboró un formato para la captura de información; dicho formato se realizó con base a información técnica y lineamientos normados en el Reglamento General de Seguridad Radiológica, NOM-028-NUCL-2009 y en la NOM-040-NUCL-2016, respecto al uso de radioisótopos, radioprotección y gestión de residuos radiactivos.

Posteriormente el formato se envió a cada una de las unidades de enlace de las instituciones médicas, a través de la Plataforma Nacional de Transparencia (PNT) del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI).

Los resultados obtenidos del diagnóstico mostraron que México es un país donde más del 80% de las instituciones médicas hacen uso de ^{99m}Tc , ^{131}I y ^{201}Tl . Estos radioisótopos son administrados en forma de undosis a más de 200 pacientes al mes en cada hospital.

De igual manera se evidenció la deficiencia y/o omisión en cuanto a los requerimientos operacionales a considerar en cada etapa de la gestión (minimización, recolección, segregación y almacenamiento temporal), además de que existe una escasa supervisión por parte del encargado de seguridad radiológica sobre el cumplimiento de las normas y condiciones de licenciamiento del manejo de residuos radiactivos.

¹ Información obtenida directamente de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias CNSNS, 2016.

INTRODUCCIÓN

“En el mundo en desarrollo, los países se enfrentan a problemas importantes: la necesidad de mejorar la atención de salud; de estimular la producción agrícola; aumentar la seguridad alimentaria; y de mejorar la gestión de los recursos naturales” (OIEA, nd). Lo cual conlleva al uso de avances tecnológicos en diversas áreas en beneficio de la población. Tal es el caso de la tecnología nuclear la cual puede aportar soluciones eficaces a muchos de estos problemas.

En la actualidad la tecnología nuclear tiene una amplia gama de aplicaciones principalmente en áreas como la energética, médica, industrial e investigación.

El desarrollo de la energía nuclear en México data de la década de 1970, motivado a raíz del auge internacional que se vivía en la industria nuclear, particularmente en Estados Unidos (Villareal, 2011). Bajo este escenario se construyó la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) única en el país, ubicada sobre la costa del Golfo de México en la localidad denominada Punta Limón municipio de Alto Lucero, estado de Veracruz.

La CNLV dispone de 2 unidades o reactores² generadores de electricidad de 682.5 megawatts eléctricos (MWe) cada una. La primera unidad inicio su operación comercial en 1990 y la segunda unidad el en 1995. Ambas unidades representan el 2.73% de la capacidad instalada en el país, teniendo una contribución del 5% de la generación eléctrica nacional. La Comisión Federal de Electricidad (CFE), es la entidad estatal propietaria de la central y responsable de su operación a través de la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas (Flores, 2008).

En el sector salud, el uso de los radioisótopos se inició en 1955 en el Hospital General de La Raza del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). El uso de éstos se fortaleció cuando fue inaugurado como Centro Médico Nacional en 1963, al crearse el denominado servicio de radioisótopos (UNAM, 2010).

Los radioisótopos tienen diversas aplicaciones en el campo de la medicina nuclear, y se extienden a todas las ramas de la medicina: Oncología (detección y tratamiento de tumores), Endocrinología (estudio hormonal), Hematología (estudio de anemias y glóbulos rojos), Hepatología (seguimiento de hepatitis), Farmacología (análisis de medicamentos en sangre), Alergología (sensibilización a ciertas sustancias). De igual forma se emplean técnicas como la radioterapia para el tratamiento de tumores malignos, la teleterapia para el tratamiento oncológico o la biología radiológica que permite esterilizar productos médicos.

La tecnología nuclear también adquiere importancia en el sector industrial ya que se utiliza para controlar y regular los procesos, permitiendo así mejorar la calidad

² Estas unidades son del tipo Boiling Water Reactors (BWR-5 Reactores de agua hirviendo).

del producto, aprovechar mejor las materias primas, y convertirse en un requisito previo para la completa automatización de las líneas de producción de alta velocidad, lo cual tiene injerencia en la investigación de procesos, la mezcla, el mantenimiento y el estudio del desgaste y corrosión de instalaciones y maquinaria, así como en la fabricación de plásticos y en la esterilización de productos de un solo uso.

Sin embargo, es de todos conocido que cualquier actividad desarrollada por el hombre implica procesos que causan la degradación del ambiente, tal es el caso de la generación de residuos. Dado que la contaminación producida por estos constituye el talón de Aquiles en una civilización que ha promovido el crecimiento económico y la industrialización como prototipos de modernización y progreso (Lagrega, 1996); es fundamental que los residuos sean gestionados adecuadamente para garantizar la minimización de riesgos a la salud de la población, el deterioro del medio ambiente; en todas y cada una de las etapas de gestión.

Cabe mencionar que al igual que cualquier otro proceso productivo y/o aplicaciones, el uso de la tecnología nuclear implica inevitablemente la generación de residuos (con la salvedad de contener material radiactivo) los cuales tienen que ser gestionados conforme a los lineamientos internacionales, leyes, reglamentos y normas instauradas para este fin.

Y es que acorde al Reglamento General de Seguridad Radiológica (RGSR, 1988, p.4) un residuo radiactivo³ es “cualquier material que contenga o esté contaminado con radionúclidos o concentraciones o niveles de radiactividad, mayores a las señaladas por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias y para el cual no se prevé uso alguno”.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo central llevar a cabo un análisis situacional de la generación y manejo de los residuos radiactivos de origen hospitalario en México, así como generar una propuesta de plan de manejo interno de residuos radiactivos para centros de atención médica, que permita la protección del medio ambiente y la salud humana de los efectos perjudiciales por los residuos radiactivos, lo cual “podría alcanzarse mediante el desarrollo eficaz e implementación del sistema de gestión de residuos radiactivos” (Abdel, 2012) minimizando, controlando y previniendo riesgos e impactos en el presente y futuro.

Y es que debido a la baja actividad, las bajas energías de emisión y la corta vida media de los residuos radiactivos provenientes de hospitales (Álvarez, n.d.); la

³Es importante mencionar que a nivel internacional a los materiales contaminados con radioisótopos se les denomina “residuos radiactivos”, pero en México la legislación los marca y define como “desechos radiactivos”. En este trabajo de investigación les referiremos como residuos radiactivos.

normativa nacional en este campo permite que los generadores gestionen sus residuos, lo que lleva a que el personal a cargo esté capacitado y tenga conocimiento para la adecuada clasificación de los residuos radiactivos generados en el hospital, así como que la institución médica cuente un plan interno de gestión que coadyuve al adecuado manejo de los residuos, asegurando no exceder los límites de seguridad ocupacionales establecidos.

Éste trabajo de investigación consta de cuatro capítulos en el primer capítulo se concentra el marco teórico-conceptual, donde se establecen los conceptos básicos relacionados con la energía nuclear, residuos radiactivos, su clasificación y gestión.

En el segundo capítulo se presenta el marco legal donde se proporcionan las bases y fundamento jurídico a nivel nacional, para la gestión de los residuos radiactivos.

En lo que respecta al tercer capítulo, se muestra el diagnóstico y análisis de la gestión de los residuos radiactivos generados en las instalaciones médicas seleccionadas para la investigación.

Finalmente, en el cuarto capítulo se desarrolla y plantea la propuesta de un plan interno de gestión de residuos radiactivos generados en instalaciones médicas, tomando en cuenta recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y lo descrito en la normatividad mexicana.

ANTECEDENTES

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año de 1999, expuso que los hospitales y otros establecimientos para el cuidado de la salud son instituciones que tienen la responsabilidad de vigilar la salud pública, lo cual puede hacerse directamente (cuidado del paciente) o indirectamente (asegurando un ambiente limpio y saludable para los empleados y la comunidad). Por consiguiente, al tener un compromiso con la salud pública y medio ambiente son responsables de los residuos que producen (citado por Baas, 2013 p. 9).

Los residuos radiactivos de nivel bajo son un subproducto de uso benéfico de materiales radiactivos, su principal utilidad en el sector salud es para el diagnóstico y el tratamiento médico, la investigación biomédica y farmacéutica.

De acuerdo a Saling, J.H. y Fentiman, A.W. (2001) el primer sitio comercial para la evacuación de residuos radiactivos de bajo nivel fue inaugurado en Beatty, Nevada, en 1962. Para 1971, se añadieron cinco sitios más de disposición con licencia comercial. Sin embargo, cuatro de los seis sitios fueron cerrados debido a que se produjeron fugas como consecuencia de la erosión por el agua superficial. Esta problemática resultó en el desarrollo de nuevos requerimientos regulatorios para la selección de sitios, parámetros de construcción, prácticas operativas y criterios de aceptación de residuos en las futuras zonas de depósito.

Con base a información del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, 1997) en la década de 1960 aumentó el uso de las tecnologías nucleares y de las radiaciones para la atención de la salud en los países en desarrollo. En lo que respecta a los residuos radiactivos en 1990 la junta del OIEA aprobó la elaboración de una serie de normas de seguridad que comprendieron la gestión de residuos radiactivos.

En México el uso de radioisótopos para fines médicos se inició en 1955 en el Hospital General de La Raza del IMSS, y su uso se fortaleció cuando se inauguró como Centro Médico Nacional, al crearse el servicio de radioisótopos (UNAM, 2010).

En lo que respecta al tema de gestión de residuos de origen hospitalario; diversos autores elaboraron investigaciones para analizar el estatus de la disposición de estos residuos, por ejemplo: Duran y Munar (2006) llevaron a cabo un diagnóstico de seguridad ambiental para la gestión de residuos radiactivos generados por la medicina nuclear en Bogotá, con el fin de exponer el cumplimiento normativo de los centros con servicio de medicina nuclear.

Por otra parte, Álvarez y Moreno (2010) implementaron un plan de gestión integral de residuos hospitalarios y similares en el hospital Chapinero E.S.E. en Colombia.

El resultado de este plan está plasmado en un cronograma con actividades concretas e informe de gestión a las autoridades pertinentes.

Mientras que Álvarez Rico (2010) realizó un trabajo donde presentó una metodología para la caracterización de los residuos radiactivos provenientes del área médica nuclear en México, con el objetivo de contar con los elementos para la toma de decisiones en la gestión, posibilitando su dispensa inmediata o propiciando un cálculo adecuado del tiempo requerido en almacenamiento.

El problema común de las investigaciones consultadas fue la falta de énfasis a las actividades administrativas y operacionales para una gestión adecuada de los residuos radiactivos, previa a su disposición final. En lo que respecta a México no se encontró información referente al manejo de los residuos radiactivos de origen médico, que sirviera para dimensionar su situación.

Por ello se infiere que es de importancia investigar sobre la situación de México para la gestión de los residuos radiactivos, específicamente de los generados en áreas de salud; esto debido a la poca información e investigación que la temática presenta.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de materiales radiactivos en aplicaciones médicas ha resultado eficaz para fines de diagnóstico, terapéuticos y de investigación; sin embargo, la manipulación de estos materiales conlleva a la generación de un amplio rango de residuos radiactivos que varían mucho en su forma física y química; así como en la concentración de radionúclidos. “Estos residuos representan el uso no sólo de pequeñas cantidades de fuentes no selladas y soluciones líquidas, sino también de las fuentes selladas de alta concentración” (OIEA, 2001).

De manera que, la eliminación segura de los residuos radiactivos es un componente vital de la gestión. Y es que tiene por “objetivo fundamental asegurar que la exposición a la radiación por parte de los trabajadores, población y el medio ambiente no exceda los límites de seguridad establecidos” (ICRP, 2007).

Habría que decir que, los efectos a la salud humana causados por la radiactividad varían dependiendo del nivel de dosis y exposición. Para niveles bajos de exposición a la radiación, los efectos biológicos son tan pequeños que pueden incluso no ser detectables. Además, el cuerpo humano tiene mecanismos de defensa contra muchos tipos de daño inducidos por la radiación. En consecuencia, la radiación puede tener uno de tres efectos biológicos, con resultados distintos para las células vivas: (1) las células dañadas se reparan por si solas, lo que resulta en ningún daño residual; (2) células que mueren, al igual que millones de células del cuerpo todos los días, que serán sustituidos a través de procesos biológicos

normales; o (3) las células se reparan incorrectamente, lo que resulta en un cambio físico (NRC, 2014).

Debido a lo anterior y acorde con los reglamentos y normas dictadas por organismos nacionales⁴, así como de recomendaciones y lineamientos de organizaciones internacionales⁵; los residuos radiactivos tienen que ser gestionados de manera adecuada, además requieren de un resguardo no convencional que debe estar a cargo de personal capacitado para garantizar la protección radiológica de los trabajadores, población y el medio ambiente.

En este sentido, es fundamental que los centros hospitalarios que generan residuos radiactivos tengan conocimiento de las características físicas y químicas de estos, para su posterior manejo; esto de acuerdo a un plan de gestión, que contenga los lineamientos generales para el manejo de residuos radiactivos (pretratamiento, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento, transporte y disposición final) que permita a los trabajadores y/o operadores prevenir riesgos e impactos a la salud humana y el medio ambiente, así como dar cumplimiento a las leyes, reglamentos y normas nacionales vigentes.

JUSTIFICACIÓN

Una de las razones que conlleva a esta investigación es que en el país no hay suficiente información que refleje el grado de cumplimiento de las actividades operacionales para la gestión de residuos radiactivos provenientes del sector salud. Considerando que de acuerdo a la CNSNS en el país el 89% de los residuos radiactivos provienen del sector salud.

Además que la normativa nacional en este campo permite que las instituciones hospitalarias con unidades de medicina nuclear o investigación médica gestionen sus residuos radiactivos de vida media corta menor a un año, y por lo tanto lleven a cabo de manera adecuada cada una de las actividades consideradas para la gestión. Por ello, es de suma importancia que cada institución médica cuente con un documento de referencia que contenga los lineamientos básicos para llevar a cabo la gestión este tipo de residuos.

Bajo esta lógica se pretende realizar un diagnóstico de las principales instituciones médicas de índole público y social, que generan residuos radiactivos; con el fin de evidenciar el grado de cumplimiento de las disposiciones normadas para la gestión de residuos radiactivos; así como de elaborar una propuesta de plan de manejo de residuos radiactivos hospitalarios de vida media corta que sirva de apoyo para los usuarios y personal expuesto; con el fin de minimizar, controlar y prevenir riesgos, así como fomentar el seguimiento de las directrices señaladas en la normatividad

⁴ Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).

⁵ Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés), International Energy Agency, etc.

mexicana para salvaguardar la salud de las personas y preservar el medio ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el diagnóstico situacional de la generación y gestión de los residuos radioactivos de origen hospitalario en México, para determinar el grado de cumplimiento normativo que tienen las instituciones médicas respecto a la generación y manejo de los residuos radiactivos.

Objetivos específicos

- Describir el marco jurídico en materia de residuos radiactivos y protección radiológica vigente en México.
- Compilar información para realizar el diagnóstico situacional de la gestión de residuos radiactivos, producto de la medicina nuclear en México del año 2015.
- Evidenciar el grado de cumplimiento de la normatividad nacional para la gestión de residuos radiactivos, por parte de las instituciones medicas e identificar las principales fallas.
- Elaborar una propuesta de lineamientos generales para la gestión de residuos radiactivos hospitalarios.

CAPÍTULO I.

MARCO TEÓRICO

1.1 LA RADIACIÓN IONIZANTE

A finales del siglo XIX y principios del XX la ciencia se vio enriquecida por una serie de descubrimientos que revolucionaron la vida de la humanidad y la forma de entender y explicar los fenómenos que ocurrían día a día en la naturaleza y el universo (Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 2000). Sin duda alguna, el descubrimiento de los rayos X por Röntgen en el año 1895, dió comienzo al conocimiento y caracterización de la radiación (Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 2000).

En 1895, el físico alemán **Wilhelm Röntgen** estudiaba el comportamiento del tubo de Crookes; observó que en el tubo se producía fluorescencia. Para evitar la fluorescencia cubrió el tubo con una envoltura de papel negro resguardándolo de la luz, creando un ambiente de oscuridad. Los rayos lograban atravesar el revestimiento, también observó fluorescencia en unos cristales de platinocianuro de bario que yacían a cierta distancia del tubo (L'Annunziata, 2007).

Luego de ver que estos rayos recorrían largas distancias en el aire, interpuso distintos y variados elementos (madera, vidrio, ébano, goma dura, fluorita) entre el tubo y la pantalla, sin embargo, estos rayos traspasaron estos materiales. La situación cambiaba si colocaba plomo o platino siendo los únicos materiales que detenían por completo la radiación; a estos rayos extraños los llamó rayos X. Röntgen reemplazó estos materiales con su propia mano (**Figura 1.1**), y observó en la pantalla la sombra densa de los huesos, delineados por las partes blandas, a partir de este momento la Medicina no sería la misma (Esteban, 2010).



Figura 1.1 Wilhelm Röntgen, descubrimiento de los rayos X.
Fuente: Martínez, 2014.

El 20 de noviembre de 1895 Röntgen realiza la primera radiografía que representaba en una película fotográfica las molduras de la puerta de su laboratorio atravesadas por los rayos X (Buzzi, n.d.).

Tras el descubrimiento de los rayos X un año después, en 1896 el físico francés **Antoine Henri Becquerel**, intenta averiguar si algunos materiales expuestos a la radiación solar son capaces de emitir rayos X. Así comprobó que determinadas sustancias, como las sales de uranio, producían radiaciones penetrantes de origen desconocido. Comprobando de manera experimental que la radiación no tenía relación alguna con la fosforescencia; sino que el uranio emitía de manera natural un tipo de radiación muy penetrante y diferente de los rayos X (L'Annunziata, 2007).

Sin saberlo Becquerel había descubierto lo que Marie Curie llamaría más tarde radiactividad (L'Annunziata, 2007).

Hasta la década de 1890, los científicos creían que los átomos eran la parte más pequeña de la materia y que eran "indivisibles". En 1897 el físico británico **Joseph J. Thomson** consiguió dar fin a esta idea mediante un importante experimento que llevó al descubrimiento de una nueva partícula: el electrón (Challoner, 2013).

Para demostrar que los rayos llevaban una carga negativa Thomson intentó desviarlos con un campo eléctrico (**Figura 1.2**). Y efectivamente los rayos fueron desviados por la carga eléctrica, afirmando que estos rayos más que ondas, estaban compuestos por partículas cargadas negativamente a las que llamó "corpúsculos" (más tarde, otros científicos las rebautizarían como electrones).

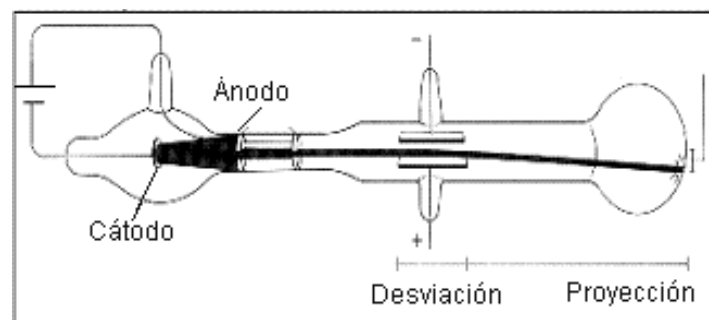


Figura 1.2 Tubo de vacío con el campo eléctrico activado

Fuente: [Imagen en línea] Disponible en: <http://fis.sb-10.org/pravo/4536/index.html>

Hacia el año 1898 **Marie Curie** decidió estudiar los misteriosos rayos emitidos por el uranio descubiertos por Becquerel; así como determinar si otras sustancias además del uranio causaban la conducción de la electricidad en el aire (L'Annunziata, 2007).

Es así que después de probar con diferentes minerales Marie y Pierre Curie descubren que no solo el uranio y el torio son capaces de emitir radiación (L'Annunziata, 2007). Concluyeron que estos rayos eran una propiedad de los átomos del uranio y torio. A esta propiedad que tienen ciertos elementos inestables, de emitir energía en forma de radiación al desintegrarse, Marie Curie la llamó "radiactividad" (L'Annunziata, 2007).

En 1903 el matrimonio Curie recibió el premio Nobel de física junto con Becquerel por el descubrimiento de la radiactividad natural (Esteban, 2010).

Estas investigaciones fueron proseguidas más tarde por **Ernest Rutherford**. Al principio de sus estudios sobre la radiactividad Rutherford descubrió en 1899 que las muestras de uranio emitían dos tipos de radiación y que se diferenciaban entre sí por la capacidad de penetrar la materia; así como de la carga eléctrica que cada una de estas aportaban evidenciando su distinta absorción por la materia (Burcham, 2003).

Los rayos menos penetrantes que eran fácilmente absorbidos por algunos centímetros de aire o por una lámina metálica (con espesor de 0.1 mm) fueron denominados rayos alfa (α) y mostraban un signo positivo. Mientras que los rayos más penetrantes que resultaban absorbidos por un espesor de 1 mm de plomo, se denominaron rayos beta (β) y tenían un signo negativo (Burcham, 2003).

Tiempo después Rutherford supo de un tercer tipo de radiación, capaz de atravesar espesores del orden de 10 cm de plomo. Estos rayos fueron bautizados como radiación gama (γ).

Además de la diferencia entre el poder de penetración de las radiaciones alfa, beta y gamma; otra propiedad para poder identificar estas radiaciones es la deflexión (**Figura 1.3**), es decir el cambio de dirección que sufren las radiaciones al someterlas a un campo eléctrico o magnético (L'Annunziata, 2007).

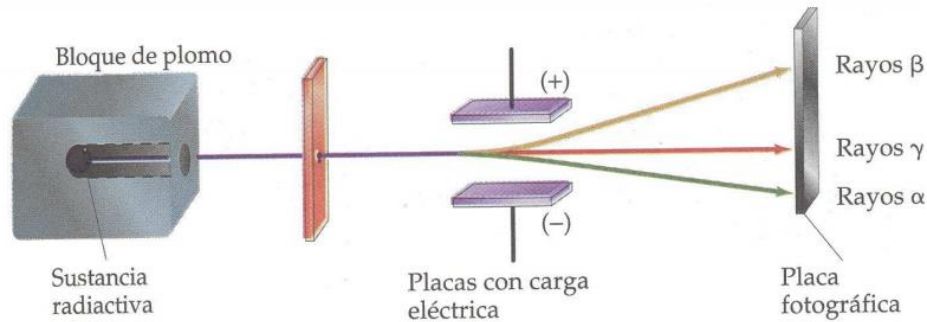


Figura 1.3 Efecto de un campo magnético o eléctrico sobre las radiaciones.
Fuente: Lapuente, nd.

El descubrimiento de las radiaciones y de la radiactividad, marca el nacimiento de la energía atómica. La evolución de la energía atómica es impulsada por los sucesivos descubrimientos entre los que cabría destacar:

- La teoría de la relatividad de Albert Einstein (1905).
- El modelo atómico de Ernest Rutherford (1911).
- La radiactividad artificial por los esposos Joliot Curie (1934).
- Fisión nuclear por Otto Hahn (1938).

La energía nuclear y el desarrollo de la bomba atómica

El desarrollo de grandes inventos ha tenido un origen militar, tal es el caso de la energía nuclear.

En 1941, se desarrolla el proyecto secreto "Manhattan"; creado por el gobierno de los Estados Unidos destinado al desarrollo de la energía nuclear y principalmente de los procesos industriales y científicos que permitiesen una producción masiva de bombas nucleares (López, et al., 1999). En este proyecto trabajan destacados científicos encabezados por Robert Oppenheimer y así, bajo su supervisión se crearon tres bombas atómicas, entre los años 1941-1945 (Díaz, 1991).

En 1945 se llevó a cabo la primera prueba de la bomba atómica de plutonio en el desierto de Alamogordo (Nuevo México) y resultó ser un completo éxito. Después se eligieron los próximos blancos para un bombardeo atómico: Hiroshima y Kokura y otros de reserva: Niigata y Nagasaki. (Díaz, 1991).

La bomba atómica de uranio y la de plutonio estuvieron listas al mismo tiempo. “De modo que el 6 de agosto de 1945 la ciudad de Hiroshima fue destruida por la explosión de una bomba de ^{235}U . La bomba denominada *Little Boy* constaba de dos masas de ^{235}U que se proyectaban una sobre otra con explosivos convencionales; esta detono a solo 200 metros del blanco señalado. La explosión, equivalente a la detonación de 12,500 toneladas de TNT (trinitrotolueno), destruyó instantáneamente la ciudad, provocando la muerte de 140 mil habitantes e hiriendo a otros 163 mil” (Díaz, 1991, p.76).

El segundo bombardeo fue el día 9 de agosto, *Fat Man* una bomba de plutonio fue arrojada sobre Nagasaki. Donde murieron 73 mil personas y otras 35 mil morían después en medio de la agonía. La potencia de la explosión fue estimada en 22 kilotones (ver **Figura 1.4**) (Díaz, 1991).

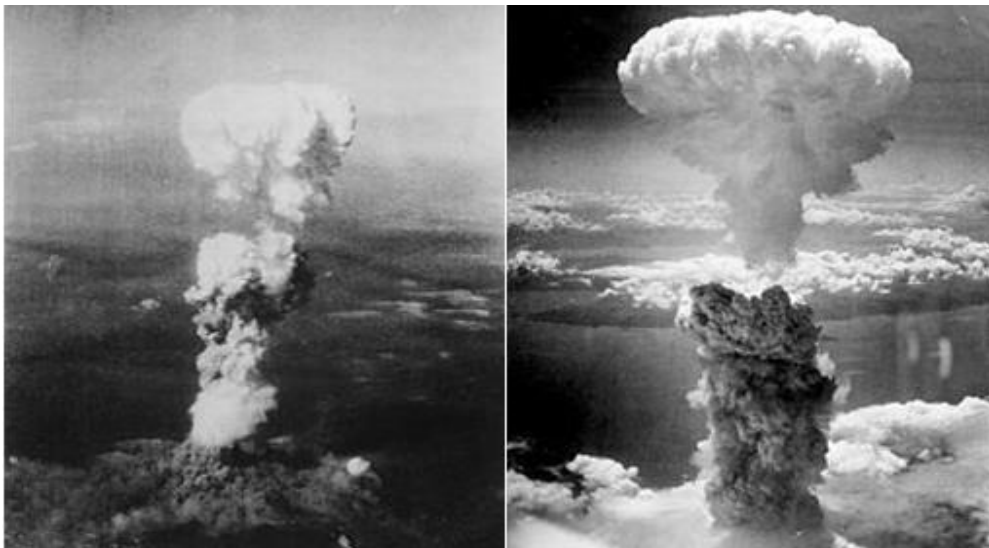


Figura 1.4 Explosión de bomba atómica en Hiroshima (izquierda) y Nagasaki (derecha).
Fuente: Energía Nuclear, 2014.

En apenas instantes dos ciudades enteras habían sido devastadas. La energía nuclear entraba en la historia acompañada de dos gigantescos crímenes. “Las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki se convirtieron así en los primeros y hasta el momento los únicos objetivos de un ataque con bombas atómicas de la historia” (Díaz, 1991).

1.2 ESTRUCTURA DE LA MATERIA Y LA RADIATIVIDAD

Las primeras concepciones filosóficas acerca del átomo fueron en el siglo V a.C., Leucipo pensaba que sólo había un tipo de materia; sostenía que si dividíamos la materia en partes cada vez más pequeñas acabaríamos encontrando una porción que no se podía seguir dividiendo. Un discípulo suyo, Demócrito de Abdera fue el primero de la historia en dar una definición de átomo: la parte más pequeña e indivisible que constituye a la materia (L'Annunziata, 2007).

Sin embargo, más tarde se comprobaría que el átomo está formado por partículas subatómicas y que es posible dividir átomos por medio de la fisión nuclear.

Teoría atómica de Dalton

En 1803 el inglés John Dalton formula una teoría que introdujo la idea de átomo como partícula indivisible, y que se publicó en 1808 con el nombre de “teoría atómica” (Picado y Alvarez, 2008).

La teoría atómica de Dalton se resume con los siguientes postulados (Picado y Alvarez, 2008):

1. Un elemento está compuesto de partículas pequeñas e indivisibles llamadas átomos.
2. Todos los átomos de un elemento dado son iguales entre sí, y son diferentes a los átomos de los demás elementos.
3. Los compuestos se forman cuando átomos de elementos diferentes se combinan entre sí en una proporción fija.
4. Los átomos de un elemento no pueden crearse, destruirse o transformarse en átomos de otros elementos.

Hoy en día se sabe que los postulados no son completamente ciertos; sin embargo, la teoría atómica de Dalton constituyó un marco de referencia que posteriormente los científicos pudieron modificar o ampliar. Por esta razón se considera a Dalton como el padre de la Teoría Atómica Moderna.

A medida que los científicos desarrollaban métodos para explicar la naturaleza de la materia, donde se consideraba al átomo como “indivisible”, se comenzó a evidenciar indicios de que el átomo constaba de una estructura mucho más compleja.

Sin embargo, antes de llegar al modelo atómico actual que explica y esquematiza la estructura del átomo; se suscitaron diversos descubrimientos experimentales de

los cuales se postularon diferentes modelos, los cuales se explicaran de manera breve.

Modelo atómico de Thomson

En 1897 J.J. Thomson identificó que los átomos poseían unas partículas subatómicas con carga eléctrica negativa a las que se llamó electrones.

Thomson propuso que el átomo no debía considerarse como una partícula indivisible tal y como decía Dalton, sino que el átomo era una gran esfera con carga eléctrica positiva, en la que los electrones estaban incrustados y se distribuían como pequeños granitos al que llamó “budín con pasas” (Picado y Alvarez, 2008):

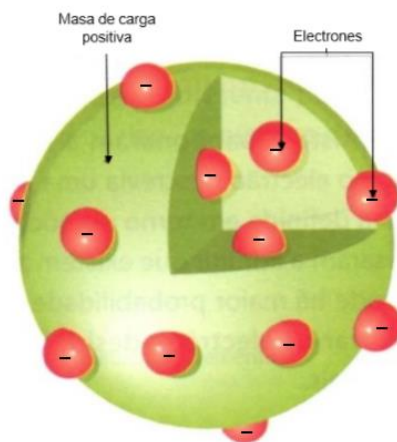


Figura 1.5 Modelo atómico de Thomson, “budín con pasas”.
Fuente: PREUSM, nd.

Modelo atómico de Rutherford

Pocos años después en 1911 Rutherford investigaba el comportamiento de las partículas alfa, observando que una pequeña fracción de estas partículas rebotaban al tener contacto con la lámina de oro. Este resultado no tenía explicación en cuanto a la distribución uniforme de masa, por ello Rutherford propuso un modelo atómico, el cual consiste en (Picado y Alvarez, 2008):

- El centro del átomo está formado por un núcleo en el cual se concentra casi toda la masa del átomo y que posee una carga positiva (protón). Fue el primero en proponer un modelo “nuclear” para el átomo.

- El resto del átomo es la corteza, la cual consiste en una atmosfera electrónica compuesta de orbitas en las que se mueven los electrones, por lo que es un espacio vacío (**Figura 1.6**).

