

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Propuesta de guías para la formulación
del plan de emergencias radiológicas en
servicios de medicina nuclear, derivadas
de fuentes radiactivas abiertas.**

Laura María Giraldo Galvis

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá D.C., Colombia

2016

Propuesta de guías para la formulación del plan de emergencias radiológicas en servicios de medicina nuclear, derivadas de fuentes radiactivas abiertas.

Laura María Giraldo Galvis

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Física Médica

Directora:

MD. MSc. Brighth Yesenya Sierra Cano

Codirectora:

Ph.D., PD Maria Cristina Plazas de Pinzón

Línea de Investigación:

Física Médica / Protección Radiológica

Grupo de Investigación:

Física Médica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Física

Bogotá D.C., Colombia

2016

*A mis padres, mis hermanas y en especial a Diego por estar
siempre a mi lado.*

Agradecimientos

A la Dra. Brighth Sierra por su paciencia, orientaciones y valiosos aportes para llevar a buen término mi trabajo final de maestría.

A la Dra. Maria Cristina Plazas, por su acompañamiento, apoyo y ánimo durante toda la maestría.

A mi familia, por ser mí soporte, en especial a Alex, Andrea y Martina por el respaldo en este último tramo.

A mi otra familia, mis amigos, que recorrieron este camino conmigo y me brindaron su apoyo.

Resumen

Se presenta un análisis de la normativa colombiana en relación con las emergencias radiológicas, abarcado desde la gestión del riesgo general hasta las que son específicas para el empleo de material radiactivo. Con base en la norma se prepone un formato para la formulación del plan de emergencias radiológicas en servicios de medicina nuclear y que se ajusten con las recomendaciones internacionales del Organismo Internacional de Energía Atómica, planteando además la articulación con el plan de capacitación para el personal de tales servicios enfocado en la gestión del riesgo radiológico.

Palabras clave: Plan de Emergencias Radiológicas, Emergencias Radiológicas, Protección Radiológica

Abstract

An analysis of Colombian regulations regarding radiological emergencies is presented, ranging from general risk management to those that are specific for the use of radioactive material. Based on the standard, a format is proposed for the formulation of the Radiological Emergency Plan in Nuclear Medicine services and that complies with the international recommendations of the International Atomic Energy Agency, also proposing the articulation with the training plan for the personnel of such services focused on radiological risk management.

Keywords: Radiological Emergency Plan, Radiological Emergency, Radiation Protection

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XVI
Lista de Abreviaturas	XVIII
Introducción 1	
1. Marco teórico	3
1.1 Antecedentes en medicina nuclear en Colombia	3
1.2 Radiaciones ionizantes en medicina nuclear	4
1.2.1 Radiactividad, radionucleidos, decaimiento radiactivo y procesos de interacción de radiaciones ionizantes con la materia	8
1.2.2 Radiofármacos.....	32
1.2.3 Radionucleidos usados en medicina nuclear	34
1.3 Tipos de exposición y efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.....	36
1.4 Emergencias radiológicas.....	41
2. Marco normativo y recomendaciones internacionales	49
2.1 Normativa colombiana.....	49
2.1.1 Congreso de la República.....	49
2.1.2 Ministerio de Salud y Protección Social.....	50
2.1.3 Ministerio de Minas y Energía.....	55
2.2 Recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica.....	63
3. Elaboración del formato aplicable al plan de emergencias radiológicas	67
3.1 Descripción de los componentes del formato basados en la normativa colombiana y recomendaciones internacionales.....	67
3.2 Desarrollo por cada componente del formato.....	78
3.2.1 Introducción.....	78
3.2.2 Caracterización del servicio de medicina nuclear (Capítulo 1).....	79
3.2.3 Caracterización de escenarios de riesgo radiológico (Capítulo 2).....	80
3.2.4 Bases de planificación (Capítulo 3).....	86
3.2.5 Capacitación de los procesos en atención a emergencias radiológicas (Capítulo 4).....	90
3.2.6 Organización de la respuesta a emergencias radiológicas (Capítulo 5).....	91
3.2.7 Operaciones – Implementación de la respuesta a emergencias radiológicas (Capítulo 6).....	93
3.2.8 Mecanismos de seguimiento y control (Capítulo 7).....	96

XII Propuesta de guías para la formulación del plan de emergencias radiológicas en servicios de medicina nuclear, derivadas de fuentes radiactivas abiertas.

3.2.9	Glosario	96
4.	Articulación de la documentación para el proceso de autorización del manejo de material radiactivo y formulación del plan de emergencias radiológicas.....	97
5.	Conclusiones y recomendaciones	101
5.1	Conclusiones	101
5.2	Recomendaciones.....	102
A.	Anexo: Formato para la formulación del plan de emergencias radiológicas.....	103
B.	Anexo: Métodos Análisis de Modos y Efectos de Fallo - Matriz de Riesgo	115
C.	Anexo: Implementación del formato del plan de emergencias radiológicas.....	135
D.	Anexo: Contenido sugerido del programa de capacitación en emergencias radiológicas	143
E.	Anexo: Ejemplo de implementación del proceso de capacitación	145
	Referencias	153

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1: Clasificación de la radiación. Entre los tipos de clasificación más importancia están: la clasificación de acuerdo con su origen, radiación electromagnética y radiación corpuscular y, la clasificación de acuerdo con el poder de ionización del medio con el que interactúa, es decir ionizante o no ionizante.	5
Figura 1-2: Clasificación de la radiación. Otra de las clasificaciones de la radiación, está determinada por su capacidad de ionización directa o indirectamente. La radiación directamente ionizante depende directamente de partículas cargadas, mientras que la radiación indirectamente ionizante se deriva de partícula sin carga.	6
Figura 1-3: Representación gráfica para los esquemas de Decaimiento. En esta figura se tiene una representación de los esquemas de Decaimiento que pueden presentar los radionucleidos conforme al cambio en su número atómico o excesos de energía, así como su característica principal en relación con el tipo de emisión de radiación, bien sea electromagnética o corpuscular (Powsner & Powsner, 2006).	11
Figura 1-4: Representación gráfica del Decaimiento α . Este tipo de decaimiento es característico para átomos de gran masa atómica, de modo que este tipo de radionucleidos para alcanzar la estabilidad nuclear, liberan la partícula más pequeña y estable posible, es decir un átomo de helio (Powsner & Powsner, 2006).....	12
Figura 1-5: Representación gráfica del Decaimiento β^- , el núcleo presenta un exceso de neutrones y el mecanismo para llegar a la estabilidad nuclear es convirtiendo un neutrón en un protón, un electrón (partícula β^-) y un antineutrino (Powsner & Powsner, 2006).....	13
Figura 1-6: En la figura (a), representación gráfica del Decaimiento β^+ , el núcleo tiene un exceso de protones y el mecanismo para llegar a la estabilidad nuclear es la conversión de un protón en un neutrón, un positrón y un neutrino. En la figura (b), representación gráfica del efecto de Aniquilación, en este proceso el positrón asociado al Decaimiento β^+ colisiona con un electrón del medio, desencadenando así la aniquilación de ambas partículas y la emisión de dos fotones con una energía de 511 keV cada uno y formando un ángulo de 180° (Powsner & Powsner, 2006; E.Christian & Waterstram-Rich, 2012)...	14
Figura 1-7: Representación gráfica de la captura electrónica. Generalmente se presenta cuando hay un decaimiento de un protón en un neutrón y un electrón de las capas más profundas es absorbido por el núcleo, en consecuencia, la vacante dejada por el electrón absorbido es ocupada por un electrón de las capas exteriores emitiendo un rayo X característico (Powsner & Powsner, 2006).....	15
Figura 1-8: Representación gráfica de la Emisión γ ; el núcleo se encuentra en un estado excitado e inestable, por lo que el mecanismo adoptado para llegar al equilibrio es emitiendo parte de esta energía como radiación electromagnética (Powsner & Powsner, 2006).....	16

Figura 1-9: Representación gráfica de la conversión interna, proceso en el cual el núcleo excitado transfiere energía a uno de los electrones de las capas profundas (k o l), y en consecuencia el electrón es despedido del átomo. La vacante que deja el electrón despedido es ocupada por un electrón de una capa más externa, alcanzando así la estabilidad del átomo. Esta transición tiene como característica principal la emisión de un fotón y puede estar acompañada por un electrón Auger (Powsner & Powsner, 2006). 17

Figura 1-10: Representación gráfica del proceso de Excitación y Des-excitación, procesos que se derivan de la interacción de partículas cargadas con átomos, en este caso específico, la energía de las partículas incidentes no es suficiente para arrancar el electrón del átomo, pero si es suficiente para hacer que sea desprendido de su órbita. El electrón atómico es expulsado de una de las órbitas más cercanas al núcleo, para una externa, sin embargo, para alcanzar el equilibrio nuevamente, la vacante dejada por el electrón es ocupada por el mismo electrón o uno diferente, generando de esta forma la emisión de radiación ionizante (como radiación electromagnética) (Powsner & Powsner, 2006). 18

Figura 1-11: Representación gráfica del proceso de Ionización, en este caso la energía de la partícula incidente en la materia es mayor que la energía de ligadura de los electrones atómicos, lo cual genera que el electrón sea expulsado de su órbita e incluso del átomo (Powsner & Powsner, 2006). 19

Figura 1-12: Representación gráfica del momento antes de la colisión de la partícula cargada pesada con el electrón atómico y después de tal colisión. 21

Figura 1-13: Representación de colisiones de partículas cargadas con la materia. De acuerdo con el parámetro de impacto se pueden clasificar las colisiones en tres, colisiones fuertes, colisiones débiles y colisiones por radiación (Podgorsak, 2010). 22

Figura 1-14: Representación gráfica del rango (espesor recorrido) de las partículas pesadas en un material absorbente (Powsner & Powsner, 2006). 27

Figura 1-15: Efecto Compton. Representaciones de la colisión entre el fotón y el electrón atómico en libre y en reposo. En este efecto el fotón que incide en la materia tiene la suficiente energía como para desligar un electrón de las capas externas del átomo, en consecuencia, un fotón de menor energía es desviado en un ángulo determinado (Powsner & Powsner, 2006). 28

Figura 1-16: Representación gráfica del Efecto Fotoeléctrico, en el que un fotón interactúa con un electrón atómico. El fotón deposita toda su energía en el electrón, por lo que este último es liberado del átomo dejando una vacante que es rápidamente ocupada por un electrón de capas externas. La energía del fotón incidente es mayor que la energía de ligadura del electrón, y la energía que no es usada para liberar al electrón se convierte en energía cinética del fotoelectrón (Powsner & Powsner, 2006). La probabilidad de producción de fotoelectrones depende directamente del número atómico del material y de la energía cinética del haz de fotones que incide en él (Turner, 2007). 30

Figura 1-17: Representación gráfica de la Producción de pares, este proceso se genera principalmente con fotones de alta energía capaces de interactuar con el núcleo de los átomos, desintegrándolo y produciendo en su lugar un par positrón-electrón. Los positrones generados mediante este mecanismo, al igual que los generados en el Decaimiento β^+ , se aniquilan al combinarse con electrones en el medio de la interacción. Por lo anterior, la producción de pares estará acompañada por radiación de aniquilación, generando dos fotones de 511keV cada uno y con un ángulo de 180° entre ellos. 32

Figura 1-18: Efectos directos e indirectos de la radiación ionizante sobre el ADN, en la representación gráfica se observa que la mayoría de los daños indirectos son causados por radiación de baja LET, mientras que los daños directos se deben a la radiación del alta LET (Powsner & Powsner, 2006). 37

Figura 4-1: Articulación de títulos y documentos cruciales para la presentación de la solicitud de autorización para el manejo de material radiactivo. 98

Figura 4-2: Articulación de los documentos cruciales con eje en la evaluación de seguridad (conectores morados) y articulación de los documentos cruciales con eje en el plan de emergencias radiológicas (conectores naranjas).....	100
Figura A-1: Plano 1. Disposición general del centro médico	105
Figura A-2: Plano 2. Disposición general del servicio de medicina nuclear con clasificación de zonas	105
Figura A-3: Plano 3. Descripción lugar de almacenamiento y flujo de material radiactivo.....	106
Figura A-4: Plano 4. Ubicación de dispositivos de monitoreo y límites de dosis; sistemas, elementos y componentes de protección y seguridad radiológica.....	106
Figura A-5: Plano 5. Ubicación de sistemas eléctricos de emergencia y de detección y extinción de incendios	107
Figura A-6: Organigrama del servicio de medicina nuclear.....	112
Figura A-7: Organigrama de la Brigada de Emergencias	113
Figura E-1: Práctica de elementos de protección personal, colocación elementos.	147
Figura E-2: Práctica de elementos de protección personal, retiro elementos.....	147
Figura E-3: Monitoreo del personal	150
Figura E-4: Resultados Test.....	151

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Ajuste de la ecuación (1.6) de acuerdo con la masa de la partícula que incide en los electrones. Se presenta ejemplo en cada caso (Podgorsak, 2010).....	22
Tabla 1-2: Valores de LET para radiación ionizante de baja y alta LET, el valor que separa la baja y alta LET es de $10\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$	26
Tabla 1-3: Características básicas de algunos radiofármacos usados en medicina nuclear, tipo de uso que se le da a cada uno de ellos, bien sea para Diagnóstico o Terapia (Powsner & Powsner, 2006; Gamma Imagen, 2016).....	35
Tabla 1-4: Manifestaciones clínicas asociadas a irradiación corporal (OIEA, 2016).....	40
Tabla 1-5: Manifestaciones clínicas asociadas a irradiación localizada en la piel (Cárdenas Herrera, 2015).	41
Tabla 1-6: Categorías de amenazas nucleares y radiológicas (OIEA, 2004).	42
Tabla 1-7: Criterios recomendados para determinar las categorías de amenazas III y IV para instalaciones y prácticas (OIEA, 2010).....	44
Tabla 1-8: Emergencias Radiológicas relacionadas con aplicaciones médicas (OIEA, 2014).....	47
Tabla 2-1: Normograma Ministerio de Salud y Protección Social. Relación de secciones específicas para el cumplimiento en servicios de medicina nuclear.	55
Tabla 2-2: Normograma Ministerio de Minas y Energía	63
Tabla 3-1: Contenidos sugeridos por la normativa colombiana para los PER (Ley 1523, 2012; Resolución 181434, 2002; Resolución 90874, 2014)	67
Tabla 3-2: Procesos de la gestión del riesgo de desastres	69
Tabla 3-3: Agrupación sugerida de contenidos propuestos por la Ley 1523 y la Resolución 90874.....	69
Tabla 3-4: Agrupación sugerida de contenidos propuestos por la Ley 1523 y las Resoluciones 90874/2014 y 181434/2002	71
Tabla 3-5: Contenido sugerido por publicaciones del OIEA para los PER (OIEA, 2010; OIEA, 2004; OIEA, 2009).....	74
Tabla 3-6: Contenido sugerido para el plan de emergencias radiológicas por el OIEA	76
Tabla 3-7: Categorías de amenazas nucleares y radiológicas (OIEA, 2004)	84
Tabla 3-8: Niveles de actuación en dosis para el caso de exposición aguda, para órganos o tejidos (Resolución 181434, 2002).....	89
Tabla A-1: Datos generales del servicio de medicina nuclear	105
Tabla A-2: Equipos e instrumentación del servicio	107
Tabla A-3: Capital humano del Servicio de medicina nuclear y sus funciones en situaciones de emergencia	108

Tabla A-4: Descripción de prácticas con radionucleidos.....	108
Tabla A-5: Información base para la matriz de riesgo.....	109
Tabla A-6: Niveles de riesgo.....	109
Tabla A-7: Relación escenarios de riesgo con el nivel de riesgo.....	110
Tabla A-8: Niveles de referencia.....	110
Tabla A-9: Relación escenarios de riesgo - Niveles de referencia.....	110
Tabla A-10: Inventario de materiales, equipos e instrumentación de emergencia.....	111
Tabla A-11: Entidades de apoyo (internas).....	111
Tabla A-12: Entidades de apoyo (externas).....	111
Tabla A-13: Modelo plan de capacitación.....	112
Tabla A-14: Descripción de procedimiento para cada escenario de riesgo identificado.....	113
Tabla A-15: Mecanismos de notificación.....	114
Tabla B-1: Calificación de la Severidad del efecto de acuerdo con los niveles de radiación.....	117
Tabla B-2: Calificación de la Ocurrencia del fallo.....	117
Tabla B-3: Calificación de la Probabilidad de Detección.....	118
Tabla B-4: Calificación del Nivel Prioritario de Riesgo (Consuegra Mateus, 2015).....	120
Tabla B-5: Formato de tabla para recopilación información método AMFE.....	122
Tabla B-6: Criterios para la asignación de los niveles de frecuencia (FORO-OIEA, 2012).....	125
Tabla B-7: Criterios para establecer probabilidad de fallos de barreras (FORO-OIEA, 2012).....	125
Tabla B-8: Criterios para establecer nivel de consecuencias en pacientes (FORO-OIEA, 2012; Duménigo, Guerrero, López, & Paz, 2015).....	126
Tabla B-9: Criterios para establecer nivel de consecuencias en público y personal ocupacionalmente expuesto (FORO-OIEA, 2012).....	126
Tabla B-10: Nivel de Riesgo parcial, producto de la frecuencia y la probabilidad de fallo de barreras de seguridad (FORO-OIEA, 2012).....	127
Tabla B-11: Nivel de riesgo, producto del nivel de consecuencias y nivel de riesgo parcial (FORO-OIEA, 2012).....	128
Tabla B-12: Criterios de aceptabilidad del riesgo y acciones correctoras (FORO-OIEA, 2012).....	130
Tabla B-13: Comparativo entre los métodos AMFE y Matriz de Riesgo.....	131
Tabla C-1: Información base para la matriz de riesgo.....	136
Tabla C-2: Niveles de riesgo.....	136
Tabla C-3: Relación escenarios de riesgo con el nivel de riesgo.....	136
Tabla C-4: Niveles de referencia.....	137
Tabla C-5: Relación escenarios de riesgo - Niveles de referencia.....	137
Tablas C-6: Inventario de materiales, equipos e instrumentación de emergencia.....	138
Tabla C-7: Entidades de apoyo (externas).....	139
Tablas C-8: Descripción de procedimiento para cada escenario de riesgo identificado.....	140
Tablas C-9: Mecanismos de notificación.....	141
Tabla 5-29: Modelo plan de capacitación.....	144
Tabla E-1: Aplicación modelo plan de capacitación.....	145
Tabla E-2: Niveles de contaminación (OIEA).....	150
Tabla E-3: Resultados Test.....	151

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ADN</i>	Ácido Desoxirribonucleico
<i>AMEF</i>	Análisis de Modos y Efectos de Fallo
<i>BEIR</i>	Biological Effects of Ionizing Radiation
<i>HAZOP</i>	Hazard and Operability
<i>ICRP</i>	International Commission on Radiological Protection
<i>LET</i>	Linear Energy Transfer
<i>MME</i>	Ministerio de Minas y Energía
<i>MN</i>	Medicina Nuclear
<i>MSPS</i>	Ministerio de Salud y Protección Social
<i>NPR</i>	Nivel Prioritario de Riesgo
<i>OIEA</i>	Organismo Internacional de Energía Atómica
<i>OIT</i>	Organización Internacional del Trabajo
<i>ONU</i>	Organización de las Naciones Unidas
<i>OPR</i>	Oficial de Protección Radiológica
<i>PER</i>	Plan de Emergencias Radiológicas
<i>PET</i>	Positron Emission Tomography
<i>SEFM</i>	Sociedad Española de Física Médica
<i>SPECT</i>	Single Photon Emission Computed Tomography
<i>TAC</i>	Tomografía Axial Computarizada
<i>TOE</i>	Trabajador Ocupacionalmente Expuesto

Introducción

El Ministerio de Minas y Energía regula, controla y licencia las actividades industriales, médicas, agrícolas y demás que se fundamentan en el uso de fuentes radiactivas. En el 2001 adoptó, entre otras, la política nacional en materia de energía nuclear y la gestión de materiales radiactivos; siendo también el encargado de dictar las normas y reglamentos para la gestión segura de dichos materiales. De igual forma estableció mediante las Resoluciones 181434/2002 y 90874/2014 las especificaciones para la presentación de un Plan de Emergencias Radiológicas, como un documento de requisito para la autorización y licenciamiento para el uso de material radiactivo.

Dado que los materiales radiactivos están considerados como peligrosos, es necesario contar con planes de emergencias radiológicas que permitan tener una caracterización de los posibles riesgos asociados al uso de fuentes radiactivas, estableciendo los mecanismos de atención de acuerdo con los riesgos, con miras en todo momento a mantener los niveles de radiación adecuados, de manera tal que no se generen efectos determinísticos y estocásticos en las personas que se encuentran en el servicio.

El objetivo principal del presente trabajo es entonces, proponer un formato para la formulación del plan de emergencias radiológicas en Servicios de medicina nuclear, que se articulen con la normativa nacional y recomendaciones del OIEA.

El presente documento se compone de 4 capítulos y 4 anexos, con los que se busca mostrar la importancia de la gestión de las emergencias radiológicas en servicios de medicina nuclear, integrando los conceptos de la protección radiológica en situaciones de emergencia.

En el capítulo 1 se presenta el marco teórico, compuesto por los antecedentes de la medicina nuclear en Colombia, las radiaciones ionizantes en la medicina nuclear, los efectos biológicos por la exposición a radiaciones ionizantes y generalidades de las emergencias radiológicas. El capítulo 2 está enfocado al análisis de los componentes que propone la normativa colombiana a través del Ministerio de Minas y

2 Propuesta de guías para la formulación del plan de emergencias radiológicas en servicios de medicina nuclear, derivadas de fuentes radiactivas abiertas.

Energía¹ y el Ministerio de Salud y Protección Social², en referencia a la atención de emergencias radiológicas. Además, se relacionan las recomendaciones del OIEA en torno al tema. En el capítulo 3 se presenta una descripción de los componentes del formato diseñado para la formulación del plan de emergencias radiológicas, su contenido básico y el desarrollo por componentes, tratando en todo momento cumplir con los requerimientos de la norma y las recomendaciones internacionales. Finalmente, en el capítulo 4 se entregan las conclusiones y algunas recomendaciones.

En relación con los anexos, en estos se presentan: el formato para la formulación del plan de emergencias radiológicas; métodos usados para la evaluación de la seguridad y análisis de riesgos; contenido sugerido para un programa de capacitación en emergencias radiológicas para el capital humano del servicio y, la implementación de una actividad práctica con los estudiantes de la Maestría en Física Médica.

¹ Autoridad Reguladora.

² Autoridad Sanitaria

1. Marco teórico

1.1 Antecedentes en medicina nuclear en Colombia

La medicina nuclear se entiende como el conjunto de procedimientos que permiten el diagnóstico y tratamiento de algunas patologías, mediante el uso de elementos radiactivos en medicina; dicho de paso, el término de medicina nuclear es relativamente nuevo, su aparición se dio a finales de los años 50's, momento en el que aún se hacía referencia a dicha especialidad como la utilización radioisótopos en humanos. En Colombia particularmente, se podría decir que se tenía poco conocimiento del uso de material radiactivo en humanos, a excepción de ser usados como fuentes emisoras de radiación ionizante para terapia. No obstante, la primera aplicación que involucró el uso de material radiactivo de este tipo en Colombia se dio en marzo de 1951, cuando a una mujer de 50 años se le administró por vía intraperitoneal una dosis de ^{198}Au , por ascitis por metástasis (Otero Ruiz, 2002).

Para el año 1954 ya se tenían publicaciones que relacionaban el uso de radioisótopos, específicamente el de yodo radiactivo para problemas tiroideos, y finalmente el 28 de julio de 1955, en las instalaciones del Instituto Nacional de Cancerología E.S.E. se administró este elemento radiactivo a una paciente para estudio de su función tiroidea, se podría decir que este fue el inicio de la medicina nuclear en el país, escenario que se completa con el ingreso del primer detector de centelleo en 1956 y el primer gammógrafo en 1961, y dando inicio a los servicios de medicina nuclear tal como se conocen en la actualidad (Otero Ruiz, 2002).

Conforme ha aumentado el uso de radionucleidos en la Medicina, y de acuerdo con el riesgo que representa para la salud humana el mal uso de los materiales radiactivos, ha sido necesario establecer mecanismos de control, que soporten el óptimo uso de éstos, y que permitan contar con estándares de calidad, facilitando el quehacer de la medicina nuclear. Es el Ministerio de Minas y Energía quien se encarga de establecer los lineamientos, condiciones y requisitos para otorgar la autorización de manejo de material radiactivo, no obstante, ha delegado al Servicio Geológico Colombiano como Autoridad Reguladora para: autorizar la expedición, modificación, renovación, suspensión o revocatoria de

autorizaciones para las actividades relacionadas con la gestión segura de los materiales radiactivos y nucleares en el territorio nacional.

1.2 Radiaciones ionizantes en medicina nuclear

Para tener una visión general de los efectos y consecuencias que se pueden presentar debido al uso de material radiactivo en los servicios de medicina nuclear, es necesario resolver algunas preguntas como ¿Qué son las radiaciones ionizantes?, ¿Qué es decaimiento radiactivo?, ¿Qué son los radiofármacos?, ¿A qué tipo de radiación se puede estar expuesto en un servicio de medicina nuclear?, ¿Qué efectos biológicos se pueden presentar debido a dichas radiaciones ionizantes?, y finalmente ¿Qué tipo de exposición se pueden presentar en un servicio de medicina nuclear? Por lo anterior se presentan en este capítulo, algunos apartes que dan respuesta a dichas preguntas.

Cuando se habla de radiación se hace referencia a la propagación y transporte de energía en un medio material o en el vacío; este proceso se clasifica en radiación electromagnética y radiación corpuscular, y como se verá más adelante, cada tipo de radiación interactúa de manera particular con diferentes medios.

La radiación electromagnética se presenta como ondas que viajan en el espacio a la velocidad de la luz, así mismo una de sus características más relevantes es su frecuencia de oscilación, que tiene relación directa con la energía asociada a dicha radiación electromagnética.

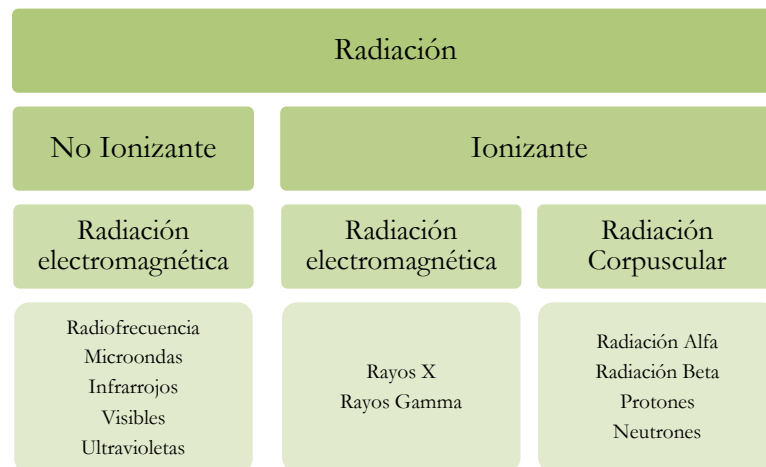
La radiación electromagnética, se presenta cuando hay un transporte de energía por medio de ondas electromagnéticas, entendiendo esta como el cambio de un campo eléctrico debido a fuerzas magnéticas, o del cambio de un campo magnético debido a fuerzas eléctricas. La radiación electromagnética no posee masa, solo energía y puede considerarse como ionizante o no ionizante, dependiendo directamente de la longitud de onda de la onda electromagnética asociada y del efecto que genera al incidir en un medio determinado.

Una de las características más importantes de la radiación electromagnética es la cuantización de la energía, es decir, que la energía viaja en paquetes de partículas sin masa (fotones) lo que establece que las cantidades de energía son discretas. Como ejemplo de la radiación electromagnética están los Rayos Gamma y los Rayos X.

La radiación corpuscular por su parte corresponde al transporte de energía por medio de partículas subatómicas que viajan a grandes velocidades. Como ejemplo de la radiación corpuscular está la radiación alfa, beta y neutrónica.

La clasificación de la radiación se puede realizar de diferentes formas, clasificarse de acuerdo con los efectos que pueden producir al interactuar con un medio, es decir, radiación ionizante o no ionizante, y clasificarse de acuerdo con su origen, como radiación electromagnética y radiación corpuscular. No toda radiación electromagnética es ionizante, y no toda radiación corpuscular genera ionización directa, esto se aclarará más adelante en el texto, sin embargo, se presenta a continuación una gráfica de categorización de la radiación.

Figura 1-1: Clasificación de la radiación. Entre los tipos de clasificación más importancia están: la clasificación de acuerdo con su origen, radiación electromagnética y radiación corpuscular y, la clasificación de acuerdo con el poder de ionización del medio con el que interactúa, es decir ionizante o no ionizante.



Las radiaciones que tienen la capacidad de “remover” electrones de las capas de los átomos, al momento de interactuar con la materia, se conocen como radiaciones ionizantes; en el proceso transfieren a los átomos toda o parte de su energía, generando procesos de ionización o excitación, e induciendo efectos y alteraciones directas e indirectas en la materia.

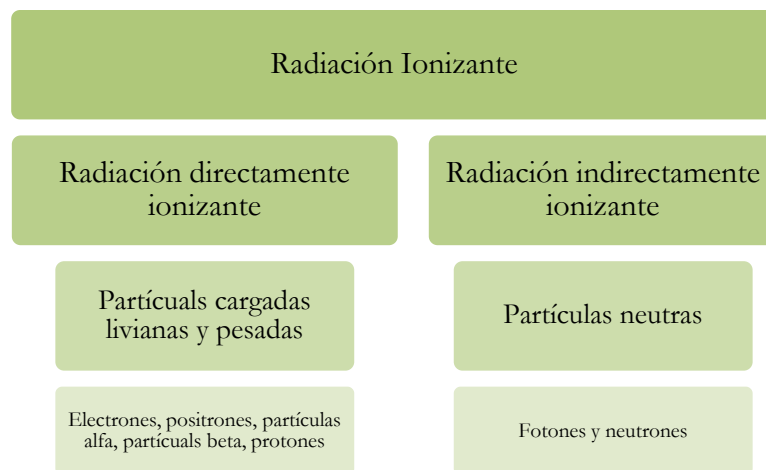
Existen ciertas formas por las que se pueden producir las radiaciones ionizantes:

- Mediante la desintegración espontánea de los átomos en la naturaleza (denominada radiactividad natural). Los elementos que presentan esta característica y emiten radiación ionizante se conocen como radionucleidos (OMS, 2016);

- Por la elaboración artificial mediante aceleradores de partículas, es decir la interacción de electrones acelerados con la materia; y mediante los procesos de fisión y fusión nuclear (reacciones nucleares), generalmente usados para la producción de energía y en el sector industrial.

Sin embargo, la radiación ionizante tiene la capacidad de atravesar el tejido humano, y puede clasificarse a su vez como directa o indirectamente ionizante, lo cual dependerá del tipo de radiación bien sea electromagnética o corpuscular, y en este último caso dependerá directamente de la carga que tenga la partícula (International Atomic Energy Agency, 2014). La radiación directamente ionizante, corresponde a las partículas cargadas que depositan toda o parte de su energía directamente en la materia, mediante interacciones coulombianas, este tipo de interacción se da entre las partículas cargadas y los electrones orbitales del átomo de la materia en la que incide; mientras que la radiación indirectamente ionizante corresponde a la interacción de partículas neutras que depositan energía en la materia en la que inciden mediante dos etapas, la primera de ellas la partícula neutra incidente genera que se libere una partícula cargada en la materia, en consecuencia, las partículas cargadas liberadas son depositan a su vez energía en la materia entendiendo este proceso como la segunda etapa (la deposición de energía se da mediante interacciones coulombianas con los electrones atómicos) (Podgorsak, 2010).

Figura 1-2: Clasificación de la radiación. Otra de las clasificaciones de la radiación, está determinada por su capacidad de ionización directa o indirectamente. La radiación directamente ionizante depende directamente de partículas cargadas, mientras que la radiación indirectamente ionizante se deriva de partícula sin carga.



Magnitudes y unidades de radiación

Dada la capacidad de tener que tiene la radiación ionizante de generar cambios en la materia en la cual incide, es necesario identificar mecanismos de medición, sobre todo si el uso de tales radiaciones se implementará en el ámbito médico tanto para diagnóstico como para tratamientos. Para facilitar la cuantificación de la radiación se han establecido ciertas magnitudes y unidades, así:

Exposición [X]: está relacionada con la capacidad que tiene un haz de fotones para ionizar el aire, tal proceso se describe como el cociente entre dQ y dm , siendo dQ el valor absoluto de la carga total de los iones de un mismo signo producido en aire cuando todos los electrones liberados por los fotones son atenuados completamente por este elemento. La unidad es $[C \cdot kg^{-1}]$ (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

Kerma [K]: en inglés definido como Kinetic Energy Released per Unit Mass, corresponde al cociente entre dE_{tr} y dm , donde dE_{tr} es la sumatoria de las energías cinéticas de las partículas cargadas liberadas por las partículas sin carga en un material específico y dm la masa del material en el que incide. La unidad es $[J \cdot kg^{-1}]$ y recibe el nombre de Gray [Gy] (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

Dosis [D]: se define como la energía absorbida por unidad de masa del medio en el que incide, corresponde al cociente entre $d\bar{E}$ y dm , donde $d\bar{E}$ se conoce como la energía impartida y que corresponde a la suma de todos los depósitos de energía en material de masa dm . La unidad de $d\bar{E}$ es [J] (puede expresarse también en eV), por lo que la unidad de la dosis absorbida es [Gy] (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

Dosis Equivalente [H]: la dosis equivalente se define como magnitud derivada la dosis absorbida media por un órgano o tejido, D_T . La dosis equivalente $H_{T,R}$ corresponde a el producto de w_R y $D_{T,R}$, donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media producida por una radiación R , en un tejido u órgano determinado T , y w_R es un factor de ponderación de radiación, este último al ser un factor de ponderación no tiene unidades, por lo que la dosis equivalente tiene unidades de $[J \cdot kg^{-1}]$, en esta caso la unidad es conocida como Sv (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

La diferencia entre las unidades de dosis absorbida y dosis equivalente, Gy y Sv, radica en que la dosis equivalente es considerada como una unidad en protección radiológica, mientras que la dosis absorbida se usa para dosimetría clínica.

1.2.1 Radiactividad, radionucleidos, decaimiento radiactivo y procesos de interacción de radiaciones ionizantes con la materia.

Radiactividad

Para el desarrollo del concepto es necesario identificar cuando un núcleo es estable, y cuáles son sus características. La estabilidad nuclear se da cuando las fuerzas que actúan al interior del núcleo están en equilibrio, o cuando las fuerzas de atracción (fuerzas de enlace entre neutrones y protones) son mayores que las fuerzas repulsivas (fuerzas de repulsión eléctrica de los protones). En consecuencia, la estabilidad nuclear está asociada directamente con la proporción adecuada del número de neutrones y de protones en el núcleo, lo cual representa que el tamaño del núcleo influye en la estabilidad o reactividad del núcleo (Turner, 2007).

Se considera radiactividad a la emisión de energía a partir de núcleos inestables, refiriéndose así a las transformaciones espontáneas que se generan cuando el núcleo de los átomos está modificándose, afectando incluso su estructura electrónica. La radiactividad está presente en todas las modificaciones nucleares de un átomo inestable hasta llegar a la estabilidad de éste (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

La energía que se libera a partir de estas transformaciones o modificaciones en el átomo, pueden ser de dos tipos:

- Energía ionizante, como fotones, electrones, partículas alfa, entre otras; o
- Energía no ionizante, como fluorescencia.

En los servicios de medicina nuclear, se podría decir, que el insumo fundamental para el diagnóstico y tratamiento es el material radiactivo, conocido en este caso como radionucleido. Los radionucleidos o isótopos radiactivos, son núcleos inestables que se transforman en una descendencia estable o inestable conforme pasa el tiempo, pudiendo presentarse desintegraciones radiactivas y así emisión de radiación ionizante.

La propiedad de emitir radiación ionizante (radiactividad) es característica de cada radionucleido, y está asociada a diversos fenómenos de decaimiento. Sin embargo, para abordar los métodos de decaimiento o de desintegración es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

Constante de Decaimiento $[\lambda]$: es una de las principales características de cada radionucleido y hace referencia directa a la probabilidad por unidad de tiempo de que se genere una transformación nuclear espontánea. La unidad de la constante de decaimiento es s^{-1} (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

Actividad $[A]$: es el número de decaimientos nucleares espontáneos que tiene un radionucleido determinado en un periodo de tiempo, generalmente en un segundo (por consiguiente, la radiación se asocia a ésta). La unidad de la Actividad es **Bq**, que corresponde a una transformación nuclear/s (Sociedad Española de Física Médica, 2011). La unidad de **Bq** fue adoptada en 1974 por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación y en 1975 adoptada por la Conferencia General de Pesas y Medidas, ya que antes consideraban la expresión de Curio [**Ci**] como unidad de la Actividad. El **Ci**, sigue siendo usado como unidad tradicional para referirse a la Actividad, y originalmente es la actividad atribuida a 1 g de Ra-226, es decir, la actividad específica para dicho radionucleido. Por lo anterior se considera una equivalencia entre el **Bq** y el **Ci** así: $1 \text{ Ci} = 3.7^{10} \text{ Bq}$ (Podgorsak, 2010).

La actividad de una sustancia radiactiva con un número de átomos radiactivos idénticos representa el número total de desintegraciones por unidad de tiempo y es definido como el producto entre $N(t)$ y λ ; así (International Atomic Energy Agency, 2014):

$$A(t) = \lambda N(t) \quad (1.1)$$

Periodo o tiempo de semidesintegración: es el tiempo que debe transcurrir para que la actividad de un conjunto de radionucleidos idénticos se reduzca a la mitad, y está directamente relacionado con la constante de decaimiento. El periodo se define mediante la ecuación $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ y su unidad es [s].

Radionucleidos

Los isótopos radiactivos, también conocidos como radionucleidos, son átomos con núcleos inestables, por lo cual se producen una serie de desintegraciones espontáneas del núcleo (hasta llegar a estabilizarse), mediante emisiones de partículas y/o radiación en forma de ondas electromagnéticas, proceso conocido como, Decaimiento Radiactivo (Sopena Novalesca, Plancha Mansanet, Martínez Carsí, & Sopena Monforte, 2013).

Los radionucleidos se pueden encontrar de manera natural y son conocidos como radionucleidos primordiales, o se pueden producir de manera artificial mediante el uso de aceleradores de partículas.

Los radionucleidos de mayor abundancia en la naturaleza tienen tiempos de semidesintegración comparables con la edad de la tierra (4.47×10^9 años), entre ellos se encuentran ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U , ^{40}K y ^{87}Rb . Por su parte, la producción artificial de los radionucleidos representa una gran ventaja para los servicios de medicina nuclear, ya que se pueden producir en gran variedad, de acuerdo con las necesidades identificadas. Cabe destacar que los aceleradores de partículas son prácticamente la única fuente de radionucleidos emisores de positrones, por lo que la producción de éstos plantea una ventaja para la adquisición de imágenes diagnosticas mediante la Tomografía de Emisión de Positrones o PET por sus siglas en inglés (Positron Emission Tomography) (OIT, 2001).

Cada radionucleido se caracteriza por el tipo de radiación que emite, la energía de la radiación y su tiempo de semidesintegración, así el tipo de radiación emitida por los radionucleidos se debe al tipo de decaimiento que sea característico de éste.