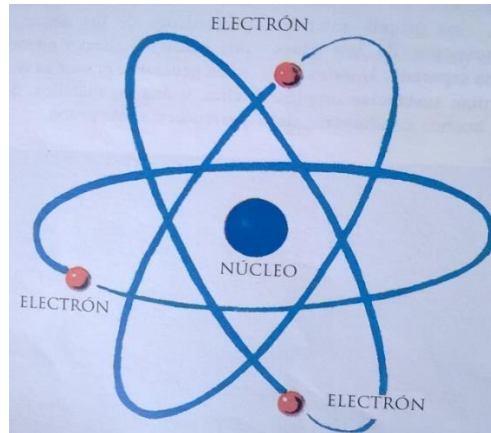


Figura 1.6 Modelo atómico de Rutherford.
Fuente: Marín, G. *et al.*, 2004.

Aunado a lo anterior, fue en 1932 cuando James Chadwick confirmó el modelo de Rutherford, además descubre una partícula atómica con una masa igual a la del protón y sin carga a la que llamó neutrón (Picado y Alvarez, 2008).

Modelo atómico de Bohr

Bohr se basó en el modelo de Rutherford y en el átomo de hidrogeno para proponer un modelo atómico, que fuese capaz de explicar la estabilidad de la materia y los espectros de emisión y absorción que se observan en los gases.

Bohr propuso que cada electrón de un átomo contiene una cantidad fija de energía, que lo mantiene en movimiento alrededor del núcleo, dentro de una región llamada nivel energético (ver Figura 1.7) (Maubert y Martínez, 2012).

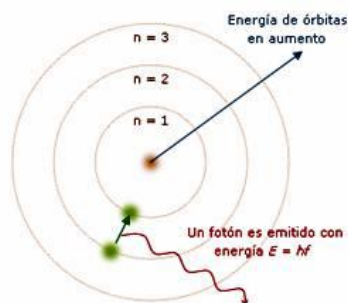


Figura 1.7 Modelo planetario del átomo propuesto por Bohr.

Estructura del átomo

Las investigaciones realizadas por físicos y químicos de todo el mundo durante casi 50 años, permiten establecer un modelo del átomo el cual se constituye de las siguientes partículas subatómicas fundamentales (**Figura 1.8**):

Electrón (e^-): Los electrones son la partícula subatómica más pequeña, poseen carga eléctrica negativa y se localizan orbitando en torno al núcleo atómico. “A velocidades pequeñas poseen una masa de 0,00054862 uma (unidades de masa atómica) y en gramos una masa de 9.19×10^{-28} ” (Cork, 1950).

Protón (p^+): Los protones son partículas subatómicas ubicadas en el núcleo, poseen una carga eléctrica positiva. “Su masa es de $1.67248 \times 10^{-24} \text{g}$ ” (Cork, 1950). La masa de un protón es aproximadamente 1.836 veces mayor que la masa del electrón. Por tanto, la masa de un átomo está concentrada casi exclusivamente en su núcleo.

Neutrón: Es una partícula subatómica localizada en el núcleo atómico junto con los protones; el neutrón no posee carga eléctrica, de acuerdo a Cork (1950) “el neutrón se ve influido por otros átomos solamente a una distancia muy corta”. En consecuencia, atravesará gruesas capas de elementos pesados con poca pérdida de energía. Su masa atómica es de $1.67477 \times 10^{-24} \text{g}$ un poco superior a la del protón.

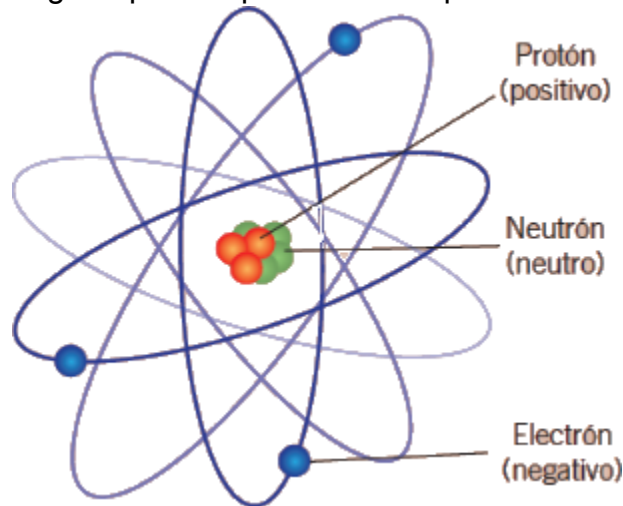


Figura 1.8 Partículas elementales del átomo.
Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2010.

Cabe mencionar que el número de protones de un átomo se conoce como **número atómico** y se representa con la letra “Z”. Y la suma de los protones y neutrones del núcleo de un átomo, se conoce como **masa atómica (A)**.

Representado de la siguiente manera:



Donde:

Z= Número atómico (Número de protones)

A= Masa atómica (suma de protones y neutrones)

N= Número de neutrones

X= Símbolo del elemento

Con base a lo anterior, se dice que un átomo es de carga neutra, por el hecho de tener mismo número de protones (+) y de electrones (-); sin embargo “cuando un átomo gana o pierde electrones adquiere carga eléctrica y es considerado un ion” (González y Rabin, 2011) Ver **Figura 1.9**.

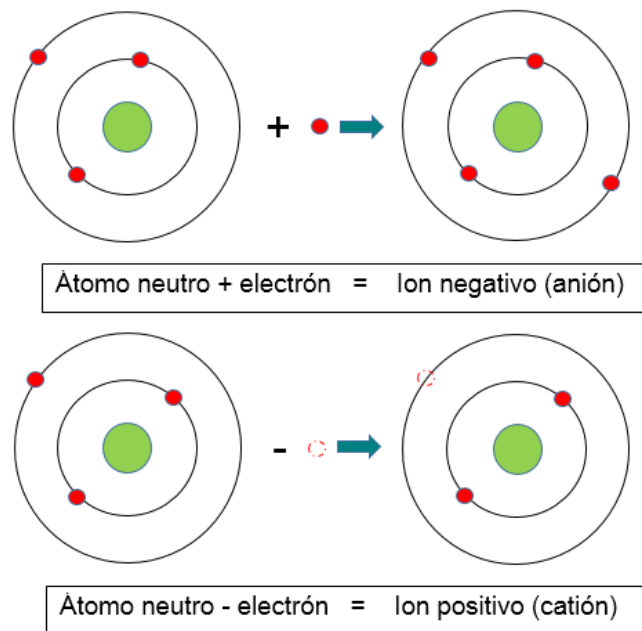


Figura 1.9 Esquematización de la formación de iones.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Isotopos

Un mismo elemento (definido por su número atómico) puede tener diferente número de neutrones, y por tanto diferente peso atómico. A estas variaciones se les denominan “isotopos” (**Figura 1.10**); ya que son átomos que poseen mismo número de protones, pero con diferente número de neutrones (Guerrero y Berlanga, 2000).

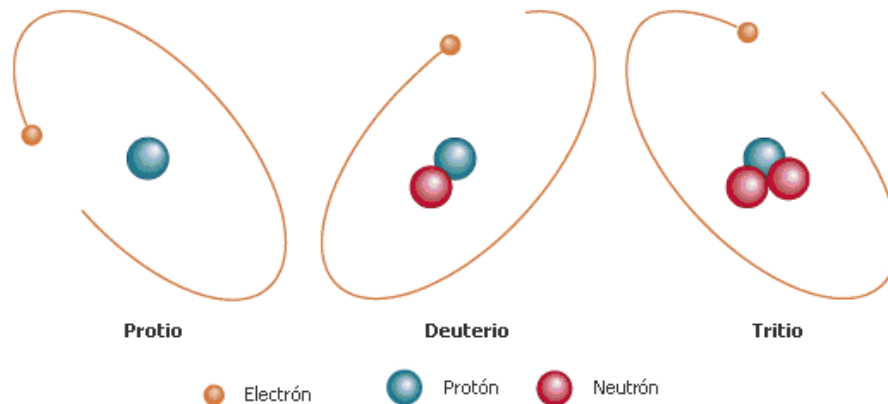


Figura 1.10 Isotopos del hidrogeno.

Existen dos tipos de isotopos:

- **Isotopos naturales:** Son los que se encuentran de forma natural en el ambiente.
- **Isotopos artificiales:** Son fabricados en laboratorios nucleares por el bombardeo de partículas subatómicas.

Ahora bien, cabe mencionar que los isotopos pueden ser estables o inestables (González y Rabin, 2011). Los isótopos estables son aquellos que no se desintegran con el tiempo; entre ellos se incluyen algunos isótopos de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, carbono y azufre.

De acuerdo a Bulbulian (1991) los isótopos estables con pocos protones tienen en general un número igual de neutrones; pero a medida que aumenta el número de protones va aumentando la carga positiva concentrada, y para estabilizar el átomo aumenta también el número de neutrones; de otra forma la repulsión entre las cargas positivas de los protones haría que el átomo fuera muy inestable. La relación entre N y Z , es de fundamental importancia para mantener un balance en el núcleo. Cabe señalar que los neutrones se encargan de conservar la estabilidad de un átomo.

“Sin embargo, existe un límite para la estabilidad de los núcleos (**Figura 1.11**) ya que todos los que tienen 84 protones o más son radiactivos” (Bulbulian, 1991); no obstante, algunos elementos más livianos también son radiactivos como el ^{14}C y ^{40}K .

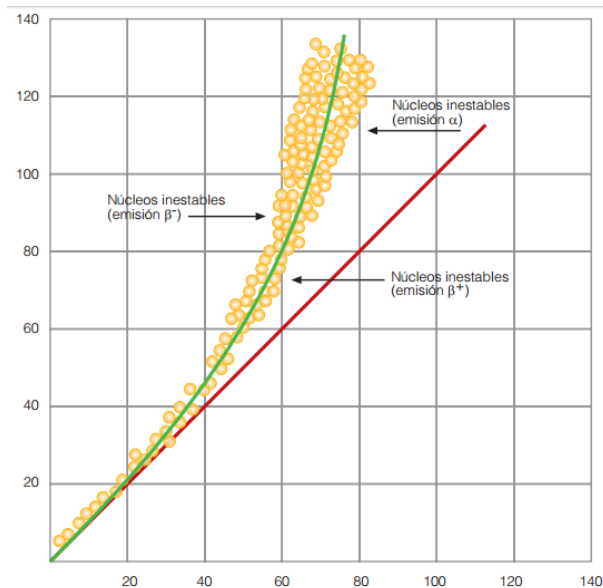


Figura 1.11 Curva de estabilidad nuclear.

Y aunque “la gran mayoría de los isótopos naturales son estables” (Cane y Sellwood, 1978), hay que considerar que también pueden ser isótopos inestables, esto se debe a un desequilibrio de la relación N y Z ; lo cual significa que sus núcleos emiten radiaciones o partículas, o ambas y se descomponen espontáneamente, formando átomos del mismo o de otros elementos. A estos isótopos inestables se les denomina radioisótopos (Bulbulian, 1991).

Es decir, los radioisótopos emiten radiación durante un cierto tiempo, en busca de la estabilidad nuclear, lo cual ocurre por el *decaimiento radiactivo*. A medida que ocurre el decaimiento radiactivo, los núcleos de un radioisótopo irán disminuyendo llevando a cabo el *periodo de semidesintegración*, es decir, el tiempo que tiene que transcurrir para que la actividad de una sustancia radiactiva se reduzca a la mitad.

El decaimiento de los radioisótopos se da por distintos mecanismos que resultan en la emisión de diferentes tipos de radiaciones ionizantes que pueden tener naturaleza corpuscular (partículas subatómicas) o electromagnética (fotones) (Bulbulian, 1991). Los principales tipos de decaimiento radiactivo se agrupan en: decaimiento alfa (α), decaimiento beta (β), y decaimiento gamma (γ) (Acosta & Cañate, 2005).

1.3 TIPOS DE RADIACIONES IONIZANTES

Aunque la radiación se manifiesta en muchas formas, los tipos de radiación más importantes en lo que concierne a la salud humana son aquellas que penetran a través de la materia y la ionizan, es decir, hacen que adquiera carga eléctrica.

Al penetrar en el tejido vivo, la radiación ionizante produce iones capaces de afectar los procesos biológicos normales. Así, la exposición a cualquiera de los tipos más comunes de radiación ionizante que existen: α , β y γ ; pueden producir efectos nocivos sobre la salud (ININ, 2008, citado por Ibarra, 2012, p.4)

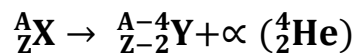
A continuación, se describen cada uno de los modos de decaimiento radiactivo:

1.3.1 Decaimiento alfa (α)

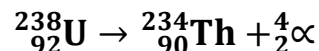
Este decaimiento consiste en la emisión de una partícula α la cual es de naturaleza corpuscular, y se constituye de dos protones y dos neutrones, es decir, son núcleos de helio (${}^4\text{He}$).

Cuando un núcleo emite una partícula α , su número atómico "Z" disminuye en dos unidades y su masa atómica "A" en cuatro unidades (UCO, s.f.).

Esta reacción nuclear se puede simbolizar de la siguiente manera:



Este tipo de emisión se presenta en núcleos pesados, y que tienen masa atómica mayor a 140 por ejemplo:



La NRC (2014) refiere que las partículas α son muy másicas, y por lo tanto su capacidad de penetración en la materia es muy baja. Es decir, estas partículas pueden ser bloqueadas por una hoja de papel, piel, o incluso unas pocas pulgadas de aire. Los efectos de sobre la salud dependen en gran medida de la forma de exposición; la exposición externa generalmente no representa un peligro, debido a su baja capacidad de penetrar la piel; sin embargo, estas partículas representan un riesgo para el tejido vivo cuando se inhalan, ingieren o se absorbe en el torrente sanguíneo; al acumularse en algún tejido el daño biológico resultante aumenta el riesgo de generar células cancerosas; principalmente cáncer de pulmón por inhalación.

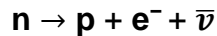
1.3.2 Decaimiento beta (β)

Este tipo de radiación al igual que la alfa, es de naturaleza corpuscular. “A diferencia de lo que sucede con la desintegración alfa, en la desintegración beta varía solamente el número atómico (Z), manteniéndose invariable el número másico (A)” (Martínez y Díaz, 2004, p.232), de modo que el núcleo residual es un isóbaro del originario. Debido a su mayor poder de penetración en relación a los rayos alfa, y mayor poder ionizante que los rayos gamma, causan mayores daños superficiales produciendo quemaduras sobre la piel y dañando los ojos.

Cabe mencionar que, hay dos tipos de decaimiento beta: a) Decaimiento β^- , o emisión espontánea de un electrón. b) Decaimiento β^+ , o emisión espontánea de un positrón.

a) Decaimiento β^-

Este proceso radiactivo consiste en la emisión espontánea de electrones por lo núcleos atómicos. Como en el núcleo atómico no hay electrones, se admite que este tipo de proceso es el resultado de la desintegración de un neutrón (n), que se transforma en un protón (p), un electrón (e^-) y antineutrino ($\bar{\nu}$) (UCO, n.d., p.61), según el siguiente esquema:



Es decir, un neutrón se transforma en un protón; por lo tanto, el núcleo residual tendrá el mismo número másico (A) que el originario pero su número atómico (Z) será una unidad mayor. Esta reacción nuclear se puede representar por:



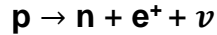
Algunos ejemplos de desintegración β^- son:



b) Decaimiento β^+

Este proceso radiactivo se produce cuando en el núcleo hay un exceso de protones. Consiste en la emisión espontánea de positrones; que son antipartículas del electrón, ya que poseen igual masa que el electrón, pero su carga eléctrica es positiva.

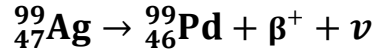
Como en el núcleo atómico no hay positrones, se admite que la desintegración β^+ es el resultado de la desintegración de un protón (p), que se transforma en un neutrón (n), a la vez que emite un positrón (e^+) y un neutrino ($\bar{\nu}$) (Núñez, 2016; UCO, n.d.). De acuerdo al siguiente esquema:



En consecuencia, el núcleo residual tendrá el mismo número másico que el núcleo padre; pero su número atómico disminuye en una unidad. Tal como sigue:



Un ejemplo de desintegración β^+ :

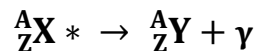


En general, las partículas beta son más ligeras que las partículas alfa; por lo tanto, tienen mayor capacidad para penetrar en otros materiales. Como resultado, estas partículas pueden viajar unos pocos metros en el aire. Pueden derivarse daños en la piel y en los tejidos más profundos, sin embargo, una hoja delgada de metal o de plástico o un bloque de madera puede detener partículas beta (NRC, 2014).

1.3.3 Radiación gamma (γ)

La radiación gamma (γ) consiste en la emisión de fotones, emitidos por núcleos inestables, es decir son ondas electromagnéticas que no tienen masa ni carga y proceden de un núcleo excitado. Es decir, el núcleo no cambia su identidad, sino que únicamente pierde energía.

Este proceso se representa por:



“En donde el asterisco nos indica que el núcleo estaba en un estado excitado. Esta desexcitación de los núcleos suele ocurrir en un tiempo muy breve, por lo que la emisión gamma se observa en coincidencia con el proceso que la precede (emisión α o emisión β)” (UCO, n.d).

Al componerse de ondas de alta energía; pueden viajar grandes distancias a la velocidad de la luz, presenta un poder de ionización relativamente bajo y una

capacidad de penetración alta (NRC, 2014). Para detenerla se hace preciso utilizar barreras de materiales densos como el plomo y el hormigón. Pueden derivarse daños en la piel y en los tejidos más profundos, así como esterilización y mutación de genes (al atacar al núcleo del ADN) (UPNA, n.d.).



Figura 1.12 Capacidad de penetración de las partículas alfa, beta y de la emisión gamma.
Fuente: CSN, 2010.

1.4 FUENTES DE RADIACIÓN

1.4.1 Radiación natural

La radiación natural siempre ha estado presente en el ambiente, así que todo ser vivo está expuesto continuamente a ella. La dosis que recibe cada individuo depende de su ubicación geográfica, es decir de su latitud y altitud, así como de las actividades que realizan cotidianamente, entre otros factores.

De acuerdo al Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, 2000), las principales fuentes de radiación natural de fondo provienen de: los rayos cósmicos que vienen del espacio exterior y de la superficie del sol, de los radionúclidos terrestres que se producen en la corteza terrestre, de los materiales de construcción, de los alimentos e incluso del propio cuerpo, ya que este posee ciertos elementos radiactivos como el ^{40}K y el ^{14}C , entre otros.

La dosis efectiva anual mundial per cápita debido a las fuentes naturales de radiación se estima en 2,4 mSv, la cual se desglosa en la **Tabla 1.1**, cabe recalcar que esta dosis promedio varía en cada individuo.

Tabla 1.1 Dosis media de radiación de fuentes naturales.

Fuente	Dosis efectiva anual promedio en todo el mundo (mSv)
Exposición externa	
Rayos cósmicos	0.4
Elementos en la corteza terrestre	0.5
Exposición interna	
Inhalación (principalmente radón)	1.2
Ingesta (alimentos)	0.3
Total	2.4

Fuente: Elaboración propia con base a UNSCEAR, 2000.

Saling, J.H. y Fentiman, A.W. (2001) mencionan que la radiación natural recibida por la población estadounidense se compone principalmente de:

“a) el radón (55% del total), los rayos cósmicos (8% del total), (3) las emisiones de la desintegración del uranio, torio, radio, y otros materiales radiactivos elementos en la corteza terrestre (8% del total), y (4) las emisiones de potasio 40 (⁴⁰K), carbono 14 (¹⁴C), y otros radioisótopos que se producen naturalmente en el cuerpo (11% del total)”.

1.4.2 Radiación artificial

Este tipo de radiación es creada por el ser humano, para ser empleada en actividades tan diversas como la producción de energía eléctrica, medicina, la industria o la investigación.

La mayor contribución de fuentes artificiales proviene de radiación que se utiliza para diagnóstico y tratamiento médico. Otras fuentes artificiales incluyen componentes emisores de radiación de los aparatos de televisión, detectores de humo y otros productos de consumo; consecuencias de las armas atómicas; y la fuga accidental de los reactores nucleares y otras instalaciones nucleares (Saling y Fentiman, 2002).

Diecisiete por ciento de la dosis media anual efectiva se compone de: la radiación de rayos X médicos (11%), medicina nuclear (4%), y productos de consumo (3%). Menos del 1% proviene de exposiciones ocupacionales (0.3%), la lluvia (0.3 %), y el ciclo del combustible nuclear (0.1%).

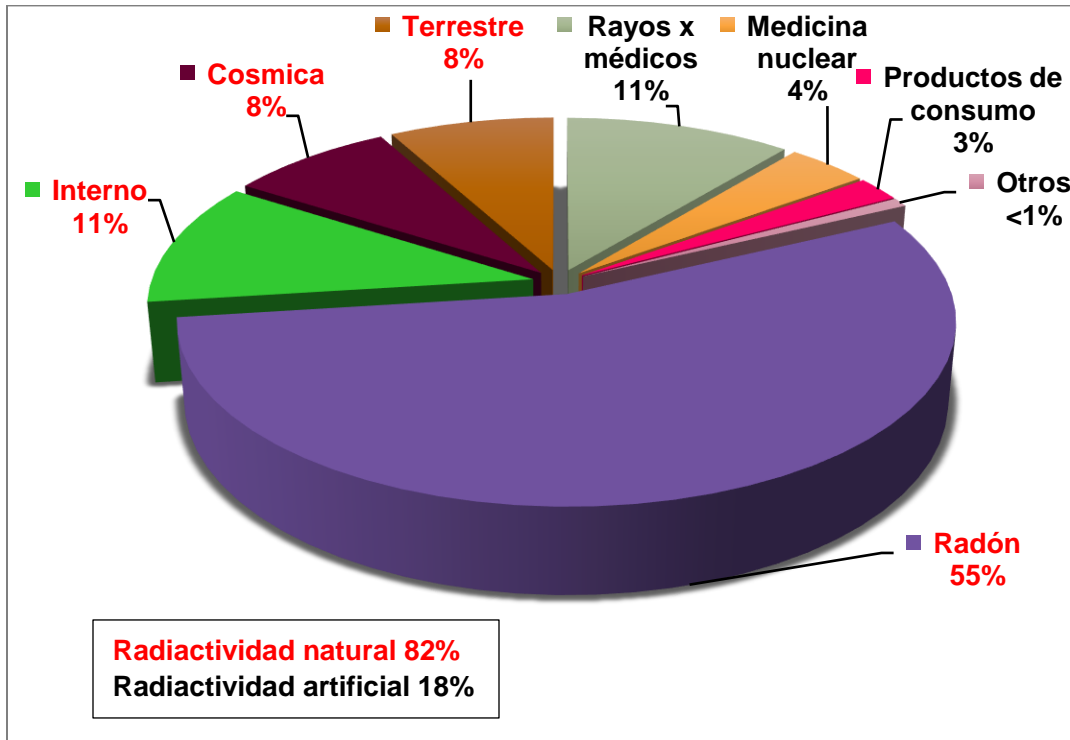


Figura 1.13 Porcentaje de radiación recibida en el ser humano.

Fuente: Elaboración propia con base a Saling, J.H. y Fentiman, A.W., 2001.

1.5 DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN

Para el ser humano las radiaciones ionizantes son imperceptibles, sin embargo, desde que se descubrió que existen elementos que emiten radiación se han desarrollado instrumentos que permiten detectarla y medirla.

Bulbulian (1991) menciona que las radiaciones nucleares sólo se pueden observar indirectamente a través de los efectos que producen al atravesar la materia, y los aparatos diseñados para medir su energía e intensidad están basados en estos efectos: 1) La producción de iones cargados eléctricamente y 2) la producción de excitación que se emite en forma de luz.

Midiendo la intensidad del efecto, es posible conocer la cantidad y la calidad de la energía cedida por la radiación al medio irradiado. Además, los detectores de

radiación pueden emitir luz, cambio de temperatura o efectos químicos lo cual puede ser indicador de presencia de radiación. Los detectores más usados son los de ionización y los contadores de excitación o contadores de centelleo.

En los **contadores de excitación o de centelleo**, la radiación provoca la excitación de las moléculas o de las estructuras cristalinas con una emisión de luz (centelleo) que puede ser observada directamente o transformada en una señal eléctrica mediante un fotocátodo y un fotomultiplicador.

Como ya se ha mencionado cada detector funciona con base a la interacción de la radiación con la materia, es por ello que existe un tipo de detector adecuado para cada aplicación y es fundamental la selección del detector a utilizar, para que el resultado de las mediciones sea correcto.

1.6 MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS

Como ya se ha mencionado, la radiación ionizante pierde energía al interactuar con la materia, dicha energía al ser absorbida o captada por los átomos con los cuales se produce la interacción puede originar en la materia una gran diversidad de efectos físicos, químicos y biológicos.

Dado que las radiaciones ionizantes no tienen la misma capacidad de penetración en la materia; ni representan el mismo peligro pueden provocar diferentes efectos negativos, los cuales se miden en términos del daño biológico y están en función de:

- La cantidad de energía absorbida.
- El tipo de radiación ionizante recibida.
- La parte del cuerpo u órgano afectado.

Debido a esto, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés), ha adoptado magnitudes de protección que están fundamentadas en la medición de la energía depositada en órganos y tejidos del cuerpo humano. Para ello se utiliza la dosimetría de radiación que es el cálculo de la dosis absorbida en tejidos y materia como consecuencia de la exposición a la radiación ionizante, tanto de manera directa como indirecta.

En este sentido, para poder valorar la relación causa-efecto, el ICRP ha establecido y definido las siguientes magnitudes:

- **Actividad:** La actividad es el número de transformaciones nucleares que ocurren en una cantidad definida de algún material radiactivo por unidad de tiempo, esto es:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Donde A es la actividad y dN es el valor esperado del número de transformaciones nucleares espontáneas que ocurren en un intervalo dt. Su unidad de medida es el Becquerel (Bq), que es igual a 1 desintegración por segundo; anteriormente se utilizaba el Curie; 1 Ci = 3.7 x 10¹⁰ Bq.

- **Exposición (X):** La exposición se emplea para medir la capacidad de la radiación para producir iones en el aire; y ha sido definido por la Comisión Internacional de Unidades radiológicas (ICRU, por sus siglas en inglés) como:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en el aire, cuando todos los electrones y positrones liberados por los fotones incidentes, se frenan completamente en una masa de aire (dm).

Su unidad de medida es el coulomb sobre kilogramo (C·kg⁻¹).

- **Rapidez de exposición:** Es la rapidez con la que la radiación electromagnética produce cargas eléctricas en el aire.

$$X = \frac{dX}{dt} \text{ en } \frac{C}{kg * s}$$

Su unidad de medida es el coulomb sobre kilogramo por segundo (C·kg⁻¹·s⁻¹).

Aunque también se suelen emplear las siguientes unidades de rapidez de exposición:

R·h ⁻¹	(roentgen por hora)
mR·h ⁻¹	(miliroentgen por hora)
mR·min ⁻¹	(miliroentgen por minuto)

- **Dosis absorbida (D):** La dosis absorbida es una magnitud que expresa la cantidad de energía que absorbe un material al ser expuesto a la radiación de cualquier tipo.

Es una excelente magnitud para estimar el daño producido en un órgano que ha sido irradiado.

Se define como el cociente entre el valor medio de la energía cedida por la radiación y absorbida por una cantidad de masa.

Su expresión matemática es:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} = \frac{J}{kg} = Gy$$

La unidad de medida de la dosis absorbida es el joule sobre kilogramo ($J \cdot kg^{-1}$), utilizándose el nombre específico gray (Gy).

- **Dosis equivalente (H_T):** La dosis equivalente es la magnitud que correlaciona la dosis absorbida con la probabilidad de la aparición de los efectos estocásticos, según el tipo de partícula. La unidad de dosis equivalente es el joule sobre kilogramo (J/kg^{-1}), utilizándose el nombre específico de sievert (Sv).

El uso de la dosis absorbida no es totalmente adecuado para fines de protección radiológica, dado que el efecto biológico depende del tipo de radiación incidente. Por este motivo se multiplica la dosis promedio sobre un órgano o tejido ($D_{R,T}$) por un factor de calidad W_R que depende del tipo de radiación.

El equivalente de dosis se calcula mediante la ecuación:

$$H_T = \sum D_{R,T} W_R$$

Donde:

$D_{R,T}$ = Es la dosis absorbida media debida al tipo de radiación en el tejido u órgano.

W_R = Es el factor de calidad (**Tabla 1.2**).

Tabla 1.2 Factor de calidad W_R , para diferentes tipos de radiación.

Tipo de radiación y rango de energía		W_R
Fotones (rayos X y radiación gamma) con energías mayores a 30 keV		1
Electrones con energías mayores a 30 keV		1
Neutrones, energía	< 10 KeV	5
	> 10 KeV a 100 KeV	10
	> 100 KeV a 2 MeV	20
	> 2 MeV a 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protones, salvo los de retroceso, de energías > 2 MeV		5
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados		20

Fuente: Elaboración con base a, Acosta J.M. y Cañete S.H. (2005)

- **Dosis efectiva (H_E):** Es la suma ponderada de los equivalentes de dosis para los diferentes tejidos del cuerpo humano (Ángeles *et al.*, 2010). Se calcula mediante la relación:

$$H_E = \sum W_T H_T$$

Dado que cada tejido tiene diferente radiosensibilidad es necesaria una magnitud (W_T) que permita expresar el posible efecto biológico total producido por las diferentes dosis equivalentes recibidas en los distintos órganos y tejidos del cuerpo.

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de ponderación W_T para cada órgano y tejido a considerar.

Tabla 1.3 Factor de ponderación de los tejidos W_T

Tejido u órgano	(W_T)	$\sum W_T$
Médula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos ⁶	0.12	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0.04	0.16
Superficie de los huesos, cerebro, glándulas salivales, piel.	0.01	0.04
	Total	1

Fuente: ICRP, 2007.

⁶ Resto de los tejidos: Adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix.

Con referencia a lo anterior se resumen las magnitudes y unidades radiológicas en la siguiente tabla:

Tabla 1.4 Magnitudes y unidades radiológicas.

Magnitud	Definición	Unidad de medida
		Sistema Internacional
Actividad	Número de desintegraciones por unidad de tiempo	Becquerelio (Bq) 1 Bq = 1 d.p.s(desintegración por segundo)
Exposición	Se emplea para medir la capacidad de la radiación para producir iones en el aire.	1 Culombio/kilogramo C*kg
Dosis absorbida (D)	Energía absorbida por unidad de masa en un determinado punto.	Gray (Gy) 1 Gy= 1 Julio/kilogramo
Dosis equivalente (H)	Magnitud que correlaciona la dosis absorbida con los efectos deletéreos más importantes de la exposición a la radiación, en particular de los efectos estocásticos tardíos.	Sievert (Sv) 1 Sv= 1 Julio/kilogramo
Dosis efectiva (H_E)	Es la suma ponderada de las dosis equivalentes en los distintos órganos y tejidos del cuerpo a causa de irradiaciones internas y externas.	Sievert (Sv) 1 Sv= 1 Julio/kilogramo

Fuente: Elaboración propia.

1.7 EFECTOS AMBIENTALES DE LA RADIACIÓN

El hombre y los organismos vivos están constantemente expuestos a la radiación, ya sea por fuentes naturales o artificiales.

Cabe mencionar que “la radiactividad natural es un componente integral terrestre y extraterrestre, por lo que no se considera una fuente de contaminación radiactiva al medio ambiente” (Moustafa, 1999, p.259).

Por otro lado, la radiactividad artificial es creada por el ser humano para ser empleada en diversas actividades; como resultado se generan residuos radiactivos, mismos que al ser liberados se incorporan a los diferentes ecosistemas. Esto da como resultado una situación de contaminación radiactiva (Moustafa, 1999).

Retomando la expresión de “contaminación radiactiva”, Odum (1983 citado en Osorio, 2008, p.156) define la contaminación como el cambio perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas del aire, tierra y agua, que puede afectar o afectará nocivamente la vida humana y la de especies; estos cambios se deben a la incorporación de cualquier sustancia o forma de energía con potencial para provocar daños, en el medio receptor.

En este sentido, la contaminación radiactiva puede definirse como la liberación e incorporación de elementos radiactivos al medio ambiente y la subsecuente dispersión de los radionucleidos en las vías aire, agua, suelo, planta, animal y hombre.

Cabe mencionar que los efectos de la contaminación radiactiva dependerán de las propiedades físicas del ecosistema, así como de la cantidad, propiedades físicas y químicas de los radionúclidos presentes en los residuos (Moustafa, 1999)

Las implicaciones ambientales, respecto al inadecuado uso y disposición de material radiactivo, derivan del daño biológico que puede producir la radiación ionizante. Este daño dependerá de la “cantidad y características de la energía liberada, radionúclido involucrado, así como del material biológico receptor” (CSN, 2010).

Los efectos adversos para a la biota y los seres humanos por exposición a la radiación, se pueden clasificar en dos categorías:

1. En función del tipo de células que se encuentran en los organismos:
 - Somáticos
 - Genéticos
2. De acuerdo a su probabilidad de incidencia:
 - Deterministas
 - Estocásticos

De acuerdo al tipo de células afectadas:

1.7.1 Efectos somáticos

Los efectos somáticos son aquellos que se manifiestan en el individuo irradiado; y como su nombre lo indica afecta a las células somáticas, las cuales constituyen los tejidos y órganos.

Algunos ejemplos de este tipo de efecto son:

- Inducción de cáncer: La inducción de cáncer generalmente se considera el efecto somático más importante de la radiación ionizante de baja dosis. Un cáncer en un individuo no puede atribuirse con certeza a la radiación en

comparación con otras causas; por lo tanto, la inducción de cáncer por radiación es detectable solamente por medios estadísticos (Saling y Fentiman, 2001, p.39).

El cáncer puede ser inducido por la radiación en casi todos los tejidos del cuerpo humano, aunque “la sensibilidad de los diversos tipos de células a la carcinogénesis radioniducida es muy variable; así el sistema hematopoyético (inducción de leucemia) el tiroides y las glándulas mamarias femeninas, son los tejidos más sensibles desde el punto de vista de inducción de cáncer” (Azorín, 1992).

Cabe mencionar que, la incidencia natural del cáncer varía dependiendo del tipo y el sitio de origen de la neoplasia, la edad y el sexo del individuo, y otros factores (Saling y Fentiman, 2001).

1.7.2 Efectos genéticos

Son el resultado del daño recibido en las células gaméticas y sus efectos se presentarán en la descendencia de las células irradiadas. Es decir, los efectos se presentarán en los descendientes del sujeto expuesto a la radiación.

De acuerdo a Azorín (1992) los efectos genéticos de las radiaciones se pueden clasificar en:

- Los que dependen de cambios en genes individuales (mutagénicos en el ADN)
- Los que se deben a cambios cromosómicos tales como cambios en el número de cromosomas y aberraciones cromosómicas

A continuación, se describirán los efectos de acuerdo a su probabilidad de incidencia:

1.7.3 Efectos deterministas

También denominados reacciones tisulares, se deben principalmente a la muerte/defectos en el funcionamiento de un gran número de células tras dosis elevadas (ICRP, 2007). Estos efectos se presentan en el individuo expuesto, es decir, son somáticos.

El daño se caracteriza por una dosis de umbral (dosis mínima) la cual es específica para cada tejido; así mismo el número de células afectadas se incrementan al aumentar la dosis recibida.

Por encima de un determinado nivel de dosis la pérdida celular podría ser tan importante que el tejido quedaría degradado funcionalmente y por debajo del nivel mínimo el efecto no es observable (ICRP, 2007).

En base a la ICRP (2007, p.45) los efectos determinísticos se pueden categorizar en:

- Reacciones tisulares tempranas a la radiación (días a semanas), casos dónde se ha excedido la dosis umbral pueden ser del tipo inflamatorio como consecuencia de la liberación de factores celulares o pueden ser reacciones que resultan de la pérdida de células.
- Reacciones tisulares tardías (meses a años) puede ser del tipo genérico si se originan como una consecuencia directa del daño a ese tejido.

Los tejidos más sensibles a los efectos deterministas se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1.5 Efectos determinísticos y dosis de umbral.

Efecto	Umbral	Observaciones
Cataratas	10 Gy	100% con un periodo de latencia de 1-2 años
Esterilidad permanente	6 Gy	
Esterilidad temporal	500 mGy 2.5 Gy	40 semanas 1-2 años
Cambios cromosómicos	500 mGy	Al irradiar la piel
Eritema	5 Gy	
Epilación temporal	5 Gy	
Pigmentación	20 Gy	
Efectos sobre el feto	No establecido	Anomalías cerebrales, retraso mental, reducción de la circunferencia craneal, paladar hendido, etc.

Fuente: Azorín, 1992

1.7.4 Efectos estocásticos

Son aquellos que tienen una naturaleza aleatoria, es decir, es posible que si dos individuos han sido expuestos a radiación en las mismas condiciones uno de ellos presente efectos biológicos y el otro no. Son de naturaleza probabilística, influidos por muchos factores (Preciado y Luna, 2010). No presentan dosis de umbral a partir de la cual se presente, pero al incrementar la dosis se incrementa la probabilidad de que el efecto se presente.

Son efectos vinculados a la acumulación de dosis a lo largo del tiempo y pueden manifestarse tanto en el individuo expuesto como en su descendencia (**Tabla 1.6**), ocurren cuando la célula es modificada por daño a su ADN.

Los principales efectos estocásticos de mayor preocupación son la mutagénesis y la carcinogénesis (Azorín, 1992).

Tabla 1.6 Clasificación de los efectos biológicos.

	Efectos estocásticos	Efectos deterministas
Mecanismo	Lesión subletal una o pocas células	Lesión letal muchas células
Naturaleza	Somáticos o heredables	Somáticos
Gravedad	Independiente de dosis	Dependiente de dosis
Dosis de umbral	No	Si
Relación dosis-efecto	Lineal-cuadrática	Lineal
Aparición	Tardía	Inmediata o tardía

Fuente: Real, 2014.

1.8 PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA

Todas las personas están expuestas a radiaciones ionizantes, provenientes de fuentes naturales y artificiales. Para prevenir riesgos derivados de la utilización de fuentes radiactivas es necesario contar con ciertos procedimientos, para proteger a los seres vivos de los posibles efectos deletéreos.

De acuerdo con la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, la seguridad radiológica tiene por objeto proteger a los trabajadores, a la población y a sus bienes, y al ambiente en general, mediante la prevención y limitación de los efectos que pudieren resultar de la exposición a la radiación ionizante.

En consecuencia, el sistema de protección y seguridad tiene el objeto de evaluar, gestionar y controlar la exposición a la radiación a fin de reducir, en la medida en

que sea razonablemente posible, los riesgos radiológicos, comprendidos los riesgos de efectos en la salud y los riesgos para el medio ambiente (OIEA, 2011, p.2).

La ICRP (2007, p.71) señala que, “la protección puede lograrse actuando sobre la fuente, o en puntos de las vías de exposición, y ocasionalmente modificando la ubicación o las características de los individuos expuestos”.

Podemos protegernos de una fuente de irradiación externa mediante la combinación de tres factores:

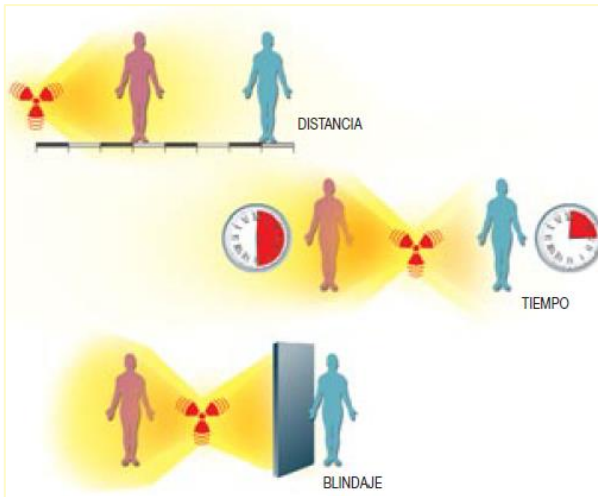


Figura 1.14 Protección radiológica.

Fuente: ENRESA, n.d.

Distancia

Alejarse de la fuente de radiación, puesto que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia.

Tiempo

Disminuir la duración de la exposición a las radiaciones.

Blindaje

Poner pantallas protectoras (blindaje biológico) entre la fuente radiactiva y las personas. Las pantallas utilizadas habitualmente son muros de hormigón, láminas de plomo o acero y cristales especiales enriquecidos con plomo.

Análogamente la OIEA, ha formulado diez principios de seguridad, que constituyen la base para elaborar los requisitos y aplicar las medidas prudentes con el fin de alcanzar el objetivo fundamental de la seguridad.

1. Responsabilidad de la seguridad

La responsabilidad primordial de la seguridad debe recaer en la persona u organización a cargo de las instalaciones y actividades⁵ que generan riesgos radiológicos

2. Función del gobierno

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

3. Liderazgo y gestión en pro de la seguridad

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

4. Justificación de las instalaciones y actividades

Las instalaciones y actividades que generan riesgos radiológicos deben reportar un beneficio general.

5. Optimización de la protección

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

6. Limitación de los riesgos para las personas

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

7. Protección de las generaciones presentes y futuras

Deben protegerse contra los riesgos radiológicos las personas y el medio ambiente del presente y del futuro.

8. Prevención de accidentes

Deben desplegarse todos los esfuerzos posibles para prevenir los accidentes nucleares o radiológicos y para mitigar sus consecuencias.

9. Preparación y respuesta en casos de emergencia

Deben adoptarse disposiciones de preparación y respuesta para casos de incidentes nucleares o radiológicos.

10. Medidas protectoras para reducir los riesgos radiológicos existentes o no reglamentados

Las medidas protectoras para reducir los riesgos radiológicos existentes o no reglamentados deben justificarse y optimizarse.

Cabe mencionar que el sistema de protección radiológica recomendado por la ICRP es la base de la reglamentación internacional y de las reglamentaciones nacionales de protección. En general solo se consideran tres principios de la protección radiológica:

1. Justificación

No se deberá adoptar ninguna practica que suponga la exposición a las radiaciones salvo que dicha práctica implique un beneficio para los individuos expuestos o para la sociedad, que sea suficiente como para compensar el detrimento causado, es decir toda dosis debe estar justificada.

Cualquier decisión que altere la situación de exposición a radiación debería producir más beneficio que daño.

2. Optimización de la protección

Se sigue el criterio "ALARA" (As Low As Reasonably Achievable), en donde la probabilidad de recibir exposiciones, el número de personas expuestas, y la magnitud de dosis individuales deben mantenerse tan bajas como razonablemente sea posible; teniendo en cuenta factores económicos y sociales.

3. Aplicación de límites de dosis

Se aplica a situaciones de exposición planificada para fuentes reguladas (excluyendo las exposiciones médicas de pacientes), donde la dosis de radiación recibida por cualquier individuo no deber exceder los límites pertinentes recomendados por la Comisión.

Los límites de dosis reglamentarios son decididos por la autoridad reguladora teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales, lo que garantiza la protección del público en general y del personal profesionalmente expuesto.

1.9 USOS Y APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR EN LA MEDICINA

A través del tiempo se ha estigmatizado el uso de la tecnología nuclear; se ha generado polémica en cuanto a su uso y total desaprobación esto a partir de sus aplicaciones con fines bélicos.

Sin embargo, es importante resaltar que hoy en día el uso de la tecnología nuclear con fines pacíficos, ha formado parte de la vida cotidiana del ser humano, ya que cuando se aplica de manera tecnológica y físicamente segura, ofrece alternativas eficaces para las diversas áreas de aplicación como la salud, industria de alimentos, el medio ambiente, energía, entre otros.

A continuación, se describirá el uso y aplicación de las radiaciones en la medicina

1.9.1 Medicina nuclear

La Medicina Nuclear comienza su desarrollo como especialidad en la década de 1940. Cabe mencionar que la medicina nuclear es un campo de la medicina que emplea pequeñas cantidades de sustancias radiactivas.

El campo de la medicina nuclear en los últimos dos siglos ha presenciado grandes avances en beneficio de la salud humana, y es que las técnicas nucleares tienen la capacidad para la prevención, el diagnóstico, tratamiento e investigación médica; es por ello que el uso de fuentes abiertas y selladas va en aumento; a pesar de la existencia de procedimientos que no incluyen el uso de radiaciones.

Algunos de los radionúclidos empleados en esta área, ya sea de fuentes abiertas o selladas se enlistan en la **Tabla 1.7** y **Tabla 1.8** respectivamente.

Tabla 1.7 Radionúclidos empleados en la medicina; como fuentes abiertas.

Radionúclido	Vida media	Aplicación	Cantidad por aplicación	Características del residuo
³ H	12.3 a	Radiotrazado Mediciones clínicas Investigación biológica	> 50 GBq	Solventes, sólido, líquido
¹³ N	10 m	Tomografía por emisión de positrones (PET ⁷)	> 2 GBq	Sólido, líquido

⁷ PET, es una tomografía por emisión de positrones y recibe este nombre por sus siglas en inglés "Positron Emission Tomography". Es una técnica que utiliza pequeñas cantidades de materiales

^{11}C	20.4 m	Tomografía por emisión de positrones	> 2 GBq	Sólido, líquido
^{14}C	5730 a	Radiotrazado Diagnóstico Investigación biológica	< 1 MBq > 50 GBq	(CO ₂ exhalado) Sólido, solvente líquido
^{15}O	122 s	Tomografía por emisión de positrones	> 500 MBq	Sólido, líquido
^{18}F	1.8 h	Tomografía por emisión de positrones	> 500 MBq	Sólido, líquido
^{22}Na	2.605 a	Diagnóstico	> 1 MBq	Sólido, líquido
^{24}Na	15.0 h	Investigación biológica	> 5 MBq	Efluente líquido
^{32}P	14.3 d	Terapia clínica	> 200 MBq	Sólido, efluente líquido
^{33}P	25.4 d	Investigación biológica	> 50 MBq	
^{35}S	87.4 d	Investigación biológica	> 5 GBq	Sólido, efluente líquido
^{36}Cl	3.01 x 10 ⁵ a	Investigación biológica	> 5 MBq	Gaseoso, sólido, líquido
^{38}K	7.6 m	Tomografía por emisión de positrones	> 1 GBq	Sólido, líquido
^{42}K	12.4 h	Mediciones clínicas	> 5 MBq	
^{43}K	22.2 h	Mediciones clínicas	> 5 MBq	
^{45}Ca	163 d	Diagnóstico Investigación biológica	> 100 MBq	Principalmente sólido, un poco líquido
^{46}Sc	83.8 d	Médica e Investigación biológica	> 500 MBq	Sólido, líquido
^{51}Cr	27.7 d	Mediciones clínicas Investigación biológica	> 5 MBq > 100 MBq	Sólido, principalmente efluente líquido

radioactivos llamados radiosondas, una cámara especial y una computadora para ayudar a evaluar las funciones de sus órganos y tejidos. Mediante la identificación a nivel celular de cambios en el cuerpo, la PET puede detectar la aparición temprana de una enfermedad antes de que sea evidente con otros exámenes por imagen (RSNA, 2015).

⁵⁷ Co	271.7 d	Mediciones clínicas	> 50 MBq	Sólido, efluente líquido
⁵⁸ Co	70.8 d	Investigación biológica	> 5 MBq	
⁵⁹ Fe	44.5 d	Mediciones clínicas Investigación biológica	> 50 MBq	Sólido, principalmente efluente líquido
⁶⁷ Ga	3.3 d	Mediciones clínicas	> 200 GBq	Sólido, efluente líquido
⁶⁷ Cu	2.6 d	Terapia clínica Anticuerpos monoclonicos	> 1 GBq	Sólido, líquido
⁷⁵ Se	119.78 d	Mediciones clínicas	> 10 MBq	Sólido, líquido
⁷⁵ Br	98 m	Diagnóstico		Sólido, líquido
⁷⁶ Br	16.2 h			Sólido, líquido
^{81m} Kr	13.3 s	Estudios de pulmón	> 6 GBq	Gaseoso
⁸⁶ Rb	76 s	Médica e Investigación biológica	> 50 MBq	Sólido, líquido
^{82m} Rb	6.2 h	Mediciones clínicas		Sólido, líquido
⁸⁵ Sr	64.8 d	Diagnóstico e investigación	> 50 MBq	Sólido, líquido
⁸⁹ Sr	50.5 d	Terapia clínica	> 300 MBq	Sólido, líquido
⁹⁰ Y	2.7 d	Terapia clínica Médica e Investigación biológica	> 300 MBq	Sólido, líquido
⁹⁵ Nb	35.0 d	Médica e Investigación biológica	> 50 MBq	Sólido, líquido
^{99m} Tc	6.0 h	Mediciones clínicas Investigación biológica y generador de núclidos	> 100 GBq	Sólido, líquido
¹¹¹ In	2.8 d	Mediciones clínicas e investigación biológica	> 50 MBq	Sólido, líquido

^{123}I	13.2 h	Médica e Investigación biológica	> 500 MBq	Sólido, líquido Ocasionalmente vapor
^{124}I	4.2 d	Médica, diagnóstico e investigación		
^{125}I	60.1 d	Mediciones clínicas		
^{131}I	8.0 d	Terapia clínica	> 11.1 GBq	
^{113}Sn	155.0 d	Médica e Investigación biológica	> 50 GBq	Sólido, líquido
^{133}Xe	5.3 d	Mediciones clínicas	> 400 MBq	Gaseoso, sólido
^{153}Sm	47 h	Terapia clínica	> 8 GBq	Sólido, líquido
^{186}Re	3.8 d	Terapia clínica, tratamiento paliativo	> 500 MBq	Sólido, líquido
^{169}Er	9.3 d	Terapia clínica, tratamiento paliativo	> 500 MBq	Sólido, líquido
^{198}Au	2.7 d	Mediciones clínicas Terapia	> 500 MBq	Sólido, líquido
^{201}Tl	3.0 d	Mediciones clínicas	> 200 MBq	Sólido, líquido
^{203}Hg	46.6 d	Investigación biológica	> 5 MBq	Sólido, líquido

Fuente: OIEA, 2000.

Tabla 1.8 Radionúclidos provenientes de fuentes selladas.

Aplicación	Radionúclido	Vida media	Actividad de la fuente	Comentarios
Densitometría ósea	²⁴¹ Am	433.0 a	1-10 GBq	Unidades móviles
	¹⁵³ Gd	244.0 d	1-40 GBq	
	¹²⁵ I	60.1 d	1-10 GBq	
Braquiterapia	¹⁹⁸ Au	2.7 d	50-500 MBq	Pequeñas fuentes portátiles
	¹³⁷ CS	30.0 a	30-300 MBq	
	²²⁶ Ra	1600 a	50-500 MBq	
	⁶⁰ Co	5.3 a	50-1500 MBq	
	⁹⁰ Sr	29.1 a	50-1500 MBq	
	¹⁰³ Pd	17.0 a	50-1500 MBq	
	¹²⁵ I	60.1 a	200-1500 MBq	
	¹⁹² Ir	74.0 d	5-100 MBq	
Braquiterapia vascular	³² P	14.3 d	200 MBq	Caracterización
	⁸⁹ Sr	50.5 d	150 MBq	
	¹⁹² Ir	74 d	0.1-1 TBq	
Braquiterapia de carga diferida remota	¹³⁷ Cs	30.0 a	0.03-10 MBq	Unidades móviles
	¹⁹² Ir	74.0 d	0.1-200 TBq	
Teleterapia	⁶⁰ Co	5.3 a	50-100 TBq	Instalaciones fijas
	¹³⁷ CS	30.0 a	500 TBq	
Irradiación de sangre	¹³⁷ CS	30.0 a	2-100 TBq	Instalaciones fijas
	⁶⁰ Co	5.3 a	50-1000 TBq	
Investigación	⁶⁰ Co	5.3 a	> 750 TBq	Instalaciones fijas
	¹³⁷ CS	30.0 a	> 13 TBq	
Fuentes de calibración Marcadores anatómicos Fuentes como estándares en instrumentos	⁶³ Ni	96 a	< 4 MBq	Instalaciones fijas de los instrumentos o fuentes móviles
	¹³⁷ CS	30.0 a	< 4 MBq	
	⁵⁷ Co	271.7 d	> 400 MBq	
	²²⁶ Ra	1.6 x 10 ³ a	< 10 MBq	
	¹⁴⁷ Pm	2.62 a	< 4 MBq	
	³⁶ Cl	3.01x 10 ⁵ a	< 4 MBq	
Radiocirugía gamma (cuchillo gamma)	¹²⁹ I	1.57 x 10 ⁷ a	< 4 MBq	Cráneo
	⁶⁰ Co	5.3 a	> 220 TBq	

Fuente: OIEA, 2000.

Es preciso mencionar que “la mayor parte de los radioisótopos utilizados en los hospitales para procedimientos de diagnósticos y tratamientos médicos son de muy corta duración” (OIEA, 2001, p.5).

Las principales áreas de aplicación de la medicina nuclear son, en radioinmunoensayos, radiofármacos (radiotrazadores), procedimientos de diagnóstico, la radioterapia y la investigación. Estos representan el uso no sólo de pequeñas cantidades de fuentes abiertas y soluciones líquidas, sino también de fuentes selladas de alta concentración confinados en capsulas blindadas (OIEA, 2001).

En este sentido los radiofármacos son medicamentos que han adquirido gran importancia en la práctica clínica por su aplicación con fines diagnósticos y terapéuticos. Contienen una pequeña cantidad de principio activo, conocido como “trazador”, que se marca con un radionúclido haciendo que emitan una dosis de radiación (Cortés y Gómez, 2003). “Cuando son utilizados con un propósito diagnóstico, se aprovecha la propiedad emisora de los radioisótopos para detectarlos a distancia; cuando la intención es terapéutica, se aprovecha el efecto deletéreo que la radiación puede tener sobre un tejido” (Chain y Illanes, 2015, p.7).

1.9.2 Áreas de aplicación de la medicina nuclear

Las técnicas de medicina nuclear se centran principalmente en dos áreas: diagnóstico y terapéutico, que se describen a continuación:

1. Diagnóstico:

El diagnóstico incluye la realización de pruebas funcionales, morfológicas, dinámicas, morfofuncionales y analíticas basadas en principios bioquímicos, fisiológicos y fisiopatológicos, encaminadas a conseguir un mejor conocimiento y comprensión de la estructura y función del cuerpo humano en estado de salud o de enfermedad (MSSSI, 1996).

Con base a Ganatra y Nofal (1986, p.5), la aplicación de la medicina nuclear al diagnóstico tiene tres facetas: 1) un problema clínico, 2) un radiofármaco que se administra al paciente, y 3) un instrumento que se utiliza para detectar la radiactividad.

En esta área las técnicas de aplicación de radionúclidos, los procedimientos se dividen en dos categorías: a) *in vivo*, b) *in vitro*.

a) *in vivo*:

El uso de este procedimiento es fundamental para el diagnóstico de enfermedades que afectan a órganos específicos, como el encéfalo, tiroides, corazón, pulmón entre otros. (OMS, 1976). Constituye una importante tecnología de la medicina nuclear, cuya principal función es evaluar la función del órgano.

Este tipo de procedimientos por imágenes de medicina nuclear, son no invasivos y tienen lugar dentro del cuerpo; en la que un radiotrazador o radiofármaco es suministrado al paciente por vía

intravenosa, inhalación u oral; que se acumulara en el órgano a examinar. “Debido a las propiedades químicas de los radiofármacos, estos se dirigen a los tejidos y órganos a examinar; sin molestia o daño alguno” (Jawerth, 2014).

b) ***in vitro***

En el diagnóstico *in vitro* el procedimiento se realizan fuera del cuerpo, es decir, no se administra ninguna sustancia radiactiva al paciente; al paciente solo se le extraen muestras (sangre, orina o líquido cefalorraquídeo) a las que se les añade directamente la sustancia radiactiva (Jawerth, 2014).

2. Terapéutico:

Desde el punto de vista terapéutico la medicina nuclear, se limita al uso de fuentes abiertas con pequeñas cantidades de material radiactivo con el fin de tratar o “reducir la actividad patológica de tejidos y órganos como tiroides, la medula ósea, membranas sinoviales, así como para el tratamiento de tipos concretos de cáncer; limitando su propagación a otros tejidos y órganos” (OMS, 1976).

Existen dos formas de llevar a cabo el tratamiento de radioterapia (WNA, 2016):

- a) Teleterapia (Irradiación externa): La teleterapia puede llevarse a cabo utilizando un haz de rayos gamma de una fuente de cobalto 60 (^{60}Co), y donde esta fuente radiactiva no entra en contacto con el paciente.
- b) Braquiterapia (Radiación interna): A la braquiterapia también se le conoce como radiación interna, y consiste en colocar una fuente radiactiva dentro del cuerpo en o cerca del tumor. Y a diferencia de la teleterapia, la braquiterapia permite administrar una mayor dosis al tumor, con menor daño a los tejidos circundantes (Jawerth, 2014).

A pesar de que el diagnóstico y la radioterapia son las principales áreas de aplicación de la medicina nuclear; es importante resaltar que también tiene aplicaciones en el ámbito de la esterilización de material médico mediante la irradiación de los mismos.

1.10 RESIDUOS RADIATIVOS

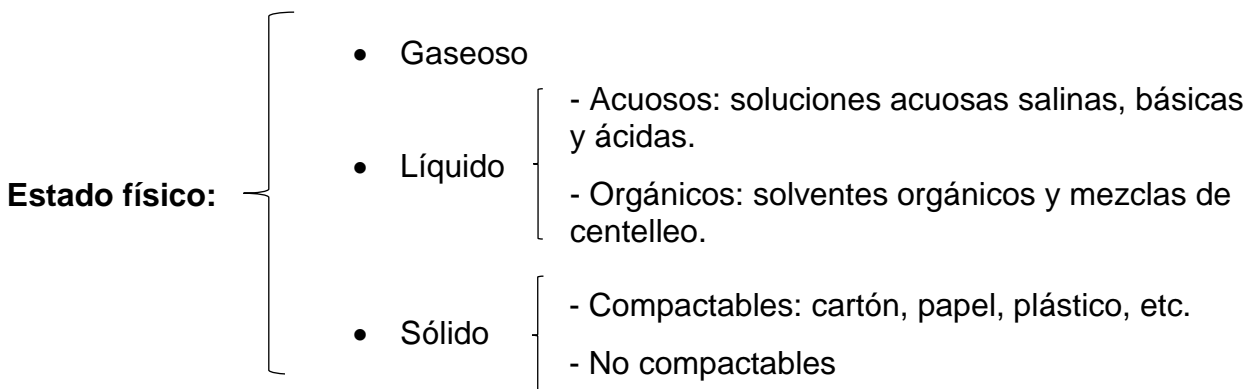
El OIEA define a los residuos radiactivos como “cualquier material que contenga o este contaminado con radionúclidos o concentraciones o niveles de radiactividad superiores a las cantidades establecidas por las autoridades competentes, y para los que no se prevé uso alguno”.

En el caso de México el órgano regulador en materia nuclear es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). Por su parte la NOM-004-NUCL-2013, en el inciso 4.5 define como desecho radiactivo “cualquier material para el que no se tenga previsto uso alguno, y que contenga o esté contaminado con radionúclidos a concentraciones o niveles de actividad mayores a los establecidos por la NOM-035-NUCL-2000, o la que la sustituya”.

1.11 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS

Existen ciertos criterios que sirven de base al momento de establecer las clasificaciones de los residuos radiactivos; tales como: su estado físico, el tipo de radiación emitida, el período de semidesintegración, la actividad específica y la radiotoxicidad.

A continuación, se describe cada uno de los criterios antes mencionados (Norma para la gestión ambiental de desechos radiactivos, 2003):



Con base a este criterio se determinará el tratamiento o acondicionamiento que recibirá el residuo.

Tipo de radiación emitida:

Como ya se vio en el apartado 1.3, los radionúclidos contenidos en los residuos radiactivos se desintegran emitiendo partículas, las cuales se clasifican en alfa α , beta β y gamma γ .

Periodo de semidesintegración:

En base al periodo de semidesintegración (tiempo para que la radiactividad se reduzca a la mitad) de los radionúclidos de un residuo radiactivo, se hace la siguiente clasificación:

- Residuos radiactivos de vida muy corta: son residuos cuyos radionúclidos se desintegran en un periodo de 90 días (Foro Nuclear, 2009)
- Residuos radiactivos de vida corta: Un período de 200-300 años. Son residuos cuyos radionúclidos tienen períodos de semidesintegración máximos de unos 300 años, coincidiendo con los valores del ^{137}Cs y ^{90}Sr . (Foro Nuclear, 2009)
- Residuos radiactivos de vida larga: Radionúclidos cuyo periodo de semidesintegración es superior a 300 años. (Foro Nuclear, 2009)

Actividad específica:

En cambio, si la clasificación se hace en base a la actividad específica (actividad por unidad de masa o unidad de volumen), los residuos líquidos, sólidos o gaseosos se distinguen en (Foro Nuclear, 2009):

- Residuos de muy baja actividad (RBBA): Por su bajo contenido radiactivo, precisan de menores requisitos para su gestión. Decaen suficientemente tras un período temporal de almacenamiento inferior a 5 años, después del cuál son declarados exentos.
- Residuos de baja y media actividad (RBMA): Son materiales contaminados con isótopos radiactivos que en menos de 30 años habrán reducido su radiactividad a la mitad y provienen de la operación de las centrales nucleares en los procesos de limpieza y purificación de sus sistemas y componentes, así como los servicios de medicina nuclear de hospitales, de otras industrias y de centros de investigación.
- Residuos de alta actividad (RAA): Presentan problemas de generación de calor para su almacenamiento temporal y definitivo y están formados principalmente por el combustible irradiado de los reactores nucleares y otros materiales con niveles elevados de radiactividad, normalmente con un contenido apreciable de radionúclidos de vida larga.

Radiotoxicidad:

“La radiotoxicidad es una propiedad de los residuos radiactivos que define su peligrosidad desde el punto de vista biológico. La radiotoxicidad de un radionúclido engloba varios parámetros como el tipo de radiación, el periodo de

semidesintegración, la rapidez con que es expulsado del organismo y también depende de si tiende a fijarse selectivamente en determinados órganos o tejidos” (Álvarez, n.d.).