Decaimiento radiactivo

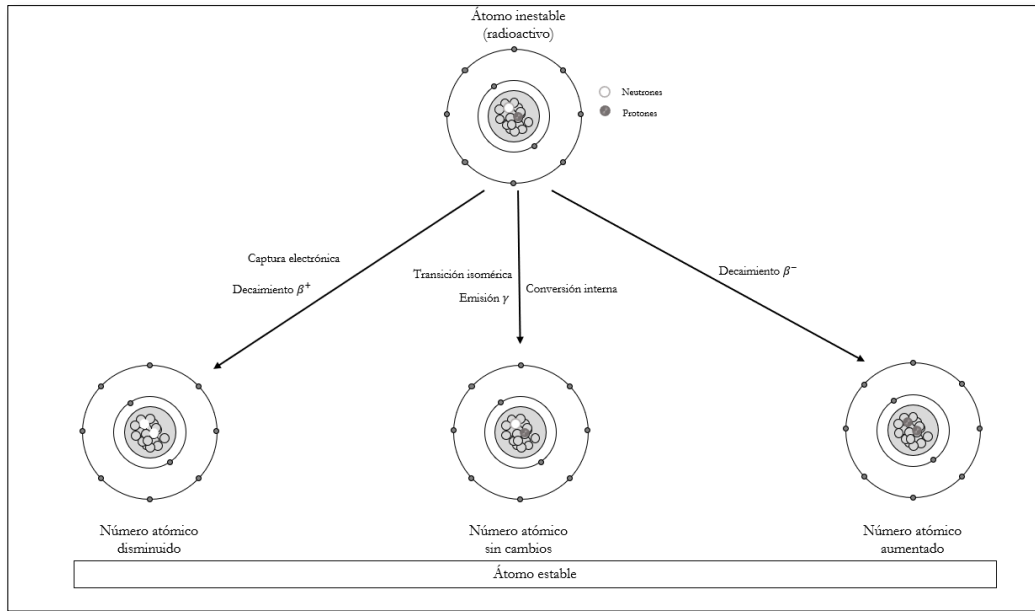
La forma en que decae un material radiactivo es de gran importancia para establecer su uso médico, ya que cada tipo de decaimiento indica un tipo de radiación ionizante característico y a su vez la forma en que interactúa con el medio en el que incide.

Los decaimientos radiactivos pueden verse representados por la emisión de partículas cargadas o por la emisión de radiación electromagnética (rayos X característicos de radionucleido), ambas emisiones capaces de excitar o ionizar el medio en el que inciden. La Figura 1-3 contiene una representación gráfica para los esquemas de decaimiento.

Entre los decaimientos que implican la emisión de partículas cargadas se encuentran: **Decaimiento α** , **Decaimiento β** , que puede ser de dos tipos β^- o β^+ , o **Captura Electrónica** (Powsner & Powsner, 2006).

No todos los radionucleidos presentan inestabilidad por los cambios o excesos en protones o neutrones, algunos generan radiación debido a las transiciones isoméricas, en estos casos, la energía del núcleo es mayor que la energía de su nivel de reposo, es decir, existe un exceso de energía en el núcleo. Entre los procesos asociados a las transiciones isoméricas están: **Emisión Gamma [γ]** y **Conversión Interna**.

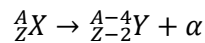
Figura 1-3: Representación gráfica para los esquemas de Decaimiento. En esta figura se tiene una representación de los esquemas de Decaimiento que pueden presentar los radionucleidos conforme al cambio en su número atómico o excesos de energía, así como su característica principal en relación con el tipo de emisión de radiación, bien sea electromagnética o corpuscular (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

a. Decaimiento α

Este tipo de decaimiento es característico de átomos con gran masa atómica ($Z \geq 83$) y que se pueden dividir en fragmentos nucleares. El átomo que emite este tipo de radiación, libera desde el núcleo una partícula α , que se compone por dos protones y dos neutrones, equivalente al núcleo de un átomo de helio; así, la radiación emitida se conoce como radiación alfa, y el núcleo de helio emitido, partícula α . Las partículas α más energéticas provienen de radionúclidos que tienen semividas relativamente cortas (Turner, 2007; Powsner & Powsner, 2006). El decaimiento α se representa mediante la siguiente expresión:



Ejemplo:

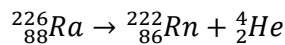
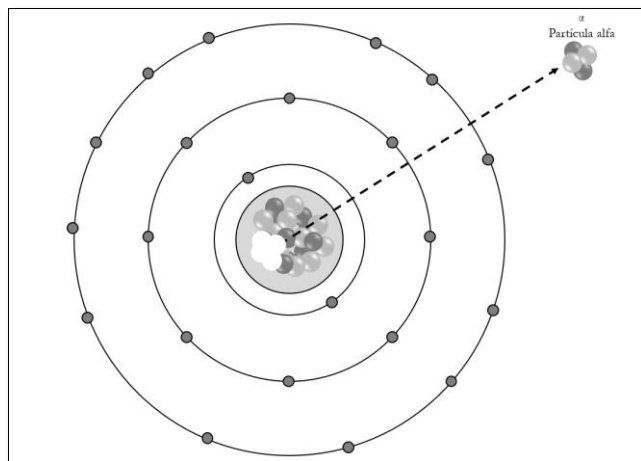


Figura 1-4: Representación gráfica del Decaimiento α . Este tipo de decaimiento es característico para átomos de gran masa atómica, de modo que este tipo de radionucleidos para alcanzar la estabilidad nuclear, liberan la partícula más pequeña y estable posible, es decir un átomo de helio (Powsner & Powsner, 2006).



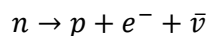
Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

b. Decaimiento β^-

En el decaimiento β^- , existe un exceso de neutrones en relación con la cantidad de protones en el átomo, así, los núcleos pueden llegar a la estabilidad mediante la conversión de un neutrón, en un protón, un electrón y un antineutrino. Como consecuencia, el protón permanece en el átomo y un electrón es emitido. La radiación emitida mediante este proceso se conoce como radiación beta y el electrón como la partícula β , convirtiéndose en un electrón libre hasta encontrar una vacante en ese átomo o en otro.

Una de las características más importantes de este modo de decaimiento es que si bien existe la conservación de la carga, en la que el neutrón da un protón positivo y un electrón negativo, diversos experimentos dieron como resultado que la conservación de la energía no se cumple; así pues se estima la emisión de una segunda partícula conocida como antineutrino (partícula sin carga y de masa diez mil veces menor a la del electrón), y que sería la encargada de transportar la energía faltante, conservando así la energía (Turner, 2007; Powsner & Powsner, 2006)

La expresión que define el Decaimiento β^- está dada por:



Ejemplo:

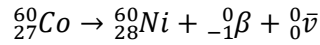
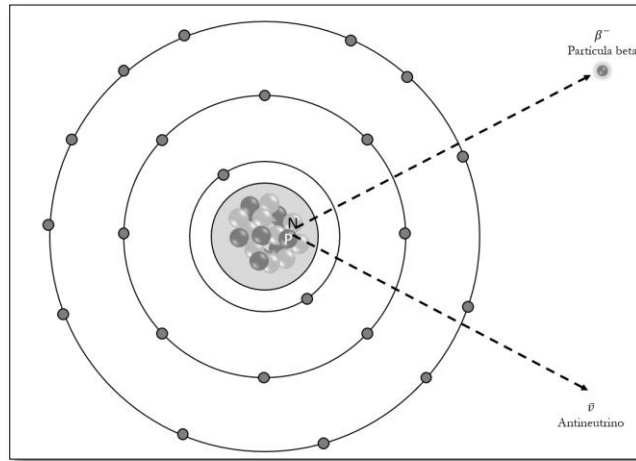


Figura 1-5: Representación gráfica del Decaimiento β^- , el núcleo presenta un exceso de neutrones y el mecanismo para llegar a la estabilidad nuclear es convirtiendo un neutrón en un protón, un electrón (partícula β^-) y un antineutrino (Powsner & Powsner, 2006).

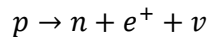


Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

c. Decaimiento β^+

Se presenta cuando existe un exceso de protones en el núcleo; para lograr estabilizarse, el núcleo decae generando la conversión de un protón en un neutrón. En este caso, también llamado decaimiento de positrones, un protón se convierte en un neutrón y un positrón (antipartícula del electrón, tiene la misma masa y carga eléctrica, ésta última positiva). En este proceso también se emiten neutrinos; por lo que se podría decir que es la imagen del Decaimiento β^- , solo que en vez de emitirse un electrón (carga negativa) se produce un positrón (carga positiva), y en vez de un antineutrino, un neutrino. Ver Figura 1-6 (Powsner & Powsner, 2006).

Este tipo de decaimiento está representado mediante la siguiente expresión:



Ejemplo:

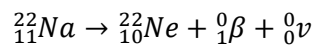
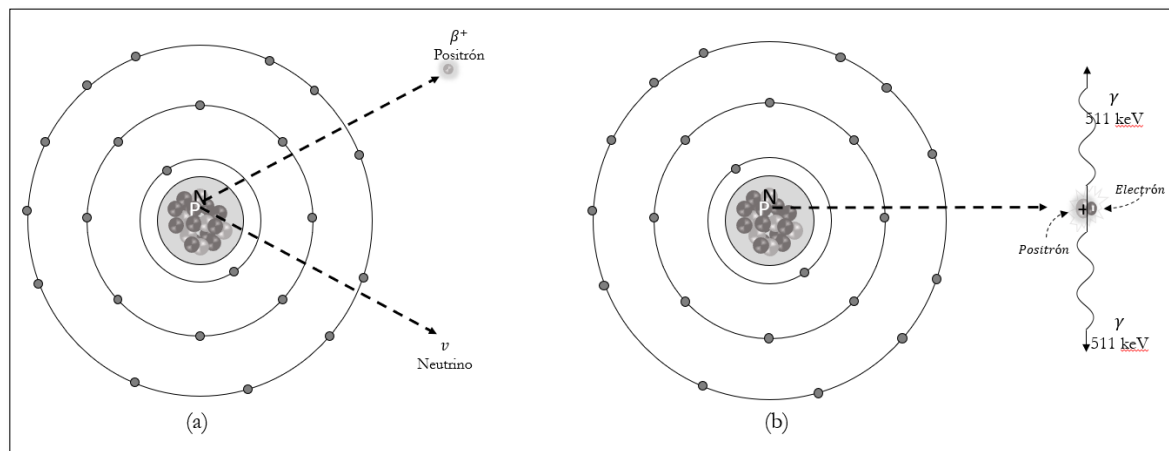


Figura 1-6: En la figura (a), representación gráfica del Decaimiento β^+ , el núcleo tiene un exceso de protones y el mecanismo para llegar a la estabilidad nuclear es la conversión de un protón en un neutrón, un positrón y un neutrino. En la figura (b), representación gráfica del efecto de Aniquilación, en este proceso el positrón asociado al Decaimiento β^+ colisiona con un electrón del medio, desencadenando así la aniquilación de ambas partículas y la emisión de dos fotones con una energía de 511 keV cada uno y formando un ángulo de 180° (Powsner & Powsner, 2006; E.Christian & Waterstram-Rich, 2012).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

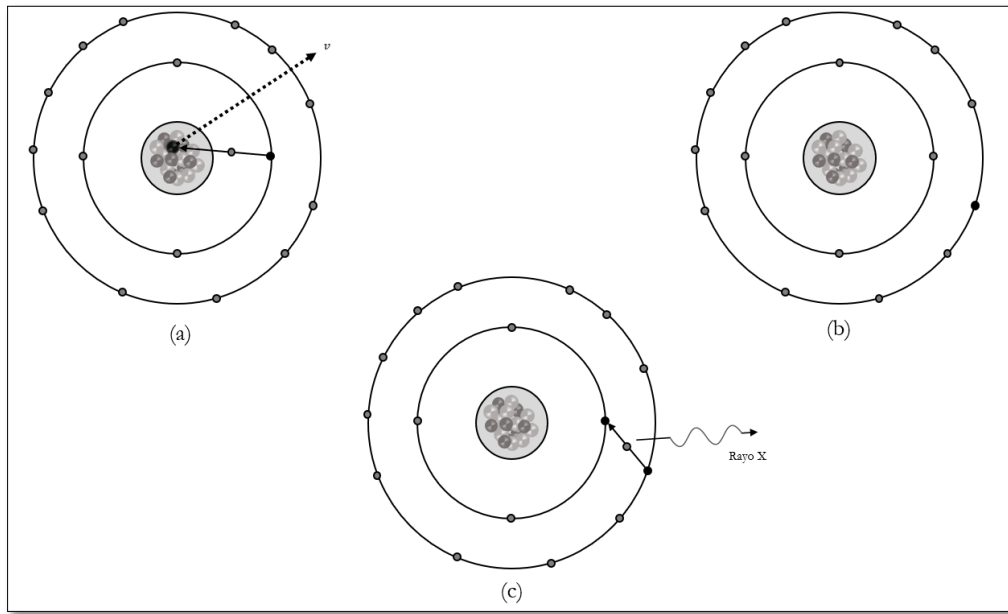
El positrón, debido a las colisiones con la materia a su alrededor, pierde energía cinética y en consecuencia velocidad, por lo que es atraído fácilmente por un electrón del medio. Cuando el electrón y el positrón se unen, orbitando en torno a su centro de masas, forman una espiral entre ambos, creando de esta manera un átomo temporal conocido como positronio. El positronio tiene un tiempo de desintegración orden de 10^{-7} s, y se conoce como aniquilación, proceso en el que las masas de cada partícula (electrón y positrón) se convierten en energía electromagnética (fotones), de acuerdo con la ecuación, $E = mc^2$, la masa en reposo de cada partícula se convierte en un fotón de 511 keV, es decir, la aniquilación corresponde a la formación de 2 fotones que viajan en direcciones opuestas para conservar el momento (E.Christian & Waterstram-Rich, 2012).

d. Captura electrónica

Otro de los procesos que se puede presentar cuando hay decaimiento de un protón en un neutrón, en núcleos con exceso de protones es la captura electrónica. En este modo de decaimiento uno de los electrones de las capas más profundas, interactúa con el núcleo y es absorbido (Sociedad Española de Física Médica, 2011).

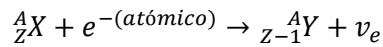
La vacante dejada por el electrón capturado es ocupada por un electrón de las capas exteriores, emitiendo radiación ionizante (rayos X) debido a la transición del electrón de una capa de mayor energía a una de menor energía. Este proceso sucede por la conversión de un protón en un neutrón (Turner, 2007; Powsner & Powsner, 2006)

Figura 1-7: Representación gráfica de la captura electrónica. Generalmente se presenta cuando hay un decaimiento de un protón en un neutrón y un electrón de las capas más profundas es absorbido por el núcleo, en consecuencia, la vacante dejada por el electrón absorbido es ocupada por un electrón de las capas exteriores emitiendo un rayo X característico (Powsner & Powsner, 2006).

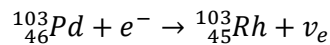


Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

La siguiente expresión describe la captura electrónica



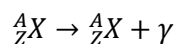
Ejemplo:



e. Emisión gamma [γ]

La emisión gamma se puede clasificar como una transición electromagnética, en la que el radionucleido se encuentra inicialmente en un estado (excitado) energético más alto que el estado energético final, por

lo que no hay cambios en Z y N. Cuando un núcleo está excitado se puede presentar la emisión gamma, que no es otra cosa que radiación electromagnética. La radiación electromagnética se compone de paquetes de energía conocidos como fotones (Quintero Mejía, 2012), y su característica principal es que no tienen masa ni carga eléctrica (ver Figura 1-8). Este tipo de emisiones, reciben también el nombre de transiciones isoméricas (Turner, 2007). La expresión que describe este tipo de emisión es:



Ejemplo

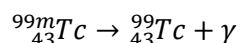
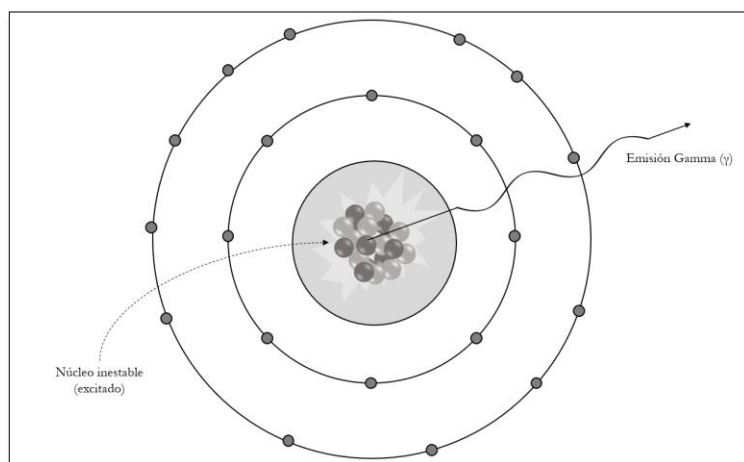


Figura 1-8: Representación gráfica de la Emisión γ ; el núcleo se encuentra en un estado excitado e inestable, por lo que el mecanismo adoptado para llegar al equilibrio es emitiendo parte de esta energía como radiación electromagnética (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

f. Conversión interna

La conversión interna es un proceso electromagnético que puede ocurrir en el núcleo, en el que los campos eléctricos del núcleo interactúan con los electrones orbitales (habitualmente de las capas más profundas del átomo), con energía suficiente para que estos últimos sean expulsado. La vacante que queda es ocupada por un electrón de las capas más externas y de esta forma se logra la estabilidad del átomo. En algunos casos, estas transiciones están acompañadas de la emisión de un fotón (rayo X), en el cual la energía de éste corresponde a la diferencia de energía entre el nivel superior y el nivel inferior al que cae el electrón, o acompañada por la emisión de un electrón Auger (Sociedad Española de Física Médica, 2011; Turner, 2007).

La expresión que define a la conversión interna es:

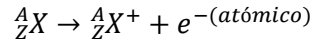
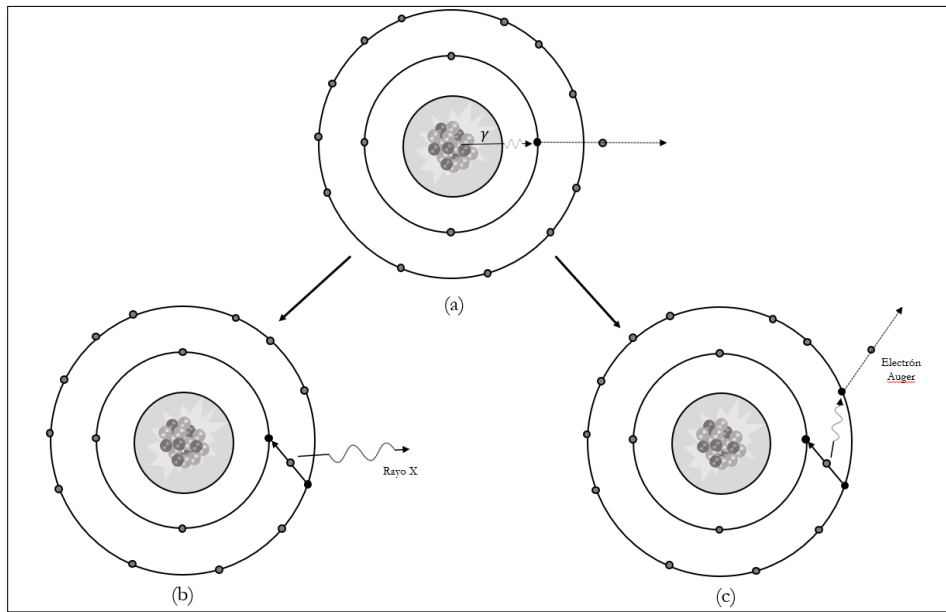


Figura 1-9: Representación gráfica de la conversión interna, proceso en el cual el núcleo excitado transfiere energía a uno de los electrones de las capas profundas (k o l), y en consecuencia el electrón es despedido del átomo. La vacante que deja el electrón despedido es ocupada por un electrón de una capa más externa, alcanzando así la estabilidad del átomo. Esta transición tiene como característica principal la emisión de un fotón y puede estar acompañada por un electrón Auger (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

Teniendo claros los procesos de decaimiento y el tipo de emisión que generan (partículas o emisión de fotones), es necesario conocer el impacto que tiene la radiación ionizante sobre la materia. Las consecuencias que se pueden generar van desde la transferencia de energía a los átomos y moléculas, y el calentamiento de la materia, hasta la modificación de la estructura atómica.

Procesos de interacción de las radiaciones ionizantes con la materia

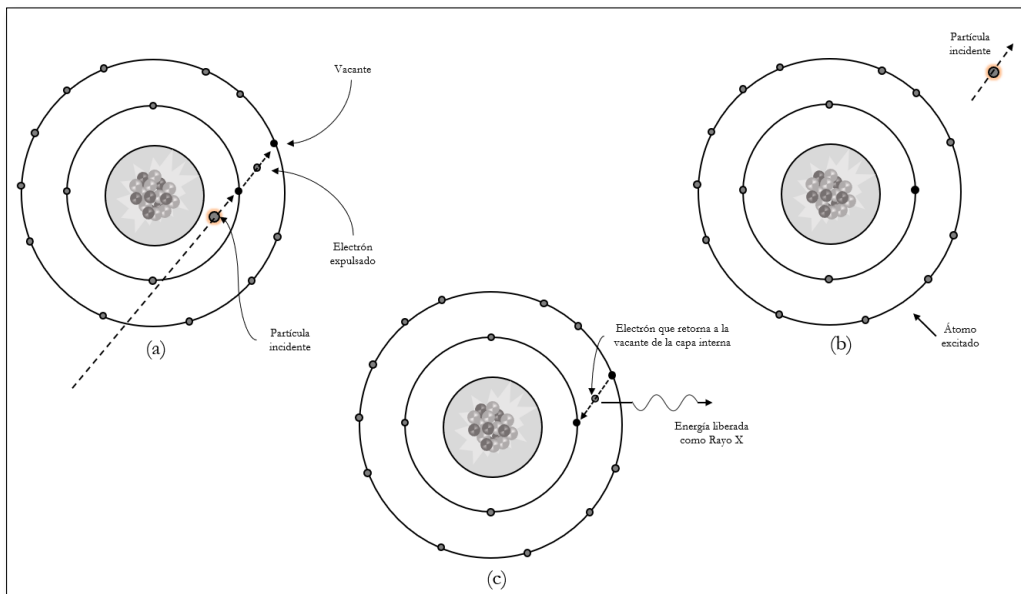
La interacción de la radiación ionizante con la materia va a depender en primera instancia de la naturaleza de ésta, es decir, si la radiación ionizante procede de partículas cargadas o de ondas electromagnéticas.

Interacción de partículas cargadas con la materia

Este tipo de interacción depende directamente de las colisiones que se presentan entre las partículas cargadas y los átomos y núcleo del material en el que inciden; así pues, la principal interacción es coulombiana; las partículas cargadas ejercen una fuerza electromagnética sobre los electrones de los átomos, impartiendo de esta manera energía sobre ellos. Este tipo de interacciones se consideran como el principal mecanismo de pérdida de energía de las partículas cargadas incidentes, ya que en cada colisión la partícula cargada presenta una pérdida de energía hasta perder o transferir toda su energía y detenerse (Powsner & Powsner, 2006). Debido a las interacciones en mención, se producen dos procesos importantes a saber: Ionización y Excitación, así:

a. Excitación

Figura 1-10: Representación gráfica del proceso de Excitación y Des-excitación, procesos que se derivan de la interacción de partículas cargadas con átomos, en este caso específico, la energía de las partículas incidentes no es suficiente para arrancar el electrón del átomo, pero si es suficiente para hacer que sea desprendido de su órbita. El electrón atómico es expulsado de una de las órbitas más cercanas al núcleo, para una externa, sin embargo, para alcanzar el equilibrio nuevamente, la vacante dejada por el electrón es ocupada por el mismo electrón o uno diferente, generando de esta forma la emisión de radiación ionizante (como radiación electromagnética) (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

En general las partículas cargadas transfieren parte de su energía cinética a los electrones del átomo en el cual inciden, esto sucede cuando la energía no es suficiente para producir una ionización; así, los electrones son desplazados de su órbita a una de mayor energía (órbita exterior), este proceso se conoce como **excitación**. Sin embargo, el átomo tiende a estabilizarse y dicho electrón retorna a su órbita original, generando la emisión de la energía ganada recientemente como radiación electromagnética, este proceso se conoce como **des-excitación**,

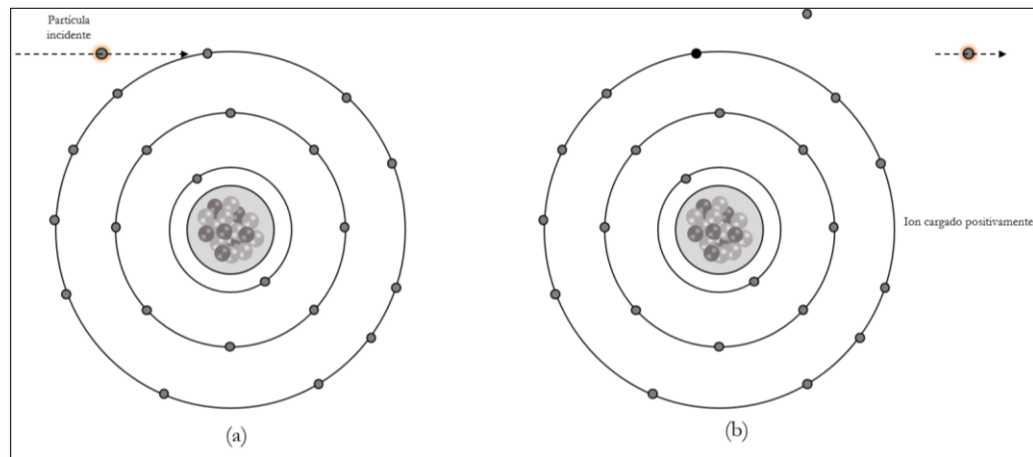
Figura 1-10 (Powsner & Powsner, 2006).

b. Ionización

Cuando la energía de las partículas cargadas es superior a la energía de enlace de los electrones de las órbitas exteriores, estos electrones son expulsados del átomo, generando así un ion positivo. A este primer proceso se le conoce como ionización primaria; cuando la energía de los electrones expulsados es suficiente para generar otra ionización en un átomo diferente, pero en el mismo medio, se presenta una ionización secundaria. El proceso de ionización no se genera únicamente por partículas cargadas, como se verá más adelante, también se puede presentar ionización debido al Efecto Compton y al Efecto Fotoeléctrico (Powsner & Powsner, 2006).

Si bien los procesos de ionización y excitación se presentan como consecuencia de la interacción de las partículas cargadas con la materia, existen situaciones características que se deben estudiar de acuerdo con el tipo de partículas, y de esta manera entender cuáles son los mecanismos para detectar la radiación ionizante y su efecto biológico en tejido vivo.

Figura 1-11: Representación gráfica del proceso de Ionización, en este caso la energía de la partícula incidente en la materia es mayor que la energía de ligadura de los electrones atómicos, lo cual genera que el electrón sea expulsado de su órbita e incluso del átomo (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

La interacción de las partículas cargadas con la materia tiene ciertas consideraciones para tener en cuenta, por ejemplo, mecanismos pérdida de energía, poder de frenado, rango y alcance, y tiempo de ralentización. No obstante, y teniendo en cuenta que las partículas pueden clasificarse entre pesadas y livianas, se hace necesario desarrollar cada una de estas características para las partículas pesadas (partículas que tienen una masa considerablemente mayor que la del electrón, en este estudio son de interés las partículas α y β) y para las partículas livianas (electrones y positrones). La selección de este tipo de partículas para el análisis se debe a la naturaleza de las fuentes radiactivas usadas en los servicios de medicina nuclear, dado el tipo de decaimiento que experimentan.

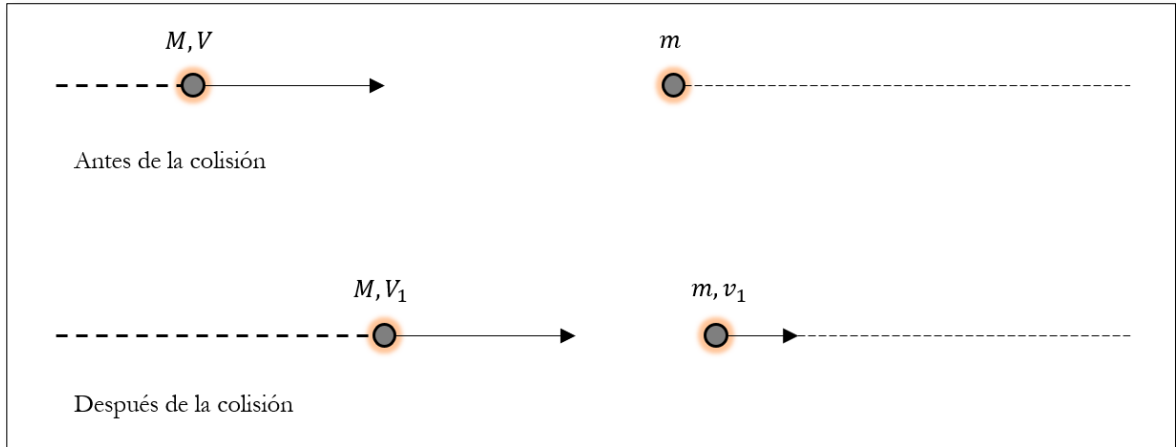
En relación con la interacción de las partículas cargadas con la materia, existen una serie de conceptos a saber: pérdida o transferencia de energía, poder de frenado y rango – alcance. Así mismo, se consideran una serie de características propias para la interacción de partículas cargadas pesadas con la materia y para la interacción de partículas cargadas livianas con la materia, por tal motivo se realizará una comparación en el desarrollo de cada concepto.

a. Pérdida o transferencia de energía:

Una de las principales características de la colisión de las partículas cargadas con la materia, es que pueden transferir solo una pequeña parte de su energía en una sola colisión, esta característica es fundamental para entender más adelante el rango o el alcance que llegan a tener tales partículas al incidir con la materia (Turner, 2007).

Para calcular la máxima energía transferida de las partículas cargadas pesadas a los electrones del átomo, se deben tener en cuenta dos condiciones básicas: primero, la partícula incidente debe tener una velocidad mayor a la del electrón atómico; y segundo, la energía de la partícula es mucho más grande que la energía de ligadura del electrón atómico, es decir, se considera al electrón del átomo como libre y en reposo. En consecuencia, se asume que hay conservación de energía y del momento, por lo que la colisión es elástica (Turner, 2007).

Figura 1-12: Representación gráfica del momento antes de la colisión de la partícula cargada pesada con el electrón atómico y después de tal colisión.



Nombre de la fuente: (Podgorsak, 2010)

Conforme a la Figura 1-12, se pueden establecer las siguientes ecuaciones, a partir de la conservación de la energía y el momento, así:

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}MV_1^2 + \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (1.2)$$

$$MV = MV_1 - mv_1 \quad (1.3)$$

Despejando la velocidad de la partícula incidente (V_1), del juego de ecuaciones anteriores, se llega a:

$$V_1 = \frac{(M-m)V}{M+m} \quad (1.4)$$

La máxima pérdida de energía por la partícula, denominada como Q_{max} , se considera como la diferencia de la energía inicial y la energía restante de la partícula, después de la colisión, así entonces:

$$Q_{max} = \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}MV_1^2 \quad (1.5)$$

$V_1 = \frac{M-m}{M+m}V$ (1.4), en la ecuación $Q_{max} = \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}M\left(\frac{M-m}{M+m}V\right)^2$ (1.5), y

recordando que $E = \frac{MV^2}{2}$ corresponde a la energía cinética inicial de la partícula cargada incidente, se llega a:

$$Q_{max} = \frac{4mME}{(M+m)^2} \quad (1.6)$$

Según la ecuación (1.6) se puede considerar que la energía máxima transferida por colisión depende directamente de la masa de la partícula incidente; en la

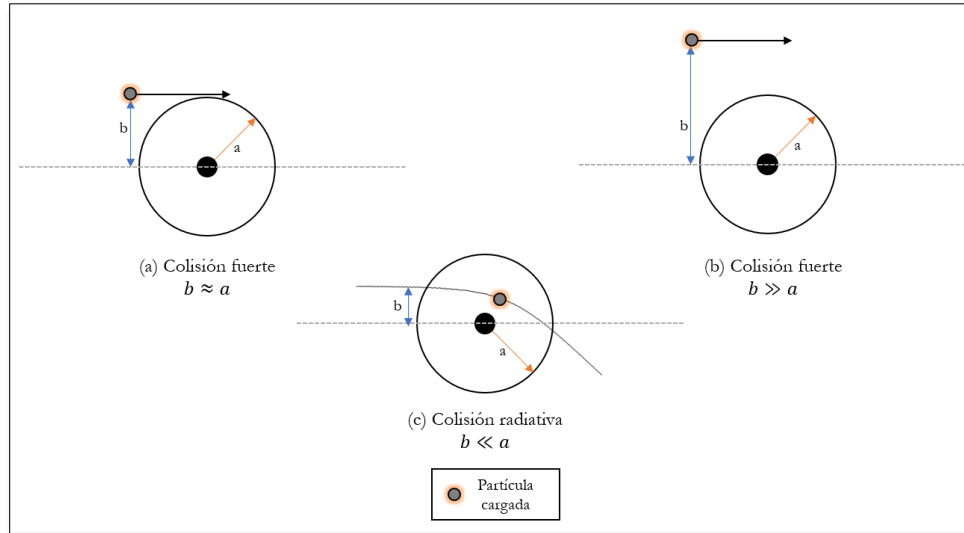
Tabla 1-1: Ajuste de la ecuación (1.6) de acuerdo con la masa de la partícula que incide en los electrones. Se presenta ejemplo en cada caso (Podgorsak, 2010).

Caso	Ecuación	Ejemplo
$M \gg m$	$Q_{max} = 2mV^2$	Protón que colisiona con un electrón orbital
$M \ll m$	$Q_{max} = \frac{4ME}{m}$	Partícula α que colisiona con un núcleo de oro (^{207}Au)
$M = m^*$	$Q_{max} = E$	Positrón que colisiona con un electrón orbital o un neutrón que colisiona con un átomo de hidrogeno
$M = m^{**}$	$Q_{max} = \frac{E}{2}$	Electrón que colisiona con un electrón orbital

* En el caso en que las partículas son distinguibles

** En el caso en que las partículas no son distinguibles

Figura 1-13: Representación de colisiones de partículas cargadas con la materia. De acuerdo con el parámetro de impacto se pueden clasificar las colisiones en tres, colisiones fuertes, colisiones débiles y colisiones por radiación (Podgorsak, 2010).



Nombre de la fuente: (Podgorsak, 2010)

Cuando las partículas cargadas “impactan” con la materia, realmente se están presentando interacciones de coulomb con los núcleos y los electrones de los átomos del material absorbente. Estas interacciones se pueden clasificar de tres formas, de acuerdo con el parámetro de impacto clásico de la trayectoria de la partícula cargada en relación con el radio atómico del átomo del material absorbente. Figura 1-13 (Podgorsak, 2010).

El parámetro de impacto y su relación con el radio atómico del material absorbente determinan el tipo de colisión, por lo que se considera que:

- Colisiones fuertes: la interacción de la partícula cargada se da con un electrón atómico del material absorbente, en este caso $b \approx a$.
- Colisiones suaves: la interacción de la partícula cargada se da con un electrón atómico del material absorbente, en este caso $b \gg a$.
- Colisiones radiativas: la interacción de la partícula cargada se da con el campo nuclear externo del material absorbente, en este caso el parámetro de impacto $b \ll a$. En este caso en particular, hay emisión de fotones, debido al cambio de velocidad en la partícula incidente.

b. Poder de frenado:

El poder de frenado se puede interpretar como la pérdida de energía por unidad de longitud que sufren las partículas cargadas al penetrar en un medio determinado, por lo que este término toma relevancia para la dosimetría de la radiación. A razón de esto el poder de frenado dependerá de la energía y del tipo

de partícula incidente, además de las características del material en el que incide. El poder de frenado se expresa en unidades de $MeV\ cm^{-1}$ y se describe bajo la siguiente ecuación (Turner, 2007).

$$-\frac{dE}{dx} = \mu Q_{avg} = \mu \int_{Q_{min}}^{Q_{max}} Q dQ \quad (1.7)$$

Donde μ corresponde es la probabilidad por unidad de distancia en la que puede ocurrir una interacción con un electrón del medio, Q_{avg} es la energía promedio perdida en la colisión, Q_{max} es la máxima energía transferida y Q_{min} es la energía mínima de ionización.

El Poder de Frenado y la Transferencia Lineal de Energía están relacionados con la dosis entregada por las partículas cargadas y con la efectividad biológica de los diferentes tipos de radiación. Más adelante se profundizará en el concepto de Transferencia Lineal de Energía.

Existen dos tipos de poder de frenado a saber: Poder de frenado de colisión (aplicable para partículas cargadas pesadas y livianas) que resulta de la colisión de las partículas cargadas con los electrones atómicos del medio en el que inciden, y el poder de frenado radiativo (o frenado nuclear) que resulta de la interacción de las partículas cargadas con el núcleo de los átomos en los que inciden.

Poder de frenado por colisión:

En 1913 gracias a algunos cálculos semi-clásicos, Bohr determinó el poder de frenado para las partículas cargadas pesadas, considerando una distancia determinada entre la partícula incidente y el electrón atómico (b), llamada parámetro de impacto; al igual que en el cálculo para la máxima pérdida de energía, Bohr, consideró que el electrón atómico se encontraba libre y en reposo, y que la partícula cargada pesada pasaba a una velocidad comparada con la velocidad de la luz. Finalmente, la ecuación obtenida por Bohr fue (Turner, 2007):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{mV^2} \ln \frac{mV^2}{hf} \quad (1.8)$$

Donde:

$$k_0 = 8.99 \times 10^9 Nm^2C^{-2}$$

z = Número atómico de la partícula pesada cargada

e = Magnitud de la carga de electrones

n = Número de electrones por unidad de volumen en el medio

m = Masa del electrón en reposo

V = Velocidad de la partícula incidente

h = Constante de Planck

f = Frecuencia orbital

Posteriormente, Bethe mediante el uso de la Mecánica Cuántica Relativista, derivó la expresión para una partícula cargada pesada y un medio uniforme, llegando a la siguiente expresión:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{mc^2 \beta^2} \ln \left[\frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (1.9)$$

Donde las variables que se repiten de la ecuación 1.6 se mantienen, y se agregan:

c = Velocidad de la luz en el vacío

$\beta = V/c$ = Velocidad de la partícula comparada con la velocidad de la luz

I = Media de la energía de excitación del medio

Poder de frenado radiativo (Bremsstrahlung)

Cuando una partícula cargada liviana incide en la materia, su trayectoria se ve desviada debido a la interacción con el campo eléctrico del núcleo (en menor medida esta interacción se da con el campo eléctrico de los electrones orbitales) y en consecuencia hay emisión de fotones. Este fenómeno se conoce como Bremsstrahlung y corresponde a su vez a la fracción de energía cinética que se irradia como fotones, dicha fracción aumenta en relación con el número átomo del material blanco y se conoce como Y y se describe con la ecuación.

$$Y = \frac{6 \times 10^{-4} ZT}{1 + 6 \times 10^{-4} ZT} \quad (1.10)$$

La energía máxima que puede tener un fotón emitido por este fenómeno es igual a la energía cinética de la partícula incidente (Turner, 2007).

Transferencia Lineal de Energía – LET

Se denomina LET por sus siglas en inglés (Linear Energy Transfer) y es sinónimo del poder de frenado, la diferencia entre estos conceptos radica en que la LET hace referencia a la energía realmente absorbida (tasa de energía transferida) por la materia en la que inciden las partículas, mientras que el poder de

frenado relaciona la energía transferida (Turner, 2007). Al igual que el poder de frenado, la unidad asociada a la LET es [$\text{keV}\mu\text{cm}^{-1}$], en el SI se expresa en [Jm^{-1}], el equivalente de 1Jm^{-1} es $6.25 \times 10^9\text{keVcm}^{-1}$.

La ecuación que describe la LET está dada por:

$$LET = \frac{dE}{dl} \quad (1.11)$$

Donde dE es la energía cinética promedio impartida al medio por una partícula cargada al atravesar una distancia dl ; es de aclarar que la LET se puede presentar debido a las partículas cargadas que inciden directamente en el medio, o por procesos de ionización secundaria para fotones, es decir, los electrones derivados de los efectos de la interacción de fotones con la materia.

La densidad de ionización producida por la radiación ionizante en la materia depende de la LET de la radiación que incide en ella, y en consecuencia se tiene una variación de acuerdo con sus características (partículas cargadas o fotones). Existen dos tipos de radiación ionizante en relación con la LET (Podgorsak, 2010):

- Baja LET, que se refiere a aquella que es pobremente ionizante; y
- Alta LET, aquella que es densamente ionizante.

Tabla 1-2: Valores de LET para radiación ionizante de baja y alta LET, el valor que separa la baja y alta LET es de $10\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$.