Este criterio sirve de base para fijar los requisitos de protección y seguridad que han de cumplir las instalaciones en la que se manipule sustancias radiactivas, a fin de reducir adecuadamente el riesgo de irradiación interna (Álvarez, n.d.).

1.12 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS DE ACUERDO AL ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, OIEA.

El OIEA tiene la facultad para establecer normas de seguridad, cuyo principal objetivo se centra en facilitar la gestión de los desechos radiactivos. Tal es el caso de la guía de seguridad titulada *Classification of Radioactive Waste* (2009), la cual contiene normas generales para clasificar los desechos radiactivos; y cuyo sistema de clasificación se centra en la seguridad a largo plazo para el manejo de los distintos tipos de desechos. En ella se definen seis tipos de residuos:

1.12.1 Residuos exentos (EW)

Los residuos exentos contienen pequeñas concentraciones de radionúclidos que cumplen los criterios necesarios para la dispensa, exención o exclusión del control reglamentario y tampoco se requiere establecer disposiciones para la protección radiológica, independientemente de que los residuos se sometan a disposición final en vertederos convencionales o se reciclen; no requiere ninguna consideración adicional desde una perspectiva de control reglamentario.

1.12.2 Residuos de período muy corto (VSLW)

Los residuos de periodo muy corto contienen radionúclidos con períodos de semidesintegración muy breves cuyas concentraciones de la actividad están por encima de los niveles de dispensa. Estos residuos pueden ser almacenados hasta que la actividad ha caído por debajo de los niveles de dispensa, y posteriormente sean autorizados para gestionarlos como residuos convencionales. Ejemplos de desechos de período muy corto son los procedentes de fuentes que emplean ^{192}Ir y $^{99\text{m}}\text{Tc}$, y los desechos que contienen otros radionúclidos con períodos de semidesintegración cortos procedentes de aplicaciones industriales y médicas.

Los principales criterios para clasificar desechos como VSLW son los períodos de semidesintegración de los radionúclidos predominantes. En general, la opción de gestión de almacenamiento con fines de desintegración se aplica a los desechos que contienen radionúclidos con períodos de semidesintegración del orden de 100 días o menos.

1.12.3 Residuos de actividad muy baja (VLLW)

Los desechos que presentan un riesgo tan limitado y que de todos modos se encuentra por encima o cerca de los niveles correspondientes a los desechos exentos, se denominan desechos de actividad muy baja. Este tipo de instalaciones también pueden contener otros desechos peligrosos. Suelen formar parte de esta clase de desechos la tierra y los escombros con baja concentración de actividad.

1.12.4 Residuos de actividad baja (LLW)

Los residuos de baja actividad son los que se encuentran por encima de los niveles de dispensa, pero que contienen cantidades limitadas de radionúclidos de período largo. Estos residuos requieren un aislamiento y contención durante períodos de hasta algunos cientos de años y son adecuados para la disposición final en instalaciones cerca de la superficie.

1.12.5 Residuos de actividad intermedia (ILW)

Los residuos de actividad intermedia contienen radionúclidos de período largo en cantidades que requieren un mayor grado de contención y aislamiento de la biosfera que el que ofrece la disposición final cerca de la superficie.

Los ILW pueden contener radionúclidos de período largo, en particular radionúclidos emisores de radiación alfa, por ello es conveniente que la disposición se lleve a cabo en una instalación a una profundidad de entre algunas decenas y varios cientos de metros. La disposición final a esas profundidades tiene el potencial de ofrecer un aislamiento del medio ambiente accesible durante un largo período de tiempo, siempre que se proceda a la selección adecuada de las barreras, tanto naturales como artificiales, del sistema de disposición final.

1.12.6 Residuos de actividad alta (HLW)

Los desechos de actividad alta son desechos que contienen concentraciones tan grandes de radionúclidos de período corto y largo que requieren un mayor grado de contención y aislamiento del medio ambiente accesible para garantizar la seguridad a largo plazo. Esta contención y aislamiento normalmente se realiza utilizando el almacenamiento geológico profundo en su concepto multibarrera (barrera geológica más barreras de ingeniería).

La disposición final en formaciones geológicas profundas y estables, normalmente a varios cientos de metros o más por debajo de la superficie, es en general la opción aceptada para la disposición final de los HLW.

En la **Figura 1.15** se muestra de manera conceptual, el sistema de clasificación de los residuos radiactivos.

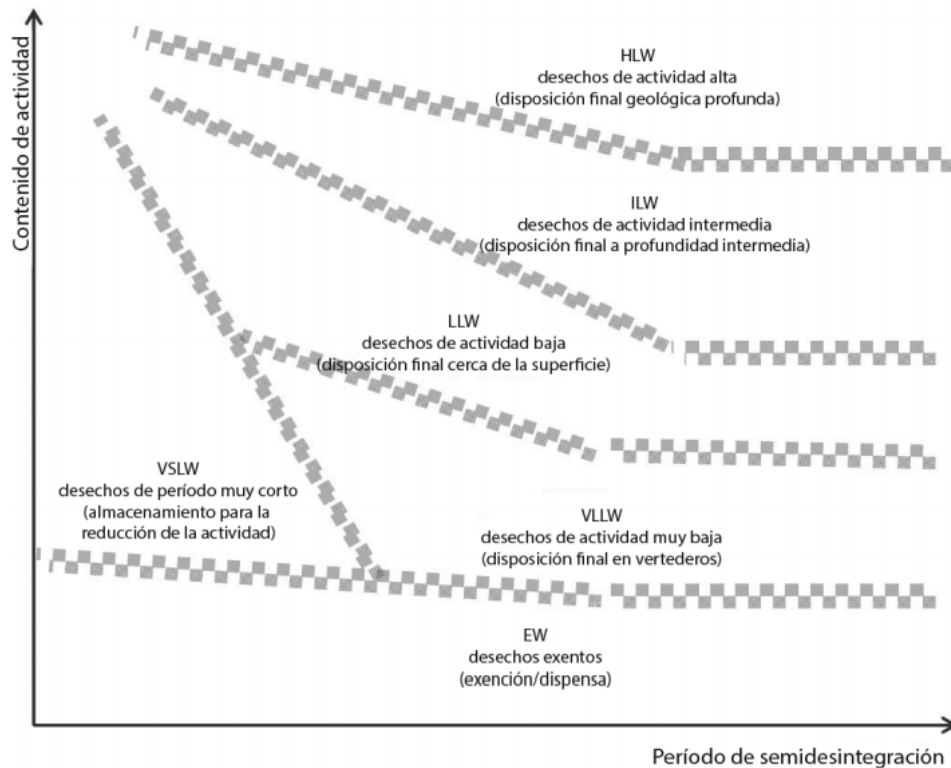


Figura 1.15 Sistema de clasificación de los residuos radiactivos del OIEA.

Fuente: (OIEA, 2009).

Como se puede observar el eje vertical representa el contenido de actividad⁸; el cual puede variar de una concentración insignificante de radionúclidos a una concentración muy elevada. Y con base a esta actividad se tomará en cuenta la gestión de los residuos; es decir, a mayor contenido de actividad, mayor será la necesidad de aislar los residuos de la biosfera. Mientras que los residuos por debajo de los niveles de dispensa se pueden gestionar sin tomar en cuenta las propiedades radiológicas.

En el eje horizontal se representan los periodos de semidesintegración de los radionúclidos contenidos en los residuos. El periodo de semidesintegración va desde periodos cortos (segundos) hasta periodos muy largos (millones de años). Los radionúclidos con un periodo de semidesintegración menor a 30 años se consideran de periodo corto (OIEA, 2009).

⁸ El "contenido de actividad", es un término genérico que abarca la concentración de la actividad, la actividad específica y la actividad total (OIEA, 2009).

1.13 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA NOM-004-NUCL-2013

En México el órgano regulador en materia de energía nuclear es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), la cual es responsable de generar y garantizar el cumplimiento de las normas referentes al uso de radiación y radioisótopos.

En cuestión de la gestión de los desechos radiactivos, se ha publicado la Norma Oficial Mexicana NOM-004-NUCL-2013 la cual clasifica a los residuos radiactivos de acuerdo con la concentración, la actividad y la vida media de los radionúclidos presentes estos y su origen, en:

- a) Desechos radiactivos de Nivel Bajo: Clase A, Clase B y Clase C:**
Contienen cantidades despreciables de radionúclidos de vida media larga; producidos generalmente de la aplicación de radioisótopos en medicina, industria, e investigación (Hernández, 2005, p.7).
- b) Desechos radiactivos de Nivel Intermedio:**
Desechos que se generan durante la operación de centrales nucleares de potencia. No generan suficiente calor para requerir enfriamiento, pero su nivel de radiactividad hace necesario el uso de blindajes para su manipulación (Idem).
- c) Desechos radiactivos de Nivel Alto:**
Provenientes del reprocesamiento de combustibles gastados, estos desechos contienen elementos transuránicos y productos de fisión altamente radiactivos, generan calor y tienen vida media larga por lo que se requiere de blindaje y enfriamiento (Idem).
- d) Desechos mixtos:**
Son aquellos que reúnen las características establecidas en el punto 4.5 de esta norma, y que contienen residuos peligrosos conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, o la que la sustituya.
- e) Jales de uranio y torio:**
Los jales son los desechos radiactivos resultantes del procesamiento de la mena, en el caso del uranio los remanentes sólidos y líquidos del proceso de concentración es a lo que se les conoce como jales, en los cuales el material remanente es el uranio y el torio.

1.14 GESTIÓN DE RESIDUOS RADIACTIVOS

Se entiende por gestión de residuos radiactivos a “todas las actividades, administrativas y operativas, necesarias para la manipulación, tratamiento previo, tratamiento, acondicionamiento, transporte, almacenamiento y eliminación de los residuos radiactivos” (OIEA, 2003).

1.14.1 Principios básicos para la gestión de residuos radiactivos

El OIEA (2011 p.1) menciona que “los principios básicos sobre energía nuclear, proporcionan un enfoque amplio y holístico para el uso de la energía nuclear y para ser aplicables a todos los elementos esenciales de los sistemas de energía nuclear, incluidos los aspectos humanos, técnicos, de gestión y económicos; tomando en cuenta la protección de las personas y el medio ambiente, la no proliferación y la seguridad”.

En los párrafos siguientes se presentan los objetivos que se derivan de cada uno de los Principios de Energía Nuclear, aplicados a la gestión de residuos radiactivos (OIEA, 2011):

- **Principio Básico: Beneficios**

Objetivo: Minimización y optimización de la generación de residuos radiactivos

- Mejorando el diseño y operaciones de las actividades de minería y enriquecimiento del uranio.
- Mejorando el diseño de los reactores nucleares que reduzcan la generación de desechos radiactivos y descargas al ambiente.
- Optimizando las operaciones de las plantas nucleares.
- Aumentado el reuso y reciclado de los materiales radiactivos.
- Mejorando los métodos de gestión y seguridad para el manejo de las fuentes radiactivas.
- Mejorando las técnicas de descontaminación y reduciendo el volumen de los desechos generados.

- **Principio Básico: Transparencia**
Objetivo: *Establecimiento de métodos y enfoques para generar confianza entre personas implicadas y afectadas por la gestión de los residuos radiactivos.*
 - Apertura y transparencia en relación con la planificación y la toma de decisiones son elementos clave en la construcción de confianza.
 - Coherencia en el discurso y la acción.
 - La confianza en el operador y el órgano regulador.
 - Desarrollo de un marco regulatorio eficaz y un organismo regulador independiente y digno de confianza.

- **Principio Básico: Protección a las personas y al ambiente**
Objetivo: *Aplicación de métodos de gestión de residuos radiactivos que garanticen la protección de las personas y el ambiente.*

- **Principio Básico: Seguridad**
Objetivo: *Instalación de sistemas de protección física en las instalaciones que están dentro del ciclo de gestión de los residuos radiactivos.*

- **Principio Básico: No proliferación**
Objetivo: *Incorporación de requerimientos de salvaguardas de material nuclear en el diseño y operación de instalaciones que manejan residuos radiactivos.*

- **Principio Básico: Compromiso a largo plazo**
Objetivo: *Desarrollo de soluciones que permitan la gestión de los residuos radiactivos a largo plazo.*

- **Principio Básico: Eficiencia de los recursos**
Objetivo: *Promoción de métodos y planes de gestión de residuos radiactivos que permita utilizar los recursos económicos de forma eficiente.*

- **Principio Básico: Mejora continua**
Objetivo: *Mejorar constantemente los métodos y tecnologías de gestión de los residuos radiactivos.*

1.15 ETAPAS DE GESTIÓN DE DESECHOS RADIACTIVOS

El objetivo de llevar a cabo la gestión de estos residuos radica en proteger la salud humana y del medio ambiente; esto “podría lograrse mediante el desarrollo y la aplicación efectiva del sistema de gestión de residuos radiactivos” (Abdel, 2012, p.3).

En la **Figura 1.16** se esquematiza la serie de actividades a considerar para la gestión de residuos radiactivos, previo a su disposición final.

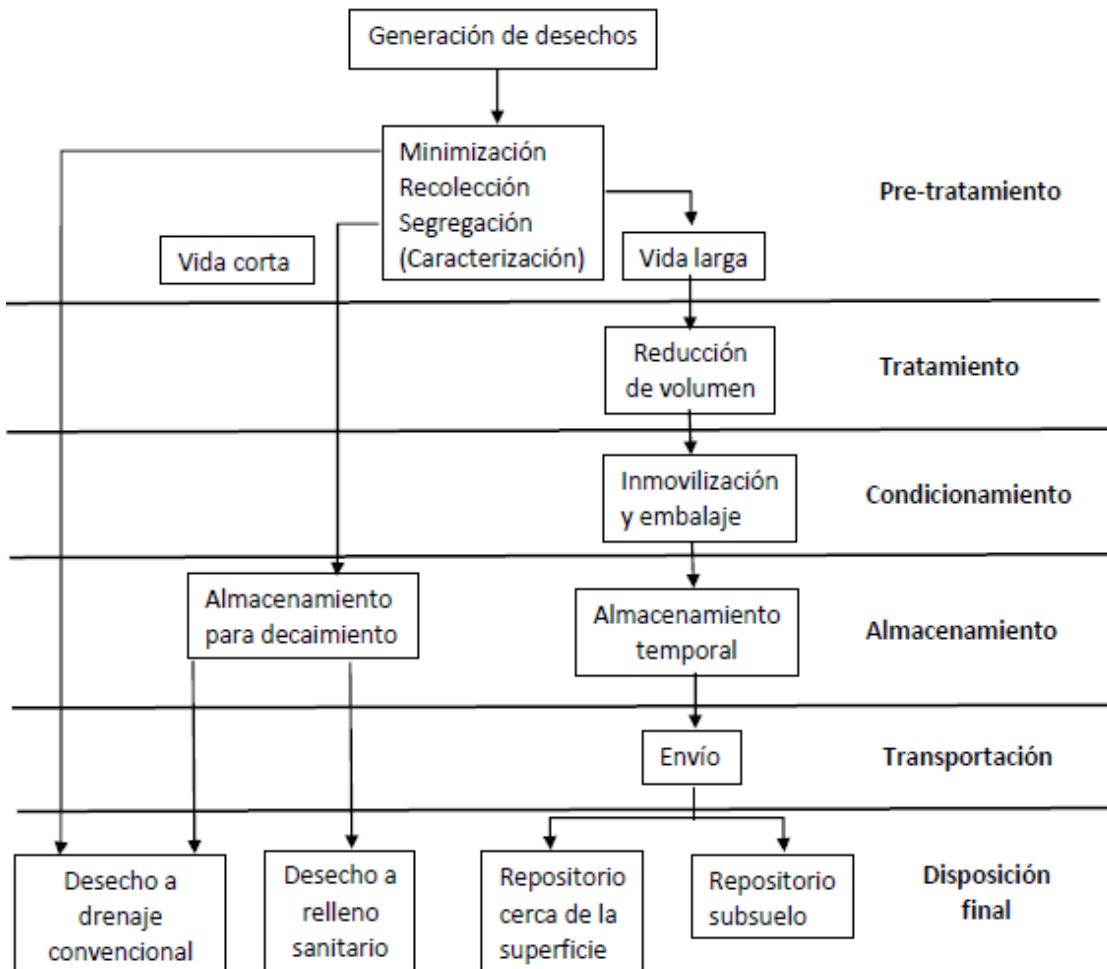


Figura 1.16 Etapas de gestión de residuos radiactivos.

Fuente: (OIEA, 2001).

En los siguientes párrafos se describe cada una de las etapas para la gestión de residuos radiactivos.

1.15.1 Pre-tratamiento

Con base al OIEA (1987, p.4) el pretratamiento de los residuos radiactivos es “el primer paso de la gestión y se lleva a cabo posterior a la generación de residuos. El pretratamiento abarca las actividades de recolección, segregación, ajuste químico y descontaminación; aplicables tanto a desechos radiactivos líquidos como sólidos”.

Los principales objetivos del pretratamiento son (OIEA, 1987):

- Segregación o separación de los residuos en flujos activos y no activos, para reducir el volumen de los desechos radiactivos.
- Separar el flujo activo en componentes o para convertir el residuo en una forma tal, que sea más fácil el tratamiento, acondicionamiento, empaquetado y transporte fuera del sitio o eliminarse de la manera más adecuada.
- Recuperar productos para reciclaje.

Para realizar estas operaciones se debe hacer una caracterización adecuada de los residuos que permita la clasificación correcta de los procesos de tratamiento y acondicionamiento. Esta etapa es muy importante, pues en muchos casos constituye la mejor oportunidad para segregar los residuos en los diferentes flujos.

Durante el pretratamiento también se incluye el embalado de los residuos radiactivos, es necesario realizarlo de manera correcta, ya que permite la minimización del volumen de residuos, además de dar una concentración confiable durante el almacenamiento, facilitando el manejo y simplificando el tratamiento subsiguiente.

En cuanto a la reglamentación mexicana, el pretratamiento se contempla en la NOM-028-NUCL-2009, “Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas”.

1.15.2 Clasificación

Es esencial que los residuos radiactivos una vez generados se clasifiquen y caractericen; ya que la eficacia del tratamiento y acondicionamiento depende en gran medida del conocimiento de la naturaleza y composición del residuo a ser tratado.

La caracterización puede servir para diferentes fines, tales como percatarse de los riesgos potenciales inherentes a ciertos tipos de desechos, diferenciar los que son

adecuados para almacenamiento hasta que decaigan, almacenamiento o disposición final, y planificar y diseñar las instalaciones de gestión. Por otro lado, la clasificación permite seleccionar la opción más adecuada para la gestión de residuos, la cual se ve influida por el periodo de semidesintegración radiactiva.

1.15.3 Tratamiento

El tratamiento de los desechos radiactivos abarca las operaciones destinadas a obtener mayor seguridad o eficiencia económica, modificando sus características físicas o inclusive químicas.

Los tratamientos básicos que se aplican son: reducción del volumen, eliminación de radionúclidos y el cambio en la composición (OIEA, 2009).

Entre los métodos de tratamiento se encuentran: la compactación, incineración de los residuos sólidos secos, así como la evaporación y precipitación química de los residuos líquidos (Balek, 1994). Asimismo, se pueden combinar varios de estos procesos para lograr la descontaminación eficaz de los flujos de residuos.

1.15.4 Acondicionamiento

El acondicionamiento consiste en las operaciones realizadas con el fin de convertir los residuos en una forma adecuada para su empaquetamiento y su posterior manejo, transporte, almacenamiento y la disposición final (OIEA,2009).

Generalmente en el acondicionamiento la conversión de un residuo es a una forma sólida, asimismo se puede incluir condicionalmente la inmovilización del residuo, empaquetándolo en un contenedor y de ser necesario implementar un embalaje adicional (OIEA,2009).

En la selección del proceso de acondicionamiento, se debe tomar en cuenta la compatibilidad del residuo radiactivo con la matriz en la que se acondicionará y la compatibilidad de la matriz con las condiciones ambientales del futuro emplazamiento donde se almacenará. (Qafmolla, 2000).

Las matrices más comunes son el cemento, el betún, los polímeros y el vidrio. Debiéndose evaluar la durabilidad de las matrices que contengan residuos y el comportamiento a largo plazo en condiciones de evacuación (Balek, 1994, pp. 15-16).

1.15.5 Inmovilización

La inmovilización de residuos es un paso importante para la gestión de residuos, y consiste en incorporar el residuo a una matriz sólida y estable; reduciendo el potencial de dispersión de los radionúclidos a la geosfera.

Generalmente la inmovilización, ya sea de forma solidificada o encapsulado, permite que el residuo sea más estable, facilitando que las operaciones de manejo, transporte y disposición se realicen de manera segura

1.15.6 Almacenamiento

El almacenamiento de los residuos radiactivos, se debe de realizar de tal manera que se garantice su aislamiento y la protección de los trabajadores, el público y el medio ambiente.

El almacenamiento de residuos, se emplea en los siguientes casos (OIEA, 2009):

- Para que decaigan los radionúclidos antes de liberarlos del control reglamentario.
- Antes del pretratamiento, tratamiento y acondicionamiento.
- Antes de la disposición final o el traslado a otra instalación autorizada.

En particular los radionúclidos empleados en la investigación y medicina son de un periodo de semidesintegración corto (horas o días), por lo cual el almacenamiento temporal para el decaimiento es una etapa importante en el proceso de gestión, antes de que estos se consideren exentos del control reglamentario. En este sentido, el OIEA (2009. p.36) menciona que “el almacenamiento temporal con fines de decaimiento suele ser adecuado para los residuos radiactivos que contengan radionúclidos con periodos de semidesintegración no superiores a 100 días”.

A razón de lo anterior, en México esta permitido que en aquellas instalaciones en las cuales hacen uso de radionúclidos con vidas menores a 1 año, tengan un lugar exclusivo para el almacenamiento temporal, esto debido a que la normatividad responsabiliza al permisionario del manejo de este tipo de residuos, antes de que estos sean liberados al ambiente.

Por otro lado, también se generan residuos con largos periodos de semidesintegración, y para los cuales el almacenamiento solo es una etapa más de la gestión, en la cual se asegura su aislamiento en lo que se trasladan al sitio de disposición final.

1.15.7 Disposición

La disposición final es la última etapa de la gestión de residuos radiactivos (con largos periodos de semidesintegración), esta consiste en colocar los residuos en una instalación para su almacenamiento definitivo.

Para la contención o confinamiento de los residuos, las instalaciones de disposición deben de contar con barreras (**Figura 1.17**) que proporcionen un grado de asilamiento a largo plazo, y que no representen riesgos para la población y el ambiente. Asimismo, para realizar el confinamiento final de residuos radiactivos, éstos deben cumplir con ciertos requisitos de aceptación previamente definidos por el órgano regulador.

Hay dos tipos de barreras (OECD, 2000):

- Hechas por el hombre (acero u hormigón).
- Barreras naturales (geológicas: gruesas capas de arcilla o metros de roca).

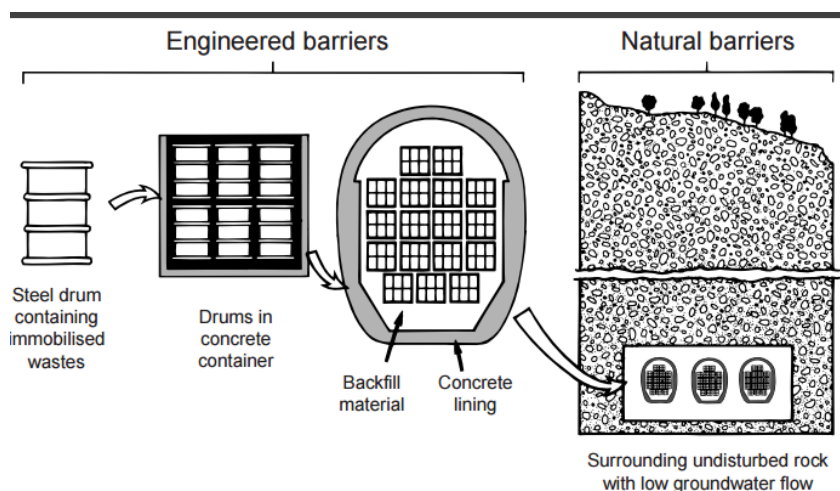


Figura 1.17 Contención en barreras múltiples.

Fuente: OECD, 2000.

Las barreras pueden estar en:

- Enterramientos próximos a la superficie.
- Formaciones geológicas a media profundidad.
- Formaciones geológicas profundas.

1.16 PROCEDIMIENTOS PARA LA GESTIÓN FINAL DE RESIDUOS RADIATIVOS

La evacuación de los residuos radiactivos con periodos de semidesintegración corto o medio, es la etapa final del proceso de gestión, para esta etapa de evacuación de acuerdo a la Sociedad Española de Protección Radiológica se pueden distinguir dos vías (SEPR, 2002):

- 1. Gestión convencional:** Se aplica cuando el residuo no requiere de consideración alguna desde el punto de vista de riesgo radiológico. En esta vía es importante distinguir los residuos que pueden evacuarse directamente por rutas convencionales y los que han de esperar un tiempo para su decaimiento, ya que se denomina como “residuos convencionales” a aquellos que tengan niveles de actividad y concentración de actividad por debajo de los niveles de dispensa el cual se discutirá en el siguiente apartado.
- 2. Gestión a través de una empresa autorizada:** Aquellos residuos radiactivos que por sus características no son susceptibles de una evacuación convencional deben ser gestionados por una empresa autorizada para la gestión.

En el caso específico de México la entidad gestora de residuos radiactivos es el ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) a través del PATRADER (Planta de TRAtamiento de DEsechos Radiactivos) y el CADER (Centro de Almacenamiento de DEsechos Radiactivos).

1.17 DISPENSA DE RESIDUOS CONTAMINADOS CON MATERIAL RADIATIVO Y OTROS CONCEPTOS.

Así como se generan residuos que están por encima del nivel establecido, también se producen residuos que contienen material radiactivo, pero por debajo de los niveles establecidos por el órgano regulador y/o normas aplicables. En estos casos estos residuos no representan riesgos para la salud y medio ambiente, y por lo tanto se considera impráctico su regulación.

La gestión de este tipo de residuos se realiza por las vías usuales, a menos que presenten características químicas o biológicas que impliquen un peligro, de ser así se tratarán de acuerdo a la normatividad correspondiente.

Expuesto lo anterior, a continuación, se definirán los conceptos relacionados con la liberación de las fuentes de radiación que eximen algunos o todos los controles reguladores:

17.1 Dispensa

La dispensa de residuos o materiales radiactivos, consiste en la supresión de cualquier control regulador en materia nuclear. “La finalidad de la dispensa es establecer que material del que ya está bajo control reglamentario, puede retirarse del mismo” (OIEA, 2007, p.7).

En México los criterios para la dispensa se establecen en la NOM-035-NUCL-2013 y en la cual se definen dos tipos de dispensa:

- Dispensa incondicional, donde los residuos sólidos que contengan radionúclidos deben ser gestionados de manera segura considerando sólo otras propiedades peligrosas que pudieran contener.
- Dispensa condicional, en caso de que se pretendan usar niveles de dispensa superiores a los establecidos para la dispensa incondicional, se debe obtener la autorización de la CNSNS.

Según la OIEA (1998), para que una práctica o fuente quede exenta de las consideraciones reglamentarias debe de cumplir con los siguientes criterios:

- Equivalente de dosis efectiva para el público inferior a $10 \mu\text{Sv/año}^1$.
- Equivalente de dosis efectiva colectiva en un año, sea inferior a 1 Sv-hombre.

17.2 Exclusión y exención.

Para el caso de la exclusión, se considera excluida del ámbito de las normas toda exposición esencialmente no controlable, ya que resulta imposible controlar el grado de exposición a la radiación.

Los ejemplos de exposiciones excluidas son: “la exposición por ^{40}K presente en el organismo, a la radiación cósmica en la superficie terrestre o a la concentración no modificada de los radionúclidos presentes en la mayor parte de las materias primas” (OIEA, 2007)

La exención como lo señala el OIEA (2007) se aplica, para el caso de prácticas y fuentes adscritas al órgano regulador, que estén debidamente justificadas y cuyo riesgo radiológico es suficientemente bajo, y para lo cual resulta impráctico emplear recursos para su control; es decir se exime del cumplimiento de ciertos requisitos administrativos al usuario, siempre y cuando los residuos cumplan con ciertos requerimientos mencionados en la sección de dispensa.

“El concepto de exención se puede aplicar tanto a los radionúclidos de origen natural como artificial” (OIEA, 2007, p.7).

1.18 NORMATIVIDAD MEXICANA EN MATERIA NUCLEAR

Como se ha precisado en incisos anteriores la generación de residuos radiactivos implica posibles impactos a la salud pública y ambientales; por ello es fundamental regular cada una de las actividades que integran la gestión de residuos radiactivos.

En este sentido a continuación se presenta el marco regulatorio en materia nuclear, así como la forma en que se articulan las reglas para el uso pacífico de la energía nuclear y la gestión de los residuos radiactivos.

1.18.1 LEY REGLAMENTARIA DEL ARTÍCULO 27 CONSTITUCIONAL EN MATERIA NUCLEAR

Esta ley fue publicada en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) el 4 de febrero de 1985.

La ley regula la exploración, la explotación y el beneficio de minerales radiactivos, así como el aprovechamiento de los combustibles nucleares, los usos de la energía nuclear, la investigación de la ciencia y técnicas nucleares, la industria nuclear y todo lo relacionado con la misma.

Asimismo, la ley define ciertos términos aplicados en el área nuclear y delimita las atribuciones y facultades de los entes encargados y vinculados en el aspecto nuclear, así como la capacidad de intervenir antes, durante y después del uso materiales radiactivos y de la gestión de residuos radiactivos.

Entre las entidades administrativas mexicanas mencionadas en la ley destacan:

- Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, ahora Secretaría de Energía (SENER)
- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS)
- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)

1.18.2 LEY DE RESPONSABILIDAD CIVIL POR DAÑOS NUCLEARES

La Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares fue publicada en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) el 31 de diciembre de 1974.

La Ley de Responsabilidad “tiene por objeto regular la responsabilidad civil por daños que puedan causarse por el empleo de reactores nucleares y la utilización de sustancias y combustibles nucleares y desechos de estos” (Artículo primero de la Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares)

Cabe mencionar que las disposiciones de la presente ley son de interés social y de orden público y rigen en toda la República.

A continuación, se mencionarán algunos artículos relevantes en cuanto a la ley.

“El operador de una instalación nuclear será responsable de los daños causados por un accidente nuclear que ocurra en una instalación nuclear a su cargo, o, en el que intervengan substancias nucleares peligrosas producidas en dicha instalación siempre que no formen parte de una remesa de substancias nucleares” (Artículo quinto de la Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares)

“El operador no tendrá responsabilidad por daños nucleares, cuando los accidentes nucleares sean directamente resultantes de acciones de guerra, invasión, insurrección u otros actos bélicos, o catástrofes naturales, que produzcan el accidente nuclear” (Artículo once de la Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares)

Como podemos darnos cuenta la Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares legisla de forma lo más posible adecuada en el ámbito de Responsabilidad Civil, donde se vincula la gestión del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos. Se refiere a esta ley con la intención de que el lector tenga un panorama sobre las responsabilidades que recaen en los operadores de instalaciones nucleares, aunque esta ley no es relevante para el tema de estudio; es importante hacer mención de esta, ya que es parte de la reglamentación en el ámbito nuclear.

1.18.3 REGLAMENTO GENERAL DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA (RGSR)

Dado que en la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear establece que las instalaciones nucleares y radiactivas deben de contar con sistemas de seguridad radiológica y su operación requerirá de la satisfacción de los requisitos que sobre el particular se determinen en la misma ley y en las disposiciones reglamentarias respectivas; resulta pertinente disponer de instrumentos reglamentarios para hacer efectivas dichas disposiciones.

Es así que se publica el Reglamento General de Seguridad Radiológica en el *Diario Oficial de la Federación* el 22 de noviembre de 1988, y cuyo objeto es proveer en la esfera administrativa a la observancia de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear en lo relativo a seguridad radiológica.

En dicho reglamento se establecen los requerimientos técnicos que debe de cumplir el permisionario, las funciones y responsabilidades referente a la protección radiológica, de igual manera se establecen los criterios para el diseño, construcción, operación, sistemas y equipos de las instalaciones radiactivas, como los procedimientos para el uso seguro de las fuentes de radiación, incluyendo el entrenamiento del personal expuesto y la forma de actuar en caso de emergencias.

El motivo para la creación de este reglamento, se vio influenciado por la inexistente normatividad en relación con la protección, ya que el material radiactivo empleado en México con fines médicos, industriales y de investigación carecía de un marco jurídico. Hay que recordar que la seguridad radiológica vincula el uso de materiales

radiactivos y la gestión de residuos, controlando la exposición de las personas antes, durante y después de la aplicación de dichos materiales.⁹

1.18.4 NORMAS OFICIALES MEXICANAS

1.18.4.1 NOM-004-NUCL-2013, Clasificación de los desechos radiactivos

Esta norma tiene por objetivo establecer los criterios y requisitos para la clasificación de los desechos radiactivos para el almacenamiento definitivo, con el fin de efectuar de manera segura cada una de las etapas de gestión de residuos.

Es así que, la norma clasifica los desechos radiactivos según su concentración de actividad, la actividad, la vida media de los radionúclidos y su origen, en:

- a) *Desechos radiactivos de Nivel Bajo: Clase A, Clase B y Clase C*
- b) *Desechos radiactivos de Nivel Intermedio*
- c) *Desechos radiactivos de Nivel Alto*
- d) *Desechos mixtos*
- e) *Jales de uranio y torio*

1.18.1.5 NOM-028-NUCL-2009, Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas.

En esta norma se establece los requerimientos para la segregación, la recolección, el manejo y el almacenamiento temporal de los desechos radiactivos; de manera que coadyuven a minimizar la generación de residuos, reducir las dosis de exposición, así como reducir las liberaciones al ambiente.

Los requerimientos generales implican:

- Previsiones para evitar acciones que conduzcan a una generación innecesaria de desechos radiactivos.
- Establecer controles para que, durante la recepción y almacenamiento del material radiactivo, no se generen desechos radiactivos.
- Registro actualizado de entradas y salidas del material radiactivo y residuos.
- Establecimiento de un programa para la gestión de los desechos radiactivos

El cumplimiento de éstos, son responsabilidad del permisionario, de manera que el envío a las instalaciones de gestión o bien la descarga al drenaje o al ambiente, se tenga la certeza de que la opción correspondiente cumpla con las prescripciones legales del Reglamento General de Seguridad Radiológica.

⁹ Véase el apartado de protección y seguridad radiológica.

1.18.1.6 NOM-035-NUCL-2013, Criterios para la dispensa de residuos con material radiactivo.

La presente norma tiene por objetivo, establecer los límites y condiciones para identificar aquellos residuos con material radiactivo, los cuales sean viables para la dispensa.

Cabe resaltar que esta norma queda excluida para aquellos residuos sólidos como: fuentes selladas agotadas, edificios contaminados con material radiactivo, materiales de consumo, residuos generados como resultado de un accidente o incidente y NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials).

La presente establece las siguientes disposiciones para la dispensa de residuos con material radiactivo:

- Dispensa incondicional.
- Dispensa condicional.
- Dispensa de aceites contaminados con material radiactivo.
- Criterios de dispensa para el reciclado de residuos metálicos contaminados.
- Criterios de dispensa para la reutilización de componentes metálicos contaminados.

1.18.1.7 NOM-039-NUCL-2011, Especificaciones para la exención de prácticas y fuentes adscritas a alguna práctica, que utilizan fuentes de radiación ionizante, de alguna o de todas las condiciones reguladoras.

En la presente se establecen las especificaciones para exentar algunos o todos los controles reguladores establecidos por la CNSNS; para las prácticas y fuentes cuya cantidad de material radiactivo o nivel de radiación no representan riesgos para la población o ambiente. Ya que se considera impráctico regular la seguridad radiológica para este tipo de fuentes.

Los puntos a tratar en la norma son:

- Criterios de exención.
- Exención incondicional.
- Exención de fuentes que utilicen residuos dispensados.
- Exención Condicional.

1.18.1.8 Norma Oficial Mexicana NOM-040-NUCL-2016, Requisitos de seguridad radiológica para la práctica de medicina nuclear.

La presente tiene el objetivo de establecer los requisitos de protección y seguridad radiológica que se deben cumplir en las instalaciones donde se realiza la práctica de medicina nuclear, con el propósito de mantener las dosis al personal ocupacionalmente expuesto y al público tan bajas como razonablemente sea posible.

Los puntos a tratar en la norma son:

- Requisitos de la instalación
- Requisitos para los equipos para protección radiológica
- Del personal ocupacionalmente expuesto
- Control del material radiactivo

CAPÍTULO II.

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se ubica dentro de un diseño no experimental cuantitativa, ya que según Hernández *et al* (2010) “se trata de estudios donde no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables”; es decir, se observa el fenómeno tal como se presenta en la realidad para posteriormente analizarlo.

Asimismo, esta investigación se orienta por el estudio de alcance descriptivo el cual pretende medir, evaluar, o recolectar datos sobre diversas variables y/o aspectos, del fenómeno a investigar (Hernández, *et al*, 2010). Y que a su vez es transeccional, ya que se recopilan datos de un tiempo determinado.

En la **Figura 2.1**, se presenta el esquema metodológico seguido en este trabajo:

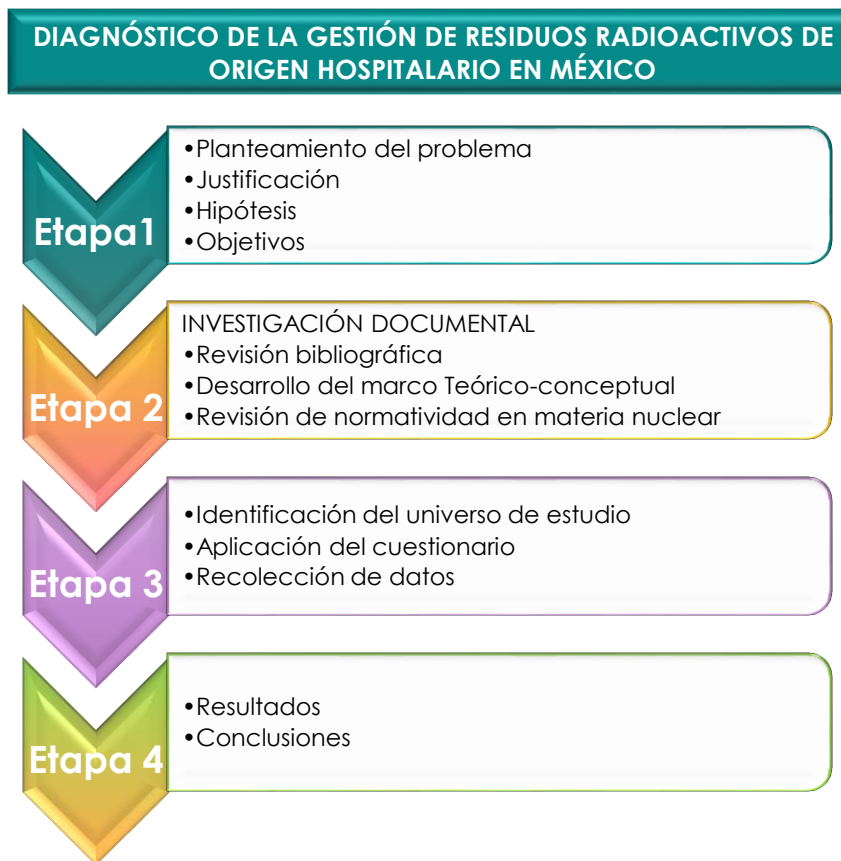


Figura 2.1 Metodología de investigación.

La etapa 1 consistió en definir la problemática y con base a esta establecer los objetivos.

En la etapa 2, se llevó a cabo la investigación documental mediante la búsqueda, recopilación y revisión de documentos técnicos abordando conceptos y teorías relacionadas a la tecnología nuclear, radioprotección, aplicaciones pacíficas y gestión de residuos radiactivos.

Posteriormente se hizo una revisión y análisis de la Normatividad Mexicana Vigente en materia nuclear, en especial de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-NUCL-2013, Norma Oficial Mexicana NOM-027-NUCL-1996, Norma Oficial Mexicana NOM-028-NUCL-2009 y Norma Oficial Mexicana NOM-040-NUCL-2016; referentes al uso de fuentes abiertas de radiación, clasificación, manejo y lineamientos para la gestión de residuos radiactivos, así como de las especificaciones de radioprotección.

Para la etapa 3 se definieron las unidades de análisis, es decir las instituciones médicas de índole público y social del país que cuentan con servicio de medicina nuclear, esta información se obtuvo a través de la Secretaría de Salud. Después se seleccionó una muestra.

En términos estadísticos, para determinar el tamaño de una muestra se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N(Z^2)(p)(q)}{N - 1(d^2) + Z^2(p)(q)}$$

Donde:

n= número de muestra

N= Universo

Z= Nivel de confianza

p= proporción favorable

q= proporción no favorable

d=precisión

En este caso, para seleccionar la muestra fueron consideradas únicamente aquellas instituciones médicas que son consideradas como las principales generadoras de residuos radiactivos hospitalarios; esta información se obtuvo a través de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas.

Debido a que el universo de estudio representa una muestra pequeña (22 instituciones), no resultó factible determinar un tamaño de muestra. Por lo tanto, se consideró el total de la población de interés, con el fin de obtener resultados fiables de la realidad del sector con respecto al servicio de medicina nuclear y gestión de residuos radiactivos. Así también se determina que el tipo de muestra de la investigación es de tipo no probabilística ya que de acuerdo con Hernández *et al*

(2010) en este tipo de muestra “la elección de los elementos no depende de la probabilidad si no de las características de la investigación”.

Respecto al método de recolección de datos, y con el objetivo de realizar el diagnóstico sobre la generación y gestión de los residuos radiactivos generados por los hospitales, se elaboró un formato para la captura de información (**Anexo 1**); dicho formato se realizó una vez que se revisaron y analizaron los lineamientos considerados en la normatividad mexicana para el uso de radioisótopos, radioprotección y gestión de residuos radiactivos (ver **Figura 2.2**).

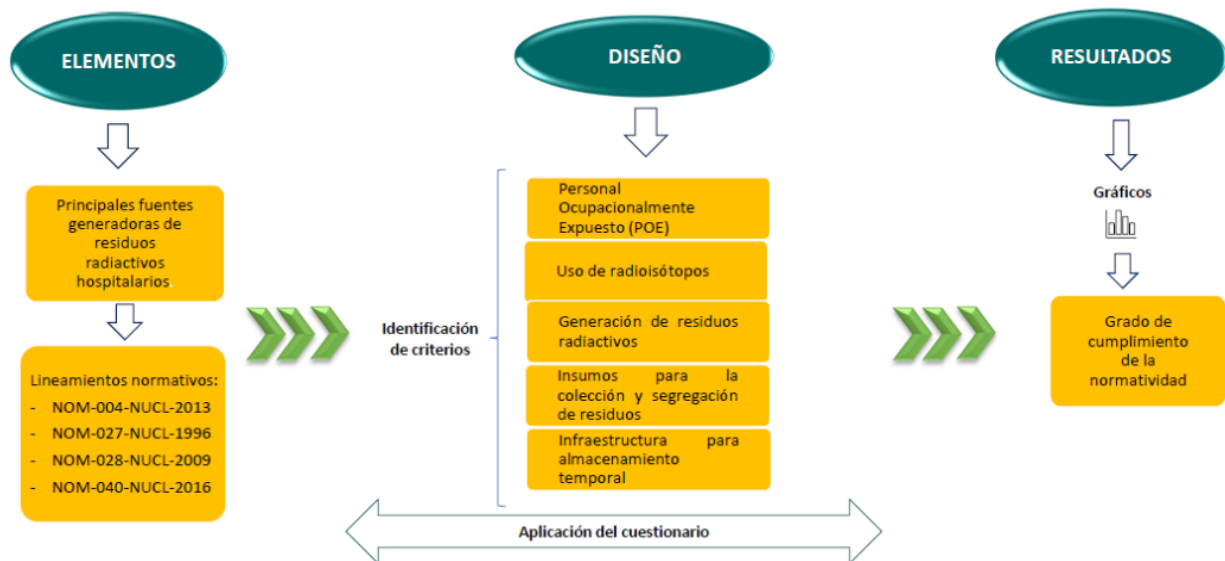


Figura 2.2 Metodología cuestionario

Para la elaboración del cuestionario se tomaron en cuenta los siguientes criterios de análisis:

- Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE): con la finalidad de determinar el grado académico que posee el personal que manipula material radiactivo.
- Uso de radioisótopos: identificar los principales radioisótopos utilizados en el área médica.
- Generación de residuos radiactivos: identificar el tipo de material contaminado con radiación que se genera, así como la cantidad de residuos radiactivos generados por cada una de las instituciones médicas.
- Insumos para la colección y segregación: se refiere a las características físicas que deben de poseer los insumos empleados para la colección y segregación de los residuos radiactivos.

- Infraestructura para almacenamiento temporal: referente a las especificaciones con las que debe contar el lugar destinado para el almacenamiento y decaimiento de los residuos radiactivos.

El formato para la recolección de datos se envió a cada una de las unidades de enlace de las instituciones médicas, a través de la Plataforma Nacional de Transparencia (PNT) del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI).

Finalmente, se agruparon los datos y se generaron graficas correspondientes a cada criterio. En el capítulo tres de la presente investigación se presentan los resultados obtenidos del **Anexo 1**, y las conclusiones derivadas de la investigación.

CAPÍTULO III.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del diagnóstico y el análisis de la información obtenida a partir del instrumento metodológico descrito en el **Anexo 1**, el cual considera los aspectos de interés sobre el uso de materiales radiactivos en el sector médico y los aspectos normativos de las actividades operacionales para la gestión de residuos radiactivos, lo anterior con el fin de determinar el grado de cumplimiento normativo que tienen las instituciones médicas de índoles público y social; respecto a la generación y manejo de los residuos radiactivos.

3.1 INSTALACIONES HOSPITALARIAS QUE GENERAN RESIDUOS RADIATIVOS

Actualmente en México el 89%¹⁰ de los residuos radiactivos de origen no energético provienen del sector médico. Sin embargo, dicho porcentaje no detalla si se hace referencia a las fuentes selladas o fuentes abiertas en desuso.

Con respecto a lo antes mencionado, a la fecha se tiene el registro de 52¹¹ instituciones médicas en el país que cuentan con el servicio de medicina nuclear, y que hacen uso de fuentes de radiación tanto abiertas como selladas. Por otra parte, la CNSNS tiene el registro de 441 licencias de operación de fuentes radiactivas con fines médicos; de las cuales 229 amparan el uso de fuentes abiertas y 212 amparan la operación de fuentes selladas. Sin embargo, debido al éxito obtenido en el uso de radioisotopos en el sector médico, la demanda de fuentes abiertas y selladas se incrementa año con año.

¹⁰ Información obtenida directamente de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias CNSNS, 2016.

¹¹ Información obtenida directamente de la Secretaria de Salud.

La CNSNS señala que, de las 52 instituciones médicas registradas en el país, solo 22 son consideradas como principales generadores de residuos radiactivos; tal como se señala en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1 Principales instituciones generadoras de residuos radiactivos

CLAVE	INSTITUCIÓN	INSTALACIÓN
H1	Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado	Centro Médico Nacional 20 de noviembre
H2	Hospital Juárez de México	Hospital Juárez de México
H3	Hospital Infantil de México Federico Gómez	Hospital Infantil de México Federico Gómez
H4	Instituto Mexicano del Seguro Social	Unidad Médica de Alta Especialidad, Hospital de Especialidades Centro Médico Nacional de Occidente.
H5	Instituto Nacional de Pediatría	Instituto Nacional de Pediatría
H6	Instituto Mexicano del Seguro Social	Hospital General Regional No. 25 Ignacio Zaragoza
H7	Instituto Nacional de Cancerología	Instituto Nacional de Cancerología
H8	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Especialidades Dr. Antonio Fraga Mouret CMN La Raza
H9	Hospital General de México, Dr. Eduardo Liceaga	Hospital General de México, Dr. Eduardo Liceaga
H10	Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán	Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán
H11	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Oncología CMN Siglo XXI.
H12	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Especialidades CMN Siglo XXI Bernardo Sepúlveda Gutiérrez
H13	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Especialidades CMN Gral. De Div. Manuel Ávila Camacho
H14	Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez	Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez
H15	Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado	Hospital Regional Lic. Adolfo López Mateos
H16	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Cardiología, Centro Médico Nacional Siglo XXI.
H17	Instituto Mexicano del Seguro Social	Unidad Médica de Alta Especialidad, Hospital de

		Especialidades No. 25, Centro Médico Nacional del Noreste
H18	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Especialidades del Centro Médico Nacional, Ignacio García Téllez
H19	Instituto Mexicano del Seguro Social	Hospital de Especialidades No. 71, Centro Médico Nacional, Torreón.
H20	Institutos Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas	Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas
H21	Instituto Mexicano del Seguro Social	Unidad Médica de Alta Especialidad (UMAЕ), Hospital de Especialidades No. 1 Centro Médico Nacional Bajío
H22	Instituto Mexicano del Seguro Social	UMAЕ, Hospital de Cardiología No. 34, Centro Médico Nacional del Noreste

Fuente: Elaboracion propia con base CNSNS, 2016.

A continuación, se presenta los resultados del **Anexo 1** obtenidos por cada una de las instituciones señaladas en la **Tabla 3.1**.

¿Cuántos años tiene la institución prestando el servicio de medicina nuclear?
Los resultados obtenidos a este cuestionamiento se aprecian en el **Gráfico 3.1**.

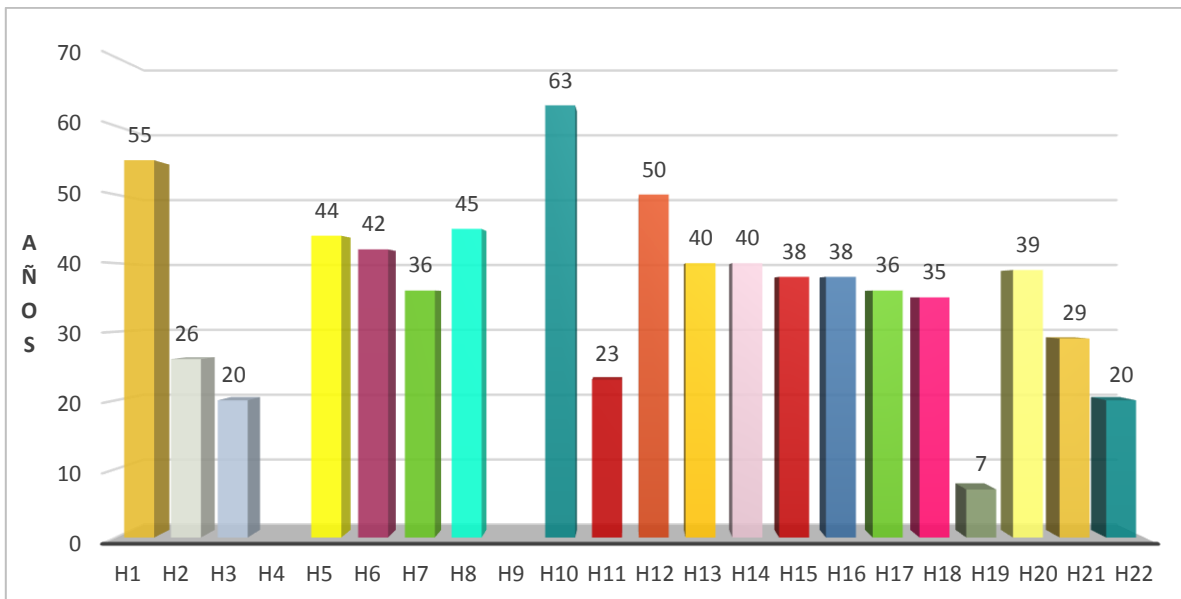


Gráfico 3.1 Años de servicio en medicina nuclear.

Fuente: Elaboracion propia.

Tal como se observa en el gráfico, las instituciones médicas que tienen mayor antigüedad en el manejo de unidades de medicina nuclear son: el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (H10) con 63 años, seguido del Centro Médico Nacional 20 de noviembre (H1) con 55 años, Hospital de Especialidades CMN Siglo XXI Bernardo Sepúlveda Gutiérrez (H12) con 50 años, el Hospital de Especialidades Dr. Antonio Fraga Mouret CMN La Raza (H8) con 45 años y el Instituto Nacional de Pediatría (H5) con 44 años. Las demás instituciones radican en el intervalo de 40 a 20 años. Dos instituciones no proporcionaron información.

La información obtenida, da un panorama general de los años de experiencia que cada centro médico tiene en cuanto al uso de material radiactivo, y que dicha experiencia derive en el adecuado manejo de residuos radiactivos, es decir, sería conveniente que las instituciones con mayor experiencia en medicina nuclear sean las que tengan un alto grado de cumplimiento en cuanto a la gestión de residuos radiactivos con forme a la normatividad vigente en el país.

¿Grado académico del Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) que manipula materiales y residuos radiactivos en el área de medicina nuclear?

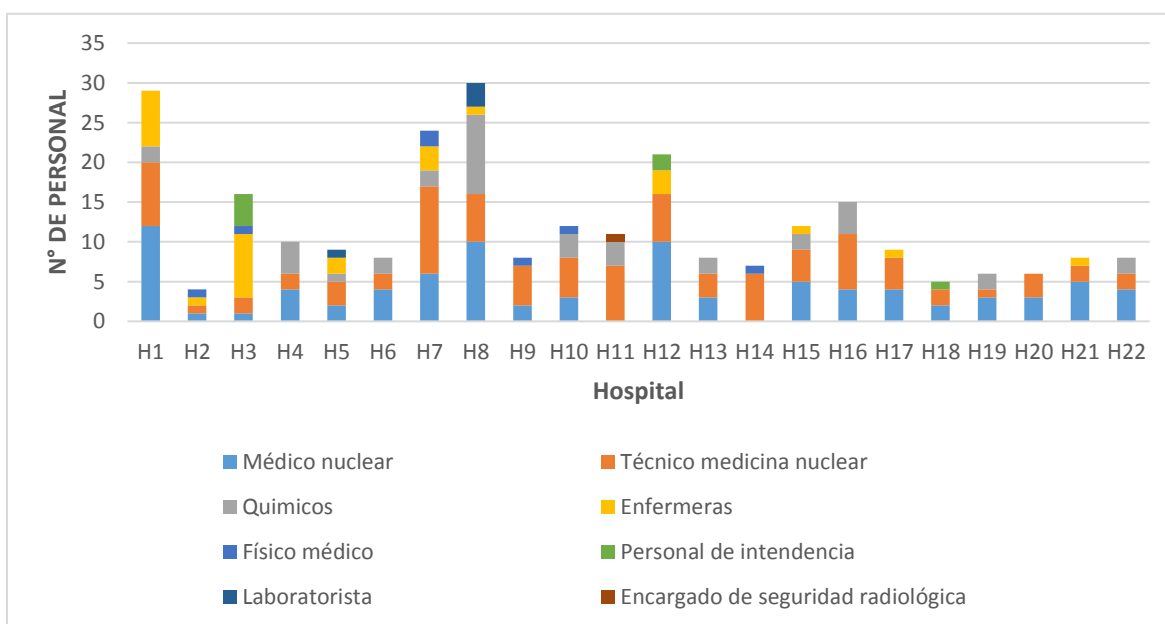


Gráfico 3.2 Personal Ocupacionalmente Expuesto.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al personal ocupacionalmente expuesto que labora en el área de medicina nuclear de cada institución y su grado académico destacan: médicos

nucleares, técnicos en medicina nuclear, químicos, enfermeras, físicos médicos, laboratoristas y personal de intendencia.

El personal antes mencionado, es el encargado de la recepción, manipulación y gestión de los residuos radiactivos generados, por lo tanto, es el más expuesto a las radiaciones ionizantes y/o a la incorporación de material radiactivo en caso de no realizar estas operaciones de manera adecuada. Por ello debe demostrar un nivel de escolaridad al menos de educación básica.

Ante esta situación y desde el punto de vista de gestión de residuos radiactivos, el grado académico del personal que labora en cada hospital se considera aceptable, sin embargo, no es el único requisito exigido para el POE, es por ello que se considera la siguiente pregunta; **¿El POE, antes mencionado se encuentra dentro de la licencia de operación?** Todo POE debe contar con el reconocimiento de la CNSNS y estar contemplado en la Licencia de Operación Vigente emitida por la Comisión, la cual constata la capacitación y adiestramiento del personal respecto al manejo de materiales radiactivos.

En ese sentido, las 22 instituciones aseguran que su POE está incluido en la Licencia de Operación y que está capacitado para laborar y realizar actividades de índole radiactivo; no obstante, dos hospitales (Hospital Infantil de México Federico Gómez y Hospital Bernardo Sepúlveda) mencionan como POE al personal de intendencia y aunque estos son considerados “excluidos”, dicen contar con capacitación y adiestramiento para laborar en instalaciones radiactivas.

3.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

En este apartado se desarrollan los resultados obtenidos apartir de los cuestionamientos, referentes al uso de radiofármacos y generación de residuos radiactivos hospitalarios. A continuación se describen los datos obtenidos.

Los procedimientos realizados en medicina nuclear requieren el uso de diferentes tipos radioisotopos para la producción de radiofármacos con fines de diagnóstico y terapia. De acuerdo con la CNSNS existen 24 radioisótopos autorizados para uso médico, estos se listan en la **Tabla 3.2**:

Tabla 3.2 Radioisótopos autorizados en medicina nuclear.

^{198}Au	^{99}Mo
^{57}Co	$^{13}\text{N}^1$
^{60}Co	^{15}O
^{51}Cr	^{32}P
^{137}Cs	^{223}Ra
^{18}F	^{188}Re
^{55}Fe	^{35}S

^{67}Ga	^{153}Sm
^{125}I	^{89}Sr
^{131}I	^{90}Sr
^{111}In	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
^{192}Ir	^{201}Tl

Fuente: Elaboracion propia.

Al respecto, acontinuación se presentan los resultados obtenidos del siguiente cuestionamiento:

Principales radioisótopos usados en la institución médica.

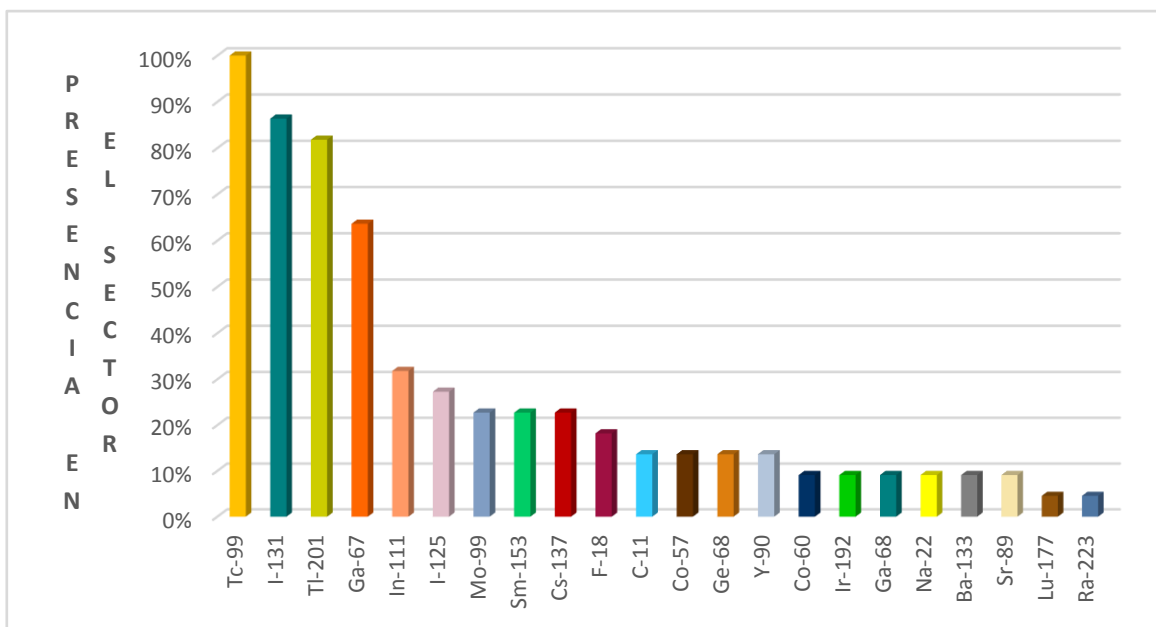


Gráfico 3.3 Radioisótopos de uso médico.

Fuente: Elaboracion propia.

En el Gráfico 4.3 se visualizan los resultados obtenidos referente a la pregunta 4, estos dejan ver que los radionúclidos con mayor aplicación medica por parte de las 22 instituciones, son: el $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{131}I , y ^{201}Tl .

De los cuales, la totalidad de los centros médicos utilizan el $^{99\text{m}}\text{Tc}$, el 86% usa ^{131}I y el 82% usa ^{201}Tl . En menor proporción se encuentran: ^{67}Ga , ^{111}In , ^{125}I , ^{99}Mo , ^{153}Sm , ^{137}Cs , entre otros.

Cabe señalar que el Tc-99m es el radiofármaco de mayor importancia en el campo de la medicina, debido a que se emplea con éxito en la detección de padecimientos y a su corto periodo de semidesintegración física (6 h) y biológica. Es un emisor gamma y se usa principalmente para la formación de imágenes del esqueleto y el

miocardio (OIEA,2014). Por otro lado, el yodo-131 es un emisor beta, con una vida media de 8 días se utiliza para tratar la actividad de la glándula tiroides, el cáncer de tiroides y la formación de imágenes de la tiroides (OIEA,2014). Mientras que el talio-201 tiene una vida media de 3 días y se usa para fines de imagen cardiovascular.