Radiación de baja LET	LET [$\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$]	Radiación de alta LET	LET [$\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$]
Rayos X: 250 kVp	2	Neutrones: 14 MeV	12
Rayos γ : ^{60}Co	0.3	Protones: 2 MeV	17
Rayos X: 3 MeV	0.3	Iones de Carbono: 100 MeV	160
Electrones: 10 keV	2.3	Iones Pesados	100-2000

Como se observa en Tabla 1-2, la radiación de alta LET está asociada a partículas pesadas, ya que tienen mayor probabilidad de interactuar con los átomos del medio, lo que indica una pérdida de energía más rápida, generando muchas ionizaciones en poca distancia. Por otra parte, la radiación de baja LET está generalmente asociada a radiación electromagnética, ya que al no tener masa su poder de penetración es mayor y las interacciones son muy espaciadas unas de otras.

La LET en términos biológicos permite parametrizar el daño en tejido derivado de las partículas incidentes, no obstante, al relacionarse el concepto la tasa de energía promedio transferida, en un nivel macroscópico tal energía puede variar drásticamente por unidad de longitud. A medida que las partículas cargadas atraviesan un medio, perdiendo su energía mediante colisiones e ionizaciones, la LET tiende a aumentar abruptamente cuando llega al final de su rango.

Debido al cambio de la LET por unidad de longitud, los valores promedio de la LET se correlacionan equivocadamente con los efectos biológicos observados (macroscópicamente), por lo que es necesario incluir un nuevo término, Eficacia Biológica Relativa (o RBE por sus siglas en inglés Relative Biological Effectiveness) (International Atomic Energy Agency, 2014).

Es importante mencionar que la misma dosis de diferentes tipos de radiación pueden no producir los mismos efectos biológicos, por lo que se debe contar con un patrón que ayude a comparar los efectos biológicos para los tipos de radiación. La RBE se define como la relación entre una radiación de referencia para producir un efecto biológico específico y la radiación (diferente a la de referencia) capaz de producir el mismo efecto biológico, así:

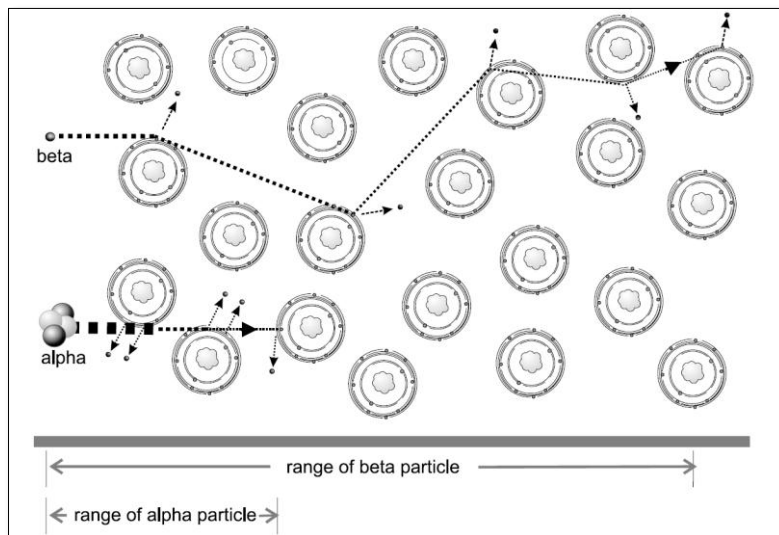
$$RBE = \frac{D_x}{D} \quad (1.12)$$

En la ecuación anterior se considera que D_x corresponde a la dosis de Rayos X de 250 kVp, para la cual ya se han identificado efectos biológicos (Turner, 2007).

c. Rango:

El rango de una partícula cargada que incide en un material absorbente corresponde a un concepto experimental que hace referencia al espesor que puede penetrar la partícula en dicho material hasta perder su energía cinética, el espesor recorrido depende directamente de la partícula incidente, su masa y carga, y de las características del material absorbente; las partículas cargadas pierden su energía por las colisiones que se presentan con los átomos del material, generando ionizaciones y radiación (bremsstrahlung), que a su vez pueden causar desviaciones significativas de la partícula incidente. El rango es recíproco al poder de frenado, y experimentalmente es el cociente entre las partículas transmitidas y las partículas incidentes (Podgorsak, 2010; Turner, 2007)

Figura 1-14: Representación gráfica del rango (espesor recorrido) de las partículas pesadas en un material absorbente (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

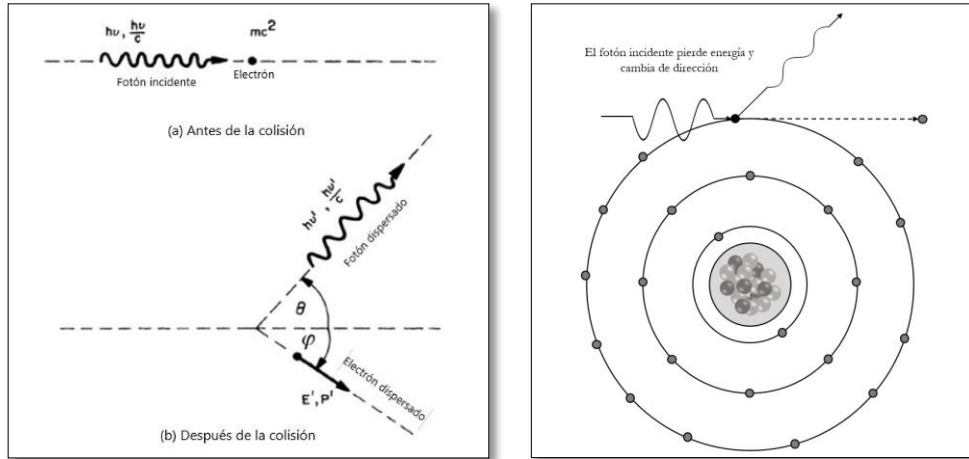
Cuando se habla de rango, se hace referencia a la distancia recorrida por la radiación de partículas cargadas que incide en el material, teniendo una relación directa con la Transferencia Lineal de Energía, de esta forma podría decirse que las partículas más livianas (partículas β y γ) o que tienen mayor energía recorren una distancia mucho mayor. En la Figura 1-14; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa la diferencia de rangos de acuerdo con las partículas que inciden en un material.

Interacción de fotones con la materia

Cuando un haz de fotones incide sobre la materia estos interactúan con los núcleos o electrones orbitales de los átomos del material blanco, generando diferentes efectos de acuerdo con la energía del fotón incidente y de las características del material (como el número atómico). Entre las interacciones de interés por sus efectos sobre la materia están: Efecto Compton, se da por la interacción de los fotones con electrones orbitales débilmente ligados; el Efecto Fotoeléctrico se da por la interacción de los fotones con los electrones orbitales fuertemente ligados y, la Producción de Pares, que se debe a la interacción de los fotones con el núcleo.

a. Efecto Compton

Figura 1-15: Efecto Compton. Representaciones de la colisión entre el fotón y el electrón atómico en libre y en reposo. En este efecto el fotón que incide en la materia tiene la suficiente energía como para desligar un electrón de las capas externas del átomo, en consecuencia, un fotón de menor energía es desviado en un ángulo determinado (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics (Powsner & Powsner, 2006).

Conocido también como Dispersión Compton; se trata de un proceso de colisión, en el que los fotones que inciden sobre la materia tienen una energía superior a la energía de enlace de los electrones atómicos de las capas exteriores, generando que el electrón sea expulsado del átomo (Figura 1-15). Como la energía inicial es superior a dicho enlace, el remanente es dispersado por un segundo fotón de menor energía en un ángulo que puede variar desde 0° hasta 180°, dependiendo de la energía del fotón incidente (Powsner & Powsner, 2006; Durand, 2000).

En este tipo de dispersión, se considera que el fotón con una energía $h\nu$ y momento $h\nu/c$, incide con un electrón libre y en reposo. Después de la colisión, el fotón es dispersado en un ángulo θ , con una energía $h\nu'$ y momento $h\nu'/c$, mientras que el electrón impactado retrocede en un ángulo φ , con una energía E' y momento P' , Figura 1-15. Dado que la colisión es elástica, se considera la conservación de la energía y el momento; la ecuación que describe la conservación de la energía está dada por:

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + E' \quad (1.13)$$

Y la ecuación que describe la conservación del momento está dada por:

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + P' \cos \varphi \quad (1.14)$$

Considerando las ecuaciones anteriores y dada la importancia de conocer la energía trasferida en este proceso, se considera determinar la pérdida de energía del fotón incidente, por lo que es útil determinar la diferencia entre la λ y λ' , por lo que se puede definir tal diferente de la siguiente forma:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = c \left(\frac{1}{v'} - \frac{1}{v} \right) = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) \quad (1.15)$$

De acuerdo con la ecuación $\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$, podemos decir que mientras el ángulo de dispersión sea mayor, la pérdida de energía del fotón incidente es mayor.

b. Efecto fotoeléctrico

Se trata del proceso por el cual un fotón de baja energía (o que ha perdido parte de su energía debido a previas interacciones Compton) incide sobre un átomo, interactuando con los electrones orbitales de las capas internas y depositando toda su energía sobre ellos; como resultado de esta interacción, el electrón es liberado dejando una vacante.

La energía cinética del fotoelectrón, como se conoce al electrón liberado, corresponde a la diferencia de la energía del fotón incidente, $E = h\nu$, y la energía de ligadura del electrón, es decir, la energía que requiere el electrón para escapar del material. Así pues, la energía cinética del fotoelectrón emitido está dada por la siguiente ecuación (Turner, 2007)

$$E = h\nu - \Phi \quad (1.16)$$

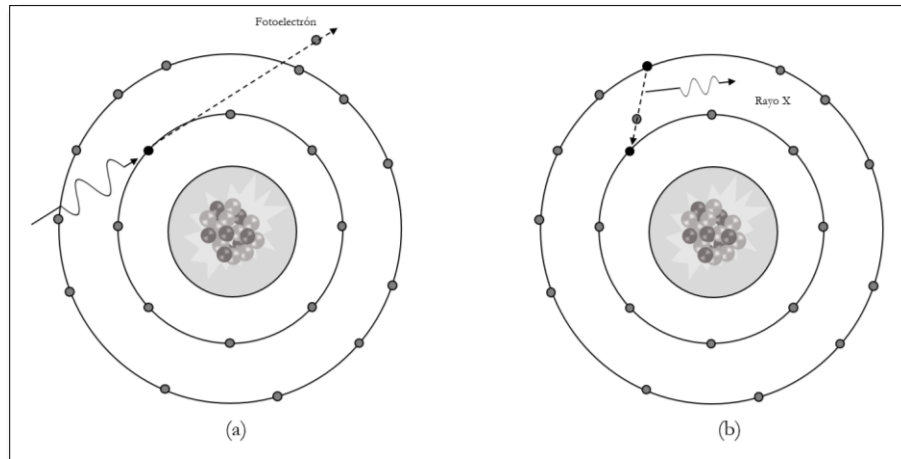
Como no todos los electrones están igualmente ligados al átomo, se debe considerar una mínima energía de ligadura, conocida como función de trabajo y que se denota como Φ_0 . Así, la energía cinética máxima del fotoelectrón está dada por:

$$E_{max} = h\nu - \Phi_0 \quad (1.17)$$

La vacante es rápidamente ocupada por un electrón de las capas exteriores y la energía generada por este proceso es emitida como rayos X (Powsner & Powsner, 2006; Durand, 2000). En la Figura 1-16 se presenta un esquema de interacción y posterior emisión de rayos X.

Figura 1-16: Representación gráfica del Efecto Fotoeléctrico, en el que un fotón interactúa con un electrón atómico. El fotón deposita toda su energía en el electrón, por lo que este último es liberado del átomo dejando una vacante que es rápidamente ocupada por un electrón de capas externas. La energía

del fotón incidente es mayor que la energía de ligadura del electrón, y la energía que no es usada para liberar al electrón se convierte en energía cinética del fotoelectrón (Powsner & Powsner, 2006). La probabilidad de producción de fotoelectrones depende directamente del número atómico del material y de la energía cinética del haz de fotones que incide en él (Turner, 2007).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

c. Producción de pares

La producción de pares consiste en la interacción de fotones de alta energía con el núcleo de un átomo, proceso por el cual el fotón deposita toda su energía en el núcleo desintegrándolo y creando un par positrón-electrón, no obstante, este proceso solo es posible cuando la energía del fotón incidente excede la energía equivalente a las masas en reposo del electrón y del positrón.

Teniendo en cuenta que la energía del fotón es $h\nu$ y la ecuación que describe la conservación de la energía en este proceso está dada por:

$$h\nu = E_e + E_p \quad (1.18)$$

Donde E_e corresponde a la energía del electrón y E_p a la energía del positrón, y cada una de estas energías corresponde a la suma de la energía en reposo de la partícula y la energía cinética adquirida después de la producción del par por cada una de ellas; considerando que la masa del electrón y del positrón es la misma, se tiene que la Ecuación (1.18) se puede escribir como:

$$h\nu = (m_e C^2 + K_e) + (m_p C^2 + K_p) \quad (1.19)$$

Siendo K_e y K_p las energías cinéticas del electrón y del positrón respectivamente posterior a la creación. De la Ecuación 1.19 se puede observar que se requiere una energía mínima o umbral para la formación del par positrón-electrón, así:

$$h\nu = 2m_e C^2 = 1.02 \text{ MeV} \quad (1.20)$$

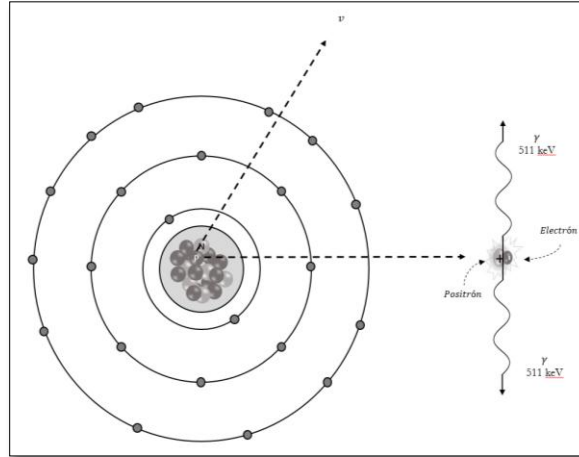
Si el fotón incidente tiene una energía superior a **1.02 MeV**, tal exceso se convierte en energía cinética para las partículas creadas.

Después de la producción del par positrón-electrón estos pierden su energía cinética por ionización y excitación, como cualquier otro electrón que llegase a incidir en el medio. Cuando el positrón ha perdido toda su energía cinética, se combina con un electrón del medio de forma tal que se aniquilan y se produce energía radiante.

Considerando que la aniquilación del electrón y su antipartícula se presenta cuando han perdido su energía cinética, la cantidad de momento inicial en ese instante es cero, debido a que en el proceso existe una conservación de la energía y del momento, no es posible la creación de un único fotón (como energía radiante), por lo que se presenta la creación de dos fotones, con igual momento, pero de signo opuesto, por lo que en el proceso de aniquilación se crean dos fotones de **0.511MeV** cada uno y con un ángulo de 180° entre ellos (Turner, 2007).

Es pertinente recordar en este punto la equivalencia entre la masa y la energía, según el cual la presencia de una masa conlleva una cierta energía, aunque la masa se encuentre en reposo. La energía en reposo de un cuerpo se define como el producto de su masa por el factor de conversión (velocidad de la luz al cuadrado), es decir, $E = mC^2$. Según este principio de equivalencia, la masa de un electrón corresponde a una energía en reposo de **0.511 MeV**.

Figura 1-17: Representación gráfica de la Producción de pares, este proceso se genera principalmente con fotones de alta energía capaces de interactuar con el núcleo de los átomos, desintegrándolo y produciendo en su lugar un par positrón-electrón. Los positrones generados mediante este mecanismo, al igual que los generados en el Decaimiento β^+ , se aniquilan al combinarse con electrones en el medio de la interacción. Por lo anterior, la producción de pares estará acompañada por radiación de aniquilación, generando dos fotones de 511keV cada uno y con un ángulo de 180° entre ellos.



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

1.2.2 Radiofármacos

Los radiofármacos, son radionucleidos unidos a pequeñas cantidades de fármacos que son conocidos como radioligandos o radiotrazadores de acuerdo con su función terapéutica o diagnóstica respectivamente.

El fármaco es una fracción química conocida, orgánica o inorgánica, que tiene la propiedad de interactuar con moléculas proteicas y determinar la biodistribución del radiofármaco hasta el órgano de interés u órgano blanco; a su vez tiene la capacidad de generar un efecto evidenciable en las propiedades fisiológicas de las moléculas con las que interactúa (Sociedad Española de Física Médica, 2014).

Los fármacos en este caso son conocidos como vectores de disposición, ya que permiten indicar el camino adecuado de disposición de los radiofármacos; mientras que los radionucleidos son conocidos como vectores de información, los cuales permiten determinar de manera directa (mediante la detección de la emisión de radiación ionizante) su concentración específica en los órganos.

Entre las funciones del radionucleido están:

- Permitir la detección externa del radiofármaco, al ser utilizado como trazador; y
- Suministrar la dosis absorbida interna de la radiación emitida, cuando es utilizada con fines terapéuticos.

Los fármacos usados para los radiofármacos son generalmente moléculas que tienen funciones como:

- Dirigir al radionucleido hasta el órgano o sistema deseado, de acuerdo con su afinidad biológica.

- Garantizar la farmacocinética del radiofármaco, es decir, la absorción, distribución, metabolismo y eliminación del radionucleido en el organismo (Sopena Novalesca, Plancha Mansanet, Martínez Carsi, & Sopena Monforte, 2013).

El uso de radiofármacos permite identificar el comportamiento fisiológico y bioquímico, gracias a la detección a distancia de la radiación emitida por el radionucleido, y a su vez permite una aproximación anatómica del órgano y/o sistema a evaluar. En general los radiofármacos pueden ser usados para el diagnóstico debido que no alteran las funciones biológicas de los órganos en los cuales se depositan, es decir, al aplicarse en cantidades tan bajas no ejercen un efecto medible (Chain & Illanes, 2015).

Por otra parte, los radiofármacos son usados para tratamientos, bien sea de tejidos neoplásicos (como adenocarcinomas de tiroides, metástasis óseas y pulmonares, entre otras) y tejidos no neoplásicos (como hipertiroidismo), debido a la radiación emitida por el radionucleido y su efecto biológico en tejidos blanco (Sopena Novalesca, Plancha Mansanet, Martínez Carsi, & Sopena Monforte, 2013).

1.2.3 Radionucleidos usados en medicina nuclear

El uso de radiofármacos en los servicios de medicina nuclear está determinado para dos situaciones específicas: diagnóstico y tratamiento. Independiente de su uso, la característica que comparten es su corto tiempo de semidesintegración, la cual puede variar entre horas y días.

La selección de los radiofármacos para medicina nuclear depende de las necesidades que se tengan para la práctica, diagnóstico o terapia; no obstante, hay ciertas características que deben tener los radiofármacos para su uso, así (Chain & Illanes, 2015):

- Fácil disponibilidad, es decir, que el radiofármaco sea fácil de producir, no tenga costos muy altos y que se tenga una alta disponibilidad en el servicio.
- Periodos de semidesintegración cortos. En este caso se busca que los radiofármacos usados para diagnóstico tengan un periodo de semidesintegración corto, pero que sea suficiente para realizar el procedimiento. Por otra parte, para los radiofármacos usados en terapia, se busca que los tiempos de semidesintegración sean más largos (de días o semanas) de tal forma que pueda fijarse en el órgano blanco antes de que decaiga.
- Tipo de emisión radiactiva del radionúclido; esta puede ser una de las características más importantes. Para los radiofármacos usados en diagnóstico, suelen usarse aquellos que experimentan transiciones isoméricas (procesos como Emisión Gamma y Conversión Interna), ya que el tipo de radiación emitida tiene poca interacción con el tejido, por lo que puede ser

detectada a una distancia determinada. En terapia, se busca que los radiofármacos empleados sean emisores de partículas α y β , ya que tienen interacción directa con el tejido, generando efectos biológicos importantes.

- Relación actividad lesión/fondo, esta característica está asociada a la distribución que tiene el radiofármaco en el tejido blanco, dependiendo directamente del marcador que se use y de su forma de administración.

Entre los radiofármacos más usados en medicina nuclear Diagnóstica está el ^{99m}Tc , lo cual se evidencia por el cumplimiento de las características mencionadas, así (Chain & Illanes, 2015):

- Se obtiene fácilmente y a bajo costo mediante el uso de un Generador de ^{99}Mo - ^{99m}Tc , este a su vez permite que el radiofármaco sea estéril y apto para la inyección del paciente.
- Tiene un periodo de semidesintegración física es de 6 horas, por lo que se pueden administrar actividades del orden de mCi, sin exponer al paciente a dosis efectivas altas.
- El ^{99m}Tc emite radiación Gamma, de unos 140 keV y monoenergética, por lo que no se prevén interacciones con el tejido, permitiendo el recorrido de los fotones hasta los detectores de la Gamma Cámara.

En la Tabla 1-3 se presentan los radionucleidos de mayor uso en los servicios de medicina nuclear, incluyendo su tiempo de semidesintegración, los rangos de energía y su uso frecuente (terapia o diagnóstico). Como se observa, los radionucleidos de uso terapéutico representan un riesgo mucho más alto debido a los niveles de energía que emiten, además el tipo de radiación y la LET es fundamental para establecer los efectos biológicos que se pueden presentar. Por lo anterior se sugiere que la evaluación de los escenarios de riesgo asociados con los radionucleidos de uso terapéutico sea prioritaria en el servicio de medicina nuclear.

Tabla 1-3: Características básicas de algunos radiofármacos usados en medicina nuclear, tipo de uso que se le da a cada uno de ellos, bien sea para Diagnóstico o Terapia (Powsner & Powsner, 2006; Gamma Imagen, 2016).

Radionucleido	Vida media	Tipos de decaimiento	Energía máxima	Uso
^{18}F	110 minutos	β^+	0.63 MeV	Diagnóstico en Oncología Localización de tumores primarios de origen desconocido; Diagnóstico en Hematología Diagnóstico en Neurología, detección de enfermedades neurodegenerativa. Enfermedad de Alzheimer y deterioros cognitivos. Diagnóstico en Cardiología: enfermedad coronaria.

Radionucleido	Vida media	Tipos de decaimiento	Energía máxima	Uso
⁶⁷ Ga	3.26 días	CE, γ	93 keV (39%); 0.19 MeV (21%); 300 keV (17%) y 394 keV (5%)	Su principal uso es en neoplasias hematológicas (leucemias y linfomas) procesos infecciosos e inflamatorios. Diagnóstico, seguimiento y respuesta al tratamiento de procesos hematológicos como enfermedad de Hodgkin y no Hodgkin.
⁶⁸ Ga	1.12 horas	β^+ , γ	1.90 MeV	Diagnóstico
⁸⁹ Sr	50.5 días	β^-	1.49 MeV	Tratamiento paliativo (Oncología)
⁹⁰ Y	64.1 horas	β^-	2.28 MeV	Terapéutico
^{99m} Tc	6.02 horas	γ	0.14 MeV	Diagnóstico en Oncología y Neurología. Diagnóstico de disminución de perfusión coronaria y de infarto miocárdico, diagnóstico de malignidad de cáncer de mama, diagnóstico de hiperparatiroidismo recurrente o persistente. Diagnóstico mediante gammagrafía ósea, tiroidea, de glándulas salivares, pulmonar de ventilación; medida de la tasa de filtración glomerular. Estudio de áreas inflamatorias extra-abdominales. Marcaje <i>in vitro</i> de leucocitos.
¹¹¹ In	67.3 horas	γ , CE	0.17 MeV – 0.25 MeV	Diagnóstico. Terapéutico (Oncología, Hematología)
¹²³ I	13.2 horas	CE, γ	0.16 MeV	Diagnóstico: para tumores derivados de la cresta neural. Detección y monitoreo de neuroblastomas. Estudios funcionales de la médula suprarrenal. Diagnóstico diferencial entre el temblor esencial y síndromes parkinsonianos. Terapéutico en Oncología y Neurología.
¹³¹ I	8.02 días	β^- , CE, γ	0.61 MeV	Diagnóstico y terapéutico (Oncología)
¹⁷⁷ Lu	6.71 días	β^- , γ	0.50 MeV	Oncología

CE: Captura Electrónica

Nombre de las fuentes: Essential Nuclear Medicine Physics; Fundación Hospital General de la Santísima Trinidad

1.3 Tipos de exposición y efectos biológicos de las radiaciones ionizantes

En medicina nuclear y en general en las prácticas médicas que usan radiaciones, existen tres tipos de categorías de exposición: exposición médica, exposición ocupacional y exposición del público. Esta clasificación está sujeta a las características del sector o grupo de personas que estarán expuestas; la exposición médica está asociada a una prescripción de dosis para diagnóstico o tratamiento, por lo que este grupo están contemplados los pacientes y cuidadores o acompañantes. La exposición ocupacional

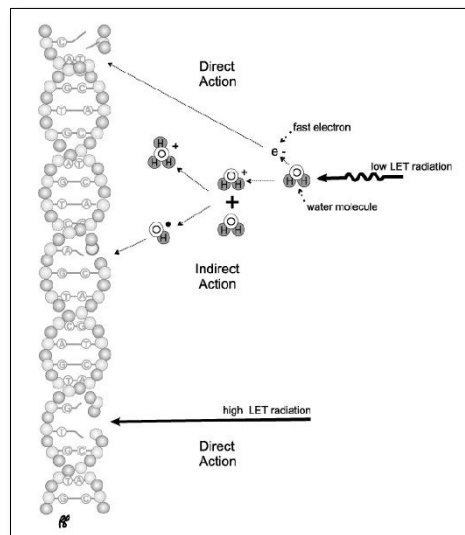
es aquella que ocurre como consecuencia del desarrollo de una labor o trabajo con radiaciones ionizantes, en este grupo se consideran a las personas que son fundamentales para el desarrollo de la práctica de medicina nuclear (como Médicos Nucleares, OPR, Físicos Médicos, Tecnólogos en medicina nuclear, personal de enfermería). Finalmente, la exposición del público corresponde a las demás exposiciones y personas que no están catalogadas como pacientes o TOE (Trabajador Ocupacionalmente Expuesto) (Sociedad Argentina de Radioprotección, 2011).

Así como se consideran categorías de exposición, para fines de la protección radiológica y de aplicación de límites de exposición y seguimiento; también existen situaciones de exposición, planeadas, de emergencia y existentes. Dentro de las situaciones de emergencia es importante tener claridad en los conceptos de: irradiación externa, contaminación externa y contaminación interna.

En un servicio de medicina nuclear los tres tipos de categoría de exposición, es decir, personas del público, pacientes y/o TOE, de acuerdo con la manipulación del material, pueden tener riesgo de exposición por irradiación externa, contaminación externa e incluso, contaminación interna.

Se han discutido previamente, las diversas formas de interacción de las radiaciones ionizantes con la materia, y sus efectos, que pueden ir desde el calentamiento hasta la modificación de la estructura atómica. Pero ¿qué sucede cuando la materia es un tejido vivo? ¿pueden presentarse cambios en su estructura molecular?, evidentemente existe un cambio, dadas las particularidades moleculares del tejido vivo, y es así como se pueden presentar efectos directos o indirectos sobre las células (específicamente en el Ácido Desoxirribonucleico –ADN–), conocidos como efectos biológicos. Los efectos biológicos se traducen en efectos determinísticos y estocásticos de acuerdo con la dosis entregada. La dosis hace referencia a la cantidad de energía depositada en una masa específica.

Figura 1-18: Efectos directos e indirectos de la radiación ionizante sobre el ADN, en la representación gráfica se observa que la mayoría de los daños indirectos son causados por radiación de baja LET, mientras que los daños directos se deben a la radiación del alta LET (Powsner & Powsner, 2006).



Nombre de la fuente: Essential Nuclear Medicine Physics

Generalmente los daños biológicos que se presentan por la interacción de las radiaciones formadas por partículas cargadas con el ADN están directamente relacionados con la Transferencia Lineal de Energía. Por su parte las ionizaciones resultantes posteriores de las interacciones de la radiación electromagnética ionizante con el tejido vivo están relacionadas con la producción de radicales libres y el posterior daño sobre el ADN. Por lo anterior la interacción de la radiación ionizante con el ADN, puede ser directa o indirecta.

- Efecto directo: se presenta cuando la radiación ionizante, bien sea electromagnética (por efecto secundario de los Efectos Compton y Fotoeléctrico) o partículas cargadas incide directamente sobre la doble hélice del ADN, generando un ruptura de puente de hidrógeno entre las bases nitrogenadas, ruptura una cadena o de las dos cadenas de la molécula de ADN; también se pueden presentar cambios entre las bases del ADN como recombinaciones o sustituciones; alteración de los azúcares del ADN y entrecruzamientos ADN-proteínas (Quintero Mejía, 2012).
- Efecto indirecto: se presenta por la interacción de la radiación ionizante con las moléculas de agua contenidas en la célula, generando radicales libres, que a su vez pueden interactuar con el ADN, generando modificaciones estructurales, rupturas, mutaciones, aductos, entre otros; así mismo, al interactuar con otros componentes celulares como los organelos o las membranas, pueden alterar su función.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre el ADN pueden variar desde mutaciones puntuales, tipo supresiones o sustituciones de las bases de la cadena de ADN, hasta rupturas de una (sencilla) o de la doble hélice. De acuerdo con la magnitud del daño, la célula entrará en un proceso de muerte celular programada, denominada apoptosis, muerte celular no programada, también conocida como necrosis o incluso cambios en la molécula de ADN, por una inadecuada reparación del ADN, conocidos como aberraciones cromosómicas (Quintero Mejía, 2012).

Como consecuencia de los efectos directos e indirectos sobre el ADN, pueden generarse alteraciones en las funciones celulares y tisulares; que a su vez pueden dar origen a los efectos estocásticos, determinísticos o de vecindad (bystander).

Según el reporte No. 103 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés), los **efectos determinísticos** son reacciones tisulares nocivas, que se deben principalmente a la muerte o defecto en el funcionamiento de las células tras dosis elevadas; los **efectos estocásticos**, son efectos que están asociados a una probabilidad de presentarse de acuerdo con la dosis recibida, y que se pueden manifestar como cáncer o efectos hereditarios debido a la mutación en células reproductoras (ICRP, 2007). En resumen, los efectos determinísticos están asociados con una cantidad de radiación umbral conocida, siendo los efectos más severos a medida que aumenta la dosis; mientras que los efectos estocásticos se presentan como una probabilidad relacionada con la dosis, así a mayor dosis hay más probabilidades de presentarse daños y secuelas en las personas que reciben la radiación o su descendencia.

Si bien los **efectos bystander** o de vecindad, pueden ser considerados como efectos indirectos sobre las células, estos se presentan, no por la producción de radicales libres, son mediados por señales químicas, segundos mensajeros que intervienen en la comunicación celular; estas señales, son emitidas por las células irradiadas directamente y que alteran el funcionamiento de sus vecinas. Generalmente este tipo de efectos se produce debido a la lesión o daño, generado en la célula irradiada, de esta forma el mensaje enviado a sus vecinas corresponde al efecto biológico sufrido por la célula irradiada, generando así la propagación de este efecto en el medio y/o tejido sin irradiar; este efecto puede no solamente inducirse en las células vecinas sino en las células hijas de la célula irradiada. Se conoce también como efecto espectador (Zimmermann, 2006). Sin embargo, el efecto bystander, a diferencia de los efectos determinísticos y estocásticos, es difícil de medir, por lo que en términos de radiobiología puede llegar a ser un poco controvertido, por lo que toma fuerza en la protección radiológica para dosis bajas (International Atomic Energy Agency, 2014).

Finalmente, los efectos mostrados anteriormente se traducen en efectos clínicos, es decir, las manifestaciones evidentes del organismo frente a la interacción de la radiación ionizante con el ser humano, entre estos efectos se pueden encontrar el Síndrome de Radiación Aguda y Síndrome de Radiación Cutánea

El Síndrome de Radiación Aguda, también conocido como toxicidad aguda a la radiación, hace referencia al conjunto de signos y síntomas presentados posterior a la exposición corporal a dosis efectivas altas de radiación ionizante en un periodo corto de tiempo. Este síndrome, aparece como un efecto determinístico, se conoce que los síntomas son mucho más severos y con una evolución mucho más rápida, cuanto mayor es la dosis recibida. Si bien los efectos clínicos aparecen a partir de dosis superiores a 1 Gy, se considera que el síndrome de radiación aguda para dosis superiores a los 10 Gy, con una adecuada atención médica a través de los tratamientos disponibles, esta dosis, ocasiona la muerte en termino de semanas o meses en la persona expuesta, sea por irradiación o por contaminación.

Las formas conocidas del síndrome de radiación aguda se clasifican de acuerdo con sus signos y síntomas, así para dosis mayores a 1Gy, hasta 6 Gy se presenta la forma hematopoyética, para dosis entre 6 a 8 Gy en la forma gastrointestinal y finalmente, para dosis superiores a 10 Gy en su forma neurológica, vale la pena aclarar que este último estadio, no excluye la presentación de los anteriores (OIEA, 2016). En la forma hematopoyética se pueden encontrar las manifestaciones clínicas mostradas en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Manifestaciones clínicas asociadas a irradiación corporal (OIEA, 2016).

Dosis corporal	Manifestaciones clínicas
0 – 0.25 Gy	Sin manifestaciones clínicas. Pueden presentarse en personas susceptibles, aumento en la frecuencia de aberraciones cromosómicas.
0.25 – 1 Gy.	Sin síntomas o náuseas transitorias y emesis en muy raras ocasiones. Disminución leve del conteo de las células de defensa y Aberraciones cromosómicas.
1 – 6Gy	Esta forma se caracteriza por la alteración de las células sanguíneas, tanto la línea roja como la línea blanca. Se evidencia por la disminución progresiva en el número de células, donde a mayor dosis recibida, mayor disminución, lo que clínicamente se evidencia en sangrados de diferente magnitud (petequias, sangrados gingivales, gastrointestinales) y mayor riesgo de infección, por disminución de las células de defensa (línea blanca) Las formas más leves del síndrome hematopoyético, pueden incluso recuperarse sin tratamiento. (hasta 2Gy recibidos). A mayor dosis, mayor compromiso y alteraciones clínicas.

Dosis corporal	Manifestaciones clínicas
6 – 8 Gy	Adicional a los signos y síntomas de la forma hematopoyética, aparece la forma gastrointestinal, caracterizada, por náusea, vómito, dolor abdominal, diarrea, sangrados gastrointestinales, deshidratación y muerte con dosis mayores a 10Gy.
>10Gy	Las náuseas y vómitos aparecen muy rápidamente, a mayor dosis, más rápida será la aparición de las náuseas, en casos de dosis mayores a 10Gy, pueden aparecer dentro de la primera hora de la exposición. En estas dosis se presenta la forma neurovascular, es decir aparecen efectos neurológicos, como alteración del estado de conciencia, coma y muerte. Hasta el momento, a pesar de instaurar tratamiento médico, la letalidad es del 100% de los casos.

Nombre de la fuente: International Nuclear Information System

El Síndrome de Radiación Cutánea, se presenta como el conjunto de signos y síntomas, que son consecuencia de la sobreexposición de un segmento de la piel, generalmente se presenta por irradiación o por contaminación localizada, es decir, sobreexposición de una fracción limitada del cuerpo (Cárdenas Herrera, 2015). La Tabla 1-5 muestra las manifestaciones clínicas relacionadas con las dosis de exposición.

Tabla 1-5: Manifestaciones clínicas asociadas a irradiación localizada en la piel (Cárdenas Herrera, 2015).

Dosis	Manifestaciones clínicas
3 Gy	Depilación, entre 14 a 21 días posteriores al evento
6Gy	Eritema 14 a 21 días posterior a la exposición, con leve sensación de ardor.
10 – 15 Gy	Descamación seca, sensación de ardor.
15 – 25 Gy	descamación húmeda
>25 Gy	Ulceración profunda y aparición de necrosis, los signos y síntomas serán de aparición más rápida a mayor sea la dosis recibida, en este caso, días, con enrojecimiento, dolor, depilación, descamación y necrosis, cada fase de corta duración.

Nombre de la fuente: X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica

los efectos estocásticos, en la mayoría de los casos se manifiestan con efectos crónicos. Se presentan por exposiciones durante largos periodos de tiempo y pueden no presentarse manifestaciones clínicas durante el periodo de exposición. Estos efectos han sido ampliamente estudiados y discutidos en publicaciones como el BEIR (Biological Effects of Ionizing Radiation) (Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2, 2006), que se basan en los análisis epidemiológicos

de la exposición prolongada al Radón 222 (gas noble que resulta del decaimiento del Uranio 238), partiendo del hecho que este tipo de gas es emitido por los materiales de construcción (viviendas, sótanos, parqueaderos, entre otros), y se tiene así una exposición constante a la radiación ionizante y en situaciones de emergencia y desastres como Chernóbil, Hiroshima y Nagasaki, categorizando la exposición de acuerdo con la dosis recibida y describiendo los hallazgos (efectos crónicos y secuelas) a lo largo de un periodo de observación y seguimiento de las cohortes afectadas

Entre las manifestaciones clínicas de los efectos estocásticos, se pueden describir algunos tipos de cáncer como leucemia linfoide, para la cual hay evidencia suficiente y otros como Carcinoma de mama, tiroides, colon, estomago, pulmón y ovario, con niveles intermedios de evidencia, también se ha descrito, hipertensión arterial, alteraciones de tiroides, formación de cataratas, esterilidad, anemia, entre otros.

1.4 Emergencias radiológicas

La normativa colombiana define como emergencia “toda situación caracterizada por la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento y operación de una comunidad, causada por un evento adverso o por la inminencia del mismo, que obliga a una reacción inmediata y que requiere la respuesta de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general” (Ley 1523, 2012).

Por su parte el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), considera emergencia como “Situación o suceso no ordinario que requiere la pronta adopción de medidas, principalmente para mitigar un peligro o las consecuencias desfavorables en la salud y la seguridad humana o la calidad de vida, los bienes o el medio ambiente. También se incluyen las situaciones que exigen la pronta adopción de medidas³ para mitigar los efectos de un peligro percibido” (OIEA, 2010).

En ambos conceptos se consideran situaciones de gran relevancia, como la presentación de eventos inesperados que afectan las condiciones de seguridad y que requieren de una intervención rápida para evitar mayores exposiciones. Cuando las emergencias están relacionadas con la exposición a radiaciones ionizantes reciben el nombre de emergencias nucleares o radiológicas, el OIEA las define como emergencias en las que se percibe un peligro debido a

³ Medidas o acciones, de acuerdo con la referencia. La normativa colombiana adopta el término de acciones, no obstante, el OEIA se refiere a medidas. Ejemplo: medidas mitigadoras o acciones mitigadoras hacen referencia a lo mismo.

- La energía producida por una reacción nuclear en cadena o la desintegración de los productos de una reacción en cadena; o
- La exposición a la radiación.

Estos ítems representan aproximadamente a las emergencias nucleares y radiológicas respectivamente, sin embargo, también pueden clasificarse conforme a la categorización de la amenaza asociada.

Al igual que en las emergencias convencionales, las emergencias nucleares y radiológicas tienen una clasificación acorde al nivel de respuesta que se requiere para su atención; el OIEA, indica que los tipos de emergencia nucleares y radiológicas dependen de la categoría de las amenazas que las generan, relacionándolas directamente con el nivel de exposición probable, derivado de la materialización de éstas. Las amenazas, pueden ser aplicables tanto a las instalaciones como a las prácticas que conlleven el uso de material radiactivo. En la Tabla 1-6 se presentan las categorías de amenazas, que finalmente servirán para determinar el tipo de emergencia que se presente.

Tabla 1-6: Categorías de amenazas nucleares y radiológicas (OIEA, 2004).