Bajo este contexto y desde el punto de vista de generación de residuos, esta información es clave y punto de partida para la correcta gestión de residuos; ya que la identificación del nuclido es uno de los aspectos que determinará las actividades subsecuentes consideradas en cada etapa de la gestión, y sobre todo para establecer el tiempo de almacenamiento temporal para el decaimiento. De igual manera los resultados dejan ver que la mayoría de los radionúclidos empleados con fines médicos son de vida media muy corta (inferior a 30 días), lo cual no significa que los residuos contaminados con estos nucleídos dejen de representar un riesgo, es decir, aunque su actividad es limitada es material radiactivo y se han de gestionar como tal.

Promedio mensual del año 2015, de pacientes a los que se les aplico unidosis.

La aplicación de radiofármacos varía en función del número de pacientes que se tengan programados; tal como se visualiza en el **Gráfico 3.4**.

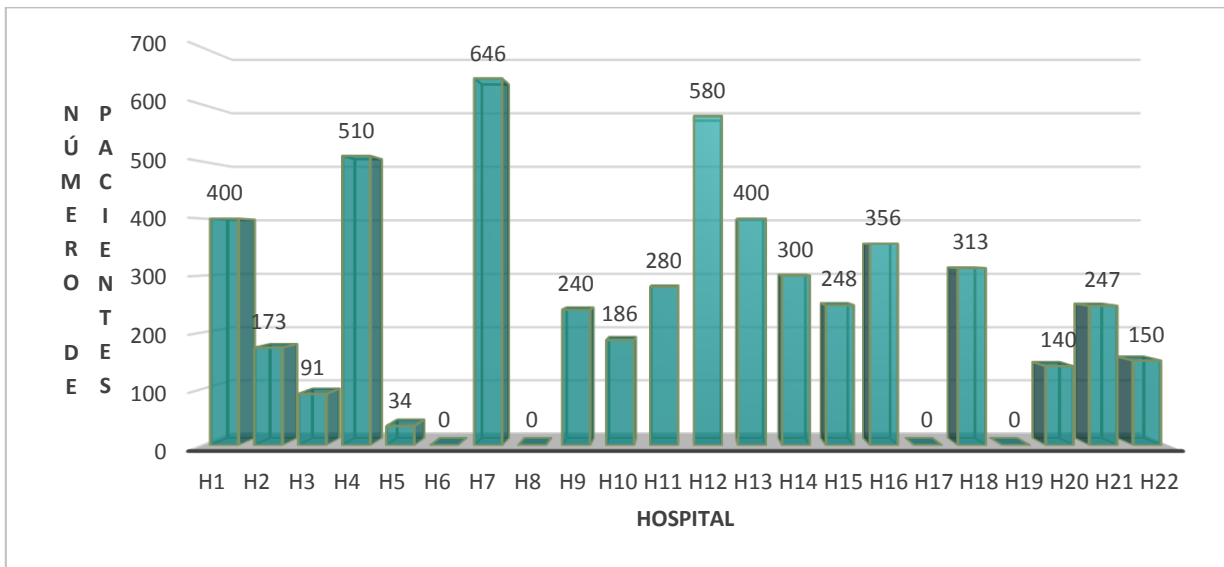


Gráfico 3.4 Aplicación de unidosis al mes en el año 2015.

Fuente: Elaboracion propia.

Los resultados obtenidos en la pregunta arrojan que para el año 2015 el 72.7% de los hospitales atendieron un promedio mensual de pacientes que van de un intervalo de 140 a 646, entre los que destacan: el Instituto Nacional de Cancerología (H7) con 646 pacientes al mes, el Hospital de Especialidades CMN Siglo XXI Bernardo

Sepúlveda Gutiérrez (H12) con 580 pacientes, Hospital de Especialidades Centro Médico Nacional de Occidente(H4) con 510 pacientes, el Centro Médico Nacional 20 de noviembre (H1) y el Hospital de Especialidades CMN Gral. De Div. Manuel Ávila Camacho (H13) con 400 pacientes al mes.

Mientras que el Hospital Infantil de México Federico Gómez e Instituto Nacional de Pediatría (9.09%) en promedio atendieron 91 y 34 pacientes al mes respectivamente, y finalmente el 18.8% restante de los hospitales: Hospital General Regional No. 25 Ignacio Zaragoza, Hospital de Especialidades Dr. Antonio Fraga Mouret, Hospital de Especialidades No. 25 CMN del Noreste y Hospital de Especialidades No. 71 CMN Torreón; precisan no utilizar unidosis en pacientes, sin embargo esta información es contradictoria ya que en un apartado del formato estas cuatro instituciones afirmaron hacer uso de unidosis de radiofármacos en pacientes.

Lo descrito anteriormente, demuestra que la demanda en aplicación de radiofármacos en pacientes es muy alta, de tal modo que el promedio estimado de pacientes proporciona información que puede ser análoga a la cantidad de residuos radiactivos generados por cada institución; esto sin tomar en cuenta la aplicación de un tratamiento a los residuos y que por lo tanto varíe el volumen de generación.

¿Qué tipo de residuos contaminados con radiación se generan durante el proceso de preparación y/o administración de radiofármacos?

Acto seguido, durante el proceso de preparación y/o administración de los radiofármacos en forma de unidosis se generan residuos sólidos radiactivos, debido al contacto directo del material con algún radioisótopo.

La información obtenida al cuestionamiento se detalla en el siguiente gráfico:

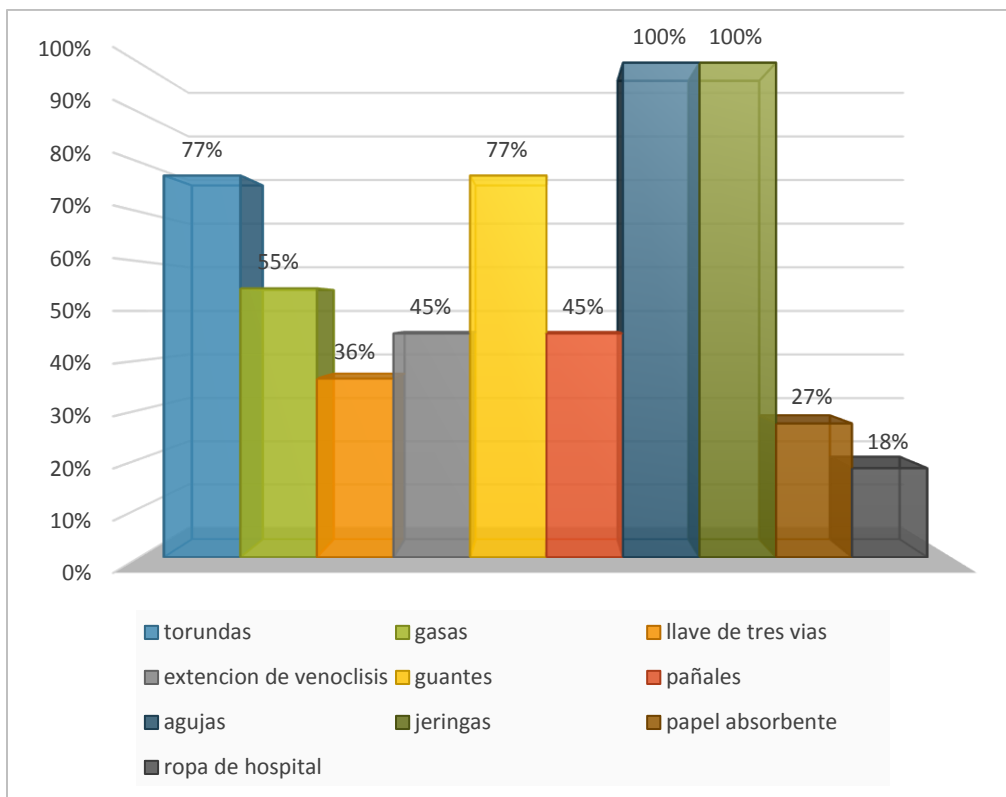


Gráfico 3.5 Material contaminado con radiación.

Fuente: Elaboracion propia.

Los resultados obtenidos demuestran que, los residuos sólidos radiactivos consisten principalmente en desechos biomédicos. Donde el total de las instituciones genera jeringas y agujas, por otro lado, el 77% genera torundas y guantes, mientras que el 55% genera gasas; estas junto con las torundas de algodón se utilizan para la limpieza del área a inyectar y en menor porcentaje se genera papel absorbente y ropa de hospital con 27% y 18% respectivamente.

Los datos obtenidos, permiten identificar las características físicas de los residuos contaminados con radiación y que junto con otros aspectos permitan determinar la adecuada segregación y las características físicas de los contenedores que los confinaran.

Aunado al párrafo anterior, el volumen es una de las consideraciones importantes a tomar en cuenta en la generación de residuos radiactivos, por lo que se planteó el siguiente cuestionamiento; **Promedio mensual del año 2015 de la cantidad (en kg) de residuos radiactivos solidos de vida media corta menor a 1 año, generados por la institución.** A cada institución se le solicitó un promedio mensual

del año 2015 de residuos radiactivos solidos generados, ya que la normatividad permite que estos sean gestionados por el permisionario.

En el **Gráfico 3.6** se observa que las cantidades varían drásticamente de un hospital a otro, tal es el caso del Hospital de Cardiología Centro Médico Nacional Siglo XXI (H16) que produjo 240 kg/mes de materiales contaminados con radiación.

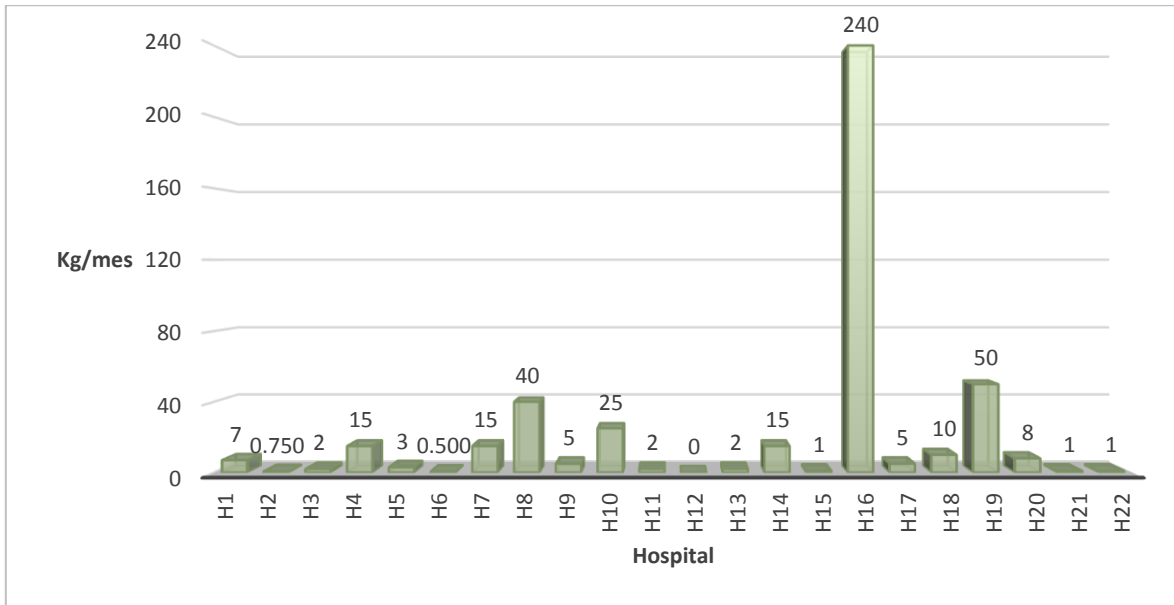


Gráfico 3.6 Cantidad de residuos radiactivos generados al mes en el 2015.

Fuente: Elaboracion propia.

El rango de residuos generados del 31.8% de las instituciones oscila entre los 10kg y 50kg al mes en donde:

- 50kg, Hospital de Especialidades No. 71, Centro Médico Nacional, Torreón (H19).
- 40kg, Hospital de Especialidades Dr. Antonio Fraga Mouret CMN La Raza (H8).
- 25kg, Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (H10).
- 15kg, Hospital de Especialidades Centro Médico Nacional de Occidente (H4) e Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez (H14).
- 10kg, Hospital de Especialidades del Centro Médico Nacional, Ignacio García Téllez (H18).

La información proporcionada respecto a la cantidad de residuos que cada institución genera se considera poco verosímil, ya que durante el proceso de recopilación de información el personal a cargo desconocía el dato justificando que el área de medicina nuclear no se encarga de ese asunto.

Haciendo una relación de resultados entre: número de pacientes atendidos con unidosis y cantidad de residuos generados por la aplicación de unidosis en el año 2015, se obtuvo el **Gráfico 3.7**.

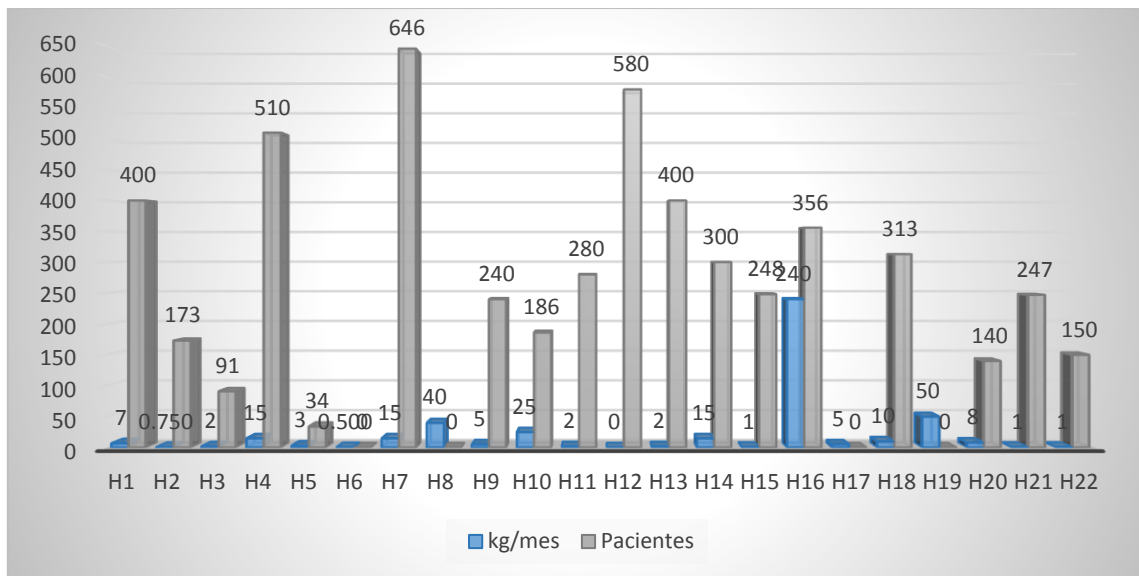


Gráfico 3.7 Unidosis aplicadas y cantidad de material contaminado.

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados muestran una incompatibilidad entre número de pacientes atendidos y la cantidad de residuos que estos generan. Se puede considerar que la cantidad de residuos puede disminuir, ya que los hospitales entregan al proveedor del radiofármaco los remanentes de las jeringas; sin embargo, aun teniendo esta consideración no se muestra relación alguna entre las variables.

Vale la pena decir que, de las variables mencionadas en el párrafo anterior, el Hospital de Cardiología (H16) es el único que muestra compatibilidad en datos.

3.3 COLECCIÓN Y SEGREGACIÓN

Este apartado hace referencia a los resultados obtenidos a partir de las preguntas referentes a las actividades de colección de residuos radiactivos y la segregación. En cada cuestionamiento se describen los datos obtenidos.

¿La institución cuenta con un plan de gestión de residuos radiactivos de vida media menor a 1 año?

Uno de los requerimientos generales establecidos en la NOM-028-NUCL-2009, para aquellas instalaciones donde se usan fuentes abiertas, consiste en “establecer un programa para la gestión de los desechos radiactivos”, la cual garantice: la

minimización en la generación de los residuos radiactivos, una segregación eficiente, la no liberación al ambiente de materiales contaminados con radionúclidos que no cumplan con los criterios reguladores establecidos, entre otros.

Lo anterior debido a que el cumplimiento de cada etapa para la gestión de dichos residuos, son responsabilidad del permisionario del material radiactivo, en este caso es responsabilidad de cada institución médica, supervisado por el encargado de seguridad radiológica.

Bajo este contexto, de las 22 instituciones médicas el 50% menciona que cuenta con un plan de gestión de residuos radiactivos; mientras que el porcentaje restante no tiene un plan de gestión; justificando que no es necesario contar con este, debido a que los proveedores de los radiofármacos se hacen responsables de esta actividad. Es preciso mencionar que los proveedores solo gestionan las jeringas provenientes de la aplicación de unidosis, mas no gestionan el material contaminado con dichos radionúclidos.

Aunado a lo anterior, cabe señalar que a pesar de que el 50% de las instituciones afirman contar con un documento que señala el protocolo a seguir en cada etapa para la gestión de residuos radiactivos; este porcentaje se considera poco verosímil; ya que la respuesta a este cuestionamiento por parte de las instituciones fue “Si se cuenta con un plan de gestión, el cual consiste en dejar decaer los residuos contaminados con radiación 10 vidas medias o hasta que dichos residuos tengan niveles de radiación de fondo, para posteriormente ser contemplados como basura municipal”; para esto hay que recordar que un plan de gestión de residuos es el documento en el cual se establecen los procedimientos para el manejo de los residuos acorde a la normatividad y con la finalidad de prevenir y reducir riesgos para el ambiente y salud pública.

Con base a la situación descrita, se determina que ninguna institución médica tiene claro los procedimientos que debe contener un plan de gestión, de ahí que se desarrollen de manera inadecuada cada una de las etapas consideradas para el manejo de residuos radiactivos.

¿La institución cuenta con un sistema de tratamiento para residuos radiactivos de vida media menor a 1 año?

Respecto a este cuestionamiento, resulta que ninguna de las instituciones médicas realiza algún tratamiento al residuo radiactivo, ya que el tratamiento implica modificar las características físicas y/o químicas del residuo.

De igual manera las instituciones médicas mencionan que dejan decaer la radioactividad del residuo 10 vidas medias en el almacén temporal, para posteriormente ser tratados como residuos biológicos infecciosos o ser dispuestos como basura convencional.

Los contenedores de la institución, destinados para los residuos radiactivos (materiales contaminados como jeringas, vendas, torundas, pañales etc.) cumplen con lo establecido en la NOM-028-NUCL-2009.

Los contenedores para residuos radiactivos deben cumplir ciertas características físicas según lo dispuesto en la NOM-028-NUCL-2009. Con base a esto se obtuvo el **Gráfico 3.8**, donde se observa el grado de cumplimiento de esta disposición por parte de las instituciones médicas.

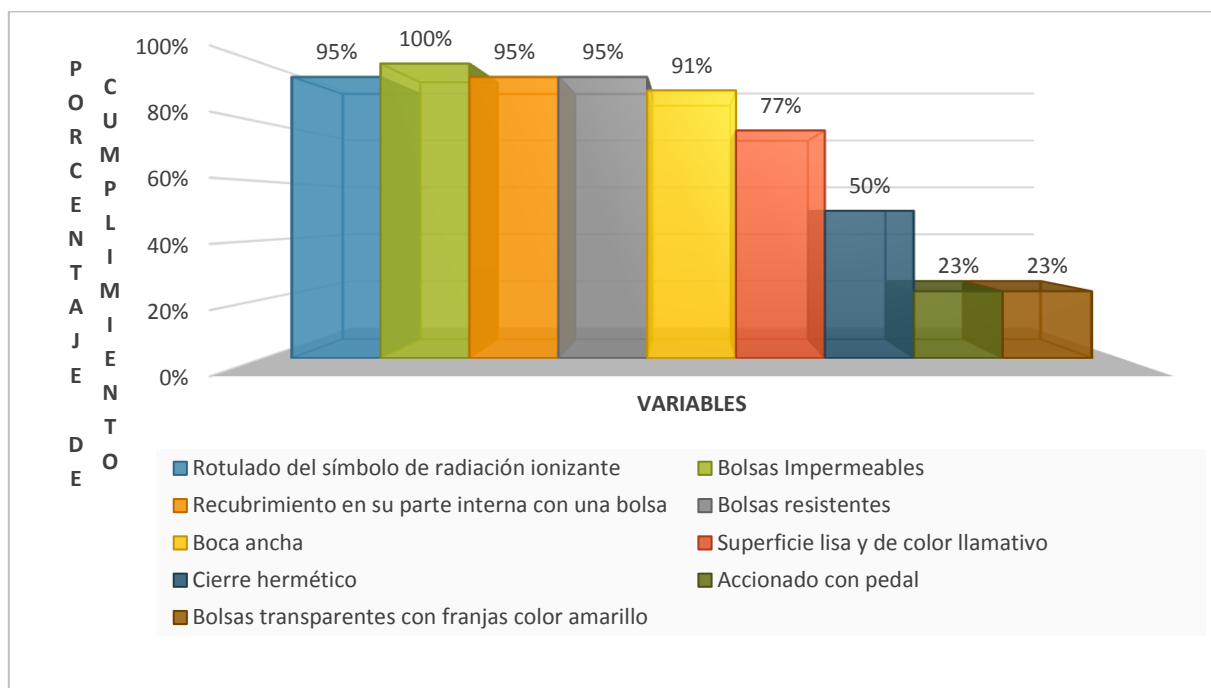


Gráfico 3.8 Características de los contenedores.

Fuente: Elaboración propia.

El 95% de los hospitales identifican sus contenedores con el símbolo de radiación ionizante. Esta disposición es útil durante el proceso de segregación, ya que ayuda a mantener separados los materiales radiactivos de aquellos que no contienen radiación.

Por otro lado, el numeral 6.2.2 dispone que los contenedores deben contar con un sistema de accionado con pedal; esto con el fin de reducir el contacto directo con el material irradiado, así como poner en práctica los factores de protección radiológica: tiempo, distancia y blindaje; sin embargo, solo el 23% de las instituciones cuentan con este tipo de contenedor; mientras el 77% restante al no contar con este tipo de contenedor tiende a aumentar el nivel de exposición y dosis de absorción por parte del POE, de igual manera se considera que el contenedor sea de tamaño adecuado que permita un fácil acceso de los residuos; característica que se cumple en un 91%.

A modo de complemento, los contenedores deben cerrarse herméticamente con el fin de prevenir la exposición no justificada del POE y como sistema de blindaje. A pesar de lo descrito, esta disposición la cumple el 50% de las instituciones médicas.

En el caso de los residuos sólidos punzocortantes, el contenedor debe ser exclusivo para estos, con el fin de que se facilite el manejo y se eviten daños al personal, dicha disposición se cumple al 100% por parte de los centros médicos.

De manera general los resultados descritos demuestran un cumplimiento aceptable referente a las características que deben de tener los contenedores de residuos radiactivos; no obstante, desde el punto de vista de protección radiológica las características más importantes que deben de tener los contenedores son: el cierre hermético y el accionado con pedal; mismas que tienen un porcentaje de cumplimiento muy bajo 50% y 23 % respectivamente.

Una vez que se recolecta y segregan los residuos radiactivos, ¿El encargado del área etiqueta las bolsas antes de su almacenamiento?

El 95% del total de las instituciones respondieron que si se etiquetan los bultos antes de que estos ingresen al almacén temporal.

Esto deja ver que la mayoría de los centros médicos mantienen un control en cuanto a la identificación de los contenedores. En adición a esto, la etiqueta debe de incluir cierta información referente al residuo que se confina en el contenedor, dicha información se detalla en la siguiente pregunta.

¿Las etiquetas utilizadas, contienen la siguiente información del residuo radiactivo?

Al respecto, la NOM-028-NUCL-2009 en el numeral 6.4.1 y el artículo 85 del Reglamento General de Seguridad Radiológica, señalan que todo recipiente y/o contenedor debe de tener un rotulado con la información general del residuo; antes de que ingrese al almacén temporal.

La etiqueta debe de contener la siguiente información:

- Fecha de retiro del área de generación.
- Lugar donde se recolecto.
- Radionúclido.
- Actividad, concentración de actividad o actividad específica.
- Nivel de radiación a contacto y a un metro.
- Composición química/forma física.
- Masa y/o volumen.
- El símbolo de radiación ionizante.
- Fecha final de la etapa de decaimiento.

En el **Gráfico 3.9** se aprecian los resultados obtenidos respecto al cumplimiento de estas características. Cabe mencionar que, el porcentaje que se muestra en el gráfico representa el total de los centros médicos (22) y cuántos de estos cumplen con las características de etiquetado.

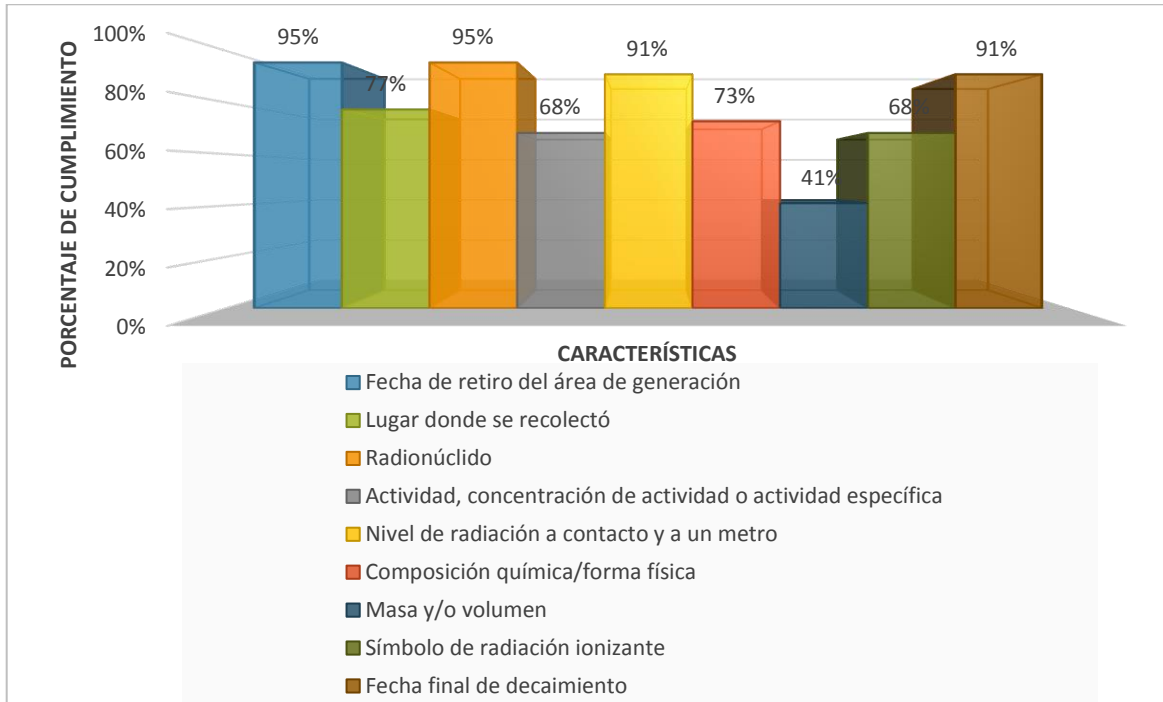


Gráfico 3.9 Información de la etiqueta.

Fuente: Elaboración propia.

De las evidencias anteriores, se observa que solo cinco características de las nueve, tienen un porcentaje de cumplimiento razonable (77%-95%). A este respecto y en torno a la generación, gestión y disposición final de residuos radiactivos las características que se consideran con mayor importancia para el etiquetado son:

- Fecha de generación.
- Tipo de radionúclido.
- Composición química/forma física.
- Masa y/o volumen.
- Fecha final de decaimiento.

Como resultado de las consideraciones señaladas anteriormente se tiene que: 21 hospitales (95%) registran en la etiqueta la fecha en la que se genera el residuo radiactivo, por otro lado, también se considera la fecha final de decaimiento con un valor de cumplimiento del 91%, estos dos aspectos son fundamentales ya que con base a estos se determina el tiempo de almacenamiento del residuo. Algo semejante ocurre con el tipo de radionúclido, donde 21 hospitales (95%) registran

este aspecto, el cual permite mantener homogeneidad de los residuos contaminados con cierto radionúclido; lo cual se va a relacionar con el aspecto de composición química y/o forma física, información que solo 16 de los hospitales (73%) registran en la etiqueta. Por último, se tiene el aspecto de masa y/o volumen, esta información solo la etiquetan 9 hospitales (41%); esto deja ver que la mayoría de los hospitales no pesan los residuos radiactivos que generan y por consiguiente no cuentan con información precisa y verosímil sobre la generación de residuos radiactivos.

¿La institución lleva una bitácora de los residuos radiactivos generados?

El numeral 6.4.7 de la NOM-028-NUCL-2009, establece que se debe mantener un registro de los residuos radiactivos colocados en el almacén temporal de la instalación generadora. Además, esta condicionante se complementa con lo descrito en la NOM-040-NUCL-2016 numeral 8.2., que plantea llevar a cabo el registro de material radiactivo administrado y desechado.

Los resultados respecto a las disposiciones antes mencionadas derivaron en que el 91% de las instituciones realizan el registro de sus residuos antes de que ingresen al almacén (bitácora de control), mientras que dos de estos: Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga y el Hospital de Cardiología CMN Siglo XXI, que representan el 9% no llevan un registro de sus residuos.

Cabe señalar que el fin de tener una bitácora, es mantener control de los residuos, antes de que estos sean exentos de cualquier control regulador en materia nuclear.

A pesar de que la mayoría de los hospitales cuentan con una bitácora de registro, se espera que dicha bitácora contenga como mínimo la información que se detalla en la siguiente pregunta.

¿La bitácora para la recepción de residuos radiactivos sólidos y líquidos, al almacén de la instalación contiene la información señalada en el Apéndice A de la NOM-028-NUCL-2009?

En la NOM-028-NUCL-2009 numeral 6.4.7 menciona que “se debe mantener un registro de los desechos radiactivos colocados en el almacén. Este registro debe contener como mínimo la información señalada en el Apéndice A (Normativo)”:

- Fecha de recepción y firma del responsable del almacén.
- Fecha de generación del residuo.
- Fecha de finalización de la etapa de decaimiento.
- Radionúclido (s) y su actividad en Bq.
- Nivel de radiación a la fecha de recepción en mSv/hr.
- Descripción del desecho radiactivo (especificando su composición química y/o forma física y su masa y/o volumen.

En el **Gráfico 3.10** se presentan los resultados obtenidos, en ellos se puede observar que:

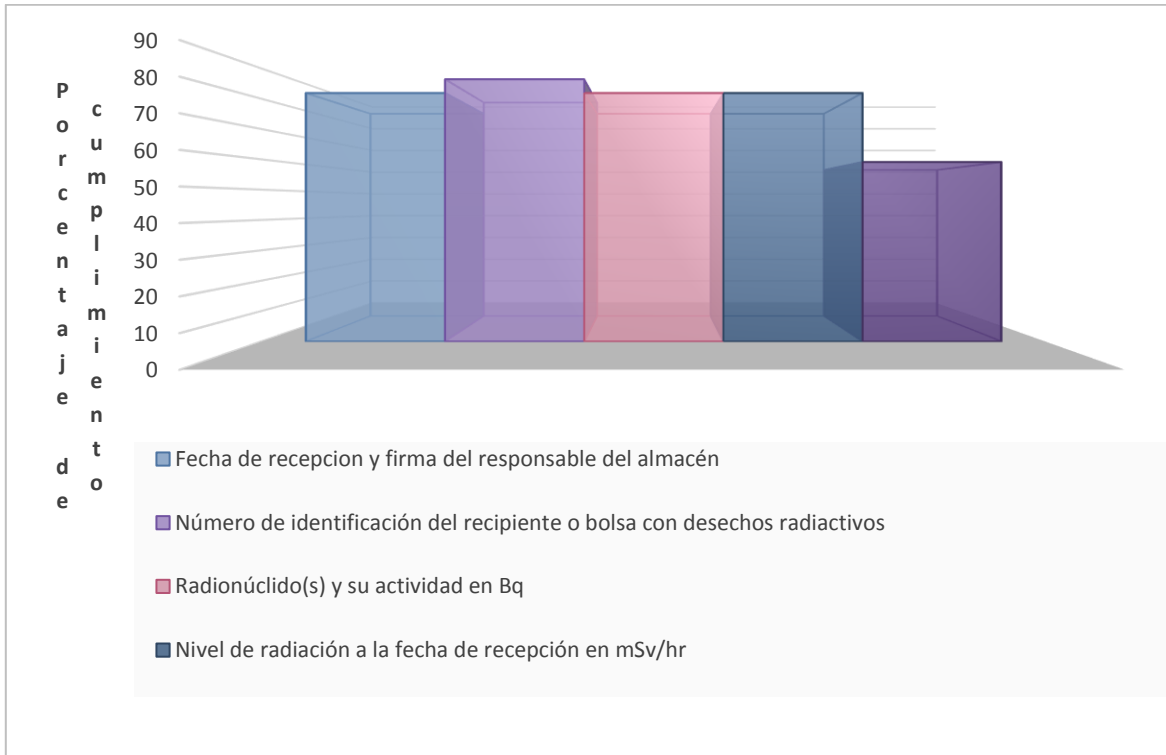


Gráfico 3.10 Registro de bitácora.

Fuente: Elaboración propia.

- 82% de las instituciones registran la fecha de recepción del recipiente o bolsa.
- 86% registra en su bitácora el número de identificación del recipiente o bolsa de residuos.
- El registro del tipo de radionúclido y su actividad solo lo registra 82% de las instituciones.
- De igual manera, 82% de las instituciones anotan el nivel de radiación a contacto y a un metro del recipiente o bolsa, al momento de su recepción en el almacén.
- Finalmente, solo el 59% de las instituciones incluyen en su bitácora una breve descripción de los residuos radiactivos contenidos en el recipiente o bolsa, especificando su composición química y/o forma física y su masa y/o volumen.

Aunado a la situación, cabe mencionar que no se obtuvo respuesta por parte de tres instituciones: Hospital Adolfo López Mateos, Hospital General Manuel Ávila Camacho y Hospital de Cardiología No.34; justificando que la información detallada en el Apéndice A, no aplica para una institución; ya que son acciones que se realizan en almacenes definitivos. En este marco de argumentación legal, la justificación por parte de los hospitales no es válida ya que como se mencionó en un principio estas especificaciones están normadas y se precisa que es información que debe contener la bitácora para un almacén temporal de residuos radiactivos en la instalación generadora.

Los resultados dejan ver que a pesar de que 91% de los hospitales cuentan con una bitácora de control de residuos, la información que se inscribe en dicho documento no tiene un cumplimiento normativo adecuado. Además, desde la perspectiva de generación de residuos un aspecto importante a considerar en la bitácora es la cantidad de residuos radiactivos generados, sin embargo, solo 9 hospitales inscriben esta información en la bitácora.

Asimismo, se determina que la CNSNS no realiza una supervisión efectiva del cumplimiento de las condiciones de licenciamiento y de las normas de manejo de residuos radiactivos.

¿Qué criterios toman en cuenta para segregar los residuos radiactivos?

Los resultados obtenidos a este cuestionamiento, muestran que los centros hospitalarios segregan los residuos radiactivos tomando en cuenta tres aspectos (ver **Gráfico 3.11**): estado físico del residuo, tipo de radionúclido con el que está contaminado el material y la radiación emitida.

Tal como se observa en el **Gráfico 3.11**, el 86% de las instituciones médicas consideran el tipo de radionúclido como el criterio de segregación más importante, seguido por el estado físico con un 68%. Mientras que el 73% segrega los residuos tomando el tipo de radiación emitida.

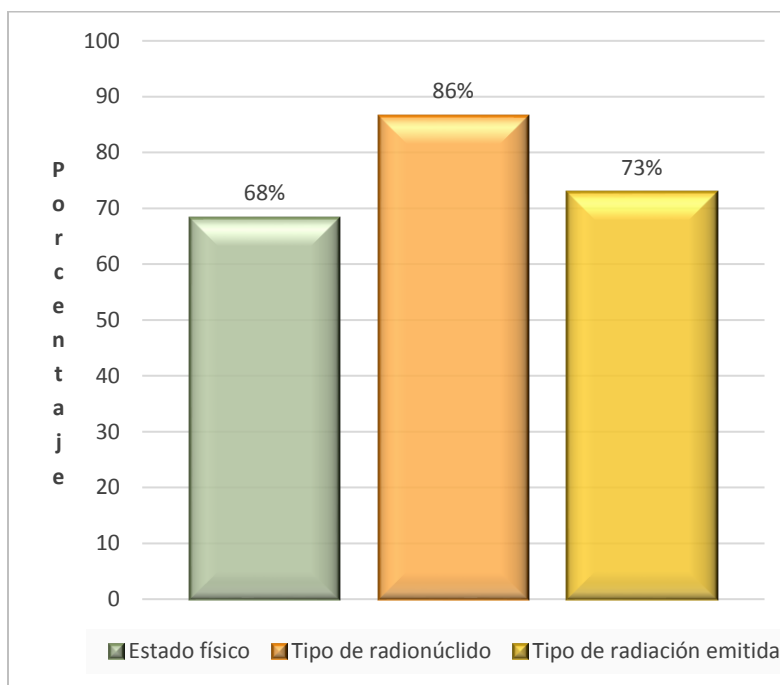


Gráfico 3.11 Segregación.

Fuente: Elaboracion propia.

Ya que la segregación es una de las etapas a considerar en la gestión de residuos, y en base a esta se determinará el tipo de contenedor y el manejo posterior que se le dará al residuo; los resultados obtenidos demuestran que se mantiene una adecuada segregación, tomando en cuenta que las instituciones consideran el radionúclido como principal criterio y que aunado a esto es un de los aspectos determinantes para el almacenamiento temporal.

¿Los residuos radiactivos sólidos punzocortantes, se separan de los no punzocortantes? ¿Se recolectan en recipientes rígidos y resistentes?

El 100% de las instituciones cumplen con esta disposición normada en el numeral 6.2.7 de la NOM-028-NUCL-2009; esto para el manejo de los residuos contaminados con radiación y que por sus características físicas ponen en riesgo la integridad del contenedor y/o del personal; asimismo esta consideración propicia el fácil manejo de dichos residuos.

¿La institución genera residuos radiactivos líquidos de vida media corta, producto de las excretas de los pacientes de radioyodoterapia?

Esta pregunta se formuló teniendo en cuenta que el 86% de las instituciones médicas utilizan ^{131}I . El uso de este radionúclido, genera residuos líquidos biológicos con radiación, debido a la orina de los pacientes tratados con terapia metabólica (^{131}I). Como resultado de las consideraciones señaladas anteriormente, se obtuvo el siguiente gráfico:

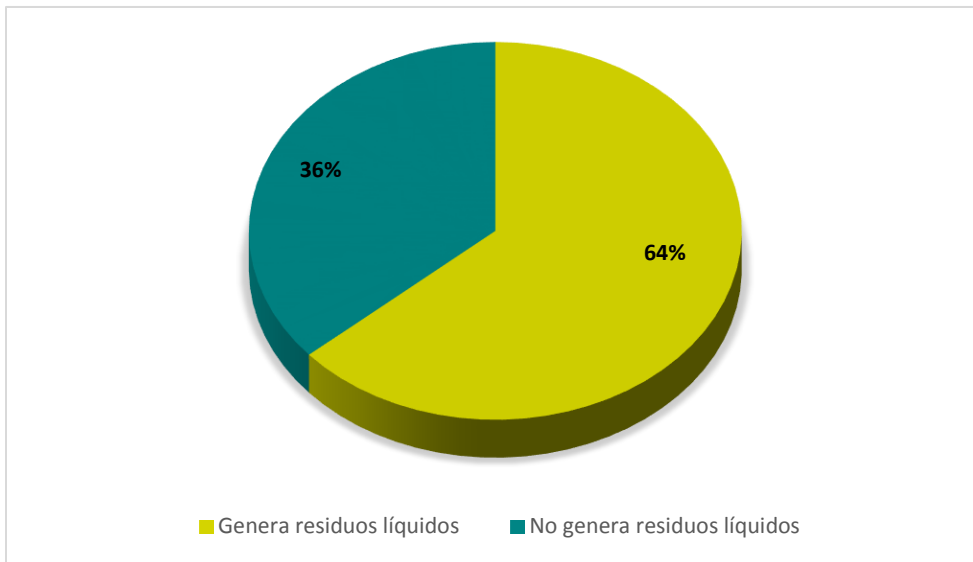


Gráfico 3.12 Porcentaje de hospitales que generan residuos radiactivos líquidos.

Fuente: Elaboración propia.

Donde 64% de las instituciones médicas generan residuos radiactivos líquidos producto de las excretas de pacientes atendidos con ^{131}I , mientras que el 36% restante dice no generar este tipo de residuo, mencionando que en dichas instituciones solo se realizan procedimientos de diagnóstico.

¿La institución cuenta con contenedores especiales para los residuos radiactivos líquidos, producto de las excretas de los pacientes de radiyodoterapia?

De manera análoga se formuló esta pregunta, esperando que los resultados fueran semejantes entre sí. Sin embargo, los resultados obtenidos (ver **Gráfico 3.13**) difieren en sí.

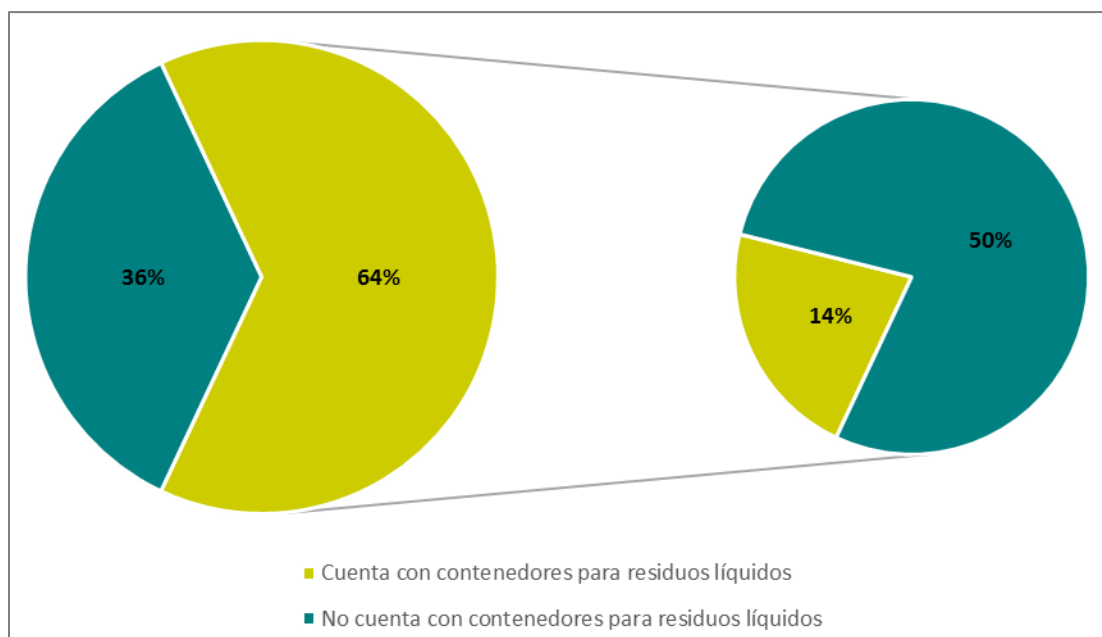


Gráfico 3.13 Porcentaje de hospitales que cuentan con contenedores para residuos líquidos.

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado se puede observar que del 64% de instituciones que afirmaron generan residuos líquidos, solo el 14% cuenta con contenedores para este tipo de residuos; este porcentaje lo integran:

- Instituto Nacional de Cancerología; el cual cuenta con un cárcamo donde realiza monitoreo del drenaje.
- Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, cuenta con dos tanques de decaimiento blindados de aproximadamente 18 m³.
- Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias

En tanto que el 50% de las instituciones no cuentan con este tipo de contenedores; algunos de los argumentos ante la falta de este tipo de contenedores fueron los siguientes:

- Las excretas con residuos radiactivos se eliminan por el drenaje común junto con toda el agua de desecho que se genera en el hospital.
- Existe una trampa en el drenaje, en la cual se almacenan las excretas y se monitorean antes de descargarlas al drenaje general.
- Se usa la técnica de dilución.
- Va al drenaje y se mide mensualmente.

Las evidencias anteriores demuestran el incumplimiento de la normatividad por parte de algunas instituciones médicas, ya que descargan los líquidos sin antes haber determinado la concentración y actividad radiactiva.

3.4 ALMACENAMIENTO Y DECAIMIENTO

A continuación, en este apartado se da a conocer los resultados obtenidos de las preguntas en relación a las actividades operacionales y lineamientos para el almacenamiento temporal de los residuos radiactivos.

¿Dentro de la institución hay un lugar de decaimiento para los residuos sólidos de vida media corta (<1año)?

Esta especificación se dispone en el numeral 6.4 de la NOM-028-NUCL-2009 y en la NOM-040-NUCL-2016 numeral 5.1.3, en la cual se establece como requisito para instalaciones de medicina nuclear, contar con un almacén para los desechos radiactivos y objetos contaminados. Con base a lo anterior los resultados fueron los siguientes:

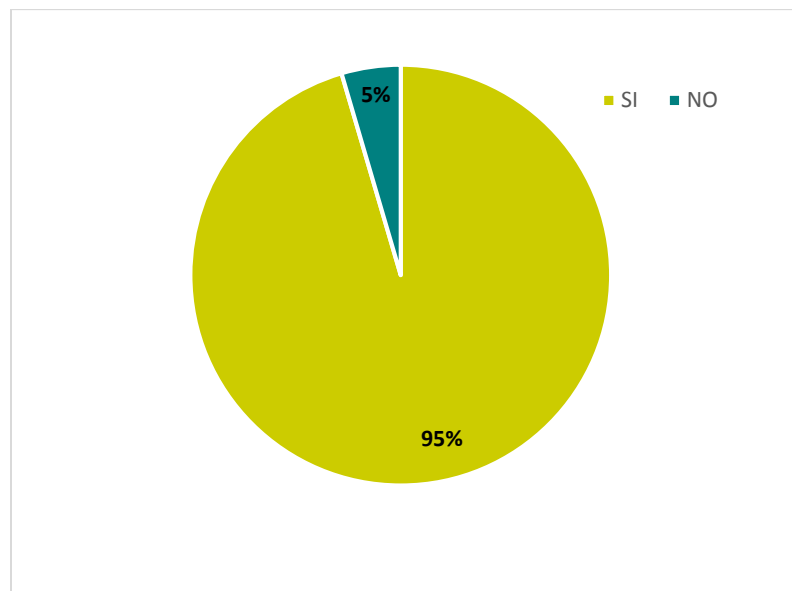


Gráfico 3.14 Porcentaje de hospitales con almacen temporal.

Fuente: Elaboracion propia.

El 95% de los centros médicos cuentan con un almacén temporal; este porcentaje representa un alto grado de cumplimiento en cuanto a requisito de infraestructura.

Mientras que, solo un 5% representado por el Hospital General de México, Dr. Eduardo Liceaga, no cuenta con un sitio almacenamiento temporal.

¿El lugar de decaimiento de los residuos radiactivos cumple con las siguientes características?

Las características del área destinada para almacenamiento temporal de los residuos radiactivos se establecen en la NOM-027-NUCL-1996, NOM-028-NUCL-2009 y NOM-040-NUCL-2016. El cumplimiento de estas por parte de las instituciones médicas se aprecia en el **Gráfico 3.15**.

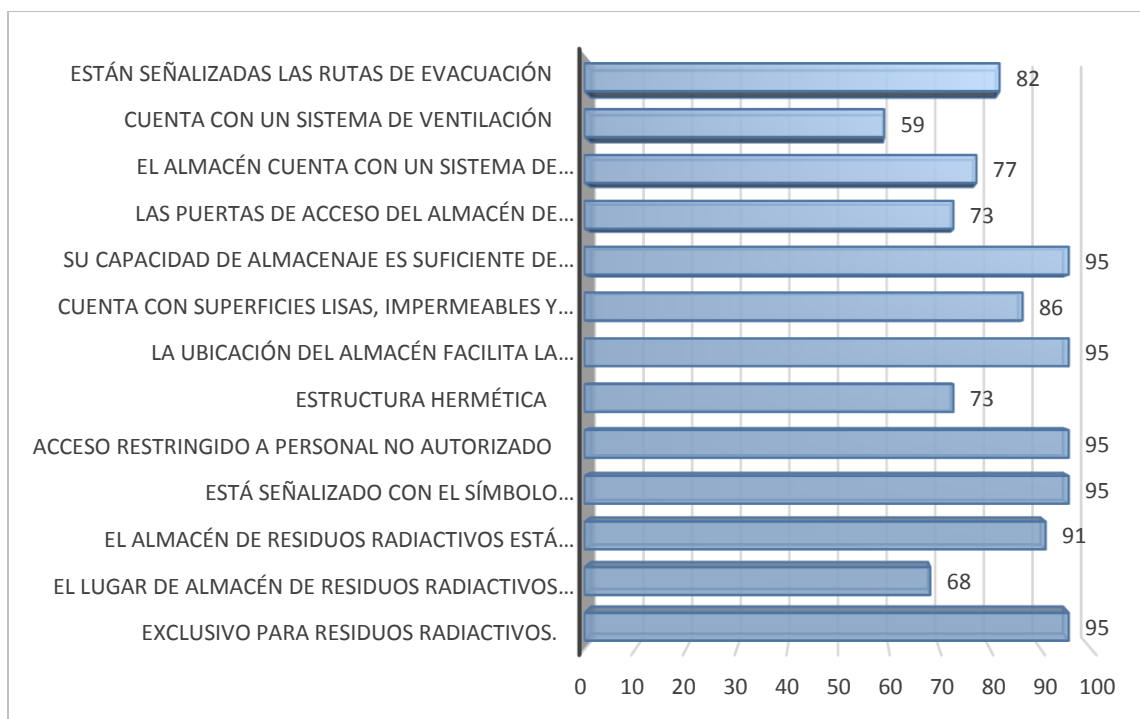


Gráfico 3.15 Características del lugar de decaimiento.

Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia el área destinada para almacenamiento de residuos radiactivos debe de señalizarse con el símbolo internacional que advierte la presencia de radiación ionizante, este aspecto lo cumplen el 95% de los hospitales.

Otra especificación, es que el área debe de ser exclusivamente para este tipo de residuos, acción que se cumple en un 95%. Asimismo, debe de estar aislado de las materias primas y/o materiales no radiactivos; disposición que se cumple en un 91%, aunado a lo anterior, la capacidad de almacenaje debe de ser suficiente de

acuerdo a lo generado por la institución, dicha disposición lo cumple el 95% de los hospitales.

Por otro lado 68% de los hospitales afirmaron que su almacén temporal se ubica en un lugar aislado del personal y de los pacientes, además su ubicación debe de facilitar la transferencia de los residuos del lugar de generación al sitio de decaimiento, de tal forma que se minimice el transporte de material radiactivo dentro de la instalación, el cumplimiento de este requisito es del 95%.

También se debe de tener en cuenta que esta área sea de acceso restringido mientras, el 95% de los hospitales cumplen con esto, de igual manera la estructura del almacén debe de ser hermética, esta disposición garantiza el adecuado almacenamiento y medida de protección, y solo el 73% de los hospitales lo consideran.

Otro requisito particular de esta zona controlada, es que la puerta de acceso debe abrirse desde su interior sin necesidad de llave, 73% de los hospitales cumplen con lo establecido. De igual manera este espacio debe de contar con superficies lisas, impermeables y fácilmente descontaminables, situación que solo el 86% de las instituciones cumplen. Mientras que el 59% de las instituciones afirman que su almacén cuenta con un sistema de ventilación, el 77% afirma que este espacio cuenta con un sistema de monitoreo ambiental para valorar los niveles de radiación existentes

Y por último en esta área de almacenamiento debe de señalizarse las rutas de evacuación, especificación que solo el 82% de las instituciones afirman tener.

De acuerdo a los requerimientos establecidos, se tiene que los porcentajes obtenidos representan un cumplimiento aceptable en cuanto diseño y características de infraestructura de un almacén temporal.

3.5 PROPUESTA DE LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS HOSPITALARIOS

Con base a los resultados recabados para determinar el grado de cumplimiento que tienen los hospitales con base a la normatividad para la gestión de residuos radiactivos, se pudo comprobar la ineffectividad de la gestión de los residuos radiactivos de vida media corta por parte de las instituciones hospitalarias. Esto es causado por la ausencia de un plan de manejo en cada centro de salud; para esto hay que recordar que un plan de gestión de residuos es el documento en el cual se establecen los procedimientos para el manejo de los residuos.

Es por ello y como parte de una aportación de la investigación, que se formuló una propuesta de lineamientos generales para la gestión de residuos radiactivos que tome en cuenta la problemática observada en los hospitales, la normatividad vigente en el país y los estándares y recomendaciones internacionales.

En esta propuesta se detallan las acciones operativas y requerimientos de los elementos a ocupar en cada una de las etapas del proceso de gestión de residuos, con el fin de garantizar y salvaguardar la seguridad del personal ocupacionalmente expuesto, de la población y el ambiente.

3.5.1 Etapas de la gestión de residuos radiactivos en medicina nuclear.

La prevención y la minimización de residuos son aspectos básicos para garantizar la efectividad de un plan de gestión, así como la protección de la salud pública y del medio ambiente (OIEA, 2000).

La gestión de residuos radiactivos comprende seis etapas (pre-tratamiento, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento, transporte y disposición final); mientras que para la gestión de residuos radiactivos con periodos cortos de semidesintegración generalmente se consideran tres etapas: pre-tratamiento, almacenamiento y disposición final, tal como se puede observar en la **Figura 3.1**.

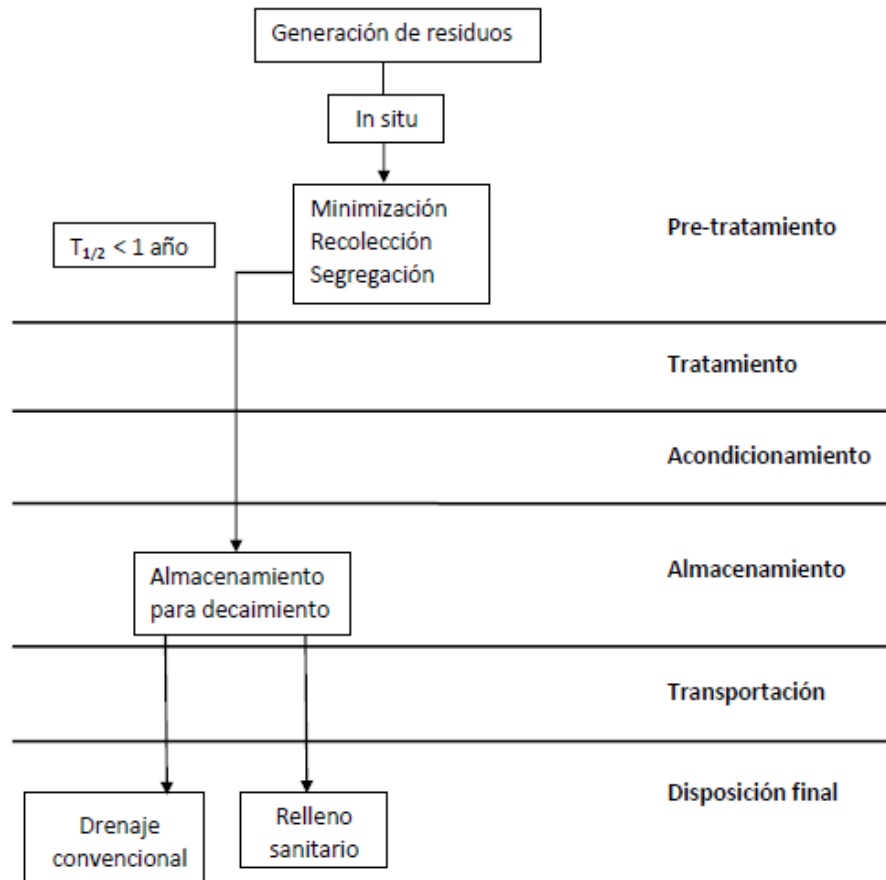


Figura 3.1 Etapas de gestión de residuos radiactivos
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, y con base al esquema se detallan las actividades operativas a realizar para la consecución de las etapas citadas.

3.5.1.1 PRE-TRATAMIENTO

Posterior a la generación de los residuos radiactivos, el pretratamiento es la primera etapa de la gestión que se debe de llevar a cabo. Incluye las actividades de minimización, recolección y segregación, mismas que se describen a continuación.

- **Minimización:**

La minimización de residuos es un aspecto importante a considerar en la gestión. Por lo cual, antes de que se generen residuos, es importante que el personal encargado de la manipulación y administración de material radiactivo planifique los trabajos con material radiactivo y adopte medidas para reducir la cantidad de residuos.

Bajo este contexto el OIEA considera los siguientes principios de minimización:

1. Mantener la generación de desechos radiactivos al mínimo posible, en términos de actividad y de volumen, mediante medidas de diseño adecuadas, prácticas de operación, incluyendo la selección y control de materiales.
2. Minimizar la propagación de la contaminación radiactiva, que conduce a la producción de residuos secundarios.
3. Minimizar la cantidad de residuos radiactivos una vez que se han creado, mediante la optimización del uso de la tecnología de tratamiento disponible.

Además de esto, se recomienda lo siguiente:

- Utilizar la menor cantidad de material radiactivo en el proceso inicial de aplicación.
- Prevenir la contaminación innecesaria de materiales, equipo y superficies en el área, por medio de restricciones de acceso de materiales u objetos ajenos al área controlada.
- Considerar el reusó de materiales previamente descontaminados, tales como el equipo y ropa de protección; siempre y cuando las circunstancias lo permitan.

En este sentido es importante destacar que el control y buena práctica de segregación y recolección son punto clave para mantener en el mínimo la generación de residuos radiactivos.

- **Segregación:**

La segregación es una etapa que junto con la recolección se deben de realizar inmediatamente después de la generación de los residuos, es decir, en el punto de origen y por el personal a cargo.

Los operadores, deben de segregar los residuos radiactivos teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Separar los materiales radiactivos de aquellos que no son radiactivos.
- b) Conocer la cantidad y forma física del residuo.
- c) Período de semidesintegración de los radionúclidos presentes en el residuo.

En medicina nuclear por lo general los residuos radiactivos producto del uso de fuentes abiertas tienen un periodo de semidesintegración corto no superiores a 100 días (apropiados para almacenarlos en espera de que decaigan) por lo cual se considera conveniente segregarlos de acuerdo a su vida media.

A continuación, se muestra una clasificación para segregar los principales radionúclidos de uso medico:

Tabla 3.3 Propuesta de segregación.

Grupo	T^{1/2} (días)	Radionúclidos
I	T ≤ 1	^{99m} Tc
II	1 ≤ T ≤ 5	²⁰¹ Tl, ⁶⁷ Ga, ¹¹¹ In
III	5 ≤ T ≤ 100	¹³¹ I

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior con el fin de facilitar la clasificación, optimizar el tiempo de almacenamiento de los residuos y mantener un control de estos; antes de que sean excentos. Cabe recalcar que en la **Tabla 3.3** se considera la vida media de los radionúclidos para ser segregados, aunado a esto en la etapa de almacenamiento, se debe de dejar decaer 10 vidas medias.

Como se mencionó, el principal factor para la segregación es el periodo de semidesintegración, sin embargo, también se debe de contemplar la forma física del residuo, con el fin de disponerlos en un contenedor adecuado. A continuación, en el siguiente apartado se describe las características que deben de tener los contenedores.

- **Recolección:**

El personal encargado de esta operación, debe de realizar de forma paralela tanto la recolección como la segregación de los residuos. De esta manera se optimiza el tiempo de exposición y los recursos empleados en la gestión de los residuos.

Bajo este contexto, también se debe considerar el tipo de contenedores que deben utilizarse, ya que estos deben ser físicamente compatibles con el residuo y de resistencia mecánica adecuada, con el fin de asegurar la contención del material y evitar la dispersión del material radiactivo.

En un contenedor se puede disponer residuos sólidos con vidas medias similares, considerando la clasificación expuesta en la **Tabla 3.3** para facilitar su gestión por decaimiento.

A continuación, y con base a la NOM-028-NUCL-2009 referente a las características de los contenedores y recomendaciones de el OIEA, en la **Figura 3.2 y 3.3** se visualiza la propuesta para la recolección.

Recipiente	Símbolo etiqueta	Tipo de residuo
	 Rotular con: RADIOACTIVO	Sólidos heterogéneos 
		Punzocortantes 

Figura 3.2 Propuesta de recolección
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.3 Propuesta de segregación
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se aprecia en la **Figura 3.3** se deben disponer contenedores especificando el radionúclido, con el fin de ir segregando de acuerdo a la vida media. En la figura también se aprecia el diseño del contenedor, el cual cuenta con un accionado de pedal para evitar contacto con el material y que facilita la disposición del residuo. Asimismo, el contenedor debe permitir un cerrado hermético, cuando no esté en uso, con la finalidad de evitar la dispersión del material radiactivo.

Aunado a lo anterior, el contenedor para residuos sólidos debe de estar recubierto por una bolsa plástica, la cual funge como embalaje para el posterior almacenamiento. Cabe señalar que la bolsa de recolección no debe de llenarse más del 80% de su capacidad.




Una vez alcanzado el nivel máximo de volumen en los contenedores; cada bolsa plástica o recipiente con residuos debe cerrarse y señalizarse por medio de una etiqueta adhesiva, con el fin de disponer la información para poder realizar el almacenamiento y realizar la evacuación de los residuos. El usuario tiene que registrar en la etiqueta la información sobre la naturaleza de los residuos tan pronto como estos empiecen a acumularse. Cada etiqueta debe constatar la siguiente información con base a la NOM-028-NUCL-2009:

- Fecha de retiro del área de generación.
- Lugar donde se recolectó.
- Radionúclido.
- Actividad, concentración de actividad o actividad específica.
- Composición química/forma física.