Categoría de amenazas	Descripción
I	Instalaciones, como las centrales nucleares, para las que se han postulado sucesos en el emplazamiento (incluso sucesos de muy poca probabilidad) que podrían causar efectos deterministas graves en la salud fuera del emplazamiento, o en relación con las que ha ocurrido este tipo de sucesos en instalaciones similares.
II	Instalaciones, tales como ciertos tipos de reactores de investigación, para las cuales se postulan sucesos en el emplazamiento que pueden dar lugar a que las personas reciban dosis fuera del emplazamiento que exijan medidas protectoras urgentes de acuerdo con las normas internacionales, o instalaciones semejantes en las que hayan ocurrido ese tipo de sucesos. La categoría II (a diferencia de la categoría I) no incluye instalaciones para las que se postulan sucesos en el emplazamiento (incluidos los de muy baja probabilidad) que podrían dar lugar a efectos deterministas graves en la salud fuera del emplazamiento, ni instalaciones semejantes en las que se haya producido ese tipo de sucesos.
III	Instalaciones, como las de irradiación industrial, para las cuales se postulan sucesos que podrían dar lugar a que las personas reciban dosis, contaminación que exijan medidas protectoras urgentes en el emplazamiento o instalaciones semejantes en las que se hayan producido ese tipo de sucesos. La categoría III (a diferencia de la categoría II) no incluye instalaciones para las que se postulan sucesos, o en las que se han producido sucesos que podrían exigir medidas protectoras urgentes fuera del emplazamiento.
IV	Actividades que pueden dar como resultado una emergencia nuclear o radiológica que podría exigir medidas protectoras urgentes en un lugar imprevisible. Se incluyen allí actividades no autorizadas, tales como las relacionadas con fuentes peligrosas obtenidas ilícitamente. Incluyen también el transporte y actividades autorizadas en las que intervienen fuentes móviles peligrosas tales como fuentes de radiografía industrial o satélites de potencia nuclear. La categoría IV representa el nivel mínimo de amenaza que se supone es de aplicación a todos los Estados y jurisdicciones.
V	Actividades en las que usualmente no se utilizan fuentes de radiación ionizante, pero que originan productos con una gran probabilidad de quedar contaminados como consecuencia de sucesos en instalaciones de las categorías de amenazas I o II, incluidas instalaciones de ese tipo

Categoría de amenazas	Descripción
	en otros Estados, a niveles que exigen la rápida imposición de restricciones a los alimentos de conformidad con las normas internacionales.

Nombre de la fuente: Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear radiológica

Partiendo de la categorización de las amenazas, se considera que los tipos de emergencia que se pueden presentar son:

- Emergencias nucleares, correspondientes a la categorización de las amenazas I, II y III, según el lugar donde se presente la emergencia. Este tipo de emergencia tiene la característica de presentarse en cualquier lugar (dentro o fuera las instalaciones que usan el material radiactivo), y pueden presentarse en sitios como instalaciones de irradiación de gran tamaño; reactores nucleares; instalaciones de almacenamiento de grandes cantidades de combustible o material radiactivo líquido o gaseoso; instalaciones del ciclo del combustible; instalaciones industriales (incluyendo instalaciones de fabricación de radiofármacos) e instalaciones de investigación o médicas con grandes fuentes fijas (servicios de braquiterapia). Las instalaciones en las que se pueden presentar emergencias de categoría I y II, justifican amplias disposiciones dentro y fuera de las instalaciones para la preparación de emergencias, mientras que aquellas que pueden presentar emergencias de categoría III requieren disposiciones para el emplazamiento y zonas aledañas, teniendo en cuenta que estas se limitan a tales zonas.
- Emergencias radiológicas, que se clasifican en la categoría de amenaza IV, y tienen la característica que se pueden presentar en cualquier lugar. Se consideran como emergencias radiológicas las siguientes: fuentes peligrosas no controladas; uso indebido de fuentes industriales y médicas peligrosas; exposiciones y contaminación del público de origen desconocido; reentrada de un satélite que contenga material radiactivo; sobreexposiciones graves; amenazas y actos dolosos y emergencias en el transporte.

Además de las descripciones presentadas en la Tabla 1-6, las características de las emergencias nucleares y radiológicas hacen que la capacidad de respuesta se ajuste a cada una de ellas conforme a las necesidades de atención que se puedan presentar y su extensión.

Tabla 1-7: Criterios recomendados para determinar las categorías de amenazas III y IV para instalaciones y prácticas (OIEA, 2010).

Categoría de amenazas	Descripción
III	Instalaciones para las cuales se han postulado emergencias que podrían dar por resultado dosis que justifiquen medidas protectoras urgentes en el emplazamiento, entre ellas:

	<ul style="list-style-type: none"> - Instalaciones con posibilidades, si se pierde el blindaje, de causar tasas de dosis externa directos superiores a 100 mGy/h a 1 m; - Instalaciones con posibilidades de producir una criticidad incontrolada a más de 0,5 km del límite fuera del emplazamiento; - Reactores con niveles de potencia inferiores o iguales a 2 MW(t); - Instalaciones con inventarios de materiales radiactivos suficientes para dar por resultado dosis que justifiquen medidas protectoras urgentes en el emplazamiento.
<p style="text-align: center;">IV</p>	<p>Prácticas en que intervienen fuentes peligrosas móviles, entre ellas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una fuente móvil con: <ul style="list-style-type: none"> i) posibilidades, si se pierde el blindaje, de causar tasas de dosis (de radiación) externa directa superiores a 1 mGy/h a 1 m, o ii) fuentes peligrosas según el apéndice III; • Satélites que contengan fuentes peligrosas según el apéndice III; • Transporte de cantidades de materiales radiactivos que constituirían fuentes peligrosas según el apéndice III de no ser controladas. <p>Instalaciones/lugares donde hay grandes probabilidades de encontrar fuentes peligrosas no controladas, como, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones grandes de procesamiento de chatarra; • Cruces fronterizos, puertos marítimos y aeropuertos nacionales.

Nombre de la fuente: Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas.

Considerando el alcance del presente trabajo final de maestría, es pertinente entender los criterios de categorización usados para las amenazas III y IV, ya que son acordes para los servicios de medicina nuclear. Lo anterior debido a que las emergencias radiológicas (amenaza IV), pueden presentarse en cualquier escenario y, las emergencias nucleares con amenaza de categoría III ya que se considera para instalaciones en las que se puede presentar exposición a dosis de radiación, y la posible contaminación de superficies y/o personas (OIEA, 2010).

Así mismo, los criterios de clasificación sugeridos y usados por el OIEA para las emergencias radiológicas permiten identificar fácilmente qué amenazas pueden encontrarse en los servicios de medicina nuclear. Entre los criterios se encuentra que las tasas de dosis externas superiores a 100mGy/h a un metro de distancia, corresponden a las amenazas de categoría III. Otro criterio hace referencia a tasas de dosis externas superiores a 1mGy/h a un metro de distancia, criterio para las amenazas de categoría IV. En la Tabla 1-7 se indican dichos criterios de clasificación.

La importancia de la categorización de las amenazas se da para así definir las condiciones de respuesta adecuados y las operaciones correspondientes a cada una de ellas, se debe tener siempre presente que el establecimiento de dichos niveles se implementa para contemplar las acciones más adecuadas, entendiendo que el objetivo fundamental es:

- Impedir que se produzcan efectos deterministas en los trabajadores y el público;
- Prestar primeros auxilios y atención a las personas con lesiones por radiación;

- Limitar, en la medida de lo posible, los efectos no radiológicos en las personas y la población.

Además de los anteriores aspectos, y dada la clasificación de las amenazas radiológicas y su relación directa con las emergencias radiológicas, se debe considerar que los materiales radiactivos son catalogados como materiales peligrosos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). De modo tal que es necesario contar con planes que permitan su control, buen uso y sobre todo planes que integren el accionar en situaciones en las que se pierda el control de dichos materiales y se produzcan emergencias radiológicas.

Emergencias radiológicas anteriores han mostrado la necesidad de contar con planes previos para la atención de éstas, dilucidando que no solo se basa en dar atención al presentarse la emergencia, sino que se deben prever los escenarios de riesgo posible y así establecer los planes más adecuados para su oportuna atención. Como parte de la colección de preparación y respuesta a emergencias radiológicas, el OIEA presentó el documento de referencia, Enseñanzas extraídas de la respuesta a emergencias radiológicas (1945-2010), en el que se presentan algunas de las emergencias que se han destacado en las últimas décadas, entre las que se encuentran algunas en América Latina, así:

- Accidente de San José (Costa Rica): el evento se presentó en 1996 en el Hospital San Juan de Dios de San José, posterior al cambio de una fuente de Cobalto 60 y un error de cálculo en relación con la tasa de dosis al momento de calibrar la fuente. Debido al error, las dosis de radiación entregadas a los pacientes fueron superiores a las prescritas, afectando aproximadamente a 115 pacientes. Estudios posteriores a la sobrexposición mostraron que 4 pacientes sufrieron severas consecuencias por la sobrexposición, 16 pacientes presentaron efectos adversos y podrían estar en situación de riesgo en el futuro y, 26 pacientes más no presentaron efectos, sin descartarse que pudieran presentar efectos en el futuro. Finalmente, y después de casi 9 meses del accidente, se determinó que 3 pacientes fallecieron por la sobrexposición, y para un paciente la sobrexposición se consideró como un factor coadyuvante para su muerte (OIEA, 2014). En retrospectiva la principal causa del accidente no es difícil de interpretar, es así como una de las principales enseñanzas de esta emergencia radiológica, abarca los controles y protocolos de calidad en las actividades que implican el uso de material radiactivo, por parte personal capacitado para tal fin.
- Accidente de San Salvador: el evento se presentó en 1989, en una instalación de irradiación industrial cerca de San Salvador. La fuente usada en el proceso era de Cobalto 60 y estaba instalada en un bastidor móvil. Bajo el uso normal de la fuente se presentó un bloqueo en el bastidor (que a su vez garantiza el blindaje de la fuente), dejándolo en la posición de irradiación. El operador a cargo trató de ajustar el bastidor durante 5 minutos, sin conseguir el objetivo, por

lo que ingresó nuevamente a la sala con dos operarios más para desbloquear el bastidor manualmente (operarios sin conocimiento sobre el manejo de materiales radiactivos). Debido al deterioro de los detectores de radiación y al no uso de los sistemas de seguridad para el ingreso a la sala de irradiación, no se identificó oportunamente la alta tasa de dosis, razón por la cual no se tomaron las medidas de seguridad adecuada. Los tres operarios que se relacionaron con el arreglo del bastidor presentaron síndrome agudo de irradiación. No obstante, el accidente no terminó allí, debido al daño generado en el bastidor y al no ser detectados los niveles de radiación, la sala de irradiación continuó en uso y las fuentes (en contenedores de acero inoxidable en forma de lápices), fueron expulsadas del bastidor, quedando una de ellas por fuera durante 6 días, causando la exposición de 4 personas más. En este caso particular, el accidente pudo no tener consecuencias tan graves si los mecanismos de detección de radiación y de seguridad se hubieran encontrado en funcionamiento y buen estado, de igual forma la evaluación de los procesos de capacitación al personal son fundamentales para prevenir este tipo de accidentes (OIEA, 2014).

El documento en mención, además de entregar la recopilación de 10 de las emergencias radiológicas más relevantes en las últimas décadas, presenta las enseñanzas adquiridas de éstas, que han permitido sugerir cambios en torno al manejo que se le da a este tipo de emergencias, proyectando en todo caso la preparación tecnológica y del personal (OIEA, 2014). De igual forma, en el documento se mencionan algunas de las emergencias relacionadas con aplicación médicas, en medicina nuclear se tienen:

Tabla 1-8: Emergencias Radiológicas relacionadas con aplicaciones médicas (OIEA, 2014).

Año	Lugar	Tipo de uso	Consecuencias	Dosis efectiva recibida	Dosis equivalente recibida	Causa principal
1968	Wisconsin – Estados Unidos	Medicina nuclear – Au 198	1 paciente muerto	4-5 Gy	70-90 Gy Hígado	Administración de dosis superior a la prescrita (7,4 GBq en lugar de 7,4 MBq).
1977	Reino Unido	Medicina nuclear – I 125	2 trabajadores con incorporación, 1 con exposición significativa a tiroides.	-	1,7 Gy	Contaminación accidental de laboratoristas.
1986	Reino Unido	Medicina nuclear – I 125	1 trabajador con incorporación y exposición a tiroides	-	400 Gy	Un técnico se hizo un corte en un dedo cuando llevaba puesto un guante contaminado con ¹²⁵ I, e incorporó parte del material en su cavidad oral.

Nombre de la fuente: Enseñanzas extraídas de la respuesta a emergencias radiológicas (1945-2010)

2. Marco normativo y recomendaciones internacionales

En el presente capítulo trata del componente normativo para las actividades que involucran el uso de fuentes radiactivas en la medicina, normas vigentes que reglamentan los temas relacionados con la seguridad y protección radiológica, y emergencias radiológicas. Entre las normas de interés se encuentran las emitidas por el Congreso de la República de Colombia, el Ministerio de Salud y Protección Social (MSPS) y el Ministerio de Minas y Energía (MME).

2.1 Normativa colombiana

2.1.1 Congreso de la República

Ley 9 de 1979

Esta ley reglamenta las medidas sanitarias que se deben cumplir para mantener la salud en las personas; el Título III hace referencia a la Salud Ocupacional con el fin de “preservar, conservar y mejorar la salud de los individuos en sus ocupaciones” (Ley 9, 1979), incluyendo un apartado exclusivo para la Radiofísica Sanitaria, en el que se indica:

- Según el artículo 150, “Para el desarrollo de cualquier actividad que signifique manejo o tenencia de fuentes de radiaciones ionizantes deberán adoptarse por parte de los empleadores, poseedores o usuarios, todas las medidas necesarias para garantizar la protección de la salud y la seguridad de las personas directa o indirectamente expuestas y de la población en general”.
- Según el artículo 151 “Toda persona que posea o use equipos de materiales productores de radiaciones ionizantes deberá tener licencia expedida por el Ministerio de Salud”.
- Según el artículo 152 “El Ministerio de Salud deberá establecer las normas y reglamentaciones que se requieran para la protección de la salud y la seguridad de las personas contra los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes y adoptar las medidas necesarias para su cumplimiento”.

Ley 1523 de 2012

Por medio de la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

La importancia de la Ley 1523 de 2012 en la formulación de los planes de emergencia radiológica radica en los lineamientos dados por dicha ley para la formulación de los planes de gestión del riesgo (planes de emergencia), entendiéndose que las emergencias hacen parte del proceso social de la gestión del riesgo, que contempla a su vez tres subprocesos: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. Los subprocesos en mención facilitan la identificación de las amenazas, los escenarios de riesgo, la capacidad instalada para dar respuesta situaciones de emergencia, y estrategias de recuperación y rehabilitación posterior a éstas.

De acuerdo con el artículo 188 de la Resolución 18-1434 de 2002 del Ministerio de Minas y Energía, el cual se especificará más adelante, establece la relación entre el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y los diferentes planes de emergencias radiológicas que deben tener las instalaciones que hacen uso de radiaciones ionizantes, bien sea material radiactivo, o equipos emisores de radiaciones ionizantes. Así pues, se considera que estos planes deberán contar los tres subprocesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres.

2.1.2 Ministerio de Salud y Protección Social

Entendiéndose que el Servicio de medicina nuclear sobre el cual se aplicará el plan de emergencias radiológicas, presta un servicio de salud, es necesario conocer la reglamentación para su funcionamiento.

Resolución 9031 de 1990

«Por la cual se dictan normas y se establecen procedimientos relacionados con el funcionamiento y operación de equipos de rayos X y otros emisores de radiaciones ionizantes. Y se dictan otras disposiciones». El artículo primero de la norma, reglamento que «toda persona natural o jurídica que posea equipos de rayos X u otras fuentes de radiaciones ionizantes debe tener licencia de funcionamiento otorgada mediante resolución expedida por el Servicio Seccional de Salud correspondiente, de acuerdo con los requisitos que se establecen en la presente resolución según las características de los equipos y la actividad de las fuentes». Entre los requisitos que debe cumplir el Servicio de medicina nuclear para dar trámite a la licencia de funcionamiento, están los descritos en el artículo 9 de la resolución 9031:

- Solicitud formulada ante el Servicio de Salud por el interesado;
- Planos detallados de la instalación;
- Fotocopias autenticadas de las tarjetas profesionales de los médicos que hacen uso del material radiactivo;
- Fotocopia de la licencia de uso y manejo de material radiactivo;
- Certificado de la especialidad en medicina nuclear o radioterapia expedido a los médicos que hacen uso del material radiactivo;
- Certificado de constitución y gerencia expedido por la Cámara de Comercio, cuando se trate de persona natural;
- Fotocopias autenticadas de los carnés de Protección Radiológica del personal que labore en la instalación con material radiactivo;
- Estudio y evaluación de la instalación, efectuados por funcionarios del Servicio Seccional de Salud correspondiente o por la entidad autorizada para este fin, ya sea de carácter público o privado.

Resolución 2003 de 2014

La presente resolución, «por la cual se definen los procedimientos y condiciones de inscripción de los prestadores de servicios de salud y de habilitación de servicios de salud»; describe la estructura de los servicios de salud, definidos mediante una clasificación de los servicios, de acuerdo con sus características. El grupo interés del presente trabajo final de maestría es el de apoyo diagnóstico y complementación terapéutica, que a su vez se divide en servicios. Entendiendo por servicio la unidad básica habilitable, a partir del cual se establece la autorización para el funcionamiento de cualquier prestador de servicios de salud.

La resolución 2003 de 2014, define y describe el servicio de medicina nuclear como «conjunto de procedimientos diagnósticos o terapéuticos mediante fuentes abiertas de radiación constituidas por isótopos radiactivos, radiofármacos o radionucleidos de uso en humanos, por ejemplo, una de las actividades características de los servicios de medicina nuclear es la terapia con yodo radiactivo. Así mismo, entre los estudios de diagnóstico que pueden hacer parte integral de este servicio están;

- Estudios de medicina nuclear general;
- Spect-CT. Estudios de medicina nuclear tomográficos fusionados con TAC;
- PET-CT: tomografía por emisión de positrones fusionados con TAC;
- Procedimientos de cirugía radioguiada: preparación para cada tipo de pacientes.»

Entre los servicios de interés que hacen parte del grupo de apoyo diagnóstico y complementación terapéutica, además del Servicio de medicina nuclear están: Radiología e imágenes diagnósticas de baja, mediana y alta complejidad, radioterapia, quimioterapia entre otros. Así mismo el servicio de Medicina nuclear se define como un servicio de alta complejidad. Entendiendo servicio de alta complejidad como aquel que requiere de médico especialista con participación de médico general y/o profesional paramédico.

La norma establece que, entre los estándares y criterios de habilitación para medicina nuclear, se debe tener que el «Prestador que utilice para su funcionamiento, fuentes radiactivas, cuenta en forma previa a la habilitación, con Licencia de Manejo de Material Radiactivo Vigente, expedida por la autoridad reguladora nuclear» (Resolución 2003, 2014).

A su vez, la norma hace referencia a criterios como: talento humano; infraestructura; dotación; medicamentos, dispositivos médicos e insumos; procesos prioritarios; historia clínica y registros; e interdependencia.

Talento humano:

La norma indica que el servicio de medicina nuclear debe contar con: Médico especialista en medicina nuclear; Auxiliar de Enfermería; Tecnólogo en medicina nuclear (o en Radiología, o en manejo de fuentes abiertas) con certificado de formación de administración de radiofármacos; Oficial de Protección Radiológica; Químico Farmacéutico con certificado de formación del manejo de radiofármacos en general y PET; y en caso de contar el servicio con PET o PET-CT un profesional con especialización en Física Médica.

Infraestructura:

- Para el servicio Tomografía por Emisión de Positrones (PET), cuenta con una sala de captación del radiofármaco que podrá ser compartida máximo por 2 pacientes y la radiofarmacia PET, deberá estar en un espacio físicamente independiente del de las demás áreas y ambientes.
- Todas las áreas deben contar con la señalización correspondiente (zona controlada y supervisada), haciendo uso del símbolo de radiación internacionalmente aceptado (trébol magenta sobre amarillo).
- La institución cuenta con licencia de manejo de material radiactivo vigente, expedida por la autoridad competente.

- Para terapias de alta tasa, cuenta con habitaciones individuales que posean baños individuales con aislamiento estricto. Estas habitaciones deben tener sistema que permita la vigilancia y comunicación con enfermería y estar separadas pero cercanas del ambiente para la segregación y decaimiento de ropa y desechos.

Dotación:

Si se cuenta con equipos de PET o PET-CT, se debe garantizar la realización de los controles de calidad mensuales, por parte de un profesional en física o ingeniero físico o ingeniero biomédico o un físico médico, que tenga certificado de formación en control de calidad PET.

Procesos prioritarios:

Cuando se realicen terapias, cuenta con:

- Procedimiento para prescripción y dosificación de todos los radiofármacos o radionucleidos para terapias.
- Procedimiento para dar de alta al paciente sometido a terapia con radiofármacos.
- Guías de manejo de pacientes sometidos a terapias con yodo.
- Protocolos para procedimientos diagnósticos para gammagrafías, Spect-CT y PET.
- Protocolos para procedimientos terapéuticos por medio de radiofármacos.
- Protocolos de manejo de emergencias radiológicas.
- Procedimientos de preparación y control de calidad, si prepara, adecua, o dosifica radiofármacos.

Resolución 4245 de 2015

El Ministerio de Salud y Protección Social, establece la Resolución 4245 de 2015 «por la cual se establecen los requisitos para obtener la certificación en Buenas Prácticas de Elaboración de Radiofármacos y se adopta el instrumento para su verificación». Dicha resolución define la Radiofarmacia como un establecimiento ubicado dentro o fuera de las instalaciones de una Institución Prestado de Servicio de Salud donde se realiza cualquier actividad o procedimiento relacionado con la obtención de material radiactivo, síntesis in situ, recepción, elaboración, transformación, adecuación, análisis de control de calidad, dispensación, elución, mezcla, ajuste de dosis, reenvase y/o reempaque, embalaje, almacenamiento, conservación, custodia, distribución, radiomarcación, disposición final, y/o cualquier otra actividad que incluya algún tipo de manipulación de radiofármacos y radionúclidos, juego de reactivos o kit frío y kit caliente, radiomarcación de muestras autólogas y generadores para uso

humano con fines médicos, para ser administrados a pacientes de un servicio de medicina nuclear habilitado.

También se define en esta norma, la clasificación de las radiofarmacias, siendo estas hospitalarias, centralizada e industrializada, siendo la radiofarmacia hospitalaria la aplica para los servicios de medicina nuclear; de igual forma las tiene una clasificación de acuerdo con su nivel de complejidad, es así como todo servicio de medicina nuclear debe contar con al menos la de menor nivel para la implementación de sus actividades. Soy tres niveles de complejidad:

- Baja complejidad: aquellas que realizan recepción y entrega de dosis listas para usar en la forma farmacéutica final;
- Mediana complejidad: aquellas que además de realizar actividades correspondientes a las radiofarmacias de baja complejidad, tienen la capacidad de realizar radiomarcación de juego de reactivos o kit frío con registro sanitario, empleando radionucleidos obtenidos de generadores con registro sanitario aprobados para uso humano; ajuste de concentración, en actividad y/o volumen de radiofármacos con registro sanitario; dilución y dosificación de radiofármacos con registro sanitario, para administración oral; radiomarcación de muestras autólogas para inyección al paciente original.
- Alta complejidad: aquellas que además de realizar actividades de las radiofarmacias de baja y mediana complejidad, pueden: radiomarcación de juegos de reactivos o kit frío con nucleidos obtenidos de generadores con registro sanitario con posible modificación de las indicaciones de preparación del fabricante y realizando los estudios de estabilidad correspondientes; marcación de juego de reactivos o kit frío autorizados con registro sanitario empleando radionucleidos de uso terapéutico; elaboración de radiofármacos a partir de materias primas y radionucleidos incluyendo operaciones de liofilización; producción de radiofármacos con radionucleidos provenientes de aceleradores o provenientes de otros generadores; reenvaso y/o reempaque de radiofármacos preparados con radionucleidos y materias primas para terapia en dosis unitaria para atender una prescripción médica de un paciente individual; síntesis in situ de radiofármacos para PET y adecuación y/o ajuste de dosis de radiofármacos a partir de productos autorizados como vitales no disponibles.

Conforme con la clasificación de las radiofarmacias, está claro que los servicios de medicina nuclear siempre contarán con una en sus instalaciones, por lo que se encuentran directamente en el campo de aplicación de la norma.

Dado que la Resolución 4245 de 2015 establece el instrumento de verificación, en el que se establecen criterios de calificación para los requisitos a cumplir, entre los que se especifican algunos para emergencias radiológicas, así:

- Contar con procedimientos para el manejo de eventualidades (emergencias radiológicas, manejo de derrames, entre otros), como parte del sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo, así mismo los procedimientos deben estar documentados.
- Contar con medidas de descontaminación en caso de emergencias radiológicas, como parte de las generalidades e infraestructura del servicio;

Los criterios de calificación aplicables para los requisitos presentados anteriormente son críticos o mayores, siendo crítico aquellos en los que el incumplimiento del requisito tiene alto impacto en la calidad del radiofármaco y puede poner en peligro la seguridad del personal y de los consumidores del mismo, y mayor en los que el incumplimiento del requisito tiene impacto medio en la calidad del radiofármaco y la seguridad del personal y del consumidor.

Tabla 2-1: Normograma Ministerio de Salud y Protección Social. Relación de secciones específicas para el cumplimiento en servicios de medicina nuclear.

Norma	Descripción	Artículos y anexos de interés en emergencias radiológicas
Resolución 9031 del 12 de julio de 1990	Por la cual se dictan normas y se establecen Procedimientos relacionados con el funcionamiento y operación De equipos de rayos X y otros emisores de radiaciones ionizantes Y se dictan otras disposiciones.	Artículos 1, 2, 9
Resolución 2003 del 28 de mayo de 2014	Por la cual se definan los procedimientos y condiciones de inscripción de los prestadores de servicios de salud y de habilitación de servicios de salud	Anexo. Manual de inscripción de prestadores y habilitación de servicios de salud. numeral 2.3.2.5
Resolución 4245 del 19 de octubre de 2015	Por la cual se establecen los requisitos para obtenerla certificación en Buenas Prácticas de Elaboración de Radiofármacos y se adopta el instrumento para su verificación.	Artículos 3, 4 y 5, y Anexo Técnico (Formato para la verificación de las buenas prácticas de elaboración de radiofármacos – BPER).

2.1.3 Ministerio de Minas y Energía

El Decreto 70 del 17 de enero de 2001, señala que entre las funciones directas del Ministerio de Minas y Energía esta adoptar la política nacional en materia de energía nuclear, la gestión de los materiales

radiactivos; y regular, controlar y licenciar a nivel nacional todas las operaciones concernientes a las actividades nucleares y radiactivas, dictar la normas y reglamentos para la gestión segura de materiales nucleares y radiactivos en el país y velar por el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias en materia de protección radiológica y seguridad nuclear (Decreto 70, 2001).

Resolución 181434 de 2002

La resolución 181434 adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica, que tiene por objeto «establecer los requisitos y condiciones mínimas que deben cumplir y observar las personas naturales o jurídicas interesadas en realizar o ejecutar prácticas que causan exposición a la radiación ionizante o en intervenir con el fin de reducir exposiciones existentes, así como los requisitos y condiciones básicos para la protección de las personas contra la exposición a la radiación y para la seguridad de las fuentes de radiación» y el cual tiene como fundamento las Norma Básicas Internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación del OIEA (OIEA, 1997).

Así mismo, dicha resolución contempla en total nueve títulos, relacionados con las generalidades; requisitos relativos a las prácticas, a las intervenciones; a las exposiciones ocupacional, médica, del público y potenciales (ésta última asociada a la seguridad de las fuentes); situaciones de exposición de emergencia y crónica. Si bien todos los apartes de la normativa son de gran importancia y relevancia para la formulación de planes de emergencias radiológicas y planes de capacitación, se identifican algunos títulos que reglamentan aspectos técnicos y de contenido para éstos, además de las responsabilidades y actividades específicas a realizar para mantener la seguridad y protección radiológica, bajo situaciones normales, de emergencia (mediante acciones protectoras) y crónicas (mediante las acciones reparadoras).

Con el objeto de dar cumplimiento a la normativa, los titulares de la autorización o licencia de uso son quienes deben garantizar en todo momento tanto la protección y seguridad radiológica, así como la calidad en las demás actividades que permiten el control de las prácticas con materiales radiactivos. Entre las responsabilidades de los titulares y las garantías que deben generar, están:

- Establecer procedimientos y protocolos para las prácticas con material radiactivo;
- Realizar evaluaciones de seguridad en torno a las fuentes radiactivas a usar en las prácticas;
- Establecer niveles de defensa que permitan identificar posibles fallas en las prácticas;
- Declarar cuáles son los riesgos derivados de las exposiciones normales y potenciales;
- Mantener al día los diferentes registros que se derivan de las actividades del servicio;

- Elaborar los planes de emergencias radiológicas y mantenerlos actualizados, además de realizar simulacros que se adapten a las características del servicio y los riesgos identificados;
- Contar con la capacidad para implementar la vigilancia radiológica en situaciones de emergencia;
- Realizar investigación y seguimiento de incidentes, accidentes y emergencias radiológicas presentados;
- Generar procesos de capacitación para el personal ocupacionalmente expuesto y el personal de atención de emergencias para la posible atención;
- Entre otras acciones que permiten cumplir las garantías de seguridad y protección.

Según el artículo 77. El responsable de la Protección Radiológica, que bien puede ser el mismo titular de la autorización, deberá cumplir con formar al personal ocupacionalmente expuesto sobre normas y procedimientos de seguridad, comprobando sus conocimientos mediante la realización de ejercicios prácticos de emergencia, acudir a la instalación para la coordinación y supervisión de las operaciones en caso de un suceso radiológico.

De acuerdo con el artículo 166 de la resolución 18-1434 de 2002 del Ministerio de Minas y Energía, la evaluación de la seguridad es considerada por la norma, como uno de los pasos más importantes para la elaboración e implementación de planes de emergencias radiológicos; dando continuidad al tema el artículo 167 refiere los ítems a incluir dentro de la evaluación de la seguridad, así:

- La naturaleza y magnitud de las exposiciones potenciales y su probabilidad;
- Los límites y condiciones técnicas de funcionamiento de la fuente;
- Las posibles modalidades de fallo de las estructuras, sistemas, componentes y procedimientos con la protección o seguridad, aisladamente o en combinación, o de otras de exposición potenciales, y las consecuencias de tales fallos;
- Las posibilidades de alteración de la protección o seguridad a causa de cambios en el medio ambiente;
- Las posibilidades de error en los procedimientos operacionales relacionados con la protección o seguridad, y las consecuencias de tales errores;
- Las consecuencias, en lo que atañe a la protección y seguridad, de toda modificación propuesta.

Según el artículo 175 de la resolución 181434, la norma establece que si conforme con la evaluación de seguridad realizada, entre los resultados existe la posibilidad de un accidente que afecte a los trabajadores, miembros del público, pacientes, entre otros; se deberá implementar un Plan de Emergencia, con el fin de mantener en todo momento la protección y seguridad de cualquier persona que se pueda ver afectada.

Así mismo estos planes de emergencias deberán cumplir con un contenido indicado en el artículo 191, así:

- Características generales de la actividad que se realiza;
- Descripción de los locales y/o áreas de la instalación en los que se llevan a cabo trabajos con fuentes de radiación ionizante;
- Descripción de posibles accidentes o situaciones anormales y sus consecuencias;
- Acciones protectoras inmediatas que tomar por el personal, ante la ocurrencia de una situación de emergencia;
- Los niveles de intervención basados en las recomendaciones de la Autoridad Reguladora, o su delegada, correspondientes a las acciones protectoras;
- Medidas con vistas a garantizar el apoyo exterior en caso de emergencias radiológicas;
- Organización y orden de ejecución del aviso a todas las Entidades Intervinientes;
- Medidas para garantizar la mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes previstos;
- Apoyo logístico material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público;
- Participación del personal responsable de protección radiológica y de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la instalación en los trabajos de mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes radiológicos previstos;
- Programa de preparación del personal para dar respuesta a las emergencias radiológicas;
- Responsabilidad de la administración de la instalación en la ejecución de las medidas para prever y eliminar los aspectos de los accidentes radiológicos;
- Criterios para poner fin a cada acción protectora;
- Descripción de las disposiciones relativas a información de los trabajadores y el público en caso de accidentes.

De acuerdo con los artículos 60 y 62 de la resolución descrita, los titulares de la autorización deberán articular todas sus actividades para la atención de emergencias radiológicas con las autoridades intervinientes. Así mismo estos últimos se deberán encargar de preparar planes generales para la coordinación y ejecución de las medidas necesarias para apoyar las acciones protectoras consignadas en los planes de emergencias radiológicas, además de cuidar de que se elaboren planes de acción reparadora para los emplazamientos.

Finalmente, según artículo 188, «el Gobierno Nacional, en el marco del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, deberá determinar por anticipado para las situaciones de exposición de emergencia, la distribución de las funciones de gestión de las intervenciones entre la Autoridad reguladora o su delegada, las entidades intervinientes nacionales y locales, así como los titulares de registro o los titulares de licencia» (Resolución 181434, 2002).

De acuerdo con el enunciado anterior, se debe tener en cuenta que todas las medidas asociadas a la gestión del riesgo (en este caso riesgo radiológico), deberán estar bajo los lineamientos dados por el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo (anteriormente Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres). Dichos planes de emergencia deberán ser preparados por las entidades intervinientes y los titulares de licencia, por separado, pero mutuamente relacionados, y que especifiquen como se cumplirá.

Resolución 180052 de 2008

La resolución 180052 es “por la cual se adopta el sistema de categorización de las fuentes radiactivas” (Resolución 180052, 2008).

Como se evidenció en la resolución 181434, es necesario contar con información de base que permita realizar una evaluación de seguridad adecuada, y por consiguiente poder optimizar la formulación de los planes de emergencia radiológicos. El sistema de categorización de fuentes radiactivas permite en primera instancia, establecer la peligrosidad que tienen dichas fuentes para la salud humana, asociando además un nivel de riesgo radiológico según sean sus efectos. El sistema de categorización de fuentes radiactivas es propuesto por el Organismo Internacional de Energía Atómica, razón por la cual se presentará en más detalle en el marco teórico.

Tal y como lo indica la norma en su artículo tercero, y de acuerdo con el interés principal del presente trabajo, «el sistema de categorización servirá de base para el establecimiento de medidas de control regulatorio relacionadas con la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas en actividades tales como:

- Optimización de las decisiones acerca de las prioridades reguladoras;
- Optimización de las medidas de seguridad física para las fuentes radiactivas, incluyendo los usos malintencionados de las mismas;
- Planificación y respuesta a situaciones de emergencia radiológica.»

De acuerdo con el Anexo General de la resolución 180052, el artículo segundo establece que el alcance de la presente categorización está dado exclusivamente para las fuentes radiactivas, en especial las usadas en medicina, agricultura, industria, y/o educación; y que no es aplicable a bultos (transporte de material radiactivo), equipos generadores de radiación, y materiales nucleares.

Resolución 90874 de 2014

La resolución 90874 es «por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas» y cuyo objeto es «Establecer los requisitos y los procedimientos administrativos aplicables en los procesos de solicitud y expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones a las instalaciones radiactivas asociadas con la utilización de fuentes radiactivas, selladas o no selladas, de acuerdo con los estándares internacionales de clasificación de este tipo de fuentes» (Resolución 90874, 2014).

La norma se compone de 7 títulos y 2 anexos que permiten identificar los mecanismos de solicitud de licencia para el manejo y uso del material radiactivo, dando las indicaciones sobre los requisitos, documentación⁴ a entregar a la Entidad Reguladora y los pasos para su aval. De acuerdo con el interés de este trabajo, se hace referencia a los artículos y menciones relacionadas con la Evaluación de la Seguridad y el Plan de Emergencias Radiológicas, partiendo del hecho, que el buen cumplimiento de toda la norma, y no solo de estos apartes únicamente, va a contribuir a la prevención de situaciones de riesgo.

La norma, como se mencionó anteriormente, hace referencia a los documentos que se deben presentar como requisito para la asignación de licencia de manejo de material radiactivo. Dada la naturaleza del presente trabajo final de maestría, conviene dar una revisión más profunda a los requisitos mencionados para la Evaluación de la Seguridad y Plan de Emergencias Radiológicas, elementos que se especifican en los ítems VIII y IX respectivamente del Anexo 2 de la norma.

Evaluación de la Seguridad.

Esta evaluación deberá ser lo más específica posible, incluyendo los aspectos que permitan determinar la magnitud de los riesgos radiológicos, la frecuencia en la que se pueden presentar dichos escenarios de

⁴ Artículos 22 y 32 de la Resolución 90874/2014

riesgo, el nivel de complejidad de las actividades y los centros en los cuales se realizan, además de variables que pueden afectar directamente el análisis.

Las personas que tengan o estén solicitando las licencias y autorizaciones, deberán realizar evaluaciones de seguridad que estén conformes a la protección y seguridad radiológica sobre las fuentes adscritas, lo anterior con el fin de:

1. «Determinar en qué formas podrían producirse exposiciones normales y potenciales, teniendo en cuenta los efectos de sucesos externos a las fuentes, así como los sucesos que afecten directamente a las fuentes y al equipo conexo.» Para dar cumplimiento, la norma postula que dicha identificación se debe realizar mediante metodologías estándar, que permitan identificar los errores humanos, fallas de equipos e incluso sucesos externos que puedan desencadenar emergencias radiológicas. Entre las metodologías se encuentran: Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMEF), Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP), Análisis Preliminar de Peligros.
2. «Determinar la magnitud prevista de las exposiciones normales y, en la medida que sea razonable y práctico, estimar la probabilidad y la magnitud de las exposiciones potenciales.» Cada magnitud de exposición deberá estar asociada a un suceso iniciador.
3. «Evaluar la calidad y la amplitud de las disposiciones en materia de protección y seguridad. Se deberá describir para cada suceso iniciador las barreras de seguridad existentes para prevenir o mitigar los accidentes». Se deberá realizar así mismo un examen crítico sistemático, correspondiente al ya mencionado en la Resolución 181434, específicamente en el artículo 167.

En general la evaluación de seguridad deberá incluir la identificación de los sucesos iniciadores y las medidas para prevenir, detectar y controlar la situación; además de tener la clasificación para dichos sucesos, de acuerdo con su frecuencia de ocurrencia, la robustez de las barreras y la severidad de las consecuencias.

Plan de Emergencias Radiológicas

Según la normativa, el plan de emergencias radiológicas deberá formularse basándose en la evaluación de seguridad, estimando los posibles escenarios y sus consecuencias; las responsabilidades del personal encargado de la atención, al momento de presentarse un accidente o situación de emergencia. Es importante que el plan de emergencias incluya la identificación de los escenarios de riesgo radiológico (sucesos iniciadores), medidas de prevención y mitigación, protocolos de atención y respuesta a las

emergencias, información difusión para quienes podrían verse afectados por alguna situación y la notificación a las entidades reguladoras.

El plan debe incluir los siguientes capítulos:

1. Bases de planificación: en este capítulo se definen los criterios para la implementación del plan de emergencia; medidas de notificación y participación de las entidades intervinientes; medidas de protección y sobre gestión de accidentes.
2. Organización de la respuesta: contiene el organigrama, o estructura organizativa de la instalación en relación con la respuesta a las emergencias radiológicas, definiendo responsabilidades del personal interno y externo a la instalación.
3. Operaciones: en este capítulo se hace referencia a como se realiza la respuesta ante a las emergencias y mecanismos de acción. Contiene además el componente de evaluación de la categoría de la amenaza⁵, caracterización de escenarios de riesgo radiológico, procedimientos de activación y notificación, mecanismos de coordinación de la emergencia, mecanismos de información al público y personas que se puedan ver afectadas por la situación.
4. Capacitación: Tiene como propósito, detallar el programa de capacitación para el personal que se encargará de la respuesta a las emergencias. Se incluyen en este capítulo los simulacros y ejercicios, actividades de capacitación que se planifiquen y las actividades de evaluación de desempeño.

Finalmente, la norma indica que la instalación o práctica deberá contar en todo momento con una persona en el emplazamiento con la autoridad y responsabilidad de clasificar una emergencia radiológica, dar inicio las acciones de respuesta, notificar a quien corresponde fuera del emplazamiento, proporcionar información necesaria para la respuesta eficaz.

En la Tabla 2-2 se presenta un resumen de las normas enunciadas anteriormente y que están relacionadas con las emergencias radiológicas.

⁵Para la realización de esta evaluación se recomienda utilizar el documento Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, Colección normas de seguridad del OIEA.

Tabla 2-2: Normograma Ministerio de Minas y Energía

Norma	Descripción	Artículos y anexos de interés en emergencias radiológicas
Resolución 181434 del 5 de diciembre de 2002	Por el cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica	Artículos 21, 33, 35, 39, 48, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 65, 98, 144, 165, 166, 167, 173, 174, 175, 183, 184, 188, 189, 191, 192, 193, 194, 196, 197, 198, 199, 200, 201.
Resolución 180052 del 21 de enero de 2008	Por la cual se adopta el sistema de categorización de las fuentes radiactivas	Artículo primero. Artículo tercero. Anexo General
Resolución 98074 del 12 de agosto de 2014	Por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas.	Artículos 14, 22, 32, 34, 44. Anexo I. Anexo II: específicamente los títulos VIII y IX.

2.2 Recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica

Desde 1960 Colombia es uno de los estados miembros del OIEA, mediante la Ley 16 de 1960, “Por la cual se aprueba el Estatuto del Organismo Intercontinental de Energía Atómica, suscrito en la Ciudad de New York el 26 de octubre de 1956”, Colombia adquiere derechos y deberes aplicables en relación con el manejo de la Energía Atómica en todo su territorio, generando así recomendaciones que permiten que dicha energía sea usada en ambientes que contribuyan al desarrollo de la paz.

A lo largo de su trayectoria, el OIEA ha generado investigaciones, estudios académicos, y una serie de contenidos científicos aplicables a los países que lo conforman, aportando así metodologías para su quehacer en torno a la energía nuclear, prevaleciendo siempre la seguridad y protección nuclear. Por lo anterior, y a razón de mantener en todo momento la seguridad y protección de las personas y el ambiente, se han desarrollado diversas colecciones y normas de seguridad, que ayudan a los gobiernos a promover estrategias de mejora continua, además de entregar material académico específico en las diversas áreas que se pueden desarrollar en temas asociados a la energía nuclear y radiaciones ionizantes.

Entre las publicaciones más importantes del OIEA está la **Colección de Normas de Seguridad**, colección en la que se hace referencia a la seguridad nuclear, la seguridad radiológica, la seguridad en el transporte y la seguridad de los desechos. A su vez dicha colección se proyecta en tres categorías de documentos: Nociones fundamentales de seguridad, Requisitos de seguridad y Guías de seguridad,

abarcando así todas las áreas que están de alguna forma involucradas con el uso de energía nuclear y radiaciones ionizantes.

- Las Nociones fundamentales de Seguridad hacen referencia a los objetivos, conceptos y principios básicos de seguridad y protección en el desarrollo y la aplicación de la energía nuclear con fines pacíficos.
- Los Requisitos de seguridad indican los requisitos que hay que cumplir para garantizar la seguridad, rigiéndose por los principios enunciados en las Nociones Fundamentales de Seguridad.
- La Guías de seguridad recomiendan acciones, condiciones o procedimientos para cumplir con los requisitos de seguridad.

Para el año 1997, el OIEA presentó el primer documento que relacionaba el método para el desarrollo de la preparación de la respuesta a emergencias nucleares o radiológicas, abriendo la puerta para la implementación de procesos de formación en emergencias nucleares y/o radiológicas, formulación de planes de emergencia que permitan identificar las posibles amenazas y preparar los niveles de operación y respuesta de acuerdo con cada una de las amenazas. De esta manera, hoy en día el OIEA cuenta con una Colección de Seguridad específica para la Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, y con la Colección de Preparación y Respuesta para casos de Emergencia del OIEA.

Entre los documentos a resaltar para el desarrollo del presente trabajo, están:

- Categoría Requisitos de Seguridad:
 - Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica (2004).
- Categoría Guías de Seguridad:
 - Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas (2010)
 - Criterios aplicables a la preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica (2013)
- Otras categorías de la colección de Preparación y Respuesta para casos de Emergencia del OIEA:
 - Manual para primeros actuantes ante emergencias radiológicas (2007)
 - Capacitación en preparación y respuesta en caso de emergencia radiológica (2009)
 - Clasificación de las fuentes radiactivas (2009)

-
- Método para elaborar disposiciones de respuesta a emergencias nucleares o radiológicas (2009).
 - Cantidades peligrosas de materiales radiactivos (Valores D) (2010).
 - Enseñanzas extraídas de la respuesta a emergencias radiológicas 1945 – 2010 (2014).
 - Método para la elaboración de una estrategia y un plan de comunicación para casos de emergencia nuclear o radiológica (2016).

3. Elaboración del formato aplicable al plan de emergencias radiológicas

3.1 Descripción de los componentes del formato basados en la normativa colombiana y recomendaciones internacionales.

Para la elaboración del formato aplicable a la formulación del plan de emergencias radiológicas (PER), el cual se relaciona en el Anexo A, fue necesario identificar los requisitos y contenidos sugeridos por la normativa colombiana, como la Ley 1523 de 2012 y las Resoluciones 181434/2002 y 90874/2014, al igual que revisar las recomendaciones dadas por el OIEA asociadas al tema en cuestión.

En la Tabla 3-1 se relacionan los contenidos sugeridos de acuerdo con la normativa colombiana, y en la Tabla 3-5 se realiza un resumen de las recomendaciones para la formulación de los PER.

Tabla 3-1: Contenidos sugeridos por la normativa colombiana para los PER (Ley 1523, 2012; Resolución 181434, 2002; Resolución 90874, 2014)

Norma	Contenido sugerido
Ley 1523 de 2012	Los planes de emergencia deberán incluir, implícitamente: <ul style="list-style-type: none">• Conocimiento del Riesgo• Reducción del Riesgo• Manejo de Desastres
Resolución 181434 de 2002	Los planes de emergencia deberán incluir, como mínimo, los siguientes puntos, según proceda: <ul style="list-style-type: none">• Características generales de la actividad que se realiza;• Descripción de los locales y/o áreas de la instalación en los que se llevan a cabo trabajos con fuentes de radiación ionizante;• Descripción de posibles accidentes o situaciones anormales y sus consecuencias;• Acciones protectoras inmediatas a tomar por el personal, ante la ocurrencia de una situación de emergencia;• Los niveles de intervención basados en las recomendaciones de la Autoridad Reguladora, o su delegada, correspondientes a las acciones protectoras;• Medidas con vistas a garantizar el apoyo exterior en caso de emergencias radiológicas;

Norma	Contenido sugerido
Resolución 181434 de 2002	<ul style="list-style-type: none"> • Organización y orden de ejecución del aviso a todas las Entidades Intervinientes; • Medidas para garantizar la mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes previstos; • Apoyo logístico material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público; • Participación del personal responsable de protección radiológica y de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la instalación en los trabajos de mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes radiológicos previstos; • Programa de preparación del personal para dar respuesta a las emergencias radiológicas; • Responsabilidad de la administración de la instalación en la ejecución de las medidas para prever y eliminar los aspectos de los accidentes radiológicos; • Criterios para poner fin a cada acción protectora; • Descripción de las disposiciones relativas a información de los trabajadores y el público en caso de accidentes.
Resolución 90874 de 2014	<p>El PER deberá contener los siguientes capítulos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bases de la planificación; • Organización de la respuesta; • Operaciones; • Capacitación.

La propuesta del formato del plan de emergencias radiológicas surge de la necesidad de establecer condiciones de seguridad adecuadas para la identificación y atención de emergencias radiológicas, situaciones que pongan en riesgo la integridad de las personas (que puedan llegar a tener algún tipo de contacto con material radiactivo). De igual manera se busca que se estandaricen los contenidos de dichos planes, facilitando la implementación de actividades, protocolos y procedimientos enfocados a emergencias radiológicas en los servicios de medicina nuclear.

Partiendo entonces de la motivación indicada, la propuesta del contenido del formato en mención está ligada directamente a los criterios mínimos determinados por la normativa colombiana, abarcando los temas indicados tanto por la Ley 1523/2012 como por las Resoluciones 181434/2002 y 90874/2014. Por lo anterior se contempló en primera instancia que el plan de emergencias radiológicas debe incluir los tres procesos de la gestión del riesgo en forma implícita, entendiendo cada uno de los procesos de la siguiente manera:

Tabla 3-2: Procesos de la gestión del riesgo de desastres

Ley 1523/2012	
	Conocimiento del riesgo: hace referencia a la identificación de escenarios de riesgo, análisis y evaluación de éstos, su monitoreo y seguimiento y los mecanismos de comunicación para promover la conciencia sobre el riesgo.
	Reducción del riesgo: acciones enfocadas a modificar o disminuir las condiciones de riesgo (prevención del riesgo). Así mismo se contempla en la reducción del riesgo todas las medidas de mitigación y prevención que se adoptan previamente para reducir la amenaza, la exposición o disminuir la vulnerabilidad en el momento de presentarse la emergencia.
	Manejo de desastres: preparación para la respuesta a emergencias la ejecución de la respuesta y la recuperación.

Contextualizando la Tabla 3-2 con la documentación requisito para la autorización y licenciamiento para el uso de material radiactivo, Resolución 90874 del 2014 del Ministerio de Minas y Energía, se puede considerar que documentos como memoria descriptiva de la instalación, manual de protección radiológica y la evaluación de seguridad abarcan temas tanto del conocimiento del riesgo como de la reducción del riesgo; por otra parte, el manual de procedimientos contempla no solo la reducción del riesgo mediante la formulación de procedimientos de prevención y mitigación, sino que se proyecta hacia el manejo de desastres, mediante la formulación de procedimientos para la atención de emergencias.

Acogiendo esta estructura, el plan de emergencias radiológicas se compone de tres ítems. No obstante, se debe tener en cuenta el contenido sugerido por la Resolución 90874/2014, incluyendo bases de planificación, organización de la respuesta, operaciones y capacitación. Vinculando los conceptos de la Resolución 90874 con la ley 1523/2012, se genera una primera estructura, así:

Tabla 3-3: Agrupación sugerida de contenidos propuestos por la Ley 1523 y la Resolución 90874

Ley 1523/2012	Resolución 90874
Conocimiento del Riesgo	Operaciones: <ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de la categoría de la amenaza. - Evaluación de Seguridad
Reducción del Riesgo	Capacitación: <ul style="list-style-type: none"> - entrenamientos (generales y específicos) del personal; - simulacros y ejercicios (teóricos, prácticos, parciales e integrales); - Alcance y la frecuencia de la capacitación; - Todas las actividades de capacitación que se planifiquen, y las actividades para evaluar el desempeño del personal involucrado

Ley 1523/2012	Resolución 90874
Manejo de Desastres	Bases de Planificación: <ul style="list-style-type: none"> - En este capítulo deberán ser descritos los criterios que se utilizarán para implementar el plan de emergencias. - Definir los mecanismos de notificación y participación de las entidades interventoras, - Definir las medidas de protección y el momento en el que deberán ser aplicadas.
	Organización de la respuesta: <ul style="list-style-type: none"> - Deberá contener la descripción de la estructura organizativa de la instalación para dar respuesta a una situación de emergencia radiológica, precisando las líneas de autoridad, roles y responsabilidades de cada individuo y/o institución interviniente. - Deberá establecer los mecanismos de interacción entre los intervinientes.
	Operaciones: <ul style="list-style-type: none"> - Medidas o acciones de respuesta; - Procedimiento de notificación; - Acciones para activar la estructura de emergencia y coordinación entre todos los involucrados en la respuesta; - Manera en que se declara el fin de las acciones de emergencia y cómo se realiza la recuperación; - Mecanismos de información e instrucción del público, cuando esto sea considerado oportuno por el regulador; - Acciones para garantizar el mantenimiento de los medios y equipamiento para la respuesta a la emergencia.

Debido a que parte de las actividades propuestas en el capítulo de operaciones, indicados por la Resolución 90874/2014, hacen parte de dos de los procesos de la gestión del riesgo. Estos son distribuidos de acuerdo con la necesidad identificada y así lograr dar continuidad a lo planteado por la Ley 1523/2012. De esta manera es posible tener una estructura del plan de emergencias radiológicas de acuerdo con el momento, es decir antes, durante y después de la emergencia, permitiendo un seguimiento cronológico de las actividades según corresponda la situación.

Partiendo de la Tabla 3-3, se integran a ésta los puntos indicados en la Resolución 181434/2002, de manera que, para cada uno de los procesos de la gestión del riesgo (ley 1523/2012) y los capítulos propuestos por la Resolución 90874/2014 se asocian dichos puntos, teniendo mayor alcance y precisión en la formulación de los planes de emergencias radiológicas. En la Tabla 3-4 se plantea la asociación e integración de todos los puntos planteados.

Tabla 3-4: Agrupación sugerida de contenidos propuestos por la Ley 1523 y las Resoluciones 90874/2014 y 181434/2002

Ley 1523/2012	Resolución 90874/2014		Resolución 181434/2002
Conocimiento del Riesgo	Memoria descriptiva de la instalación		<ul style="list-style-type: none"> • Características generales de la actividad que se realiza • Descripción de los locales y/o áreas de la instalación en los que se llevan a cabo trabajos con fuentes de radiación ionizante;
	Operaciones	Evaluación de la categoría de la amenaza. Evaluación de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción de posibles accidentes o situaciones anormales y sus consecuencias;
Reducción del Riesgo	Capacitación	Los tipos de entrenamientos (generales y específicos) del personal.	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de preparación del personal para dar respuesta a las emergencias radiológicas.
		Los tipos de simulacros y ejercicios (teóricos, prácticos, parciales e integrales).	
		El alcance y la frecuencia de la capacitación.	
		Todas las actividades de capacitación que se planifiquen, y las actividades para evaluar el desempeño del personal involucrado.	
Manejo de Desastres	Bases de Planificación	Criterios que se utilizarán para implementar el plan de emergencias.	NA
		Definir los mecanismos de notificación y participación de las entidades interventoras.	<ul style="list-style-type: none"> • Organización y orden de ejecución del aviso a todas las Entidades Intervinientes.
		Cuáles serán las medidas de protección y en qué momento deberán ser aplicadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Acciones protectoras inmediatas que tomar por el personal, ante la ocurrencia de una situación de emergencia; • Los niveles de intervención basados en las recomendaciones de la Autoridad Reguladora, o su delegada, correspondientes a las acciones protectoras;
		NA	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo logístico material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público.

Ley 1523/2012	Resolución 90874/2014		Resolución 181434/2002
	Organización de la respuesta	Deberá contener la descripción de la estructura organizativa de la instalación para dar respuesta a una situación de emergencia radiológica, precisando las líneas de autoridad, roles y responsabilidades de cada individuo y/o institución interviniente.	<ul style="list-style-type: none"> Responsabilidad de la administración de la instalación en la ejecución de las medidas para prever y eliminar los aspectos de los accidentes radiológicos
		Deberá establecer los mecanismos de interacción entre los intervinientes.	NA
	Operaciones	Medidas o acciones de respuesta.	<ul style="list-style-type: none"> Medidas para garantizar la mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes previstos; Medidas con vistas a garantizar el apoyo exterior en caso de emergencias radiológicas. Participación del personal responsable de protección radiológica y de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la instalación en los trabajos de mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes radiológicos previstos;
		Procedimiento de notificación.	NA
		Acciones para activar la estructura de emergencia y cómo se coordina entre todos los involucrados la respuesta.	NA
		Manera en que se declara el fin de las acciones de emergencia y cómo se realiza la recuperación.	<ul style="list-style-type: none"> Criterios para poner fin a cada acción protectora;
		Mecanismos de información e instrucción del público, cuando esto sea considerado oportuno por el regulador.	<ul style="list-style-type: none"> Descripción de las disposiciones relativas a información de los trabajadores y el público en caso de accidentes.
		Acciones para garantizar el mantenimiento de los medios y equipamiento para la respuesta a la emergencia.	NA

Entre las publicaciones del OIEA, se puede considerar como la más relevante, el documento titulado **Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica**, publicación que se encuentra en la categoría de Requisitos de Seguridad. Estas publicaciones tienen carácter de recomendación, por lo que carecen de carácter regulatorio, no obstante, se espera que sean implementadas por los países miembros y, que se incluyan en los procesos de preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica (específicamente en los planes de emergencias radiológicas). Se debe comprender que los planes de emergencias radiológicas hacen parte integral de la preparación, ya que es en estos planes donde se consignan las acciones a ser implementadas antes, durante y después de situaciones asociadas a la exposición radiológica de emergencia (OIEA, 2004).

La publicación preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, comprende 4 secciones principales:

- a) Principios y objetivos asociados a la preparación y la respuesta;
- b) Requisitos generales, en la que se indican las responsabilidades básicas y la evaluación de amenazas radiológicas;
- c) Requisitos funcionales, en la que se hace referencia a las medidas de gestión y operación de emergencia, determinación, notificación y activación; medidas de mitigación, medidas protectoras urgentes; información, instrucciones y avisos al público; protección de los trabajadores de emergencia; evaluación de la fase inicial; gestión de la respuesta médica; necesidad de mantener informado al público; contramedidas en la agricultura, en la ingestión y medidas protectoras a largo plazo; mitigación de consecuencias no radiológicas y realización de operaciones de recuperación.
- d) Requisitos infraestructurales, en el que se indican las consideraciones generales; la autoridad; la organización; la coordinación de la respuesta a emergencias; planes y procedimientos y el apoyo logístico e instalaciones.

La inclusión de todos los ítems que se relacionan en las secciones se determina de acuerdo con las necesidades de la instalación y del tipo de material radiactivo que se está manejando en el servicio (OIEA, 2004).

Tabla 3-5: Contenido sugerido por publicaciones del OIEA para los PER (OIEA, 2010; OIEA, 2004; OIEA, 2009)

Publicación del OIEA	Contenido sugerido
Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica (OIEA, 2004).	<p>Los planes de emergencia deberán incluir los siguientes puntos, según proceda:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Asignación de responsabilidades en lo relacionado con la ejecución de las funciones especificadas en la sección de requisitos fundamentales; 2. Identificación de las diversas condiciones de funcionamiento y de otro tipo... que pudieran originar la necesidad de una intervención; 3. Los niveles de intervención, correspondientes a las acciones protectoras pertinentes y el alcance de su aplicación, teniendo en cuenta los posibles grados de gravedad de los accidentes o las emergencias que pudieran sobrevenir; 4. Los procedimientos, incluidas las medidas en materia de comunicaciones, para ponerse en contacto con los organismos de respuesta pertinentes y para obtener la asistencia médica, policía y demás entidades pertinentes; 5. Una descripción de los métodos y la instrumentación utilizados para evaluar la emergencia radiológica y sus consecuencias en el emplazamiento y fuera de él; 6. Una descripción de las disposiciones relativas a información pública en caso de emergencia radiológica; 7. Los criterios para poner fin a cada acción protectora.
Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas (OIEA, 2010).	El plan de emergencias deberá contener un concepto de operaciones.
Método para elaborar disposiciones de repuesta a emergencias nucleares o radiológicas (OIEA, 2009).	<p>Este documento hace referencia a los diferentes niveles de los planes de emergencia, se presenta en este punto el modelo que se propone para los planes de emergencia de la instalación</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Introducción <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Objeto 1.2. Organizaciones participantes 1.3. Ámbito 1.4. Base jurídica 1.5. Planes y documentos conexos 2. Base de planificación <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Tipos de amenaza 2.2. Términos 2.3. Funciones y responsabilidades relativas a la respuesta 2.4. Organización de respuesta 2.5. Instalaciones de respuesta 2.6. Comunicaciones de respuesta 2.7. Compromisos en materia de logística/recursos 2.8. Planteamiento de las operaciones 3. Proceso de respuesta a las emergencias <ol style="list-style-type: none"> 3.1. Notificar, activar y solicitar la asistencia 3.2. Gestionar la emergencia 3.3. Llevar a cabo la mitigación 3.4. Tomar medidas protectoras urgentes

Publicación del OIEA	Contenido sugerido
	3.5. Proporcionar información, alertar y suministrar instrucciones al público 3.6. Proteger a los trabajadores de emergencia 3.7. Prestar asistencia médica y mitigar las consecuencias no radiológicas 3.8. Evaluar la fase inicial 3.9. Mantener informado al público 3.10. Adoptar contramedidas en la agricultura, en materia de ingestión y a largo plazo 3.11. Ejecución de las operaciones de recuperación 3.12. Financiar las operaciones 3.13. Mantener registros y gestionar los datos 4. Proceso de preparación para las emergencias 4.1. Autoridades y responsabilidades 4.2. Organización 4.3. Coordinación 4.4. Planes y Procedimientos 4.5. Apoyo e instalaciones logísticas 4.6. Entrenamiento 4.7. Ejercicios 4.8. Garantía de calidad y mantenimiento de los programas.

Previamente se ha presentado una propuesta del contenido del plan de emergencias radiológicas (Tabla 3-4), a la luz de la normativa colombiana. No obstante, de acuerdo con la revisión de las referencias del OIEA, y teniendo en cuenta que éstas entregan una línea base para la elaboración no solo de los planes de emergencias radiológicas, sino estándares de capacitación y atención de emergencias radiológicas para los diferentes sectores que hacen uso del material radiactivo; se realiza la integración tanto del contenido de la Tabla 3-4 y la Tabla 3-5, consolidando así toda la información correspondiente a los planes de emergencias radiológicas.

Considerando la inclusión de las recomendaciones del OIEA a la estructura propuesta, se observa que gran parte de éstas corresponden a lo solicitado por la normativa colombiana (en parte ya que las recomendaciones son aceptadas por los estados miembros del OIEA y usadas como base en la enunciación de la normativa), sin embargo, se asocia cada una de dichas recomendaciones al formato del plan de emergencias, como se muestra en la Tabla 3-6:

Tabla 3-6: Contenido sugerido para el plan de emergencias radiológicas por el OIEA

Capítulos propuestos	Recomendaciones del OIEA
1. Introducción	Se deberá integrar al plan de emergencias radiológicas una introducción en la que se relacionen el objeto, base jurídica, ámbito de aplicación (OIEA, 2009).
2. Caracterización del servicio de medicina nuclear	La caracterización del servicio de medicina nuclear, en la cual se logre la identificación de las diversas condiciones de funcionamiento que pudieran originar la necesidad de una intervención (OIEA, 2004).
3. Caracterización de los escenarios de riesgo	<p>De acuerdo con las condiciones identificadas en la caracterización del servicio, identificar qué pudiera generar la necesidad de una intervención (OIEA, 2004).</p> <p>El plan de emergencias deberá contar con la descripción de los métodos y la instrumentación utilizados para evaluar la emergencia radiológica y sus consecuencias en el emplazamiento y fuera de él, enfocadas hacia la identificación de amenazas y evaluación de la seguridad (OIEA, 2009).</p> <p>Se consideran además la clasificación de las amenazas.</p>
4. Capacitación	Se debe incluir entrenamiento y ejercicios (OIEA, 2009).
5. Bases de planificación	<p>Se recomienda:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La asignación de responsabilidades en lo relacionado con la ejecución de las funciones asignadas; - Definir niveles de intervención, correspondientes a las acciones protectoras pertinentes y el alcance de su aplicación, teniendo en cuenta los posibles grados de gravedad de los accidentes o las emergencias que pudieran sobrevenir. - Los procedimientos, incluidas las medidas en materia de comunicaciones, para ponerse en contacto con los organismos de respuesta pertinentes y para obtener la asistencia médica, policía y demás entidades pertinentes. (preparación) <p>Una de las publicaciones del OIEA relaciona directamente el capítulo de bases de planificación, sin embargo, dado su contenido, parte de este será considerado como segmento de la organización de la respuesta, entre las recomendaciones acordadas para el capítulo 5, están:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Funciones y responsabilidades relativas a la repuesta - Instalaciones de respuesta - Compromisos en materia de logística/recursos. <p>Planteamiento de las operaciones.</p>
6. Organización de la respuesta	<p>Entre las recomendaciones dadas por el OIEA para las bases de planificación, y que se integran en el presente capítulo están:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Organización de la respuesta, - Comunicación de respuesta (OIEA, 2009)

Capítulos propuestos	Recomendaciones del OIEA
6. Organización de la respuesta	<p>Así mismo es importante incluir en este capítulo, el proceso de preparación para las emergencias, definiendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Autoridades y responsabilidades - Organización - Coordinación - Planes y procedimientos <p>Apoyo e instalaciones logísticas</p>
7. Operaciones – Implementación de la respuesta	<p>El plan de emergencias deberá contar con la descripción de los métodos y la instrumentación utilizados para evaluar la emergencia radiológica y sus consecuencias en el emplazamiento y fuera de él, enfocadas a la respuesta.</p> <p>Recomiendan además relacionar una descripción de las disposiciones relativas a información pública en caso de emergencia radiológica (OIEA, 2004).</p> <p>Como parte del proceso de respuesta a las emergencias, se sugiere incluir puntos como:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Notificar, activar y solicitar la asistencia, - Gestionar la emergencia - Llevar a cabo la mitigación - Tomar medidas protectoras urgentes - Proporcionar información, alertar y suministrar - Proteger a los trabajadores de emergencia - Prestar asistencia médica y mitigar las consecuencias no radiológicas - Evaluar la fase inicial - Mantener informar al público - Ejecución de las operaciones de recuperación <p>Mantener registros y gestionar los datos (OIEA, 2009).</p>
8. Mecanismos de seguimiento y control	<p>Incluir en los preparativos, la garantía de calidad y mantenimiento de los programas.</p>

La propuesta que se presenta tiene específicamente los capítulos determinados en la Resolución 90874/2014, así mismo se incluye implícitamente toda la base propuesta en la demás normativa colombiana y las recomendaciones del OIEA, así:

1. Introducción
2. Capítulo 1. Caracterización del servicio de medicina nuclear
3. Capítulo 2. Caracterización de los escenarios de riesgo
4. Capítulo 3. Bases de planificación
5. Capítulo 4. Capacitación de los procesos en atención a emergencias radiológicas
6. Capítulo 5. Organización de la respuesta a emergencias radiológicas
7. Capítulo 6. Operaciones – Implementación de la respuesta a emergencias radiológicas
8. Capítulo 7. Mecanismos de seguimiento y control

Finalizando de esta forma el contenido sugerido para el formato, se relaciona a continuación cada uno de los capítulos, su contenido y especificaciones, mostrando en cada uno el objetivo principal y la información fundamental a incluir.

3.2 Desarrollo por cada componente del formato

En este aparte se encuentra una descripción detallada de cada uno de los componentes que conforman el formato aplicable a Emergencias Radiológicas.

3.2.1 Introducción

Objetivo: Presentar las bases jurídicas del plan de emergencias radiológicas, el objetivo principal del plan y su alcance a nivel institucional.

Contenido básico: Normativa colombiana asociada a los planes de emergencias radiológicas

En la introducción será necesario incluir las bases jurídicas para la formulación del plan de emergencias radiológicas, por tal motivo es de importancia incluir las resoluciones 181434/2012 y 90874/2014 del Ministerio de Minas y Energía y las indicaciones de ésta para la planificación, decisiones y medidas que rigen la respuesta a emergencias radiológicas y convencionales. De igual manera se deberá contemplar la inclusión de los objetivos del plan y su alcance, planteando el interés en proteger la salud y mantener la seguridad del público.

3.2.2 Caracterización del servicio de medicina nuclear (Capítulo 1).

Objetivo: Realizar una presentación general del servicio de medicina nuclear, que incluya las condiciones generales del servicio como instalaciones, material radiactivo que se usa al interior del servicio, capital humano.

Contenido básico:

- 1) Descripción de locales y/o áreas de la instalación en los que se llevan a cabo trabajos con fuentes de radiación;
- 2) Equipos e instrumentación del servicio;
- 3) Capital humano del servicio
- 4) Características generales de las actividades del servicio de medicina nuclear.

Este capítulo tendrá un enfoque hacia la descripción del servicio de medicina nuclear, es decir la presentación de la instalación orientada hacia las condiciones de funcionamiento e instalaciones, además de presentar las características del servicio que permitan al personal interno y externo de la institución (que apoyará la respuesta ante emergencia), tener una visión del servicio, su operatividad e instalaciones. Si bien algunos de los ítems propuestos deberán estar en la Memoria descriptiva de la Instalación, como documento de referencia a entregar al Servicio Geológico Colombiano, dada la necesidad en torno a la atención de emergencias, se plantea la inclusión de éstos en el plan de emergencias radiológicas, toda vez que este debe ser un documento independiente, para la lectura del personal externo a la instalación e incluso para el personal de la Brigada de Emergencia (de existir en la instalación).

La caracterización del servicio incluye entonces, la descripción de las prácticas y procesos que se realizan, personal que trabaja en el servicio y las condiciones y distribución de las instalaciones asociadas; siendo estas condiciones las bases para la caracterización de los escenarios de riesgo en el servicio, y así establecer las bases para la implementación de acciones o medidas de mitigación y protección.

Se sugiere relacionar las prácticas médicas y no médicas, tipo de radionucleido usado y el responsable de la práctica. Finalmente, es importante incluir la descripción del capital humano que trabaja allí, de la organización y los conductos jerárquicos y de comunicación al interior de éste (OIEA, 2004).

Para lograr una caracterización suficiente del servicio de medicina nuclear, se debe considerar la siguiente información:

- Plano arquitectónico de la instalación con sus rutas de evacuación señaladas.
- Plano de clasificación de áreas y controles de acceso, especificando la localización de las zonas controladas, supervisadas y áreas colindantes.

- Diagrama descriptivo de la ubicación de las fuentes y de los flujos de material radiactivo.
- Plano del sitio de almacenamiento de las fuentes selladas en desuso o en proceso de gestión (Resolución 181434, 2002).

Adicionalmente, y para completar así las bases para la caracterización de los escenarios de riesgo, se sugiere incluir en este capítulo:

- Descripción del sistema eléctrico de emergencia, que deberá alimentar los servicios esenciales para la seguridad tal como: iluminación de emergencia, instrumentación y control.
- Descripción del sistema de detección y extinción de incendios, que proteja la integridad de la fuente de irradiación y de los dispositivos, equipos, sistemas y estructuras de seguridad (Resolución 181434, 2002).

Se debe incluir en este ítem las prácticas que se desarrollan en el servicio de medicina nuclear, entendiendo como práctica, las “actividades humanas que introducen fuentes de exposición adicionales a las fuentes existentes, de manera que aumenta la exposición o la probabilidad de exposición de personas” (OIEA, 2007), por lo anterior se consideran todas las prácticas que incluyen el uso de material radiactivo al interior del servicio, desde actividades de recepción y disposición de dicho material radiactivo, hasta las diferentes intervenciones médicas que allí se desarrollan con éste.

3.2.3 Caracterización de escenarios de riesgo radiológico (Capítulo 2)

Objetivo: Determinar de acuerdo con las prácticas que se desarrollan en el servicio de medicina nuclear, los niveles de riesgo radiológico.

Contenido básico:

- 1) Bases evaluación de la seguridad
 - Método Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMEF)
 - Método de la Matriz de Riesgo
- 2) Evaluación categoría de la amenaza
- 3) Responsabilidades de la administración de las instalaciones de las medidas para prever y eliminar los aspectos de los accidentes radiológicos.

En general un escenario de riesgo hace referencia a las condiciones y características propias de un evento y cuáles son las consecuencias sobre el ambiente, las personas y las instalaciones si se llegase a presentar. Para establecer estos escenarios de riesgo, es necesario realizar un diagnóstico sobre las amenazas

existentes y el nivel de vulnerabilidad presentado en las prácticas que requieren el uso de material radiactivo.

En el presente caso, en el que se desea realizar una caracterización de los escenarios de riesgo radiológico, se identifica que los escenarios a evaluar corresponden a los que se expresen mediante la emisión de radiación ionizante, específicamente en el servicio de medicina nuclear, por material radiactivo (fuentes abiertas). Así pues, para lograr dicha caracterización es necesario establecer lineamientos que permitan evaluar la seguridad y categorizar las amenazas, y de esta manera realizar una priorización.

La priorización de escenarios de riesgo es fundamental para establecer las acciones de mitigación o protección, y las acciones de reparación, que permitan desarrollar planes de acción específicos, tanto para su reducción como para la atención de emergencias radiológicas, de esta forma la Evaluación de Seguridad se comporta como un método para la clasificación de los escenarios de riesgo (sucesos iniciadores) de acuerdo con el nivel de consecuencias asociado.

La normativa colombiana indica que el plan de emergencias radiológicas debe basarse en la evaluación de seguridad realizada en el servicio; no obstante, también considera como parte fundamental de dicho plan, la categorización de las amenazas. En este punto es necesario entender que, al hablar de la evaluación de la seguridad, no se está generando una categorización de las amenazas, toda vez que esta categorización depende del nivel de peligrosidad de las fuentes usadas y no de los posibles accidentes. De acuerdo con lo mostrado en el capítulo 1 sobre Emergencias Radiológicas, se debe entender que mediante la clasificación del OIEA (OIEA, 2010), todas las emergencias radiológicas que se presenten en un servicio de medicina nuclear son de categoría III o IV; no obstante, a la luz de la categorización del riesgo, este varía de acuerdo con las condiciones de seguridad en el desarrollo de las prácticas, las consecuencias que se puedan desprender de su presentación y la probabilidad de ocurrencia.

3.2.3.1. Evaluación de la seguridad

La evaluación de la seguridad contempla a su vez la descripción de posibles accidentes anormales y sus consecuencias, y es considerada como parte esencial de la documentación a entregar al Servicio Geológico Colombiano. No obstante, debido al objetivo del presente trabajo al ofrecer un formato aplicable para los planes de emergencia, se determina su inclusión, ya que la evaluación de la seguridad es considerada como un paso esencial para la caracterización de los escenarios de riesgo.

La normativa colombiana indica que la evaluación de seguridad se efectúa con el fin de (Resolución 90874, 2014):

- Determinar en qué forma se pueden producir exposiciones, partiendo de efectos que se puedan presentar por sucesos externos, y que afectan directamente a las fuentes y al equipo conexo. Es decir, identificar los sucesos iniciadores de posibles accidentes, incluyendo fallos de equipos, errores humanos y sucesos externos. Para determinar dichos sucesos iniciadores, existen diversas metodologías, entre ellas: Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMEF), Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP), Análisis Preliminar de Peligros, criterios de expertos e incluso lecciones aprendidas en situaciones accidentales e incidentales. Sin embargo, algunas de las metodologías sugeridas fueron concebidas para procesos industriales productivos y se debe plantear una adaptación para radiaciones ionizantes.
- Determinar la magnitud prevista de las exposiciones normales y, de ser posible indicar las exposiciones potenciales. Descripción de la severidad de las consecuencias potenciales asociadas a cada uno de los sucesos iniciadores, consecuencias para los trabajadores y miembros del público de acuerdo con el efecto potencial. En este caso específico no se tienen en cuenta las barreras o medidas de seguridad previstas.
- Evaluar la calidad y la amplitud de las disposiciones en materia de protección y seguridad.

La evaluación de seguridad plantea entonces la caracterización de los escenarios de riesgo radiológico, mediante la identificación de sucesos iniciadores, severidad en las consecuencias, barreras de seguridad, y capacidad de detección.

De acuerdo con los resultados de la evaluación de la seguridad, es fundamental considerar la priorización de cada suceso iniciador para poder establecer las acciones protectoras, mitigadoras y reparadoras sobre estos (si las barreras de seguridad son insuficientes), y se presenta exposición incontrolada a material radiactivo.

Partiendo de las sugerencias para el desarrollo de la evaluación de la seguridad y riesgo, se presentan dos de las metodologías sugeridas por la normativa y la metodología de Matriz de Riesgo, no obstante, cada una de las metodologías plantea no solo la identificación de sucesos iniciadores, sino la determinación del nivel de riesgo asociado a cada uno de ellos bien sea de manera cuantitativa o cualitativa.

Método Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP): La metodología HAZOP (por sus siglas en inglés Hazard and Operability) se utiliza para la identificación de los riesgos asociados a procesos productivos y problemas de operación; las desviaciones en las condiciones de operación normal pueden entenderse como la base de esta metodología en al que se analiza el riesgo asociado y los problemas que

se pueden presentarse debido a dichas desviaciones. El método HAZOP se basa únicamente en dos variables, la frecuencia en la que se presentan los problemas y la criticidad de sus efectos. Es importante tener en cuenta que mediante este método se puede tener una línea base de los posibles problemas, ayudando así con la identificación de eventos que pueden causar consecuencias desfavorables no esperadas (Balderas Cañas, 2008).

Método Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMEF): Es considerada una herramienta de prevención de eventos y/o accidentes adversos; método en el cual se identifican fallas del proceso, de la organización o del sistema, y que no se centra en individuos; prioriza riesgos de manera cuantitativa y optimiza recursos. Este método además de ser uno de los propuestos por la normativa, es el sistema recomendado por el INVIMA (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos) en el contexto colombiano, en torno al Sistema de Gestión del Riesgo Clínico (Consuegra Mateus, 2015).

En esta metodología se considera la inclusión de la probabilidad de ocurrencia del fallo, los niveles de detección y la severidad del evento (consecuencias). Se presentará más adelante, la metodología completa para su aplicación en el servicio.

Método de la Matriz de Riesgo: El método de la matriz de riesgo, es un método que se aplica ampliamente en la industria; y que combina la frecuencia de un suceso iniciador, las consecuencias que se derivan de éste y la probabilidad de fallo de las barreras establecidas. Usando este método se puede obtener la clasificación en niveles del riesgo, más no se puede cuantificar numéricamente. Este método ha sido aplicado para la evaluación del riesgo en servicios de Radioterapia, bajo estudios realizados por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO-OIEA, 2012).

Con el ánimo de mostrar los diversos métodos para la evaluación de seguridad y riesgos, se presentan con mayor detalle en el Anexo B, los métodos de Análisis de modos y Efectos de Fallo y Matriz de Riesgo.

Para realizar la caracterización de los escenarios de riesgo radiológico se sugiere el uso del Método de la Matriz de Riesgo, dada la aplicación en servicios de Radioterapia y Servicios de medicina nuclear (Duménigo, Guerrero, López, & Paz, 2015); esta metodología permite tener una visión mucho más amplia acerca de los posibles sucesos iniciadores de incidentes y accidentes, así mismo permite tener una perspectiva sobre las acciones a tomar y dar información relevante para próximos capítulos; no obstante se sugiere una aproximación con el método AMFE.

A partir de la categorización de los escenarios de riesgo, y con base en los escenarios que de llegarse a presentar requieren una intervención de emergencia, se pueden clasificar de dos formas:

- Emergencias que se relacionan con una pérdida importante del grado de protección de las personas presentes en el servicio. Una vez se declare este tipo de emergencia, se debe adoptar medidas de mitigación sobre las consecuencias y proteger a las personas presentes en el servicio. Este tipo de emergencias no generan efectos fuera del servicio.
- Situaciones de alerta en el servicio, relacionada con una reducción indefinida o significativa del grado de protección del público las personas presentes en el servicio. Cuando se presentan este tipo de situaciones se deben adoptar medidas oportunas para evaluar y mitigar las consecuencias y aumentar las precauciones de respuesta.

3.2.3.2. Evaluación de la categoría de la amenaza

La evaluación de la seguridad se plantea como un punto importante para la caracterización de los escenarios de riesgo, tal y como se ha establecido previamente; sin embargo, es común que se deba desarrollar la categorización de las amenazas y determinar su relación directa con la peligrosidad de las fuentes que se usan en el servicio de medicina nuclear.

De acuerdo con la categorización dada por el OIEA (OIEA, 2004), las amenazas radiológicas que se pueden presentar en el servicio de medicina nuclear son las de categoría III y IV. Como ejemplos de categoría III se tienen transporte de material radiactivo al interior del servicio, malos procedimientos con los bultos, administración de radiofármacos para terapia metabólica, derrame de material radiactivo. Para las categorías IV se relacionan las siguientes: transporte de material radiactivo por fuera de la instalación, mal manejo de desechos radiactivos.

Tabla 3-7: Categorías de amenazas nucleares y radiológicas (OIEA, 2004)

Categoría de amenazas	Descripción
III	Instalaciones, como las de irradiación industrial, para las cuales se postulan sucesos que podrían dar lugar a que las personas reciban dosis, contaminación que exijan medidas protectoras urgentes en el emplazamiento o instalaciones semejantes en las que se hayan producido ese tipo de sucesos. La categoría III (a diferencia de la categoría II) no incluye instalaciones para las que se postulan sucesos, o en las que se han producido sucesos que podrían exigir medidas protectoras urgentes fuera del emplazamiento.

Categoría de amenazas	Descripción
IV	Actividades que pueden dar como resultado una emergencia nuclear o radiológica que podría exigir medidas protectoras urgentes en un lugar imprevisible. Se incluyen allí actividades no autorizadas, tales como las relacionadas con fuentes peligrosas obtenidas ilícitamente. Incluyen también el transporte y actividades autorizadas en las que intervienen fuentes móviles peligrosas tales como fuentes de radiografía industrial o satélites de potencia nuclear. La categoría IV representa el nivel mínimo de amenaza que se supone es de aplicación a todos los Estados y jurisdicciones.