- Masa y/o volumen.
- El símbolo de radiación ionizante.
- Fecha final de la etapa de decaimiento.

A continuación, se ejemplifica la propuesta de formato de la etiqueta:

Tabla 3.4 Propuesta de etiquetado.

Fecha de generación	Día:	Mes:	Año:
Fecha final de decaimiento:	Día:	Mes:	Año:
Área de generación:			
Nombre del responsable:			
	Radionúclido	Tipo de residuo	
		Sólidos heterogéneos <input type="checkbox"/>	Punzocortantes <input type="checkbox"/>
Actividad:			
Cantidad en peso kg:			

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.2 ALMACENAMIENTO

En el caso de los residuos con periodos de semidesintegración corto, el almacenamiento es de manera temporal para que decaiga la radiactividad antes de que sean exentos del control reglamentario.

Antes de que los contenedores ingresen al almacén, se debe de llevar un control a través de una bitácora con el fin de mantener la trazabilidad del material durante su recepción y disposición final, además de evitar la acumulación innecesaria de residuos en el área. A continuación, se muestra la propuesta de formato de la bitácora e información requerida, de acuerdo a la NOM-028-NUCL-2009.

En este sentido, el diseño e infraestructura del lugar de almacenamiento son aspectos fundamentales para garantizar la disposición segura de los residuos. Los requisitos del área de almacenamiento tienen que cumplirse y ser apropiados de acuerdo a la cantidad de residuos que genera una instalación. Derivado de lo anterior, el OIEA propone que el almacenamiento puede variar desde un armario blindado hasta un área en específico. Sin embargo, sobre la base de las ideas expuestas y con base al diagnóstico se considera que lo más conveniente es contar con un área exclusiva para almacenamiento de residuos dentro de la instalación generadora, con el fin de mantener el espacio necesario para almacenar de manera ordenada los contenedores, garantizar la integridad de los mismos y la posibilidad de retirarlos sin ningún inconveniente.

A continuación, en la **Figura 3.4 y Figura 3.5** se representa la propuesta de diseño de almacén tomando en cuenta lo dispuesto en la normatividad.

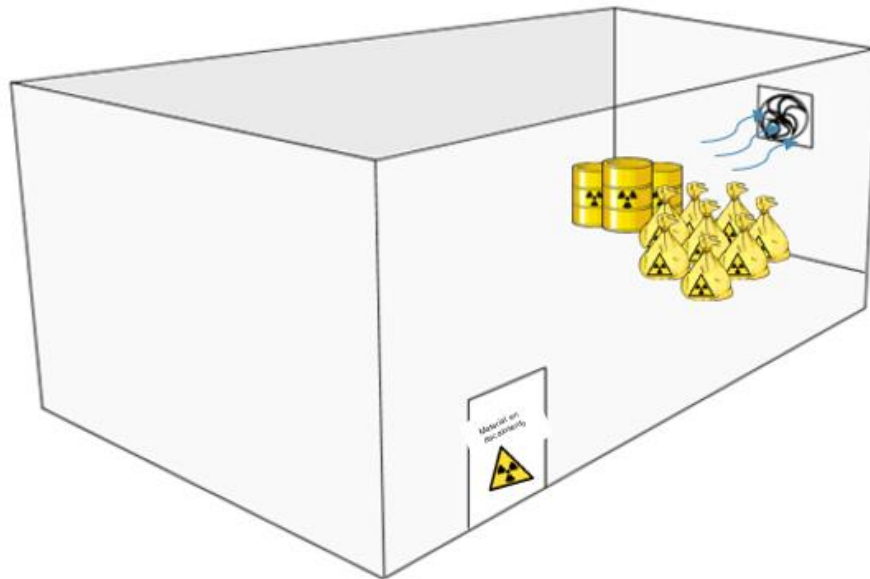


Figura 3.4 Propuesta diseño de almacén
Fuente: Elaboración propia.

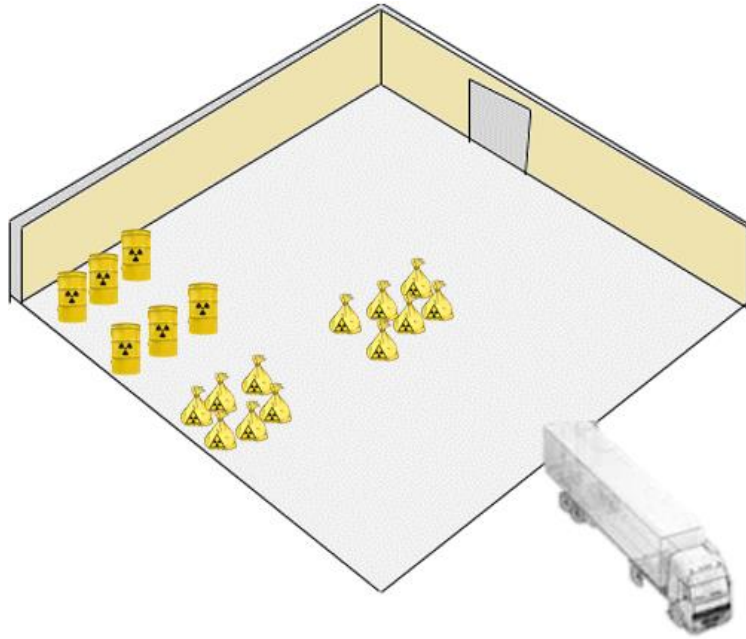


Figura 3.5 Propuesta de diseño de almacén
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, en la **figura 3.5** se considera una puerta trasera o de salida para facilitar el traslado y disposición como residuos convencionales; siempre y cuando se verifique que el residuo cumplió con su periodo de decaimiento y que no presentan riesgo químico y/o biológico adicional.

3.5.1.3 DISPOSICIÓN FINAL

La disposición final es el fin último de los residuos gestionados. Una vez que los residuos han cumplido con el periodo de almacenamiento y han alcanzado los niveles de dispensa aprobados por el órgano regulador, serán evacuados como basura convencional, siempre y cuando no presenten otras características que requieran de tratamientos adicionales.

CONCLUSIONES

La presente investigación cumplió con los objetivos establecidos al inicio; se destaca que:

- En México hay 52 hospitales de índole público y social que cuentan con el servicio de medicina nuclear.
- Solo 22 hospitales son considerados como los principales generadores de residuos radiactivos. Estos hospitales aplican en promedio más de 200 unidosis (equivalente a 200 pacientes) al mes.
- Los radionúclidos más utilizados con fines de diagnóstico y/o tratamiento son el: ^{99m}Tc , ^{131}I y ^{201}Tl .
- A la fecha se tiene registro de 229 licencias de operación que amparan el uso de fuentes radiactivas abiertas con fines médicos, sin embargo, este dato esta en constante cambio, aumentando conforme a la demanda.
- Como consecuencia de la alta demanda de material radiactivo para fines médicos, la cantidad de residuos generados se ha incrementado. Esto a su vez ha aumentado el riesgo del personal ocupacionalmente expuesto, de los pacientes y público en general.
- A pesar de que la actividad de los residuos radiactivos hospitalarios es baja, comparados con los residuos generados en el ciclo de combustible nuclear, se les debe gestionar adecuadamente para disminuir los riesgos radiológicos a la población y el ambiente.
- La evidencia obtenida dejó ver que el personal del área de medicina nuclear no cuenta con el conocimiento u hacen omisión de lo dispuesto en la normatividad, respecto elaborar y aplicar un programa para la gestión de residuos radiactivos, el cual especifique las actividades administrativas y operativas que deben llevar a cabo.
- La ausencia de un plan de gestión es la causa principal de la ineficiencia en el manejo de residuos radiactivos e incumplimiento de la normatividad.
- El 59% de los hospitales no lleva un registro y control de la cantidad de residuos generados por la aplicación de unidosis. Por lo tanto, se puede establecer que la cantidad de residuos radiactivos que genera, se considera

poco verosímil debido a que en algunos casos el personal a cargo desconoce esta información.

- A pesar de que la mayoría de los hospitales cumplen con la mayor parte de las disposiciones normadas para la gestión de residuos radiactivos, persisten deficiencias y/o omisión de los requerimientos operacionales de cada etapa de la gestión (minimización, recolección, segregación y almacenamiento temporal).
- De manera general, los resultados del diagnóstico demuestran un cumplimiento parcial referente a las características que deben de tener los insumos empleados en cada etapa de la gestión. No obstante, persisten deficiencias en aspectos como:
 - Cierre hermético y el accionado de pedal de los contenedores.
 - Pesaje de los residuos generados.
 - Sistema de ventilación en el almacén temporal.
- Existe una escasa supervisión por parte del encargado de seguridad radiológica sobre el cumplimiento de las normas y condiciones de licenciamiento del manejo de residuos radiactivos.
- La gestión de residuos radiactivos se ha sobrellevado a través de políticas parciales, a causa de la ausencia de una política nacional que fundamente la creación de una entidad o empresa que gestione los residuos radiactivos.

REFERENCIAS

Acosta, J.M., Cañete, S.H., 2005. *Manual de radioprotección*. [pdf] Universidad de Málaga. Disponible en: http://www.scai.uma.es/servicios/area_radioisotopos/rad/files/stacks_image_D6E8_AF8F-6EA3-4F81-8434-B86ABEDB7BB3_168_1.pdf [Fecha de acceso: 12 de abril de 2016].

Abdel, R. R., 2012. *Radioactive Waste*. Croatia: InTech.

Álvarez, F., n.d. *La generación de residuos radiactivos*. [en línea] [pdf]. Disponible en: http://62.43.237.121/nuclear_resrad.pdf Fecha de acceso: 6 de mayo de 2016].

Álvarez, M.A., Moreno, P.L., 2010. *Plan de gestión integral de residuos hospitalarios y similares componente interno para una institución prestadora de servicios de salud de primer nivel*. Tesis de Licenciatura, Universidad Industrial de Santander.

Álvarez, Rico Y., 2010. *Caracterización de desechos contaminados con material radiactivo en medicina nuclear*. Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional.

Azorín, N.J., 1992. *Protección radiológica III, efectos biológicos*. Cuadernos del ININ, serie divulgación técnico-científica.

Baas, M.G., 2013. *Evaluación del manejo de los Residuos Peligrosos Biológico Infeccioso (RPBI) generados en cuatro áreas del hospital Materno Perinatal "Mónica Pretelini"*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Bailey, O. M., 2004. *Marie Curie: A biography*. [Libro electrónico] Greenwood Press. Disponible en: <http://www.librosmaravillosos.com/mariecurie/pdf/Biografia%20de%20Marie%20Curie%20-%20Marilyn%20Bailey%20Ogilvie.pdf> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016]. (capítulo 5 p.53)

Balek, Vladimír., 1994. *Gestión de desechos radiactivos: Panorama de la gestión de desechos en los países de Europa Central y Oriental*. OIEA, Viena.

Bosch, P. et al., 1994. *Pioneros de las ciencias nucleares*. [Libro electrónico] México: Fondo de Cultura Económica. Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/120/htm/sec_4.htm [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016].

Bulbulian, S., 1991. *La radiactividad*. Fondo de cultura económica de España.

Burcham, W. E., 2003. *Física nuclear*. [Libro electrónico] España: Reverté. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=UCCqhTGyxJQC&pg=PA18&dq=radiactivi>

[dad&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=radiactividad&f=false](#) [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016]. (p.21)

Buzzi, A., n.d. *El descubrimiento de los Rayos X*. [pdf] Disponible en: http://www.sar.org.ar/web/docs/dayrad/hisotria_radiologia.pdf [Fecha de acceso: 4 de marzo de 2016].

Cane, B., Sellwood, J., 1978. *Elementos y compuestos*. [Libro electrónico] Reverte. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=4NjQtw8BAoC&printsec=frontcover&dq=Elementos+y+compuestos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjBhozMupTMAhVDv4MKHURoCRAQ6AEIGjAA#v=onepage&q=Elementos%20y%20compuestos&f=false> [Fecha de acceso: 12 de abril de 2016].

Chain, Y., Illanes, L., 2015. *Radiofármacos en medicina nuclear. Fundamentos y aplicación clínica*.

Challoner, J., 2013. *La historia de la ciencia: un relato ilustrado*. [Libro electrónico] Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=gMcDCwAAQBAJ&pg=PA60&dq=thomson+descubre+el+electron&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwirwYPWhunLAhWCmIMKHbszCFkQ6AEIGjAA#v=onepage&q=thomson%20descubre%20el%20electron&f=false> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016].

Contreras, R.A., 2003. *Usos pacíficos de la energía nuclear I*. [pdf] [En línea] Disponible en: http://www.quimicanuclear.org/pdf_memorias2003/taller/ContretrasRamirez.pdf [Fecha de acceso: 3 de mayo de 2016].

Cork, J.M., 1950. *Radioactivity and Nuclear Physics*. 2nd ed. New York: D. van Nostrand.

Cortés, A., Gómez, J., 2003. *Radiofármacos de uso humano: marco legal e indicaciones clínicas autorizadas en España*. [pdf].

CSN., 2010. *Radiación y protección radiológica*. Consejo de Seguridad Nuclear. España.

Díaz Balart, C.F., 1991. *Energía nuclear y desarrollo: realidades y desafíos en los umbrales del siglo XXI*. [Libro electrónico] Argentina: Colihue. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=cZq3AjlLJkC&pg=PA85&dq=la+energia+nuclear+y+la+bomba+atomica&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiirtvJmuzLAhUGgYMKHV05AhsQ6AEIKTAD#v=onepage&q=la%20energia%20nuclear%20y%20la%20bomba%20atomica&f=false> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016]. (p.64)

Energía Nuclear, 2014. [imagen en línea] *La bomba atómica. Proyecto Manhattan*. Disponible en: <http://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/historia> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016].

ENRESA., n.d., *Protección radiológica*. Ministerio de energía turismo y agenda digital. España.

Esteban, S. S., 2010. *La Historia Del Sistema Periódico*. [Libro electrónico] UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=4A9QWL7M_nlC&pg=PA158&lpg=PA158&dq=henri+becquerel+radiacion+historia&source=bl&ots=EMDAZR1ZNY&sig=LpZC6sbMFXZxnsFcee-YDEASITE&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiemf2ctOfLAhUBxSYKHTa6A9U4FBDoAQgIMAI#v=onepage&q=henri%20becquerel%20radiacion%20historia&f=false [Fecha de acceso: 16 de marzo de 2016].

Flores, C., 2008. Laguna Verde dentro del entorno mundial del uso de la energía nuclear. *Contacto Nuclear*, [en línea] Disponible en: <http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/52%20LAGUNA%20VERDE%20DENTRO.pdf> [Fecha de acceso: 4 de marzo de 2016].

Foro Nuclear, 2009. La gestión de los residuos radiactivos en España.

Ganatra, R., Nofal, M., 1986. *Promoción de la medicina nuclear en los países en desarrollo*. [pdf] OIEA. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/28205880410_es.pdf [Fecha de acceso: 28 de abril de 2016].

González, S.G. & Rabin, L.C., 2011. *Para entender las radiaciones, energía nuclear, medicina, industria*. Uruguay: DIRAC.

Guerrero, R., Berlanga, M., 2000. *Isótopos estables: Fundamento y aplicaciones*, [En línea]. Actualidad de la Sociedad Española de Microbiología. Disponible en: http://semicrobiologia.org/pdf/actualidad/SEM30_17.pdf [Fecha de acceso: 12 de abril de 2016].

Hernández, M., 2005. *Gestión de desechos radiactivos en México*.

Hernández, S.R., 2010. *Metodología de la investigación*. 5th ed. México: Mc Graw Hill.

Ibarra, M.E., 2012. *Disposición segura de residuos radiactivos de alto nivel en Laguna Verde, Veracruz*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

ICRP, 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publicación 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 2000. *Origen y gestión de residuos radiactivos*. 3er.ed.

Jawerth, N., 2014. Radiation and Radionuclides in Medicine A Brief Overview of Nuclear Medicine and Radiotherapy. *Radiation Medicine and Technology: Diagnoses and Treatments*, OIEA, Bulletin 55-4.

L'Annunziata, F. Michael., 2007. *Radioactivity Introduction and History*. [Libro electrónico] Ámsterdam: Elsevier. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=YpEiPPFINAAC&pg=PA52&dq=marie+curie+and+pierre+curie+discovered+radioactivity&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiD87qn8-jLAhVss4MKHdPwAJAQ6AEIQTAF#v=onepage&q=marie%20curie%20and%20pierre%20curie%20discovered%20radioactivity&f=false> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016].

Lapiente, A.R., n.d. [imagen en línea] *Teorías Atómico Moleculares*. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8824/6/Tema%203.-%20Teorias%20Atomico-Moleculares.pdf> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016]

LaGrega, Michael. D., 1996. *Gestión de residuos tóxicos: tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. McGraw-Hill: Madrid.

Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares., Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 1974.

Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear., Diario Oficial de la Federación, 4 de noviembre de 1985, y su reforma publicada en el D.O.F. el 9 de abril de 2012.

López, A.E. Prado, R.D., Sastre, M.A., 1999. *Manhattan project: "El papel de los científicos en el desarrollo de la bomba atómica"*. [pdf] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9730/Article019.pdf> [Fecha de acceso: 24 de marzo de 2016].

Marín, G. et al., 2004. *Consultor Estudiantil Alfamatemático*. Buenos Aires.

Martínez de Andrés Alejandro, 2014. *¡Un resultado inesperado! El descubrimiento de los rayos X por W.C. Röntgen en 1895*. [imagen en línea] Disponible en: <http://museovirtual.csic.es/csic75/laboratorios/lab3/lab3.html> [Fecha de acceso: 4 de marzo de 2016].

Martínez, A.E., Díaz, Y., 2004. *Contaminación atmosférica*. [Libro electrónico] España: Universidad de Catilla-La Mancha. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=sLE8xbtcK-gC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false [Fecha de acceso: 22 de abril de 2016].

Maubert, F.R., Martínez, G. Sylvia., 2012. *Modelos atómicos*. en: http://portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad2/modelos_atomicos/modelo_bohr [Fecha de acceso: 12 de abril de 2016].

Moustafa, A., 1999. *Environmental Radioactive Pollution Sources and Effects on Man*. En: Atomic Energy Authority, 1999. *Proceedings of the international conference on hazardous waste sources, effects and management*. Cap.5.

MSSSI., 1996. *Medicina nuclear*. Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad [pdf] Consejo Nacional de especialidades médicas: España. Disponible en: http://www.msssi.gob.es/profesionales/formacion/docs/Medicina_Nuclear.pdf [Fecha de acceso: 28de abril de 2016].

Norma Oficial Mexicana NOM-004-NUCL-2013, Clasificación de los desechos radiactivos, Diario Oficial de la Federación, 7 de mayo de 2013.

Norma Oficial Mexicana NOM-028-NUCL-2009, Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas., Diario Oficial de la Federación, 4 de agosto de 2009.

Norma Oficial Mexicana NOM-035-NUCL-2013, Criterios para la dispensa de residuos con material radiactivo., Diario Oficial de la Federación, 7 de mayo de 2003.

Norma Oficial Mexicana NOM-039-NUCL-2011, Especificaciones para la exención de prácticas y fuentes adscritas a alguna práctica, que utilizan fuentes de radiación ionizante, de alguna o de todas las condiciones reguladoras., Diario Oficial de la Federación, 26 de octubre de 2011.

NORMA Oficial Mexicana NOM-040-NUCL-2016, Requisitos de seguridad radiológica para la práctica de medicina nuclear., Diario Oficial de la Federación, 4 de agosto de 2016

Norma para la gestión ambiental de desechos radiactivos, 2003. [en línea] [pdf]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.do/transparencia/wp-content/uploads/2015/06/Norma-para-la-gestion-ambiental-de-desechos-radiactivos.pdf> [Fecha de acceso: 6 de mayo de 2016].

NRC., 2014. *Radiation Basics*. [En línea]. Disponible en: <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/radiation-basics.html#alpha> [Fecha de acceso: 21 de abril de 2016].

Núñez, M. Luis, 2016. *Elementos de radiofísica para técnicos superiores en radioterapia y dosimetría*. [Libro electrónico] España: ELSEVIER. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=0xvYCwAAQBAJ&pg=PT15&dq=desintegracion+b%2B&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj087jH-6fMAhVCvYMKHVMiDJEQ6AEIGjAA#v=onepage&q=desintegracion%20b%2B&f=false> [Fecha de acceso: 22 de abril de 2016].

OECD., 2000. *Geologic Disposal of Radioactive Waste in Perspective*. OECD: Paris.

OIEA., 1998. *Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research*. OIEA-TECDOC-1000. Viena.

OIEA., 2007. *Aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispensa*. Colección de Normas de Seguridad del OIEA No. RS-G-1.7. OIEA: Viena.

OIEA., 2009. *Classification of Radioactive Waste*. General Safety Guide No.WS-G-2.7. OIEA, Viena.

OIEA, 2009. *Gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación*. Colección de Normas de Seguridad del OIEA No. WS-G-2.7. OIEA: Viena.

OIEA., 2014. *Siete cosas que hay que saber sobre los radioisótopos*. [en línea] [pdf]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/55405810809_es.pdf [Fecha de acceso: 12 agosto de 2016].

OIEA, n.d. *Aplicaciones industriales de los radioisótopos*. [pdf] [En línea] Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/06305002630_es.pdf [Fecha de acceso: 3 de mayo de 2016].

OIEA.,1997. *Acontecimientos históricos*.

OIEA., 1987. *Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Waste*. Technical Reports Series No. 272. OIEA, Viena.

OIEA., 2000. *Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine*. TECDOC-1183. OIEA, Viena.

OIEA., 2001. *Handling and Processing of Radiactive Waste from Nuclear Applications*. Technical Reports Series No. 402. OIEA, Viena.

OIEA., 2003. *Radioactive waste management glossary*. OIEA, Viena.

OIEA., 2011. *Radiactive waste management objectives*. Nuclear energy series No. NW-0. OIEA, Viena.

OIEA., 2009. *Gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación*. Guía de seguridad No.WS-G-2.7. OIEA, Viena.

OMS., 1976. *Medicina nuclear*. Serie de informes técnicos N°591.

Osores, J.M. 2008. *Environmental radioactive pollution in neotropic*. [pdf] Disponible en: http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/biologist/v06_n2/pdf/a08v6n2.pdf [Fecha de acceso: 10 de abril de 2016].

Picado, A. Beatriz & Alvarez, Milton. 2008. *Química I. Introducción al estudio de la materia*. [Libro electrónico] Costa rica: EUNED. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=mjvKG4BJ0xwC&pg=PA107&dq=Modelo+at%C3%B3mico+de+Dalton&hl=es&ei=D87WTJHpOemW4qbawoGRBw&sa=X&oi=boo>

[k_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDgQ6AEwAg#v=onepage&q=Modelo%20at%C3%B3mico%20de%20Dalton&f=false](#) [Fecha de acceso: 10 de abril de 2016].

Preciado, R.M., Luna, C.V., 2010. *Medidas básicas de protección radiológica. Cancerología*, pp. 25-30.

PREUSM, n.d. [imagen en línea]. *Partículas elementales y modelos atómicos*. Disponible en: http://www.preusm.cl/documentos/documentos/cursos/quimica/quimica_profundizacion/public/GE%201%20Particulas%20Elementales%20y%20Modelos%20Atomicos.pdf [Fecha de acceso: 10 de abril de 2016].

Qafmolla, L., 2000. Conditioning of low level radioactive waste, spent radiation sources and their transport at the interim storage building of Institute of Nuclear Physics in Albania. "International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management. Córdoba, Spain, Contributed Papers." IAEA, Vienna.

Real, G. A., 2014. *Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes*. [pdf] Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <http://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-19202/Efectos%20de%20las%20RI%20UCM%2027%20nov%202014%20A%20Real.pdf> [Fecha de acceso: 25 de abril de 2016].

RGSR., Reglamento General de Seguridad Radiológica., Diario Oficial de la Federación, 22 de noviembre de 1988.

RSNA., 2015. *Exploración por tomografía por emisión de positrones, tomografía computada*. Radiological Society of North America. [En línea] Disponible en: <http://www.radiologyinfo.org/sp/info.cfm?pg=pet> [Fecha de acceso: 28 de abril de 2016].

Saling, J.H., Fentiman, A.W., 2001. *Radiactive waste management*. 2nd ed. New York.

SEPR., 2002. *Guía técnica de gestión de materiales residuales con contenido radiactivo en centros de investigación y docencia*. SEPR, España.

Tubo de vacío con el campo eléctrico activado. <http://fis.sb-10.org/pravo/4536/index.html>

UCO., n.d., *Radiactividad y reacciones nucleares*. [pdf] Disponible en: [http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER\\$03RRN.pdf](http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER$03RRN.pdf) [Fecha de acceso: 21 de abril de 2016].

UNAM., 2010. *Plan único de especializaciones médicas en Medicina nuclear*.

UNSEAR., 2000. *Sources and effects of ionizing radiation*. Volume I: Sources.

UPNA., n.d. *Radiaciones ionizantes*. [en línea] Disponible en: http://www.unavarra.es/digitalAssets/146/146686_100000Radiaciones-ionizantes.pdf [Fecha de acceso: 21 de abril de 2016].

Villareal, J., 2011. *Energía nuclear en México*. [pdf]. Heinrich Böll-México Centroamérica y el Caribe.

WNA., 2016. *Radioisotopes in Medicine*. World Nuclear Association [En línea] Disponible en: <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine.aspx> [Fecha de acceso: 28 de abril de 2016].

**ANEXO 1
Cuestionario**

Nombre de la institución: _____

Fecha: _____

1.- ¿Cuántos años tiene la institución prestando el servicio de medicina nuclear?	Respuesta:
---	-------------------

PERSONAL Y GRADO DE CONOCIMIENTO

2.- ¿Grado académico del Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) que manipula los materiales y residuos radiactivos en el área de medicina nuclear? Indicar la cantidad de personal				
Medico nuclear:		Técnico (_____):		OTROS (indicar la profesión y cantidad de personal):
3.- De este POE, ¿Cuántos tienen licencia?:			Respuesta:	

GENERACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

4.- Principales radioisótopos empleados en sus procedimientos de diagnóstico y terapia. Respuesta:
5.- Promedio mensual del año 2015 de pacientes a los que se les aplico unidosis Respuesta:
6.- ¿Qué tipo de residuos contaminados con radiación se generan durante el proceso de preparación y/o administración de radiofármacos? (ejemplo: torundas, pañales, guantes, jeringas, agujas, etc.) Respuesta:

7.- Promedio mensual del año 2015 de la Cantidad (en kg) de residuos radiactivos solidos de vida media corta menor a 1 año, generados por la institución. (Entiéndase por residuos radiactivos solidos aquellos que se generan por el uso y contacto de fuentes abiertas, por ejemplo: jeringas, torundas, papel, gasas, etc.)	Respuesta:
---	-------------------

COLECCIÓN Y SEGREGACION DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS

8.- ¿La institución cuenta con un plan de gestión de residuos radiactivos de vida media menor a 1 año? y de ser así ¿Cómo gestionan dichos residuos? Respuesta:

9.- ¿La institución cuenta con un sistema de tratamiento para residuos radiactivos de vida media menor a 1 año? Respuesta:
--

10.- Los contenedores de la institución, destinados para los residuos radiactivos (materiales contaminados como jeringas, vendas, torundas, pañales etc.) cumplen con las siguientes especificaciones:					
ESPECIFICACIÓN	SI	NO	ESPECIFICACIÓN	SI	NO
Boca ancha			Recubrimiento en su parte interna con una bolsa		
Accionado con pedal			Bolsas transparentes con franjas color amarillo		
Superficie lisa y de color llamativo			Bolsas Impermeables		
Rotulado del símbolo de radiación ionizante			Bolsas resistentes		
Cierre hermético					

11.- Una vez que se recolecta y segregan los residuos radiactivos, ¿El encargado del área etiqueta las bolsas antes de su almacenamiento?	SI	NO

12 - ¿Las etiquetas utilizadas, contienen la siguiente información del residuo radiactivo?		
	SI	NO
Fecha de generación del residuo radiactivo		
Lugar donde se recolecto		
Radionúclido		
Actividad, concentración de actividad o actividad específica		
Nivel de radiación a contacto y a un metro		
Composición química/forma física		
Masa y/o volumen,		
El símbolo de radiación ionizante		
Fecha final de la etapa de decaimiento		

13.- ¿La institución lleva una bitácora de los residuos radiactivos generados? Entiéndase por la respuesta SI, que la institución utiliza una bitácora (libro o registro) de los residuos radiactivos generados por la institución. Cualquier otra situación se considera como un NO.	SI	NO

14.- ¿La bitácora para la recepción de residuos radiactivos sólidos y líquidos, al almacén de la instalación, contiene la siguiente información? Cualquier otra situación que no sea la que se especifica se considera como un NO.		
	SI	NO
Fecha de recepción y firma del responsable del almacén		
Fecha de generación del residuo		
Fecha de finalización de la etapa de decaimiento		
Radionúclido(s) y su actividad en Bq		
Nivel de radiación a la fecha de recepción en mSv/hr		
Descripción del desecho radiactivo (especificando su composición química y/o forma física y su masa y/o volumen)		

15.- ¿Criterios que toman en cuenta para segregar los residuos radiactivos? Respuesta:		
	SI	NO
16.- ¿Los residuos radiactivos sólidos punzocortantes, se separan de los no punzocortantes?		
17.- ¿Los residuos radiactivos sólidos punzocortantes, se recolectan en recipientes rígidos y resistentes?		
18.- ¿La institución genera residuos radiactivos líquidos de vida media corta, producto de las excretas de los pacientes de radioyodoterapia?	SI	NO
19.- ¿La institución cuenta con contenedores especiales para los residuos radiactivos líquidos, producto de las excretas de los pacientes de radioyodoterapia? En caso de que la respuesta sea afirmativa, especificar cuantos contenedores tienen y la capacidad de estos. Respuesta:		

ALMACENAMIENTO Y DECAIMIENTO

20.- ¿Dentro de la institución hay un lugar de decaimiento para los residuos de vida media corta (<1año)?	Respuesta:	
21.- ¿El lugar de decaimiento de los residuos radiactivos cumple con las siguientes características?		
	SI	NO
Exclusivo para residuos radiactivos.		
El lugar de almacén de residuos radiactivos se ubica lejos del lugar de trabajo y lejos de personal y pacientes.		
El almacén de residuos radiactivos está aislado de almacén de materias primas o materiales no radiactivos.		
Está señalizado con el símbolo internacional de radiación ionizante		
Acceso restringido a personal no autorizado		
Estructura hermética		
La ubicación del almacén facilita la transferencia de los residuos radiactivos del lugar de generación al sitio de decaimiento		
Cuenta con superficies lisas, impermeables y fácilmente descontaminables		
Su capacidad de almacenaje es suficiente de acuerdo a lo generado por la institución		
Las puertas de acceso del almacén de material radiactivo se abren fácilmente, desde el interior, sin necesidad de llaves.		
El almacén cuenta con un sistema de monitoreo ambiental para valorar los niveles de radiación existentes		
Cuenta con un sistema de ventilación		
Están señalizadas las rutas de evacuación		