No obstante, partiendo de la categorización de los escenarios de riesgo, las amenazas pueden asociarse en este punto a la radiación ionizante emitida y dosis, relacionada a su vez con la peligrosidad de las fuentes radiactivas usadas en el servicio de medicina nuclear (OIEA, 2007).

En la evaluación de seguridad y la caracterización de escenarios de riesgos en el presente trabajo, se presenta una ejemplificación de la estimación de dosis que pueden recibir los TOE, pacientes y público, derivados de un suceso iniciador para una secuencia accidental determinada. Se plantea la identificación de sucesos iniciadores como mecanismos de presentación de emergencias, se incluye en dicho análisis la frecuencia de presentación, probabilidad de fallo de barreras de seguridad y las consecuencias que se podrían presentar en pacientes, público y personal ocupacionalmente expuesto; información que finalmente es usada para establecer los niveles de riesgo y así determinar las medidas de preparación y respuesta (OIEA, 2004).

Si bien muchos de los aspectos para la implementación de medidas de protección y corrección han sido tenidos en cuenta a partir de la evaluación de la seguridad y caracterización de escenarios de riesgo, no se han considerado algunos aspectos de relevancia en torno a la presentación de emergencias, como la población en riesgo debido al tipo de amenaza, carácter y magnitud de las amenazas relacionadas con la radiación.

La evaluación de la amenaza se debe plantear de una forma que proporcione la base para para los requisitos asociados con la preparación y la respuesta, de esta forma se asignan categorías a las instalaciones y prácticas de acuerdo con las dos categorías de amenaza que figuran en la Tabla 3-7.

En la evaluación de la amenaza deben identificarse pues, las instalaciones, fuentes, prácticas, áreas dentro del emplazamiento, áreas fuera del emplazamiento y lugares para los cuales una emergencia radiológica exigiría:

- Medidas protectoras urgentes precautorias para evitar efectos deterministas graves en la salud manteniendo las dosis por debajo de aquellas para las cuales cabe esperar una intervención bajo cualquier circunstancia,
- Medidas protectoras urgentes para prevenir, en la medida de lo posible, los efectos estocásticos evitando las dosis, de conformidad con las normas nacionales.
- Protección de los trabajadores que respondan (participen en una intervención), de conformidad con las normas nacionales (OIEA, 2004).

3.2.3.3. Responsabilidades de la administración de las instalaciones de las medidas para prever y eliminar los aspectos de los accidentes radiológicos.

A partir de la matriz de riesgo realizada en la caracterización de los escenarios de riesgo, se determinan unas acciones de mitigación y eliminación de algunos de los sucesos iniciadores, el mejoramiento de las barreras de seguridad e incluso acciones que bajen los niveles de frecuencia en la presentación de éstos; por lo anterior es necesario determinar las responsabilidades directas para el personal que hace parte del servicio de medicina nuclear, incluso el personal administrativo deberá encargarse de actividades que mejoren la operación del servicio (OIEA, 2004).

Si bien muchos de los escenarios identificados no pueden ser cambiados, dadas las condiciones de presentación del suceso iniciador (por ejemplo, amenazas de emergencias convencionales, como sismos, incendios, etc.), se deben tener en cuenta las acciones para dar respuesta a dichos eventos en los que consideran la emisión de radiación ionizantes, dichas acciones también deben estar bajo la responsabilidad del personal adecuado.

3.2.4 Bases de planificación (Capítulo 3)

Objetivo: Establecer los niveles de referencia para la implementación de las acciones mitigadoras, protectoras y reparadoras, así como determinar los criterios para la implementación del plan de emergencias y la notificación a las entidades intervinientes.

Contenido básico:

- 1) Niveles de referencia
- 2) Medidas de protección y en qué momento deberán ser aplicadas
- 3) Criterios para implementar el plan de emergencias
- 4) Mecanismos de notificación y participación de las entidades interventoras

- 5) Apoyo logístico material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público.

Las bases de planificación se entienden como los niveles básicos por los cuáles se establecen las acciones de respuesta, así mismo éstas se encuentran estrechamente relacionadas con la caracterización de los escenarios de riesgo, toda vez que los resultados en esta última, deberán compararse con los niveles de intervención considerados por la normativa colombiana.

Tal y como se describieron anteriormente, las medidas protectoras, mitigadoras y reparadoras, corresponden a las acciones que se deben implementar para mantener las condiciones de seguridad radiológica mínimas, tanto en situaciones cotidianas y normales, como en situaciones de emergencia. No obstante, existe una diferencia que permite identificar qué tipo de acciones se deben ejecutar de acuerdo con el momento; así:

Las medidas mitigadoras son aquellas que se implementarán para garantizar la seguridad radiológica después de identificado el riesgo, puede decirse que las medidas mitigadoras están enfocadas a suplir necesidades relacionadas con las barreras y defensa de profundidad. Las medidas protectoras están enfocadas, como su nombre lo indica, a la protección de las personas al momento de presentarse la exposición de emergencia a radiaciones ionizantes. Son medidas que se toman en todo caso para mantener la integridad de las personas y evitar mayor exposición. Finalmente, las medidas reparadoras por su parte son las acciones de implementación inmediata al momento de sobrepasar los límites de dosis establecidos por el servicio, aplica tanto para exposiciones de emergencia como exposiciones crónicas.

3.2.4.1. Niveles de referencia

Como parte fundamental del presente capítulo está definir los niveles de referencia, los cuales determinan que tipo de acción es requerida. De acuerdo con la Resolución 18-1434 de 2002, los niveles de referencia se dividen en 4 categorías: nivel de registro, nivel de investigación, nivel de intervención y nivel de actuación. En general los niveles de referencia se establecen para reconocer el momento (de acuerdo con la dosis de radiación o contaminación superficial), en que se deben implementar medidas para evitar que dichas dosis, para el caso de los niveles de intervención, y tasa de dosis para los niveles de actuación, supongan un efecto negativo en la salud de las personas expuestas.

Para los niveles de investigación y de registro, se debe realizar un seguimiento y optimización de las prácticas para garantizar que los niveles de dosis en personal ocupacionalmente expuesto no superen los

límites establecidos; por otra parte, para los niveles de actuación y de intervención se deben establecer acciones protectoras y reparadoras (Resolución 181434, 2002).

La normativa colombiana define el nivel de actuación como el “nivel de la tasa de dosis o de la concentración de la actividad por encima del cual deberían adoptarse acciones reparadoras o acciones protectoras en situaciones de exposición crónica o de exposición de emergencia”; así mismo define el nivel de intervención como el “nivel de dosis evitable al alcanzarse, el cual se realiza una acción protectora o reparadora específica en una situación de exposición crónica o en una situación de exposición de emergencia” (Resolución 181434, 2002).

Realizada la caracterización de los escenarios de riesgo radiológico, se debe presentar una asociación de éstos con los niveles de referencia y de consecuencias, y de este modo establecer las acciones o medidas a implementar para dar respuesta a las secuencias accidentales correspondientes. La relación de los niveles de referencia y los escenarios de riesgo, deberán estar así mismo ligados a la severidad de los efectos o las consecuencias (según el método que se use para la caracterización de los escenarios de riesgo).

Si bien en relación con los niveles de referencia la autoridad reguladora propone los límites de dosis que no deben sobrepasarse, se debe tener en cuenta que cada instalación debe realizar una estimación de los valores operacionales de los límites de dosis derivados de las prácticas que desarrollan, y deben establecer los valores de los niveles de referencia, manteniendo la coherencia entre los tres conceptos (límites de dosis, valores operaciones y niveles de referencia).

3.2.4.2. Medidas de protección y en qué momento deberán ser aplicadas

Realizada la asociación de los escenarios de riesgo con los niveles de referencia, se proyecta la formulación de las acciones o medidas a tomar en el momento que dichos niveles sean superados, determinando además cuál es el objetivo y alcance de la acción (bien sea mitigadora, protectora o reparadora).

Las medidas de protección, además de establecer en qué momento deberán ser aplicadas, deben indicar la responsabilidad que tiene el personal del servicio para la aplicación de éstas, ante la ocurrencia de una situación de emergencia radiológica.

Los niveles de intervención basados en las recomendaciones de la autoridad reguladora, correspondientes a las acciones protectoras

En este punto es importante asociar:

- Las dosis individuales y colectivas que se han de evitar con la intervención; y
- Los riesgos para la salud, radiológicos y no radiológicos (OIEA, 2004).

La normativa colombiana, específicamente la Resolución 181434 del 2002, hace referencia a los niveles de actuación para los casos de exposición aguda, así:

Tabla 3-8: Niveles de actuación en dosis para el caso de exposición aguda, para órganos o tejidos (Resolución 181434, 2002)

Órgano o tejido	Dosis absorbida proyectada al órgano o tejido en menos de dos días (Gy).
Todo el organismo (médula ósea)	1
Pulmón	6
Piel	3
Tiroides	5
Cristalino	2
Gónadas	3

Nombre de la fuente: Resolución 181434 de 2002 del Ministerio de Minas y Energía

Es decir, que, al momento de alcanzar dichos niveles de dosis absorbida en un tiempo no mayor a dos días, las acciones deben ser inmediatas.

3.2.4.3. Criterios para implementar el plan de emergencias radiológicas

Se debe indicar cuales son los criterios que se tendrán en cuenta para implementar las acciones propuestas en el plan de emergencias; implementación que se asociará directamente a los niveles de referencia y la detección de la situación que genera la exposición a radiación ionizante.

3.2.4.4. Mecanismos de notificación y participación de las entidades interventoras

De acuerdo con los escenarios de riesgo identificados y las medidas protectoras y reparadoras establecidas para cada uno de éstos, se debe definir si es necesaria la intervención de personal externo al servicio de medicina nuclear, como brigadas de emergencias, organismos de socorro, autoridad reguladora entre otras entidades que sean necesarias para la atención de la emergencia.

Organización y orden de ejecución del aviso a todas las entidades intervinientes

- Asignar las responsabilidades al personal, de acuerdo con las acciones establecidas y de acuerdo con las funciones del perfil profesional.
- Definir si de presentarse alguna emergencia, cómo se establecerá el apoyo externo, de ser necesario.

3.2.4.5. Apoyo logístico material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público.

- Definir temas asociados con la logística y recursos, es decir, definir previamente la disposición del apoyo logístico al interior del servicio y relacionar los suministros necesarios para tal fin.

Se plante la revisión y adecuación de los dispositivos, instrumentos, suministros, equipos, sistemas de comunicación, instalaciones y documentación (como procedimientos, listas de comprobación, números telefónicos y manuales) que resulten adecuados. Estos elementos de apoyo deben estar ubicados o deben suministrarse de manera que sea posible utilizarlos eficazmente en las condiciones postuladas de la emergencia (OIEA, 2004).

3.2.5 Capacitación de los procesos en atención a emergencias radiológicas (Capítulo 4)

Objetivo: Establecer un plan de capacitación para el capital humano del servicio, enfocado hacia la preparación y atención de emergencias radiológicas.

Contenido básico: 1) Programa de preparación del capital humano para la respuesta a emergencias

Como parte fundamental de la gestión del riesgo al interior de los servicios de medicina nuclear, se contempla la inclusión de procesos de capacitación que complementen los perfiles profesionales del capital humano, procesos que permitan establecer los mecanismos de identificación de emergencias radiológicas, y su oportuna respuesta. Es importante que el programa de capacitación se considere paralelo a la formación al interior del servicio y se incluya en el componente de capacitación exigido por la normativa colombiana.

Como parte fundamental para el direccionamiento de los procesos de capacitación, se debe partir del hecho de que los primeros respondientes o actuantes ante las emergencias, generalmente hacen parte del capital humano asociado al servicio, e incluso se puede considerar como una responsabilidad dado su conocimiento en referencia al manejo de radiaciones ionizantes. Es así como los procesos de

capacitación integrados a ejercicios teóricos y prácticos (OIEA, 2009), permiten que el personal encargado de la atención de emergencias sea consciente de las decisiones a tomar y sus implicaciones, y de esta manera cumplir los objetivos del plan de emergencias radiológicas. Se requiere en este capítulo detallar los tipos de entrenamiento del personal, los tipos de simulacros y ejercicios (teóricos, prácticos, parciales e integrales) que complementarán las capacitaciones, el alcance y la frecuencia, y los mecanismos de capacitación y los métodos de evaluación de desempeño del personal (Resolución 90874, 2014). En todo caso, la capacitación está dirigida a la implementación de prácticas por parte de los responsables de la respuesta a emergencias, por tal motivo no solo se considera este tipo de actividades para el personal del servicio de medicina nuclear, sino que se incluirá también el personal de las brigadas de emergencias, si los centros médicos cuentan con ella.

La gestión de la capacitación del capital humano, deberá ser responsabilidad del titular de la licencia, garantizando que el personal encargado de la atención cuente con el conocimiento, tenga las capacidades y aptitudes para ésta. De igual manera el titular debe proveer el equipo que sea necesario para la atención de eventos adversos para el cumplimiento de los protocolos y procedimientos establecidos en el PER (OIEA, 2004).

3.2.5.1. Programa de preparación del capital humano para dar respuesta a las emergencias.

El programa de capacitación debe ser lo más claro posible, incluyendo en él los tipos de entrenamiento del capital humano, actividades de capacitación, actividades de evaluación, alcance y frecuencias de capacitación y aplicación de simulacros y ejercicios prácticos. Así mismo se debe considerar incluir capacitaciones tanto de orden gerencial como operativo.

En el Anexo D, se presenta una propuesta para el programa de formación del capital humano al interior del servicio de medicina nuclear, y en el Anexo E el ejemplo de implementación de un proceso de capacitación con estudiantes de la Maestría en Física Médica.

3.2.6 Organización de la respuesta a emergencias radiológicas (Capítulo 5)

Objetivo: Establecer los mecanismos para el cumplimiento de las acciones protectoras, mitigadoras y reparadoras, así como los procedimientos y protocolos para la atención de los escenarios de riesgo identificados.

- Contenido básico:**
- 1) Descripción de los sistemas, elementos y componentes con los que cuenta el servicio, para la atención de emergencias radiológicas
 - 2) Descripción de la estructura organizativa de la instalación para dar respuesta a una situación de emergencia radiológica, precisando las líneas de autoridad, roles y responsabilidades de cada individuo y/o institución interviniente.

En este capítulo se debe hacer referencia a la estructura organizativa de la instalación para dar respuesta a las situaciones de emergencia radiológica, indicando las líneas de autoridad, roles y responsabilidades de cada personal al interior del servicio de medicina nuclear; así mismo deberá establecer los mecanismos de interacción entre los intervinientes (OIEA, 2004).

En la organización de la respuesta, es relevante establecer las disposiciones necesarias para la atención de manera oportuna, gestionada, controlada, coordinada y eficaz en el lugar de los hechos (OIEA, 2004).

Establecer de acuerdo con el nivel de la emergencia radiológica al interior de servicio, el nivel de respuesta asignado, fijando responsables, recursos, entre otros; establecer el tipo de coordinación, activación e integración; las instalaciones y comunicaciones; indicar los procedimientos y planes, métodos y equipamiento utilizados para llevar a cabo las tareas comunes o integradas, así como definir en qué momento será necesario buscar apoyo e instalaciones logísticas para hacer frente a la emergencia (OIEA, 2004; OIEA, 2009).

Para una óptima organización de la respuesta o planeación de respuesta, es necesario describir los sistemas, elementos y componentes con los que cuenta el servicio para la atención de emergencias radiológicas, es decir, se deberá contar con un inventario de éstos (bien sean elementos exclusivos para la respuesta o si se usarán los habituales de las prácticas cotidianas).

Medidas con vistas a garantizar el apoyo exterior en caso de emergencias radiológicas.

Como se vio en capítulos previos, es necesario determinar en qué momento se requiere de la participación con las entidades intervinientes (como organismos de socorro, autoridad reguladora, e incluso la brigada de emergencias al interior del centro médico) y cuáles son los mecanismos de activación, no obstante en este punto se debe especificar cuáles son las medidas que garantizan el apoyo externo en casos de emergencias, si existe algún tipo de asociación y que acercamientos se han implementado con las entidades externas al servicio. En el caso de solicitar asistencia y ayuda a entidades externas, las acciones de éstas deben garantizar el cumplimiento de los objetivos del plan de emergencias

radiológicas, preservando siempre la vida y cumpliendo con todas las condiciones de seguridad y protección radiológica.

Los preparativos de la respuesta deben establecerse de acuerdo con la magnitud y naturaleza de la amenaza, inherente a la instalación o la actividad (OIEA, 2004).

3.2.7 Operaciones – Implementación de la respuesta a emergencias radiológicas (Capítulo 6)

Objetivo: Definir los mecanismos de respuesta a emergencias radiológicas, mediante el desarrollo de planes, protocolos y procedimientos; además de establecer la estructura operativa.

Contenido básico:

- 1) Evaluación y respuesta inicial
- 2) Medidas o acciones de respuesta
- 3) Planes y procedimientos; Procedimientos de notificación
- 4) Acciones para activar la estructura de emergencia y cómo se coordina entre todos los involucrados en la respuesta
- 5) Fin de las acciones de emergencia y recuperación
- 6) Acciones para garantizar el mantenimiento de los medios y equipamiento para la respuesta a emergencia (Resolución 90874, 2014).

En este capítulo se deben establecer los mecanismos de acción, planes y procedimientos para garantizar la atención inmediata en situaciones de emergencia, así mismo se debe incluir la asignación de responsabilidades, facultades y medidas de coordinación en todas las fases de respuesta.

Como parte integral de la atención de emergencias radiológicas, se debe considerar la atención médica, tanto para la afectación en personas por exposición a radiaciones ionizantes o cualquier otro tipo de emergencia que se presente, garantizando siempre la atención y la preservación de la vida.

3.2.7.1. Evaluación y respuesta inicial

La evaluación de la emergencia es fundamental para determinar el curso de la atención y respuesta a ésta, por tal motivo es de prioridad establecer una evaluación de daños y análisis de necesidades para establecer los mecanismos de atención más adecuados. Para dar inicio a la respuesta inicial se debe considerar:

- Establecer un mecanismo de evaluación de la magnitud y evolución probable de las condiciones peligrosas, tanto al inicio como en el transcurso de la emergencia, para así dar la respuesta adecuada de acuerdo con los cambios identificados (OIEA, 2004).
- Recuperar el control de la situación
- Evitar o mitigar las consecuencias en el lugar de los hechos
- Impedir que se produzcan efectos deterministas en la salud de los trabajadores y el público.
- Prestar primeros auxilios y atención a las personas con lesiones por radiación
- Evitar, en la medida de lo posible, los efectos estocásticos en la población.
- Evitar en la medida de lo posible, los efectos no radiológicos en las personas y la población.
- Efectuar los preparativos, en la medida de lo posible, para la reanudación de la actividad (OIEA, 2004).
- Aplicar con prontitud todas las medidas razonables para proteger al público con objeto de minimizar los efectos radiológicos y no radiológicos para la salud
- Recopilar y proteger la información que pueda ser útil para tratar los efectos para la salud, a los fines de represión y de seguridad y para impedir que sucedan emergencias parecidas en el futuro (OIEA, 2007).

3.2.7.2. Medidas o acciones de respuesta

Si bien en el aparte acerca de las bases de planificación se definieron las medidas o acciones de respuesta, respecto con los niveles de referencia, en este punto se establecen las medidas específicas de acuerdo con cada uno de los escenarios de riesgo. Por lo anterior se deben integrar en este punto:

- Medidas para garantizar la mitigación o eliminación de las consecuencias de los accidentes previstos
- Participación del personal responsable de la protección radiológica y de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la instalación en los trabajos de mitigación de las consecuencias de los accidentes radiológicos previstos.

Se debe contemplar además las disposiciones para evaluar de manera continua y registrar las dosis recibidas por los trabajadores de emergencia y procedimientos para asegurar el control de las dosis recibidas.

3.2.7.3. Planes y procedimientos

Se deben establecer los procedimientos de emergencia (conjunto de instrucciones por las que se describen las medidas detalladas que deberá adoptar el personal de respuesta en caso de una emergencia (OIEA, 2004). Entre los procedimientos a incluir están los de notificación.

Los procedimientos hacen referencia a los documentos que describen y determinan el alcance de las acciones establecidas en el plan de emergencias radiológicas, describe la estructura y responsabilidades de los elementos participantes en las tareas y contiene información operativa para el desarrollo de las tareas, tales como listas de chequeo, formatos de registro, entre otros.

3.2.7.4. Acciones para activar la estructura de emergencias y como se coordina entre todos los involucrados en la respuesta

Entre las acciones que se deben implementar al momento de presentarse una emergencia, existe una acción que es primordial, y está asociada con la activación de la estructura de la emergencia, por tal razón se deben establecer los mecanismos de activación y definir los métodos o esquema operativo para la respuesta.

Existen esquemas o estrategias estandarizadas, para la coordinación de las acciones de respuesta a emergencias, el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, sugiere la aplicación de Sistema Comando de Incidentes o Cadenas de Socorro.

3.2.7.5. Manera en qué se declara el fin de las acciones de emergencia y como se realiza la recuperación

Así como se realiza una evaluación preliminar y se da inicio a la respuesta, es necesario establecer la forma y las condiciones por las cuales se dará fin a la respuesta, y se procederá a la recuperación y rehabilitación del servicio.

Una vez finalizada la fase de emergencia de una intervención, se debe establecer un programa para la recuperación y regreso a las actividades normales del servicio, se pueden incluir procesos tales como la reparación de instalaciones, disposición de desechos, descontaminación del emplazamiento y zona circundante, además de analizar la exposición ocupacional.

3.2.7.6. Acciones para garantizar el mantenimiento de los medios y equipamiento para la respuesta a la emergencia.

Se debe preparar un programa para la garantía de la calidad, que permita asegurar la disponibilidad y fiabilidad de todos los suministros, equipos, sistemas de comunicación e instalaciones necesarios para desempeñar funciones especificadas anteriormente; así mismo se debe considerar disposiciones sobre inventarios, reaprovisionamiento, pruebas y calibraciones que se deberán adoptar con el fin de cerciorarse que estos elementos e instalaciones siempre estén disponibles y en condiciones de funcionar en una emergencia.

3.2.8 Mecanismos de seguimiento y control (Capítulo 7)

Objetivo: Establecer un programa para la revisión de los contenidos y de acuerdo con su pertinencia verificar la aplicabilidad del plan de emergencias radiológicas. Definir tiempos para la revisión del documento y los factores relevantes para su actualización.

Contenido básico: 1) Programa de control de calidad

Se incluirá en este capítulo la adopción de disposiciones para mantener, examinar y actualizar planes, procedimientos y otras medidas de emergencia, además de incorporar las enseñanzas derivadas de las investigaciones, la experiencia operacional y los simulacros y ejercicios prácticos para la preparación de emergencias radiológicas.

3.2.9 Glosario

Objetivo: Definir los conceptos básicos para el entendimiento del plan de emergencias radiológicas.

Contenido básico: 1) Conceptos básicos relacionados con la protección y seguridad radiológica, y la gestión de emergencias radiológicas.

4. Articulación de la documentación para el proceso de autorización del manejo de material radiactivo y formulación del plan de emergencias radiológicas

La Resolución 90874 de 2014 emitida por el Ministerio de Minas y Energía, y por la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas, en su artículo 22 indica cuales son los documentos que se deben presentar a la Autoridad Reguladora para su evaluación técnica, y de esta manera contar con una base suficiente para el concepto técnico para la autorización. Así mismo, en el Anexo II se presenta la guía para la presentación del paquete documental, conformado por 12 títulos⁶. Si bien en el formato de solicitud se indican las condiciones básicas del servicio, como cantidad de material radiactivo a autorizar, equipos de protección radiológica y personal ocupacionalmente expuesto, en el marco de la articulación documental se verificará esta información en los documentos cruciales⁷. El recibo de pago, por su parte, se puede considerar como un documento administrativo, y el Manual de Seguridad Física es necesario para Licencias de Operación, es decir, para instalaciones que soliciten autorización para manejo de fuentes radiactivas de categoría 1 y 2, por lo que dichos documentos no serán de interés en el presente análisis.

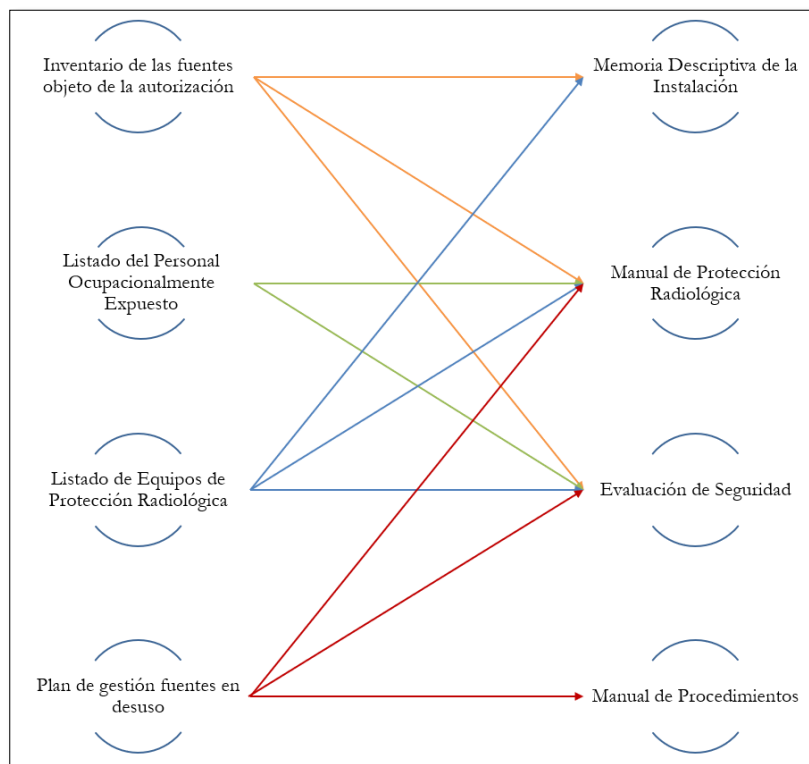
Con el ánimo de facilitar la articulación de la documentación, es pertinente mencionar que la información puede parecer redundante, ya que algunos documentos se presentan de manera particular, pero a su vez son inherentes a los documentos cruciales.

⁶ En referencia a los documentos soporte para la autorización del manejo de material radiactivo.

⁷ Documentos requisitos, que por su contenido son de gran relevancia para la solicitud de autorización para el manejo de material radiactivo; los documentos cruciales son: memoria descriptiva de la instalación, manual de protección radiológica, evaluación de seguridad, plan de emergencias radiológicas y manual de procedimientos

En la Figura 4-1 se presenta la relación e inclusión de cuatro títulos en los documentos cruciales, identificando que parte del insumo para desarrollar la memoria descriptiva de la instalación es el inventario de fuentes objeto de la autorización y el listado de equipos de protección radiológica; el plan de gestión de fuentes en desuso se ve reflejado en el manual de procedimientos y finalmente, para la construcción del manual de protección radiológica y la evaluación de seguridad es necesario contar con el inventario de fuentes objeto de la autorización, el listado del personal ocupacionalmente expuesto, el listado de los equipos de protección radiológica y el plan de gestión de fuentes en desuso.

Figura 4-1: Articulación de títulos y documentos cruciales para la presentación de la solicitud de autorización para el manejo de material radiactivo.



A la luz de la Resolución 90874 de 2014 emitida por el Ministerio de Minas y Energía, la Evaluación de Seguridad es la columna base de la estructura documental, ya que en su implementación se tienen en cuenta:

- Situaciones operacionales de la práctica;
- Estimación de las exposiciones normales y potenciales derivadas de la práctica;
- Análisis de sucesos iniciadores y sus secuencias accidentales;

- Establecimiento de los niveles de frecuencia de sucesos iniciadores;
- Establecimiento de los niveles de consecuencias para TOE, pacientes y público, derivadas de secuencias accidentales;
- Identificación y análisis de las barreras de seguridad, y su clasificación de acuerdo con su momento de actuación en la secuencia accidental y su robustez.

Haciendo una evaluación de seguridad adecuada, se identifica que documentos como la memoria descriptiva de la instalación, manual de protección radiológica, plan de emergencias radiológicas y el manual de procedimientos, se deben construir de manera paralela, garantizando así la coherencia en los datos consignados en cada uno de ellos. Algunos ejemplos:

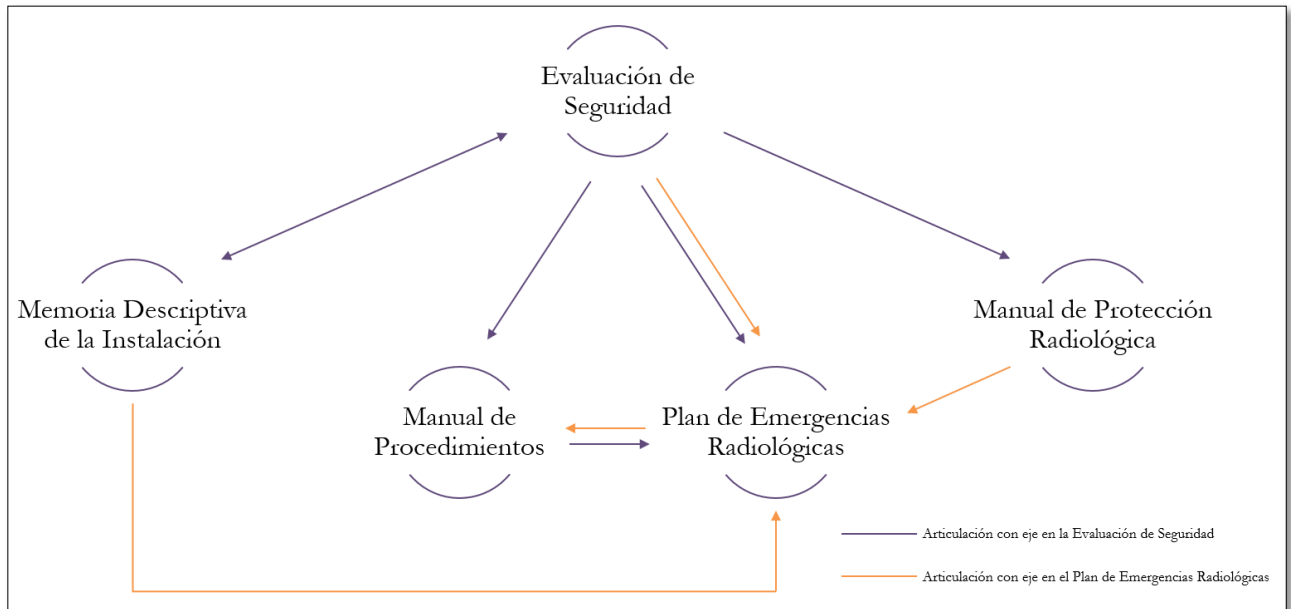
- Los niveles de referencia (registro, investigación e intervención) presentados en el manual de protección radiológica, pueden ser establecidos con base en los resultados de la estimación de las exposiciones normales de la práctica en la evaluación de seguridad.
- Las barreras identificadas en la evaluación de seguridad se relacionan en el manual de protección radiológica, específicamente en la verificación de los sistemas, equipos y componentes importantes para la seguridad y protección radiológica.
- En la memoria descriptiva se señalan los sistemas, elementos y componentes importantes para la protección radiológica y la seguridad física de la instalación, que finalmente se traducen en barreras en la evaluación de seguridad.
- Las secuencias accidentales de la evaluación de seguridad pueden ser identificadas mediante la revisión de los procedimientos asociados a la práctica; por otra parte, las barreras relacionadas con tareas designadas a los TOE⁸, son relacionadas en el manual de procedimientos.
- El plan de emergencias radiológicas corresponde a las acciones a implementar en el momento en que todas las barreras de seguridad de una secuencia accidental (identificadas en la evaluación de seguridad) son vulneradas.

Como se presentó en el Capítulo 3, el plan de emergencias radiológicas está concebido como un documento independiente que permite al lector, y en consecuencia a quien haga las veces de respondiente a la emergencia, identificar las características más importantes del servicio, las medidas de

⁸ Bajo el método de la Matriz de Riesgo, barreras de tipo 3 y 4, correspondientes a procedimientos realizados por una sola persona o por personas diferentes.

respuesta que se han establecido para la secuencia accidental presentada, equipamiento, entre otros elementos relevantes.

Figura 4-2: Articulación de los documentos cruciales con eje en la evaluación de seguridad (conectores morados) y articulación de los documentos cruciales con eje en el plan de emergencias radiológicas (conectores naranjas).



Como se observa en la Figura 4-2, la articulación de los documentos cruciales también puede proyectarse con el plan de emergencias radiológicas como eje, de allí que el formato propuesto en el Anexo A tenga información propia de los demás títulos.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Si bien las categorías de las amenazas radiológicas para un servicio de medicina nuclear no son altas en relación con otros sectores, y el nivel de peligrosidad asociado a las actividades de las fuentes radiactivas usadas no son consideradas peligrosas desde la categorización de las fuentes radiactivas, se debe contemplar en todo momento que al ser material peligroso es necesario contar con mecanismos de acción que permitan una atención oportuna. Evitando, por mínimo que sea el riesgo radiológico, la exposición innecesaria a radiaciones ionizantes en los servicios de medicina nuclear. Cabe anotar que el plan de emergencias radiológicas se basa en la evaluación de seguridad, y los resultados de allí obtenidos, más no en la categorización de las fuentes usadas.

El trabajo desarrollado enuncia la formulación de planes de emergencias radiológicas en Servicios de medicina nuclear, se considera pertinente el uso de este formato en otros servicios y áreas que hacen uso de fuentes radiactivas, toda vez que la reglamentación para la licencia de manejo de éstas no varía de un sector a otro, permitiendo una adaptación de los contenidos. Por otra parte, el formato facilitará la formulación de los planes de emergencias radiológicas, teniendo en cuenta que no existe uno establecido por la autoridad reguladora nuclear nacional.

Como parte del proceso de formación del personal ocupacionalmente expuesto, y a su vez encargados de la atención de emergencias radiológicas, se logró realizar un proceso de capacitación teórico-práctico, en el que se desarrollaron los temas principales propuestos en el presente trabajo y se aplicaron protocolos para la descontaminación y limpieza de derrames de material radiactivo.

Mediante el análisis de la normativa Colombiana y las recomendaciones internacional del OIEA, se logró incluir en el formato diseñado para la formulación del plan de emergencias radiológicas los conceptos y requisitos básicos señalados por éstas, no obstante es importante mencionar que se realizó una

adaptación del contenido, toda vez que parte de las recomendaciones, corresponden a situaciones de emergencias radiológicas y nucleares (niveles I y II) en las cuales es necesaria la intervención de organismos de socorro y la entidad reguladora.

5.2 Recomendaciones

Entendiendo que la responsabilidad del Físico Médico se proyecta en 4 ramas importantes, entre las que se incluye la Protección Radiológica, se considera pertinente la inclusión de la “Preparación y Atención de Emergencias Radiológicas” como parte de su formación y entrenamiento en Protección Radiológica. Lo anterior considerando que en situaciones reales de sobreexposición será el Físico Médico el responsable de dar los lineamientos de atención.

A. Anexo: Formato para la formulación del plan de emergencias radiológicas

En el presente formato encontrará la propuesta para facilitar la elaboración de planes de emergencias radiológicas, en éste se muestra cómo se desarrolla cada uno de los capítulos y se sugieren tablas y demás elementos base para incluir la información necesaria. Es importante mencionar que cada instalación tendrá la potestad de realizar los ajustes que considere necesarios, manteniendo siempre la coherencia con la práctica a desarrollar, la memoria descriptiva de la instalación, el manual de protección radiológica, la evaluación de seguridad, manual de procedimientos y las políticas y sistema de gestión de calidad.

1. Introducción

El Ministerio de Minas y Energía regula, controla y licencia las actividades industriales, médicas, agrícolas y demás que se fundamentan en el uso de fuentes radiactivas. En el 2001 adoptó, entre otras, la política nacional en materia de energía nuclear y la gestión de materiales radiactivos; siendo también el encargado de dictar las normas y reglamentos para la gestión segura de dichos materiales. De igual forma estableció mediante las Resoluciones 181434/2002 y 90874/2014 las especificaciones para la presentación de un plan de emergencias radiológicas, como un documento de requisito para la autorización y licenciamiento para el uso de material radiactivo.

En el plan de emergencias radiológicas (PER) se presentan los componentes de mayor relevancia en la gestión del riesgo, así pues, se plantea un análisis de los escenarios de riesgo radiológico en el servicio de medicina nuclear (basándose en la evaluación de seguridad de la instalación) y; se definen acciones de reducción y mitigación del riesgo radiológico. Finalmente se genera una serie de procedimientos para dar respuesta, en caso de presentarse una emergencia de este tipo.

El PER define claramente las responsabilidades de las personas que están involucradas en el servicio de medicina nuclear y demás personal relacionado directamente con la atención. Se establece, además, un

esquema de capacitación y preparación para la respuesta a las emergencias radiológicas y, finalmente, se dan los fundamentos para el retorno a la normalidad del servicio después de éstas.

Si bien los planes de protección y seguridad radiológica, permiten establecer protocolos de manejo del material radiactivo y mantener las condiciones adecuadas para el buen funcionamiento del servicio, pueden presentarse situaciones que pongan en peligro al personal ocupacionalmente expuesto a los pacientes o al público; es decir, pese a todas las precauciones que puedan tomarse en las prácticas diarias del servicio, pueden ocurrir fallos no intencionales, accidentes, e incluso la materialización de amenazas naturales o tecnológicas, que desencadenen emergencias radiológicas, generando exposición de las fuentes radiactivas o emisión de dichos materiales al interior de las instalaciones e incluso lugares públicos.

El objetivo de protección principal del PER es evitar y/o minimizar las consecuencias o efectos biológicos (determinísticos y estocásticos) sobre las personas, tanto del personal ocupacionalmente expuesto, público y pacientes que se encuentren en el servicio. Por otra parte, el objetivo principal de seguridad es generar mecanismos de mitigación creando y manteniendo defensas contra los riesgos radiológicos de las fuentes radiactivas.

Finalmente, es importante mencionar, que en el PER se tienen en cuenta las consecuencias o efectos debido a la radiación ionizante, enfocando siempre las acciones en disminuir los niveles de exposición en situaciones de emergencias radiológicas. Así pues, toda acción dirigida a la atención de otro tipo de emergencias será prevista y determinada en el plan de emergencias general de la institución. Ahora bien, si se afectan de manera peligrosa las fuentes radiactivas, se deben seguir las recomendaciones del Físico Médico o del oficial de protección radiológica.

Para abordar los temas mencionados previamente se distribuye el PER en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Caracterización del servicio de medicina nuclear

Capítulo 2. Caracterización de los escenarios de riesgo radiológico

Capítulo 3. Bases de planificación

Capítulo 4. Capacitación de los procesos en atención a emergencias radiológicas

Capítulo 5. Organización de la respuesta a emergencias radiológicas

Capítulo 6. Operaciones – Implementación de la respuesta a emergencias radiológicas

Capítulo 7. Mecanismos de seguimiento y control

La vigencia del PER se mantendrá de acuerdo con los tiempos establecidos para la Licencia de Operación o Registro del uso de Material Radiactivo y conforme con la política y sistema de gestión de la calidad.

2. Capítulo 1. Identificación del servicio de medicina nuclear.

Se relacionan a continuación datos generales del servicio de medicina nuclear.

Tabla A-1: Datos generales del servicio de medicina nuclear

Razón social del servicio de medicina nuclear	
NIT	
Dirección	
Teléfono	
Correo electrónico	
Titular de la licencia de manejo de material radiactivo	
Representante Legal	

2.1. Descripción de los locales y/o áreas de la instalación en los que se llevan a cabo trabajos con fuentes de radiación.

En este punto se presentan los planos de las instalaciones del Servicio de medicina nuclear, en los que se identifiquen las diferentes zonas por las que está compuesto dichos servicios, y características generales de la instalación.

Figura A-1: Plano 1. Disposición general del centro médico

[Ingrese el plano del centro médico]

Nota: El Plano 1 hace referencia a la instalación completa, y aplica en los casos en que el servicio de medicina nuclear sea dependiente físicamente de otras instalaciones, como hospital o clínica.

Figura A-2: Plano 2. Disposición general del servicio de medicina nuclear con clasificación de zonas

[Ingrese el plano general del servicio de medicina nuclear con la clasificación de zonas]

En el Plano 2 se deben incluir las zonas físicas por las que está compuesto el Servicio de medicina nuclear como: recepción de pacientes, cuarto caliente, sala de inyección, sala de pacientes inyectados, sala de

espera, sala de lectura, sala de comandos, salas con equipos (PET, SPECT-CT, etc.), baños, y otros que se identifiquen como necesarios. Así mismo se debe hacer una descripción general de las características de la construcción

Adicionalmente se debe presentar la clasificación de cada una de estas zonas, control de acceso y blindajes, de acuerdo con lo que sigue:

- Zona controlada: aquella en la que son o pudieran ser necesarias medidas de protección y disposiciones de seguridad específicas para: controlar exposiciones normales o prevenir la dispersión a contaminación en las condiciones normales de trabajo; prevenir las exposiciones potenciales, o limitar su magnitud. (referencia)
- Zona supervisada: aquella no definida como zona controlada, pero en la que se mantienen bajo vigilancia las condiciones de exposición ocupacional, aunque normalmente no sean necesarias medidas protectoras ni disposiciones de seguridad concreta. (referencia)
- Control de acceso: Medidas de seguridad adoptadas para prevenir el acceso no autorizado de personal diferente al ocupacionalmente expuesto, evitando así el uso indebido, la pérdida, robo o traslado del material radiactivo. (referencia)
- Blindajes: Para cada una de las zonas calientes, se debe señalar el blindaje para radiaciones ionizantes usado y sus características básicas.

Figura A-3: Plano 3. Descripción lugar de almacenamiento y flujo de material radiactivo

[Ingrese el plano que incluya el flujo de material radiactivo y los lugares de almacenamiento de éste]

En el plano 3 se incluyen los puntos de almacenamiento y recorridos del material radiactivo usado en el servicio. Se sugiere incluir la información así:

- Diagrama descriptivo de la ubicación de las fuentes y del flujo de material radiactivo:
- Lugar de almacenamiento de fuentes selladas, ya sea en desuso o en proceso de gestión.
- Lugar de acopio de residuos radiactivos.

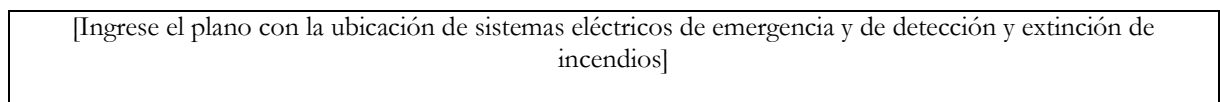
Figura A-4: Plano 4. Ubicación de dispositivos de monitoreo y límites de dosis; sistemas, elementos y componentes de protección y seguridad radiológica

[Ingrese el plano con la ubicación de dispositivos de monitoreo y límites de dosis; sistemas, elementos y componentes de protección y seguridad radiológica]

El plano 2 puede ser usada como base para la identificación del monitoreo y la estimación de las dosis máximas permitidas en las zonas identificadas, teniendo presente que existen condiciones de seguridad establecidas para cada una de ellas. Se deben incluir en el plano:

- Puntos en los que se tiene el monitoreo de área y, ubicación de detectores, entre otros.
- Sistemas, elementos y componentes de protección radiológica y seguridad física de la instalación, cómo está distribuida la instrumentación, lugar de almacenamiento de los elementos de protección radiológica personal y biombos (blindajes móviles).

Figura A-5: Plano 5. Ubicación de sistemas eléctricos de emergencia y de detección y extinción de incendios



Además de la descripción propia del servicio, es necesario incluir información acerca de los sistemas de seguridad no radiológica, y que sea determinante para la respuesta ante emergencias radiológicas:

- Descripción sistema eléctrico de emergencia
- Descripción del sistema de detección y extinción de incendios, que proteja la estabilidad de la fuente radiactiva y de los dispositivos, equipos y sistemas de seguridad.

2.2. Equipos e instrumentación del servicio

Como parte fundamental de la descripción se presentan los equipos e instrumentación que deberán estar disponibles en la instalación en el caso de presentarse una emergencia, generalmente estos equipos corresponden a los equipos que hacen parte integral del servicio de medicina nuclear. Se deben incluir todos los dispositivos que estén relacionados con el uso de material radiactivo, por ejemplo, instrumentos de detección, sistemas de alarmas, entre otros que se consideren en los procedimientos de emergencia.

Tabla A-2: Equipos e instrumentación del servicio

Equipo	
Uso general	
Ubicación	
Responsable del uso	

Nota: La Tabla A-2 podrá repetirse tantas veces como sea necesario según los equipos e instrumentos con los que cuente el servicio.

2.3. Capital humano del servicio

El capital humano que conforma el servicio de medicina nuclear se compone por:

Tabla A-3: Capital humano del Servicio de medicina nuclear y sus funciones en situaciones de emergencia

Cargo	
Funciones	

Nota: La Tabla A-3 podrá repetirse tantas veces como sea necesario según el capital humano con el que cuente el servicio, así mismo las funciones están relacionadas directamente con el manejo del material radiactivo.

2.4. Características generales de las prácticas del Servicio

A continuación se presenta una descripción de las prácticas que se realizan en el Servicio de medicina nuclear y que incluyen el uso de radiofármacos, entendiendo como **práctica** toda actividad humana que introduce fuentes de exposición o vía de exposición adicionales o extiende la exposición a más personas o modifica el conjunto de vías de exposición debidas a las fuentes existentes, de forma que aumente la exposición o la probabilidad de exposición de personas, o el número de personas expuestas.

Tabla A-4: Descripción de prácticas con radionucleidos

Práctica	
Radionucleido asociado	
Actividad del radionucleido	
Uso	
Descripción	
Responsable	

Nota: La Tabla A-4 puede repetirse tantas veces como sea necesario, de acuerdo con los procedimientos y actividades que incluyan el uso de material radiactivo. Para fines prácticos, el presente formato presentará ejemplos para su diligenciamiento.

3. Capítulo 2. Caracterización de escenarios de riesgo radiológico

3.1. Evaluación de la seguridad

La evaluación de seguridad en un servicio de medicina nuclear se considera como uno de los pasos más importantes para la caracterización de los escenarios de riesgo, pues es a partir de ésta que se identifican los posibles fallos o sucesos iniciadores que puedan afectar directamente las medidas de seguridad radiológica, y desencadenar la emisión de radiación ionizante no controlada.

3.2. Escenarios de riesgo

Para la caracterización de los escenarios de riesgo, se aplica la Matriz de Riesgo, la cual se presenta a profundidad en el Anexo B.

Para la evaluación del riesgo se deben tener en cuenta la siguiente información referida en la Tabla A-5, basada en el numeral A.2.4., y los resultados de la evaluación de la seguridad, es decir, se deben considerar aquellas prácticas en las que se detectaron sucesos iniciadores capaces de generar situaciones de emergencia radiológica.

Tabla A-5: Información base para la matriz de riesgo

Código	Suceso iniciador – Secuencia accidental	Frecuencia	Probabilidad de fallo de barreras de seguridad	Consecuencias	Nivel de riesgo

La priorización de los escenarios de riesgo, son determinados por resultado del nivel de riesgo, así entonces, todas las acciones que se planeen en el presenta plan de emergencias radiológicas, estarán enfocadas en evitar la presentación de este tipo de emergencias y dar una oportuna atención en caso de presentarse. Teniendo en cuenta que los escenarios de riesgo están relacionados directamente con los sucesos iniciadores que conllevan a consecuencias altas o muy altas, y que están catalogados de acuerdo con el grupo poblacional afectado (público, pacientes y TOE), las acciones estarán enfocadas hacia cada grupo poblacional, así mismo, es necesario identificar las barreras que actuarán como reductores de consecuencias.

Los niveles de riesgo establecidos son: muy alto, alto, medio y bajo, descritos en la Tabla A-6. Los niveles de riesgo muy altos y altos serán priorizados en función de su nivel de consecuencia para la apropiación de medidas protectoras, de mitigación y reparadoras.

Tabla A-6: Niveles de riesgo

Nivel de riesgo	Acciones para tomar
Riesgo muy alto	Se requiere paralizar la práctica y que se tomen las medidas necesarias para reducir el riesgo antes del reinicio de las labores.
Riesgo alto	Se requieren medidas inmediatas para reducir el riesgo o tendrá que paralizarse la práctica. Se requieren medidas para reducir el riesgo en un plazo apropiado de tiempo.

Nivel de riesgo	Acciones para tomar
Riesgo medio	Deben introducirse las mejoras o medidas que reduzcan el riesgo hasta lo más bajo posible considerando criterios de costo/beneficio
Riesgo bajo	No se requerirán acciones o medidas adicionales de seguridad.

Tabla A-7: Relación escenarios de riesgo con el nivel de riesgo

Escenario de riesgo	Nivel de consecuencia – Población	Acción que implementar	Responsable de la respuesta

Nota: La Tabla A-7 se diligencia con base en los escenarios de riesgo priorizados.

4. Capítulo 3. Bases de planificación

4.1. Niveles de referencia y acciones a implementar

Los niveles de referencia para el servicio de medicina nuclear se establecen como indica la Tabla A-8.

Tabla A-8: Niveles de referencia

Niveles de referencia	Límite de dosis
Niveles de actuación	
Niveles de intervención	

Dependiendo de los escenarios de riesgo, se presenta en la Tabla A-9 la correspondencia con los niveles de actuación o intervención.

Tabla A-9: Relación escenarios de riesgo - Niveles de referencia

Escenario de riesgo			
Nivel de actuación		Nivel de intervención	
Descripción acciones o medidas			
<i>[Indicar qué tipo de medidas se implementará, de protección, de mitigación o reparadora]</i>			
Momento de aplicación de la medida			
<i>[Definir el tiempo estimado de aplicación de la acción, de acuerdo con el nivel de riesgo]</i>			
Objetivo y alcance de la medida a implementar			
<i>[Indicar que se busca al implementar las medidas]</i>			

Nota: la Tabla A-9 se debe repetir para cada escenario de riesgo, así mismo se debe marcar con una X qué tipo de nivel se proyecta que se superará al presentarse el escenario de riesgo.

Como ejemplo de las medidas de protección urgentes se tienen: Profilaxis radiológica, evacuación, control de accesos, descontaminación personal y de áreas.

4.2. Criterios para implementar el plan de emergencias radiológicas

Los criterios para implementar el plan de emergencias corresponden a las razones por las cuales algunas de las acciones propuestas se llevarán a cabo, es decir, siempre que se identifique que existe la posibilidad de emisión de radiación ionizante no controlada o que esta emisión esté en curso.

4.3. Apoyo logístico, material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público.

Se presentan en la Tabla A-10 el inventario de materiales, equipos e instrumentación dispuestos para la atención de emergencias radiológicas

Tabla A-10: Inventario de materiales, equipos e instrumentación de emergencia

Elemento	Cantidad	Estado	Ubicación

Partiendo del nivel de la emergencia se debe establecer la posible participación de la brigada de emergencia del centro médico (de existir) o de entidades intervinientes externas, referenciando las personas como se indica en la Tabla A-11 y Tabla A-12

Tabla A-11: Entidades de apoyo (internas)

Brigadista	Ubicación	Teléfono

Tabla A-12: Entidades de apoyo (externas)

Institución	Referente	Teléfono

En la

Tabla A-12 se tienen en cuenta las instituciones o servicios al interior del centro médico, que puedan apoyar la atención en salud, en evacuación, entre otras acciones.

5. Capítulo 4. Capacitación de los procesos de atención

El programa de preparación del personal para dar respuesta a las emergencias radiológicas se puede planear según las necesidades de la institución, como se indicó en la sección 3.2.5., y se diligencia en la Tabla A-13 para cada tema en particular

Tabla A-13: Modelo plan de capacitación

Tema	
Objetivos y alcance	
Tipo de entrenamiento	
Dirigido a	
Descripción de la actividad	
Duración	
Fecha y frecuencia de actualización	
Tipo de evaluación	
Ejercicio práctico o simulacro	

6. Capítulo 5. Organización de la respuesta

Se presenta a continuación la estructura organizativa del servicio de medicina nuclear, Figura A-6 y de la Brigada de Emergencias Figura A-7.

Figura A-6: Organigrama del servicio de medicina nuclear

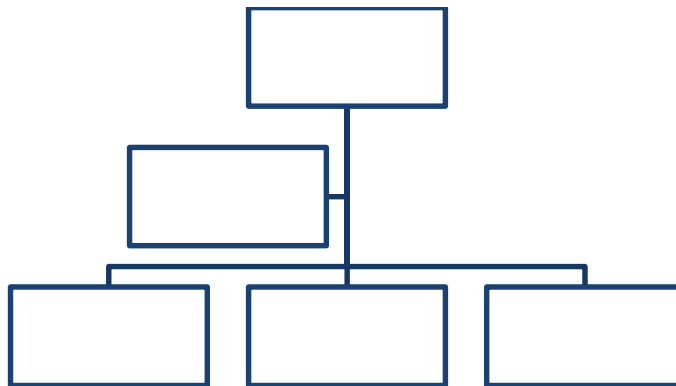
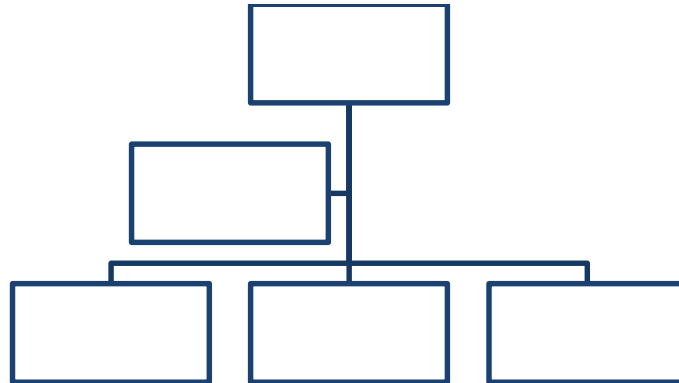


Figura A-7: Organigrama de la Brigada de Emergencias



7. Capítulo 6. Operaciones – Implementación de la respuesta

7.1. Evaluación y respuesta inicial

En este punto se indicarán las consideraciones que se tienen al momento de la identificación de la emergencia, su evaluación y el inicio de la respuesta.

7.2. Planes y procedimientos

Partiendo de las acciones y medidas establecidas previamente, se establecen en este punto las operaciones para lograr el cumplimiento de las acciones. Se presentan en la Tabla A-14 los procedimientos asociados:

Tabla A-14: Descripción de procedimiento para cada escenario de riesgo identificado.

Nombre del procedimiento	
Escenario de riesgo asociado	
Objetivo y alcance	
Responsables	
Material y equipos	
Instrucciones (paso a paso)	
Precauciones	

Nota: la Tabla A-14 se puede repetir conforme a los procedimientos que se establezcan. Se sugiere así mismo realizar los diagramas de flujo relacionados con cada procedimiento para mejor entendimiento.

Mecanismos de notificación

Entre los mecanismos de notificación más usados está la cadena de llamadas, en la Tabla A-15 se presenta un esquema de los roles que deben realizar notificación para la atención de emergencias. El

número de elementos en la tabla dependerá del personal y entidades que deban intervenir, por lo que se debe aplicar para cada uno de los escenarios de riesgo.

Tabla A-15: Mecanismos de notificación

#	Cargo – Nombre del contacto	Mecanismos de notificación	A quien informa	Teléfono – Correo electrónico

8. Capítulo 7. Mecanismos de seguimiento y control

El presente plan de emergencias radiológicas deberá ser revisado y actualizado bajo las siguientes circunstancias:

- Siempre que se genere un cambio en la autorización de manejo de material radiactivo
- Cuando haya introducción de nuevos procedimientos
- Pasado dos años de su elaboración
- Cuando se presenten cambios en la instrumentación, instalaciones y procedimientos asociados a la atención de emergencias radiológicas.

9. Glosario

Concepto

Definición

B. Anexo: Métodos Análisis de Modos y Efectos de Fallo - Matriz de Riesgo

Método AMEF

Para la presentación del método AMEF, cabe aclarar que se presenta una adaptación al modelo inicial, tomado de: el artículo “Metodología AMFE como herramienta de gestión de riesgo en un hospital universitario” (Consuegra Mateus, 2015), y las Notas Técnicas de Prevención NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos AMFE (Trabajo, 2004); el ajuste presentado se da con el fin de aproximar la información lo mejor posible a la realidad y bajo las condiciones del servicio.

Este método permite sistematizar el estudio de los procesos asociados a actividades específicas, e identificar los puntos de fallo potenciales en las prácticas. Partiendo de este estudio es posible plantear la elaboración de planes de acción, en los que se incluyan acciones protectoras, mitigadoras y reparadoras.

Bajo este método se establece un nivel de riesgo asociado a cada una de las fallas en los procesos, y que se puede calcular mediante la asignación de valores numéricos a sus componentes. Los pasos para su implementación son:

1) Conformación equipo de trabajo

El equipo de trabajo que se conformará para el análisis de fallos deberá conocer los procesos que se desarrollan en el servicio de medicina nuclear. Entre los participantes se cuentan Médicos, Físicos Médicos, Tecnólogos, Auxiliares de Enfermería, y demás personal que esté vinculado al servicio.

2) Selección del proceso

El proceso hace referencia a cada una de las etapas que conforman la práctica, es así como en la selección del proceso se sugiere realizar un diagrama que permita identificarlos y establecer el paso a paso de su ejecución. Así mismo los procesos se podrían establecer como amenazas en el servicio (en este sentido

se entiende como amenaza el evento potencial que derive un incidente o accidente), que se pueden encontrar en las instalaciones, fuentes o prácticas.

La práctica se entiende como: toda actividad humana que introduce fuentes de exposición o vía de exposición adicionales o extiende la exposición a más personas o modifica el conjunto de vías de exposición debidas a las fuentes existentes, de forma que aumente la exposición o la probabilidad de exposición de personas, o el número de personas expuestas (OIEA, 2007).

3) Identificación de fallos

Ya identificados los procesos y/o prácticas a evaluar, se procede a la identificación de fallos. Este punto hace referencia al modo o la forma en que puede fallar dicho proceso a la hora de su ejecución. La pregunta que se debe resolver en este punto es ¿Qué podría fallar? Cabe aclarar que por cada proceso pueden existir varios fallos, es necesario describir los que se asocian a un riesgo radiológico, es decir, que contemplen la emisión de radiación ionizante al ambiente, por practicidad los demás fallos que generen un daño en cualquier otro sistema y no afecten los controles de detección de radiación ionizante, no se tendrán en cuenta.

4) Calificación de fallos

Al momento de tener identificados los fallos de los procesos y/o prácticas se continúa con la identificación y evaluación de: a) los efectos y su severidad; b) las causas potenciales y su ocurrencia y c) los controles actuales de detección y su probabilidad de detección. Por cada fallo pueden existir varios efectos, causas y controles de detección, por lo que se establecen valores numéricos para lograr una calificación final, dicha calificación está asociada a la severidad, ocurrencia y probabilidad de detección (conceptos relacionados directamente con los efectos, causas y controles de detección).

- Efectos: se definen como las consecuencias no deseadas y existentes debidas al fallo identificado. Los efectos están relacionados directamente con los efectos biológicos que se presentan debido a los niveles de radiación y la exposición a la radiación a dicha radiación.
- Severidad: está asociada directamente a los efectos del fallo, es importante entender que es un nivel numérico asignado a éstos y que facilitan el cálculo del Nivel Prioritario de Riesgo. La severidad en relación con el riesgo radiológico se establece por el nivel de radiación que se pueda generar y los efectos biológicos derivados de la exposición a dicha radiación. En la
- Tabla B-1 se muestran los niveles de calificación y de asignación del valor numérico para la severidad.

Tabla B-1: Calificación de la Severidad del efecto de acuerdo con los niveles de radiación

Calificación	Categoría	Criterio
1	Ninguna	Los niveles de radiación son mínimos.
2	Menor	Los niveles de radiación no superan los niveles para el personal ocupacionalmente expuesto, pero si para el público.
3	Moderada	Los niveles de radiación superan los niveles establecidos para el personal ocupacionalmente expuesto, sin exceder los niveles que causan efectos deterministas. Se pueden presentar efectos estocásticos.
4	Importante	Los niveles de radiación generan efectos determinísticos en las personas expuestas, pero sin poner en riesgo la vida o daños permanentes para la calidad de vida.
5	Severa	Los niveles de radiación generan efectos determinísticos severos en las personas, que pueden causar la muerte o discapacidad en las personas expuestas.

- Causa potencial o mecanismo de fallo: Es el origen o suceso iniciador del fallo del proceso, se puede considerar como consecuencia de una debilidad en el diseño o ejecución del proceso en mención. En la evaluación de las causas se debe ser lo más específico posible para que las acciones protectoras y reparadoras sean las más acertadas posibles. Generalmente, un fallo se desencadena por una o más causas. El OIEA la ha definido como la causa fundamental de un suceso iniciador, cuya corrección evitará que se repita dicho suceso (es decir, la causa básica radica en el hecho de no detectar ni corregir las pertinentes debilidades latentes y en las razones de ese fallo). Las medidas correctoras diseñadas para tratar las causas básicas se denominan medidas reparadoras (OIEA, 2007).
- Ocurrencia o frecuencia: Se refiere a la probabilidad de presentación de las causas potenciales de fallo. Se recomienda usar datos históricos o estadísticos para determinar la frecuencia en la que se podría presentar la causa, cabe aclarar que la probabilidad de ocurrencia se dará para cada una de las causas identificadas en un fallo.

Tabla B-2: Calificación de la Ocurrencia del fallo

Calificación	Categoría	Criterio
1	Muy baja	Casi nunca ocurre
2	Baja	Ocurre raramente (ejemplo: anualmente)
3	Moderada	Ocurre poco frecuentemente (ejemplo: mensualmente)
4	Alta	Ocurre frecuentemente (ejemplo: semanalmente)
5	Muy alta	Casi siempre ocurre

- Controles actuales de Detección: En este punto se definen los mecanismos de detección existentes para los fallos que impliquen emisión de radiación ionizante; así mismo se incluyen

en este punto cuales son los mecanismos para prevenir las causas del fallo antes de que se presenten.

- Detección: Hace referencia a la probabilidad de detección de los fallos o sus posibles causas, antes de que se generen efectos biológicos por la radiación en las personas. Contrario a las calificaciones de la severidad y la ocurrencia, la detección entre más alta calificación tenga indica mayor probabilidad de detección.

Tabla B-3: Calificación de la Probabilidad de Detección

Calificación	Categoría	Criterio
5	Muy alta	El fallo se detecta inmediatamente se presenta, sin generar algún efecto por la radiación ionizante.
4	Alta	El fallo se detecta fácilmente, antes de generar algún efecto por la radiación ionizante.
3	Moderada	El fallo se detecta, sin embargo, existe la posibilidad de generar efectos por la radiación ionizante.
2	Baja	El fallo tarda en detectarse, y aumenta la posibilidad de presentarse algún efecto por la radiación ionizante.
1	Muy baja	El fallo no se detecta, y la posibilidad de presentarse efectos por la radiación ionizante es muy alta.

Se debe tener en cuenta que los efectos biológicos asociados a la radiación ionizante están directamente relacionados con la dosis entregada. Para mayor claridad se recomienda revisar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, presentados en el Capítulo 1.

5) Determinación Nivel Prioritario de Riesgo (NPR)

La determinación del Nivel Prioritario de Riesgo (NPR) se establece mediante la siguiente ecuación:

$$NPR = S \times O \times D \quad \text{Ecuación B-1}$$

El NPR se entiende entonces como el producto de la Severidad, la Ocurrencia y la Detección; se calcula para cada uno de los fallos identificados de la práctica seleccionada. De acuerdo con el resultado que se obtiene es posible realizar una priorización, es decir, a medida que el valor del NPR va aumentando, es evidente que se requieren acciones protectoras inmediatas para su corrección y evitar futuros efectos biológicos debido a la exposición a radiaciones ionizantes.

En la Tabla B-4 se muestra una clasificación del Nivel Prioritario de Riesgo, y de acuerdo con el valor obtenido al aplicar la Ecuación 3-1 se clasifica como riesgo alto, medio o bajo. Para una identificación

visual rápida del nivel prioritario de riesgo, se asigna un color para cada nivel de riesgo, así el riesgo alto se identificará con el color rojo, el riesgo medio con el color amarillo y el riesgo bajo con el color verde. La clasificación del NPR, además de categorizar el riesgo asociado a las prácticas evaluadas, permite identificar cuales requieren de una intervención mediante la implementación de acciones protectoras, mitigadoras o reparadoras.

El NPR puede suponer una aproximación a la magnitud del daño que se espera alcanzar debido al suceso iniciador, y que se puede establecer en tres niveles a saber:

- Riesgo bajo: es un nivel de riesgo que no representa mayor problema para el servicio; se puede considerar que el riesgo es tan bajo que no se requieren acciones inmediatas para cambiar las prácticas. El riesgo en este caso es despreciable, no obstante, se sugiere hacer seguimiento a estos niveles de riesgo, ya que los sucesos iniciadores y las variables que determinan dicho nivel son variables en el tiempo. Las acciones que implementar en este tipo de riesgo pueden ser preventivas, con el fin de mantener este nivel de riesgo.
- Riesgo medio: se considera como un nivel de riesgo que requiere de acciones de mitigación o reparación, ya que las consecuencias pueden ser de gran relevancia, al momento de presentarse el evento.
- Riesgo alto: se considera como un nivel de riesgo crítico y que requiere la implementación de acciones mitigadoras y reparadoras inmediatas para mantener los niveles de radiación lo más bajo posibles. Este nivel de riesgo es inaceptable bajo cualquier circunstancia ya que se relaciona directamente con niveles de severidad altos.

La Tabla B-4 puede considerarse como una herramienta de acceso rápido para la identificación del NPR, partiendo en todo momento del conocimiento de los niveles de severidad, ocurrencia y detección.

Tabla B-4: Calificación del Nivel Prioritario de Riesgo (Consuegra Mateus, 2015)

		Ocurrencia						
		Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)		
Severidad	Ninguna (1)	1	2	3	4	5	Muy alta (1)	Detección
	Menor (2)	4	8	12	16	20	Alta (2)	
	Moderada (3)	9	18	27	36	45	Moderada (3)	
	Importante (4)	16	32	48	64	80	Baja (4)	
	Severa (5)	25	50	75	100	125	Muy baja (5)	

Nombre de la fuente: Metodología AMFE como herramienta de gestión de riesgo en un hospital universitario

6) Priorización de fallos de acuerdo con el NPR

De acuerdo con la calificación obtenida del NPR, se deben tomar acciones protectoras, mitigadoras y reparadoras para cada uno de los escenarios identificados. Con el fin de mejorar y optimizar los servicios, se dará mayor relevancia e importancia para implementar acciones asociadas a los riesgos altos identificados.

7) Acciones recomendadas (protectoras y reparadoras)

Las acciones que tomar según el escenario de riesgo pueden ser de carácter protector o reparador. La diferencia entre este tipo de acciones es la inmediatez en la que deben realizarse para mantener la seguridad y protección radiológica y evitar daños y efectos en las personas y ambiente. Las acciones que recomendar deben estar ligadas a la optimización de los procesos, y enfocarlas hacia la mayor eficiencia posible, de aquí que sea necesario revisar qué acciones se pueden implementar para cada uno de los componentes del NPR, es decir, acciones orientadas a variar la Severidad, Ocurrencia y Detección.

- **Acción mitigadora:** Es toda acción adoptada por la entidad para reducir las posibilidades de que las condiciones evolucionen hasta una situación de exposición o la emisión de material radiactivo que requiera la adopción de medidas de emergencia en la instalación; o para mitigar las condiciones de origen que puedan dar lugar a una situación de exposición o a la emisión de material radiactivo que requiere la adopción de medidas de emergencia en la instalación (OIEA, 2007).
- **Acción protectora:** Es toda acción destinada a reducir la dosis a los miembros de la población en situaciones de emergencia o de exposición crónica. Entre las medidas comúnmente

consideradas como medidas protectoras urgentes, en casos de emergencias, están: evacuación, descontaminación de personas, profilaxis con yodo, entre otras (OIEA, 2007).

- Acción reparadora: Acción que se realiza, cuando se rebasa un nivel de actuación determinado, para reducir las dosis de radiación que de lo contrario pudieran recibirse en una situación de intervención que implique exposición crónica (OIEA, 2007). Las acciones reparadoras pueden considerarse como las acciones de atención inmediata, aun cuando no se ha presentado la emergencia.
- Medidas de respuesta a emergencias: Conjunto integrado de elementos de infraestructura necesarios para disponer de la capacidad de desempeñar una determinada función o tarea requerida en respuesta a una emergencia nuclear o radiológica. Pueden incluir funciones y responsabilidades, organización, coordinación, personal, planes, procedimientos, instalaciones, equipo o capacitación (OIEA, 2007).

8) Definición de responsables

Una vez determinadas las acciones a implementar (protectoras, mitigadoras o reparadoras), se requiere establecer un responsable directo para la implementación de éstas en tiempos definidos. De acuerdo con el tipo de fallo y el punto del proceso en el que se estén presentando, se podrá asignar dicha responsabilidad, sin dejar de lado la responsabilidad que tiene el titular de la licencia para hacer cumplir las condiciones de seguridad y protección mínimas en todos los procesos que impliquen el uso de material radiactivo.

9) Re-Evaluación de NPR

Posterior al cumplimiento de las acciones recomendadas se realizará nuevamente la evaluación de cada uno de los fallos identificados, es decir, se evaluará el cambio presentado en los componentes del NPR, como Severidad, Ocurrencia y Detección. Lo ideal es que el NPR haya bajado a tal punto que no sean necesarias nuevas acciones protectoras.

El método AMFE se compila en la Tabla B-5, en la cual se ingresan todos los datos analizados previamente. Dicha tabla se debe conservar como referencia para la revisión de los escenarios de riesgo futuros y como parte del control de seguimiento y calidad.

Tabla B-5: Formato de tabla para recopilación información método AMFE

Análisis de Modos y Efectos de Fallo en el servicio de Medicina Nuclear															
Institución:															
Servicio:															
Fecha:															
Identificación Nivel de Riesgo								Acciones Recomendadas		Evaluación posterior a la implementación de acciones					
Proceso	Falla	Efectos	Severidad [S]	Causa potencial o mecanismo de la falla	Ocurrencia [O]	Controles actuales de detección	Detección [D]	Número Prioritario de Riesgo [NPR]	Acciones recomendadas	Responsable	Acción tomada	Nueva Severidad [S]	Nueva Ocurrencia [O]	Nueva Detección [D]	Número Prioritario de Riesgo [NPR]
			1		2		3	● 6							● 0
			4		2		2	● 16							● 0
			4		3		4	● 48							● 0
								● 0							● 0
								● 0							● 0

Método de la Matriz de Riesgo

Este método, al igual que el expuesto previamente, se creó inicialmente para las industrias de alto riesgo, usándose para determinar niveles de riesgo y establecer sus prioridades, mediante la combinación de la frecuencia de presentación de un evento indeseado, y sus consecuencias (FORO-OIEA, 2012).

La Matriz de riesgo como metodología ha sido aplicada para la evaluación de riesgos en servicios de radioterapia, situación que ha puesto en marcha la implementación de dicha evaluación mediante el uso de un software elaborado por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, conocido como SEVRRRA (Sistema de Evaluación del Riesgo en Radioterapia). De igual manera esta metodología ha sido implementada en servicios de medicina nuclear, como se muestra en el artículo Matrices de riesgo en medicina nuclear, modelación en SEVRRRA (Duménigo, Guerrero, López, & Paz, 2015).

La viabilidad para la aplicación de esta metodología al plan de emergencias es alta, debido a que los parámetros aquí establecidos están enfocados directamente a los riesgos radiológicos, haciendo que los ajustes sean pocos. El presente método se presenta como un proceso de autoevaluación, que permite la identificación de errores o fallos que se deriven en incidentes, accidentes o emergencias.

Previo a la descripción de los pasos del método, es preciso aclarar algunos conceptos:

Riesgo: se puede definir riesgo, en el marco del método, como la expresión matemática que relaciona la frecuencia de un suceso iniciador, con la probabilidad de fallo de las defensas y los daños que se puedan presentar. La fórmula que representa el riesgo está dada por:

$$R = f \cap P \cap C \quad \text{Ecuación B-2}$$

Donde f es la frecuencia del suceso iniciador, P es la probabilidad de fallo de las barreras o defensas previstas y C es la gravedad de las consecuencias.

Suceso iniciador y secuencia accidental: se considera que el suceso iniciador es todo fallo (de equipo, personal o evento externo), que puede generar una exposición accidental si fallan las barreras de seguridad previstas para prevenirla. Por su parte la secuencia accidental se considera como la serie de acontecimientos desencadenados por el suceso iniciador, y puede terminar en un accidente. En la secuencia accidental se integran no solo el suceso iniciador, también se tienen en cuenta la actuación o fallo de las medidas de seguridad, la exposición accidental generada y las posibles consecuencias.

Barreras de seguridad o defensas: se definen con las medidas previstas para evitar (impedir que se presente el suceso), prevenir (reducir la frecuencia de presentación del suceso), detectar, controlar y reducir o mitigar las consecuencias una vez se presenta el suceso iniciador. Bien pueden ser barreras técnicas u organizativas. Estas barreras hacen parte del principio de defensa en profundidad. Las medidas de seguridad pueden ser clasificadas según su tipo (si son dispositivos asociados a equipos o procedimientos escritos para el personal) y según el momento de actuación en la secuencia accidental (reductores de frecuencia, barreras directas, reductores de consecuencias).

Consecuencias: hacen referencia a los daños que se pueden derivar de la presentación de los sucesos iniciadores; estas están directamente relacionadas con la severidad de los efectos y el número de personas afectadas. Las consecuencias se pueden considerar de la pérdida de barreras de seguridad, hasta efectos graves en las personas que se encuentran en el servicio (FORO-OIEA, 2012).

Los pasos para la implementación de la matriz de riesgo son:

- 1) Identificación de sucesos iniciadores y secuencia accidental

Es importante identificar en este punto cuáles son los sucesos iniciadores para evaluar, teniendo en cuenta que estos pueden ser desde fallos de equipo hasta errores humanos en el desarrollo de los protocolos. Este método sugiere 3 métodos para la identificación de los sucesos iniciadores, entre los

que se encuentra el Análisis de Modos y Efectos de Fallo, Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP) y análisis del ¿Qué pasaría si...?

Los sucesos iniciadores, pueden presentarse de dos formas:

- Aquellos que desencadenan o inician un accidente, y requieren ser interceptados por las defensas previstas para prevenir o mitigar las consecuencias indeseadas;
- Aquellos que hacen fallar alguna de las medidas de seguridad existentes y degradan la calidad de dichas medidas que se interponen a la evolución del suceso iniciador hacia un accidente.

2) Identificación de la frecuencia (f)

De acuerdo con el suceso iniciador identificado, se debe determinar la frecuencia de presentación. Inicialmente, la presentación de estos sucesos puede tomarse de forma aleatoria, no obstante, se presenta una opción para establecer una valoración semicuantitativa de la frecuencia de los sucesos iniciadores:

Frecuencia de sucesos iniciadores por fallo de equipo:

$$f = \frac{2n+1}{2T} \quad \text{Ecuación B-3}$$

Donde n es el número de fallos y T es el intervalo de tiempo en el que ocurren los fallos (expresado en años).

Frecuencia de sucesos iniciadores por errores humanos:

$$f = P_{EH}f_T \quad \text{Ecuación B-4}$$

Donde P_{EH} es la probabilidad de error humano por tarea y f_T es la frecuencia anual con que se realiza la tarea. Este método, y su aplicación en servicios de Radioterapia, han facilitado la determinación de la frecuencia, mediante la presentación de tablas

Tabla B-6: Criterios para la asignación de los niveles de frecuencia (FORO-OIEA, 2012).

Frecuencia cualitativa	Acrónimo	Probabilidad de ocurrencia del suceso iniciador	Ejemplo: número de sucesos por año considerando una carga de trabajo de 500 pacientes por año.
Frecuencia Alta: el suceso ocurre frecuentemente	f_A	$P \geq 1/10$	Más de 50 por año $F \geq 50$
Frecuencia Media: el suceso ocurre ocasionalmente.	f_M	$1/1\ 000 < P < 1/10$	Entre 1 y 50 por año $1 \leq F < 50$
Frecuencia Baja: Es poco usual o raro que ocurra el suceso iniciador, aunque se presupone que ha ocurrido.	f_B	$1/100\ 000 < P < 1/1000$	Entre 1 por año y 1 cada 100 años $0,01 \leq F < 1$
Frecuencia Muy Baja: Es muy raro que ocurra el suceso iniciador. No se tiene conocimiento de que haya ocurrido, pero se considera remotamente posible.	f_{MB}	$P < 1/100\ 000$	Menos de 1 cada 100 años $F < 0,01$

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

3) Identificación de la probabilidad de fallo de las barreras de seguridad (P)

En este punto se debe establecer si las barreras de seguridad bien sean de detección del problema o barreras que frenen el suceso iniciador se convierta en un accidente, son suficientes. Se debe tener en cuenta que cada una de las barreras identificadas para un solo suceso iniciador puede tener una probabilidad de fallo diferente. Los niveles para la probabilidad de fallo de las barreras se establecen:

Tabla B-7: Criterios para establecer probabilidad de fallos de barreras (FORO-OIEA, 2012)

Probabilidad	Acrónimo	Criterio
Alta	P_A	No hay ninguna barrera de seguridad.
Media	P_M	Hay una o dos barreras de seguridad
Baja	P_B	Hay tres barreras de seguridad
Muy Baja	P_{MB}	Hay cuatro o más barreras de seguridad. Existe suficiente defensa en profundidad

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

4) Identificación de las consecuencias

En relación con las consecuencias y su severidad, es necesario identificarlas después de enlistar y entender cada suceso iniciador, su frecuencia y su probabilidad de fallo de las barreras, es así como estas son parte fundamental para definir el nivel de riesgo en el servicio. Los niveles de consecuencias propuestos se basan en la magnitud de las desviaciones de dosis y en las manifestaciones clínicas esperadas en cada caso, en este punto se asume que ya se presentó el suceso iniciador y se presentaron fallos en las barreras de seguridad. En el modelo presentado por la referencia, los niveles se proponen tanto para pacientes como para público y personal ocupacionalmente expuesto, así:

Tabla B-8: Criterios para establecer nivel de consecuencias en pacientes (FORO-OIEA, 2012; Duménigo, Guerrero, López, & Paz, 2015)

Consecuencias	Acrónimo	Criterio
Muy Altas, catastróficas o muy graves	C_{MA}	Ocasionan muertes o daños limitantes a varios pacientes. Estas consecuencias pueden ser solo por sobredosis, para los estudios diagnósticos, ya que se ha considerado que, si el estudio no es útil clínicamente, se podrá hacer un proceder a posteriori que compense el error de subdosis. Las consecuencias Muy Altas pueden ser tanto por subdosis como por sobredosis.
Altas o graves	C_A	Ocasionan la muerte o daño limitantes a un solo paciente. En estudios diagnósticos se consideran solo por sobredosis. En el caso de la radioterapia metabólica, las consecuencias Altas pueden ser tanto por subdosis como por sobredosis. Se incluyen también en este nivel las exposiciones que tiene consecuencias sobre múltiples pacientes y cuyas desviaciones de dosis (subdosis o sobredosis) no provocan muertes o daños limitantes per si provocan exposiciones considerablemente superiores a los valores establecidos como orientativos.
Medias o moderadas	C_M	Clínicamente no ponen en riesgo la vida del paciente, son exposiciones que afectan a un paciente y provocan desviaciones de dosis considerablemente superiores a los valores establecidos como niveles orientativos.
Bajas	C_B	Disminución de la defensa en profundidad. No provocan desviaciones de dosis.

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

Tabla B-9: Criterios para establecer nivel de consecuencias en público y personal ocupacionalmente expuesto (FORO-OIEA, 2012).

Consecuencias	Acrónimo	Criterio
Muy Altas, catastróficas o muy graves	C_{MA}	Son aquellas que provocan efectos deterministas severos, siendo mortales o causantes de un daño permanente que reduce la calidad de vida de las personas afectadas.
Altas o graves	C_A	Son aquellas que provocan efectos deterministas, pero que no representan un peligro para la vida y no producen daños permanentes a la calidad de vida.
Medias o moderadas	C_M	Son aquellas que provocan exposiciones anómalas (o no previstas como normales, es decir, superan las restricciones de dosis o el límite de dosis establecidos en las regulaciones), que están por debajo de los umbrales de los efectos deterministas. Solo representan un aumento de la probabilidad de ocurrencia de efectos estocásticos.
Bajas	C_B	No se producen efectos sobre los trabajadores y público, pero se degradan las medidas de seguridad.

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

5) Determinación del nivel del riesgo

Se debe tener presente que el nivel de riesgo depende de las tres variables indicadas previamente (frecuencia, probabilidad y consecuencias), y que éstas no son cuantificadas, sino que se clasifican en

niveles. El nivel de riesgo está categorizado en 4 niveles así: Riesgo Bajo (R_B), Riesgo Medio (R_M), Riesgo Posiblemente Alto (R_A) y Riesgo Posiblemente Muy Alto (R_{MA}).

Partiendo de la ecuación $R = f \cap P \cap C$, y de la posibilidad de asociación de los niveles establecidos para las variables, es conveniente establecer un orden para la combinación de éstas; es así como el método de la matriz de riesgo plantea en primera instancia la combinación de las variables independientes del proceso (frecuencia y probabilidad de fallo de las barreras) teniendo en cuenta los cuatro niveles establecidos para cada una de ellas, dejando así 16 opciones.

Tabla B-10: Nivel de Riesgo parcial, producto de la frecuencia y la probabilidad de fallo de barreras de seguridad (FORO-OIEA, 2012).

Frecuencia	Probabilidad de fallo de barreras	Nivel de Riesgo parcial
Muy baja	Muy Baja	R_B
	Baja	R_B
	Media	R_B
	Alta	R_M
Baja	Muy Baja	R_B
	Baja	R_B
	Media	R_M
	Alta	R_M
Media	Muy Baja	R_M
	Baja	R_M
	Media	R_M
	Alta	R_A
Alta	Muy Baja	R_M
	Baja	R_M
	Media	R_A
	Alta	R_A

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

La segunda combinación se establece entre cada una de las opciones de la primera combinación, con los 4 niveles de la variable dependiente (consecuencias), lo que nos entrega un total de 64 opciones para la combinación de las tres variables. Sin embargo, tener 64 opciones para los niveles de riesgo no es algo práctico, de esta manera los niveles para el riesgo fueron establecidos por un grupo de expertos multidisciplinarios (entre los que se encuentran Médicos, Físicos Médicos, Tecnólogos del servicio),

clasificando los niveles en 4, así: Riesgo Bajo, Riesgo Medio, Riesgo Posiblemente Alto y Riesgo Posiblemente Muy Alto

Tabla B-11: Nivel de riesgo, producto del nivel de consecuencias y nivel de riesgo parcial (FORO-OIEA, 2012)

		Consecuencias			
		Bajas	Medias	Altas	Muy altas
Frecuencia \cap Probabilidad de fallo de barreras	R_B	R_B	R_B	R_B	R_M
	R_B	R_B	R_M	R_M	R_M
	R_B	R_B	R_M	R_M	R_A
	R_M	R_M	R_M	R_A	R_A
	R_B	R_B	R_B	R_B	R_M
	R_B	R_B	R_M	R_M	R_M
	R_M	R_B	R_M	R_A	R_A
	R_M	R_M	R_M	R_A	R_A
	R_M	R_B	R_M	R_M	R_M
	R_M	R_B	R_M	R_A	R_A
	R_M	R_M	R_M	R_A	R_A
	R_A	R_M	R_A	R_A	R_{MA}
	R_M	R_B	R_M	R_M	R_A
	R_M	R_B	R_M	R_A	R_A
	R_A	R_M	R_A	R_A	R_{MA}
	R_A	R_M	R_A	R_{MA}	R_{MA}

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

La expresión de posiblemente, en los dos niveles de riesgo más altos, hace referencia al enfoque conservador aplicado en la primera combinación, es decir, que en situaciones de duda se pueda generar un análisis posterior de acuerdo con el resultado asociado con su concatenación con el nivel de consecuencias. El enfoque conservador en un inicio, se debe a que se están verificando el número de barreras en la probabilidad de fallo de éstas, sin tener en cuenta que tan eficaz es y su calidad.

De acuerdo con la identificación de la frecuencia, probabilidad de fallo de barreras y consecuencias, y la determinación del nivel de riesgo mediante la inclusión de los niveles para cada variable en la matriz de riesgo, Tabla B-11, es necesario enlistar los niveles de riesgo para todas los sucesos iniciadores. Se aconseja que para las secuencias accidentales que tengan un nivel de riesgo alto o muy alto, se desarrolle

un análisis más específico mediante la aceptabilidad del riesgo y análisis de resultados del cribado y acciones correctoras.

Bajo la aplicación del presente método, se obtiene un nivel de riesgo, más no una cuantificación de este, por tal motivo, que dos sucesos tengan el mismo nivel de riesgo, no indica que su valor sea exactamente el mismo.

6) Aceptabilidad del riesgo

Hasta este punto la aplicación de la matriz de riesgo es conservadora, por tal motivo se establece una revisión ulterior a su aplicación para los niveles de riesgo alto y muy alto, considerando desde este punto la robustez, calidad y eficacia de las barreras de seguridad establecidas; adicionalmente se deben reforzar las medidas de seguridad para las secuencias que no cumplen con las criterio de aceptabilidad, es decir, se deben acciones mantener de mitigación y de protección.

Para la adopción de medidas de seguridad adicionales o reforzar las existentes se plantean dos prioridades, la primera para las secuencias accidentales en las que el nivel de riesgo sea muy alto o alto, y la segunda para las que el nivel de riesgo sea medio. De esta manera se establecen procesos de optimización, mejorando las condiciones de seguridad (FORO-OIEA, 2012).

En general la aceptabilidad del riesgo se puede plantear como la reconsideración del nivel de riesgo, partiendo de la calidad, robustez y eficacia de las barreras de seguridad y de los reductores de frecuencia y de consecuencias.

7) Análisis de resultados del cribado y acciones correctoras

Dadas las consideraciones en el item anterior, lo que se busca es que el nivel de riesgo inaceptable pase a ser aceptable, para lograr ello se puede establecer una reclasificación, y para lograrla habrá que implementar acciones determinadas (FORO-OIEA, 2012).

Tabla B-12: Criterios de aceptabilidad del riesgo y acciones correctoras (FORO-OIEA, 2012)

Intervalo de riesgo	Tolerabilidad del riesgo	Acciones
R_{MA}	Inaceptable	Se requiere paralizar la práctica y que se tomen las medidas necesarias para reducir el riesgo antes del reinicio de los trabajos.
R_A	Inaceptable si las consecuencias son altas o muy altas	Se requieren medidas inmediatas para reducir el riesgo o tendrá que paralizarse la práctica.
	Inaceptable, tolerable temporalmente bajo determinadas condiciones si las consecuencias son medias o bajas	Se requieren medidas para reducir el riesgo en un plazo apropiado de tiempo.
R_M	Tolerable según análisis costo/beneficio	Deben introducirse las mejoras o medidas que reduzcan el riesgo lo más bajo posible considerando criterios de costo/beneficio
R_B	Despreciable	No se requerirán acciones o medidas adicionales de seguridad.

Nombre de la fuente: Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia

Las acciones que de este análisis se desprendan corresponden a las acciones mitigadoras, protectoras o reparadoras para cada suceso iniciador según corresponda el caso.

Comparación método Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMFE) y Matriz de Riesgo

Partiendo de los métodos anteriormente explicados, y dada la inclusión del método AMFE en la matriz de riesgo, se presenta un cuadro comparativo de los dos métodos, Tabla 4-28, mostrando la similitud de dichos métodos y la posible redundancia al usar el método AMEF al momento de implementar la Matriz de Riesgo, es decir, existe la viabilidad de usar cualquiera de los dos métodos para el análisis de riesgos al interior de un servicio de medicina nuclear.

La información registrada en la Tabla 4-28 fue extraída para el Método Análisis de Modos y Efectos de Fallo del artículo Metodología AMFE como herramienta de gestión de riesgo en un hospital universitario (Consuegra Mateus, 2015), y las Notas Técnicas de Prevención NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos AMFE (Trabajo, 2004); para el Método de la Matriz de riesgo, la información fue extraída del documento Aplicación del método de la matriz el riesgo a la radioterapia (FORO-OIEA, 2012) y del artículo Matrices de riesgo en medicina nuclear, modelación en SEVRRRA (Duménigo, Guerrero, López, & Paz, 2015). Tabla B-13 Tabla B-13: Comparativo entre los métodos AMFE y Matriz de Riesgo

	Método de Análisis de Modos y Efectos de Fallo	Metodología de Matriz del Riesgo
Tipo de método	Cuantitativo	Semicuantitativo
Definición	Bajo este método se establece un nivel de riesgo asociado a cada una de las fallas en los procesos, y que se puede calcular mediante la asignación de valores numéricos a sus componentes.	Este método combina la frecuencia de un suceso iniciador, las consecuencias que se derivan de éste y el nivel de las barreras establecidas. Usando este método se puede obtener la clasificación en niveles del riesgo de forma semicuantitativa.
Pasos para su implementación	<ul style="list-style-type: none"> - Conformación del equipo de trabajo - Selección del proceso - Identificación de fallos - Calificación del riesgo <ul style="list-style-type: none"> - Efectos - Severidad - Causa potencial - Ocurrencia - Controles actuales de detección - Detección - Nivel Prioritario de Riesgo NPR - Priorización de fallos de acuerdo con el NPR - Acciones recomendadas - Definición de responsables - Re-evaluación de NPR 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de sucesos iniciadores - Identificación de frecuencia de presentación - Identificación de probabilidad de fallo de las barreras de seguridad. - Identificación de las consecuencias - Determinación del Nivel de Riesgo - Aceptabilidad del Riesgo - Análisis de resultados del cribado y acciones correctoras.

Si bien ambas metodologías resultan similares, la implementación del Método de la Matriz de Riesgo es de gran utilidad en medicina nuclear, ya que tiene un enfoque en protección radiológica, y es un método que ha sido estudiado ampliamente por el OIEA y el FORO Iberoamericano.

Suceso iniciador con consecuencias en TOE

Suceso iniciador: Un paciente ha sido administrado con 150 mCi (5.55 GBq) de I-131, por lo que se encuentra hospitalizado. Después de la administración del radiofármaco el paciente presenta náuseas, vómito, dolor en el pecho y mareos, por lo que es necesaria la atención por parte del personal médico.

Frecuencia: Teniendo en cuenta que la secuencia accidental no se deriva de un error humano, pero si de una probabilidad de presentar efectos adversos en el paciente, es aplicable la fórmula $f = P_{EH}f_T$, considerando que de cada 500 pacientes uno experimenta tales síntomas, se tiene que $P_{EH} = 0.002$; por otra parte, se considera que este tipo de exámenes se tres veces a la semana, en dos habitaciones, por lo que $f_T = 780$. La frecuencia entonces esta dada por $f = 0.002 * 780 = 1.56$, por lo que se considera que la frecuencia es **media**.

Probabilidad de fallo: se presentan las barreras existentes para el suceso iniciador.

Barreras directas:

- Instrucciones claras a los pacientes, para informar inmediatamente presentan algún síntoma que requiera atención.

Reductores de frecuencia:

- Capacitación y simulaciones dirigidas a lo TOE para atención de accidentes.

Reducores de consecuencias:

- Uso de elementos de protección radiológica personal.

Consecuencias: toda vez que las dosis recibidas no son derivadas de exposiciones normales, sino de exposiciones potenciales, se consideran que las consecuencias son **moderadas**.

Análisis del Riesgo

Código	Frecuencia	Probabilidad fallo de barreras	Consecuencias	Riesgo
ER-TOE-01	f_M	P_B	C_M	R_M

Suceso iniciador con consecuencias en público

Suceso iniciador: A una paciente se le administra 185 MBq (5 mCi) de I-131 para un rastreo gamagráfico, sin embargo, no se verifica previamente si la paciente se encuentra lactando. Cuando se adquieren las imágenes, se evidencia que hay una alta captación de I-131 en las mamas. Debido a la incorporación de I-131, el hijo de la paciente recibe una dosis que no se encontraba prescrita.

Frecuencia: Teniendo en cuenta que la secuencia accidental se deriva de un error humano, es aplicable la siguiente fórmula $f = P_{EH}f_T$, considerando que el tecnólogo trabaje sin estrés y dado que la admistración del radiofármaco es una tarea habitual para él, se espera que la probabilidad de error sea del 1 en 10.000, lo que corresponde a $P_{EH} = 1 \times 10^{-4}$; por otra parte, se considera que este tipo de exámenes se da 10 veces a la semana, y el 75% de las veces a mujeres, por lo que $f_T = 390$. La frecuencia entonces esta dada por $f = 1 \times 10^{-4} * 390 = 0.039$, por lo que se considera que la frecuencia es **baja**.

Probabilidad de fallo:

Barreras directas:

- Procedimiento interno mediante el cual el tecnólogo pregunta a las pacientes en edad fértil si se encuentra embarazada o lactando antes de la administración del radiofármaco.

Reductores de frecuencia:

- Ubicación de avisos informativos y de alerta para mujeres embarazadas o lactando.

Reductores de consecuencias:

- Procedimientos de emergencia para reducir la dosis en órganos críticos.

Consecuencias: Las consecuencias derivadas del evento son **muy altas**, dado que la dosis recibida por la tiroides del bebé está dada por $1.1 \times 10^{-6} \text{ Gy/Bq}$, lo que corresponde 203 Gy, generando así graves daños en la funcionalidad de la tiroides.

Análisis del Riesgo

Código	Frecuencia	Probabilidad fallo de barreras	Consecuencias	Riesgo
ER-PUB-01	f_B	P_B	C_{MA}	R_M

Suceso iniciador con consecuencias en paciente

Suceso iniciador: dos pacientes fueron citados el mismo día para terapia metabólica, el primero con 0.925 GBq (25 mCi) para terapia ambulatoria y el segundo con 5.55 GBq (150 mCi) para terapia hospitalaria, el tecnólogo a cargo confundió las dosis y al primer paciente le administra la dosis del segundo, por lo que la dosis recibida es mucho mayor que la prescrita.

Frecuencia: Teniendo en cuenta que la secuencia accidental se deriva de un error humano, es aplicable la siguiente fórmula $f = P_{EH}f_T$, considerando que el tecnólogo trabaje sin estrés y dado que la administración del radiofármaco es una tarea habitual para él, se espera que la probabilidad de error sea del 1 en 10.000, lo que corresponde a $P_{EH} = 1 \times 10^{-4}$; por otra parte, se considera que este tipo de exámenes se da 30 veces a la semana por lo que $f_T = 1560$. La frecuencia entonces está dada por $f = 1 \times 10^{-4} * 1560 = 0.156$, por lo que se considera que la frecuencia es **baja**.

Probabilidad de fallo:

Barreras directas:

- Procedimiento interno en el que el tecnólogo debe revisar el rótulo del radiofármaco contra los datos del paciente, antes de la administración. Adicionalmente, el tecnólogo se debe asegurar mediante preguntas al paciente.

Reductores de frecuencia:

- Simulaciones de atención a pacientes con el mismo radiofármaco, dirigidos a los TOE.

Reductores de consecuencias:

- Procedimientos de emergencia para reducir la dosis en órganos críticos.

Consecuencias: se presenta una sobredosisación del paciente, e incluso efectos determinísticos agudos, por lo que las consecuencias asociadas son **altas**.

Análisis del Riesgo

Código	Frecuencia	Probabilidad fallo de barreras	Consecuencias	Riesgo
ER-PAC-01	f_B	P_B	C_A	R_M

De acuerdo con la revisión de 3 sucesos iniciadores con consecuencias sobre pacientes, TOE y público, se identifican tres escenarios de Riesgo Medio, no obstante, dos de los escenarios tienen consecuencias altas o muy altas, por lo que es necesario establecer procedimientos de respuesta e incluirlos en el plan de emergencias radiológicas. En relación con el suceso de riesgo medio, pero con consecuencias moderadas en los TOE, se considera que dada la frecuencia de estos, es necesario contar con procedimientos de atención claros, así mismo, al involucrar limpieza de zonas contaminadas (bien sea por derrames en radiofarmacia, vómito en baños o habitaciones de hospitalización) se deben establecer procedimientos claros de descontaminación.

C. Anexo: Implementación del formato del plan de emergencias radiológicas

Se presenta la elaboración de algunos capítulos del plan de emergencias radiológicas, Anexo A, de acuerdo con los resultados de la evaluación de seguridad del Anexo B. Cabe aclarar que ciertos componentes no se desarrollarán ya que son específicos de la instalación.

Los ejemplos que se presentan se basan en un servicio de medicina nuclear está enfocado en el uso de I-131 para la administración de terapia metabólica, pero también realiza procedimientos de diagnóstico con Tc-99m, cuenta con cinco habitaciones de hospitalización para terapia metabólica de alta actividad, dos espacios adecuados para terapia metabólica de baja actividad, una Gammacámara para procedimientos de diagnóstico, consola, sala de lectura, una radiofarmacia de baja complejidad, un cuarto de desechos radiactivo, un sistema de gestión de vertidos radiactivos, una sala de pacientes inyectados, recepción y una sala de espera. El servicio de medicina nuclear cuenta con autorización para el uso de 18.5 GBq (500 mCi) y 111 GBq (3 mCi) semanalmente.

El equipo de trabajo del servicio de Medicina Nuclear y clasificado como TOE está conformado por: dos Médicos Nucleares, un Físico Médico, un Oficial de Protección Radiológica, dos Tecnólogos de Medicina Nuclear y un Profesional en Enfermería.

3.2. Escenarios de riesgo

Conforme a los resultados obtenidos en la Evaluación de Seguridad, se tienen los siguientes escenarios priorizados:

Tabla C-1: Información base para la matriz de riesgo

Código	Suceso iniciador – Secuencia accidental	Frecuencia	Probabilidad de fallo de barreras de seguridad	Consecuencias	Nivel de riesgo
ER-TOE-01	Paciente que debe ser atendido de urgencia después de la administración de I-131 para terapia metabólica	Media	Baja	Moderadas	Riesgo Medio
ER-PUB-01	Administración de radiofármaco a mujer lactante	Baja	Baja	Muy Altas	Riesgo Medio
ER-PAC-01	Administración de radiofármaco con actividad errada (superior a la prescrita)	Baja	Baja	Altas	Riesgo Medio

Tabla C-2: Niveles de riesgo

Nivel de riesgo	Acciones para tomar
Riesgo muy alto	Se requiere paralizar la práctica y que se tomen las medidas necesarias para reducir el riesgo antes del reinicio de las labores.
Riesgo alto	Se requieren medidas inmediatas para reducir el riesgo o tendrá que paralizarse la práctica. Se requieren medidas para reducir el riesgo en un plazo apropiado de tiempo.
Riesgo medio	Deben introducirse las mejoras o medidas que reduzcan el riesgo hasta lo más bajo posible considerando criterios de costo/beneficio
Riesgo bajo	No se requerirán acciones o medidas adicionales de seguridad.

Tabla C-3: Relación escenarios de riesgo con el nivel de riesgo

Escenario de riesgo	Nivel de consecuencia – Población	Acción que implementar	Responsable de la respuesta
ER-TOE-01 Paciente que debe ser atendido de urgencia después de la administración de I-131 para terapia metabólica	Moderadas – TOE	- Atención integral de la urgencia médica - Monitoreo de tasa de dosis en el tiempo que se desarrolle la atención médica - Gestión de desechos de materiales contaminados y descontaminación de elementos y personal que participe en la atención.	Médico Nuclear Auxiliar de Enfermería Oficial de Protección Radiológica

Escenario de riesgo	Nivel de consecuencia – Población	Acción que implementar	Responsable de la respuesta
ER-PUB-01 Administración de radiofármaco a mujer lactante	Muy Altas – Público	- Aislamiento del público afectado - Procedimiento de reducción de dosis a órganos críticos - Gestión de desechos de materiales contaminados y descontaminación de elementos y personal que participe en la atención.	Médico Nuclear Físico Médico
ER-PAC-01 Administración de radiofármaco con actividad errada (superior a la prescrita)	Altas – Paciente	- Aislamiento del paciente, de ser necesario - Procedimiento de reducción de dosis a órganos críticos - Gestión de desechos de materiales contaminados y descontaminación de elementos y personal que participe en la atención.	Médico Nuclear Físico Médico

4. Capítulo 3. Bases de planificación

4.1. Niveles de referencia y acciones a implementar

Tabla C-4: Niveles de referencia

Niveles de referencia	Límite de dosis
Niveles de intervención	Establecidos por la instalación
Niveles de actuación	

Los niveles de referencia se establecen para niveles de dosis, mientras que los niveles de actuación se establecen para tasa de dosis o contaminación.

Tabla C-5: Relación escenarios de riesgo - Niveles de referencia

Escenario de riesgo – ER-TOE-01			
Paciente que debe ser atendido de urgencia después de la administración de I-131 para terapia metabólica			
Nivel de actuación		Nivel de intervención	X
Descripción acciones o medidas			
<i>Se implementarán medidas protectoras para los TOE.</i>			
Momento de aplicación de la medida			
<i>Las medidas se deben mantener el tiempo que tarde la atención del paciente, gestión de desechos radiactivos y descontaminación de elementos y personal.</i>			
<i>Los procedimientos asociados son:</i>			
Objetivo y alcance de la medida a implementar			
<i>Mantener condiciones de seguridad y protección radiológica para los TOE que se encargan de la atención del paciente, garantizando que se mantenga el principio ALARA.</i>			

Escenario de riesgo – ER-PUB-01			
Administración de radiofármaco a mujer lactante			
Nivel de actuación		Nivel de intervención	X
Descripción acciones o medidas			
<i>Se deben implementar medidas de mitigación y reparación para el bebé lactante.</i>			
Momento de aplicación de la medida			
<i>Inmediatamente se identifique que el bebé ha consumido leche materna contaminada. Entre las acciones de mitigación está la suspensión de la lactancia materna y procedimientos para reducir la dosis a órganos críticos.</i>			
Objetivo y alcance de la medida a implementar			
<i>Reducir lo máximo posible la dosis a órganos críticos en el bebé lactante, en el menor tiempo posible.</i>			

Escenario de riesgo – ER-PAC-01			
Administración de radiofármaco con actividad errada (superior a la prescrita)			
Nivel de actuación		Nivel de intervención	X
Descripción acciones o medidas			
<i>Se deben implementar medidas de mitigación y reparación para el paciente.</i>			
Momento de aplicación de la medida			
<i>Inmediatamente se identifique que al paciente se le ha administrado una dosis mayor a la prescrita.</i>			
Objetivo y alcance de la medida a implementar			
<i>Reducir lo máximo posible la dosis a órganos críticos en el paciente.</i>			

4.2. Criterios para implementar el plan de emergencias radiológicas

El plan de emergencias deberá implementarse siempre que:

- Se identifique la presencia de una secuencia accidental, de forma tal que se tomen las medidas para que no se presenten o minimizar las consecuencias,
- Se sobrepasen el nivel de intervención o de actuación.

4.3. Apoyo logístico, material, asistencia de profesionales de la medicina, la salud y evacuación del público.

Tablas C-6: Inventario de materiales, equipos e instrumentación de emergencia

Elemento	Cantidad	Estado	Ubicación
Kit de descontaminación	1	Bueno	Radiofarmacia de baja complejidad
Kit de descontaminación interna	1	Bueno	Sala de lectura
Extintores	4	Bueno	Pasillo habitaciones de hospitalización; Sala de lectura; Radiofarmacia Sala de espera

Elemento	Cantidad	Estado	Ubicación
Equipo de atención emergencia médica	1	Bueno	Sala de lectura

Tabla C-7: Entidades de apoyo (externas)

Institución	Referente	Teléfono
Bomberos		
Defensa Civil		
Policía Nacional		
Cruz Roja		
Asesor externo		
Servicio Geológico Colombiano		

6. Capítulo 5. Organización de la respuesta

La estructura organizativa para la respuesta a emergencias, si bien es similar la estructura organizativa de la instalación, difiere en la jerarquía para la toma de decisiones, toda vez que los escenarios de riesgo radiológico deberán ser atendidos por personal idóneo.

Figura C-1: Organigrama del servicio de medicina nuclear

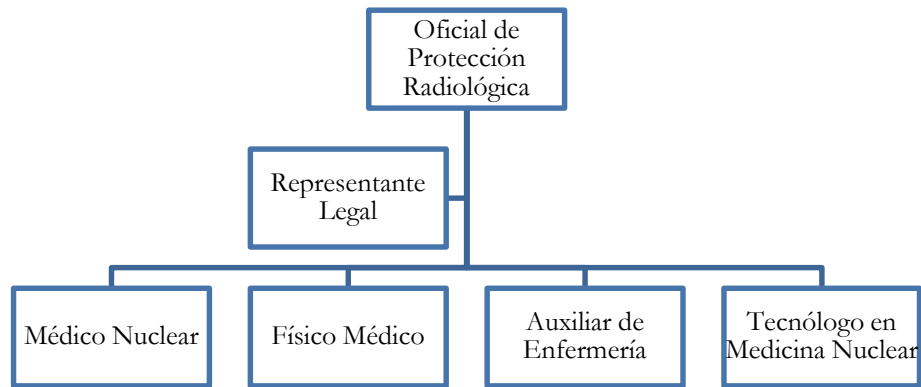
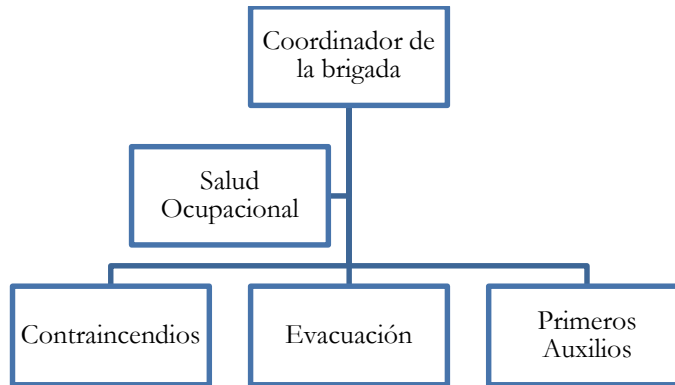


Figura C-2: Organigrama de la Brigada de Emergencias



7. Capítulo 6. Operaciones – Implementación de la respuesta

7.2. Planes y procedimientos

Partiendo de las acciones y medidas establecidas en las tablas C-5, se presentan a continuación los procedimientos asociados.

Tablas C-8: Descripción de procedimiento para cada escenario de riesgo identificado.

Nombre del procedimiento	Descontaminación radiactiva
Escenario de riesgo asociado	ER-TOE-01
Objetivo y alcance	Descontaminación de derrames de material radiactivo
Responsables	Tecnólogo de Medicina Nuclear Oficial de Protección Radiológica
Material y equipos	<ul style="list-style-type: none"> – Monitor de radiación de área, con baterías de repuesta (bien puede ser el usado en el servicio, no obstante, se debe tener precaución en que éste no esté contaminado para evitar medidas erróneas en el monitoreo de área). – Ropa protectora, traje anti fluidos, guantes, monogafas, polainas desechables, cinta perimetral, gorros desechables. – Equipo para descontaminación personal: jabón, cepillo de cerdas suaves para uñas, gasas y paños suaves. – Equipo para descontaminación de superficie: balde, toallas de papel absorbente, detergente, paños, alcohol, contenedores rígidos apropiados para elementos punzantes, vidrios rotos, agujas. – Carteles de advertencia para evitar la entrada, marcadores para delimitar áreas contaminadas, cinta para sellar bolsas de residuos – Se sugiere que contenga el protocolo de descontaminación y números telefónicos importantes.
Instrucciones (paso a paso)	1. Evacuar a las personas que no tuvieron contacto con el derrame, realizando el monitoreo personal al momento de retirarse de la sala.

	<ol style="list-style-type: none"> 2. Realizar monitoreo de área y verificar el lugar específico de la contaminación. 3. Medir con el detector en $\mu\text{Sv/h}$ o Cuentas por minutos (CPM), de acuerdo con la generalidad del servicio, a un metro de distancia del lugar del derrame. 4. Se debe acordonar el área y, los elementos que fueron usados para la primera verificación desechados en bolsas color púrpura (o blanco) y ésta depositada en el cuarto de desechos radiactivos. Además de acordonar la zona, se deben usar señales que indiquen que hay emisión de radiación ionizante. 5. Usar los elementos de protección radiológica personal, se recomienda el uso de dos pares de guantes y estar cambiando el segundo par. 6. Monitorear y marcar las áreas contaminadas, controlar si hay elementos punzantes tales como aguas o vidrios rotos. 7. La limpieza se realiza humedeciendo las toallas o paños absorbentes con detergente, cuidando de no extender la contaminación. La descontaminación se realiza siempre de la periferia hacia el centro del derrame, en forma de espiral. 8. El proceso de limpieza y descontaminación deberá realizarse hasta que la contaminación esté entre los niveles de referencia. Algunas referencias indican que la descontaminación se da usualmente por terminada cuando el conteo o la radiación medida es reducida al doble de la radiación de fondo o las medidas de descontaminación son ineficaces (en el último caso será necesario tomar alternativas de protección radiológica) (Sarmiento, Sarmiento, Sarmiento, & Nespral) 9. Los elementos usados para la limpieza deberán ser depositados en bolsas color púrpura (o blanco), y estas se deben rotular y ser dispuestas en un lugar adecuado. 10. Al finalizar las tareas de limpieza y descontaminación se debe hacer el monitoreo de área y del personal, midiendo ropa, zapatos, manos y demás elementos que pudieron haber tenido contacto con el material radiactivo.
Precauciones	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de los elementos de protección radiológica personal - Acordonar el área - Tomar el tiempo de atención y tasas de dosis

Mecanismos de notificación

Tablas C-9: Mecanismos de notificación

#	Cargo – Nombre del contacto	Mecanismos de notificación	A quien informa	Teléfono – Correo electrónico
1	Auxiliar de enfermería	Verbal y/o personalmente	Oficial de Protección Radiológica	<i>[Se incluye la información del cargo de la columna anterior]</i>
			Médico Nuclear	
2	Tecnólogo en Medicina Nuclear	Verbal y/o personalmente	Oficial de Protección Radiológica	
			Médico Nuclear	

#	Cargo – Nombre del contacto	Mecanismos de notificación	A quien informa	Teléfono – Correo electrónico
3	Oficial de Protección Radiológica	Verbal y/o personalmente	Representante Legal	
			Médico Nuclear	
4	Médico Nuclear		-	
5	Físico Médico		-	
6	Representante Legal	Telefónicamente	Servicio Geológico Colombiano	
		Vía correo electrónico		
7	Servicio Geológico Colombiano		-	

D. Anexo: Contenido sugerido del programa de capacitación en emergencias radiológicas

En este anexo se presenta, a modo de sugerencia, el contenido del programa de capacitación.

Si bien la formulación del plan de emergencias radiológicas es fundamental para la atención de eventos que supongan la exposición a radiaciones ionizantes de forma no controlada, es importante entender que la formación y capacitación para la atención de dichas situaciones es fundamental para garantizar que los efectos y consecuencias sean mínimos. De esta manera el programa de capacitación en emergencias radiológicas está dirigido al capital humano de los servicios de medicina nuclear, con el fin de ampliar su conocimiento en seguridad y protección radiológica, enfocadas en la atención de emergencias radiológicas en el servicio.

Por su parte los ejercicios prácticos y simulacros son un componente fundamental en el desarrollo del programa de capacitación, ya que este tipo de actividades permite identificar posibles fallas en la atención y respuesta a emergencias radiológicas, además de solucionar dudas en torno a protocolos y procedimientos establecidos en el plan de emergencias radiológicas, evitando errores al momento de implementarlos en situaciones reales.

El programa de capacitación, como se mencionó en la generalidad del documento, debe ser lo más claro posible, integrando en él algunos puntos indicados por la resolución 90874/2014, como:

- Tipos de entrenamiento del capital humano (general y específicos)
- Simulacros y ejercicios (teóricos, prácticos, parciales e integrales)
- Alcance y frecuencias de la capacitación
- Actividades de capacitación
- Actividades de evaluación

Como parte de la presentación de la información se sugiere que esta sea condensada por cada uno de los temas sugeridos, así pues, la Tabla D-1 podrá repetirse tantas veces sea necesario para abarcar todos los temas propuestos.

Tabla D-1: Modelo plan de capacitación

Tema	
Objetivos y alcance	
Tipo de entrenamiento	
Dirigido a	
Descripción de la actividad	
Duración	
Fecha y frecuencia de actualización	
Tipo de evaluación	
Ejercicio práctico o simulacro	

Los temas sugeridos para el programa de capacitación se plantean a partir del plan de emergencias radiológicas, así pues, este podrá ser complementado de acuerdo con las necesidades del servicio. A su vez, parte de la capacitación y entrenamiento del capital humano debe estar enfocado hacia la aplicación de los protocolos y procedimientos desarrollados en el plan de emergencias, por tal razón estará enfocada a la revisión de éstos. El programa de capacitación no considera temas básicos de las radiaciones ionizantes, toda vez que se asume su conocimiento por parte del capital humano.

Temas sugeridos:

- Socialización del plan de emergencias radiológicas
- Qué son emergencias radiológicas
- Identificación de las emergencias radiológicas
- Respuesta inicial a emergencias radiológicas
- Revisión de protocolos y procedimientos (ejemplo: protocolos de descontaminación)
- Elementos de protección radiológica personal
- Generalidades de la seguridad y la protección radiológica (actividad específica para la brigada de emergencia del centro médico)

Es importante incluir en el programa de capacitación los procesos de articulación con las brigadas de emergencias de los centros médicos, en los que socialicen las responsabilidades del capital humano tanto del servicio de medicina nuclear como de los integrantes de las brigadas de emergencia. Este tipo de socialización es de gran importancia, toda vez que los integrantes de la brigada no tienen el conocimiento requerido en relación con el uso y la peligrosidad de los materiales radiactivos.

E. Anexo: Ejemplo de implementación del proceso de capacitación

Como parte de la formulación del programa de capacitación para emergencias radiológicas, se implementó con estudiantes de la Maestría en Física Médica una sesión de capacitación enfocada a la contención de derrames y limpieza de áreas contaminadas con material radiactivo. Se presentan en este anexo las características y desarrollo de dicha actividad.

Tabla E-1: Aplicación modelo plan de capacitación

Temas	Emergencias radiológicas Contención de derrames y descontaminación de áreas Elementos de protección personal Elementos del kit de descontaminación Control de área y personal contaminado
Objetivos y alcance	Desarrollar las habilidades para la contención de derrames de material radiactivo, así como la limpieza de áreas contaminadas. Identificar la importancia del uso de los elementos de protección personal.
Tipo de entrenamiento	Específico
Dirigido a	Tecnólogos en medicina nuclear, Auxiliares de Enfermería, Físicos Médicos.
Descripción de la actividad	La actividad se desarrolla en dos componentes: teórico y práctico. Se exponen los temas en modo de conversatorio, permitiendo a los participantes realizar preguntas conforme se desarrolla el tema. En la segunda parte de la capacitación se contempla el desarrollo del ejercicio práctico que se encontrará más adelante.
Duración	2 horas
Fecha y frecuencia de actualización	24 de noviembre de 2016. Se plantea la actividad semestralmente como parte de la formación de los estudiantes de la Maestría en Física Médica
Tipo de evaluación	Previo a la actividad se resuelve un corto cuestionario, con el que se pretende identificar el nivel de conocimiento frente a los temas a tratar. Al finalizar la actividad se plantea el mismo cuestionario a los participantes para medir el cumplimiento de los objetivos y entendimiento de los temas.
Ejercicio práctico o simulacro	La actividad contempla la simulación de la contención de un derrame de material radiactivo, la descontaminación y limpieza de las áreas contaminadas y el monitoreo de área y personal.

Descripción y desarrollo de la actividad por puntos

1. Pre-test: la aplicación del test a los participantes se considera como un mecanismo de verificación de la adquisición de conocimientos, además de dar una idea general de los conocimientos actuales de los participantes.

El test se compone de 5 preguntas así:

- ¿Qué es una emergencia radiológica?
- ¿Qué tipos de detectores se usan para el monitoreo de área y del personal?
- ¿Cuál es el nivel de contaminación que se debe alcanzar después de realizar la limpieza de un derrame?
- ¿Qué elementos tiene un kit de descontaminación?
- ¿En qué momentos se debe realizar el monitoreo de área cuando ocurre un derrame de material radiactivo?

2. Presentación y desarrollo de los temas

Como parte de la presentación de los temas, se retoman las preguntas del pre-test con el ánimo de incentivar el conversatorio. Así como la inclusión de algunos apuntes necesario para completar el tema.

Los temas expuestos corresponden a:

Emergencias radiológicas: definidas por el OIEA como emergencias en las que se percibe un peligro debido a la energía producida por una reacción nuclear en cadena o la desintegración de los productos de una reacción en cadena, o la exposición a la radiación. Una de las características de las emergencias es la presentación inesperada o no controlada de la radiación, que afectan las condiciones de seguridad y que requieren una intervención rápida para evitar mayores exposiciones.

plan de emergencias radiológicas: es un documento en el cual se consigna toda la información referente a la identificación de los escenarios de riesgo radiológicos y sus posibles consecuencias; medidas de mitigación, protección y reparación; responsables de la atención y respuesta; protocolos y procedimientos de atención; manejo de la información. En general un plan de emergencias radiológicas debe entregar la información suficiente sobre el antes, durante y después de la presentación de una emergencia e indicar los procesos relativos a estas.

Normativa Colombiana asociada con planes de emergencias radiológicas: La ley 1523 de 2012 hace referencia a la gestión del riesgo de desastres en Colombia, y las resoluciones 181434/2002 y 90874/2014 del Ministerio de Minas y Energía adoptan el reglamento de protección y seguridad radiológica y, los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de

fuentes radiactivas y las inspecciones de las instalaciones radiactivas, respectivamente. Cabe aclarar que las tres normas hacen referencia a los conceptos básicos que debe incluirse en los planes de emergencia radiológica.

3. Colocación y retiro de elementos de protección personal (EPP)

En relación con los EPP es necesario aclarar que son elementos usados para evitar la contaminación por material radiactivo, más no para blindar la radiación ionizante.

Como parte de los EPP están: guantes de látex, polainas desechables, trajes tyvek, gorros, monogafas. En la práctica los participantes tuvieron la oportunidad de usar dichos elementos para la contención y limpieza del derrame.

Figura E-1: Práctica de elementos de protección personal, colocación elementos.



Figura E-2: Práctica de elementos de protección personal, retiro elementos



Entre los elementos fundamentales con los que debe contar el personal ocupacionalmente expuesto, y en especial el personal que se encarga de ejecutar la respuesta en situaciones de emergencia, se destacan los detectores de radiación y dosimetría personal.

4. Contención y limpieza de derrame de material radiactivo

El ejercicio práctico se desarrolló bajo la consideración del siguiente caso de estudio: A un paciente de 30 años se le administran 100 mCi de ^{131}I líquido para tratar adenocarcinoma de tiroides, al momento de la administración del radiofármaco, se genera un derrame sobre la mesa en la que se encuentra el vial, amenazando con caer sobre el piso de la habitación. El personal encargado de la administración del radiofármaco informa inmediatamente al Oficial de Protección Radiológica para la atención de la situación.

Para simular el derrame de material radiactivo, y que fuera fácil identificar si las labores de limpieza y descontaminación se desarrollan de la forma adecuada, se utilizó azul de metileno para colorear el agua que fue usada como material derramado.

A continuación, se presenta el protocolo (ejemplo) que se usó para la limpieza y descontaminación del derrame

- Evacuar a las personas que no tuvieron contacto con el derrame, realizando el monitoreo personal al momento de retirarse de la sala.
- Realizar monitoreo de área y verificar el lugar específico de la contaminación.
- Medir con el detector en $\mu\text{Sv/h}$ o Cuentas por minutos (CPM), de acuerdo a la generalidad del servicio, a un metro de distancia del lugar del derrame.
- Se debe acordonar el área y, los elementos que fueron usados para la primera verificación desechados en bolsas color púrpura (o blanco) y ésta depositada en el cuarto de desechos radiactivos. Además de acordonar la zona, se deben usar señales que indiquen que hay emisión de radiación ionizante.
- Usar los EPP, se recomienda el uso de dos pares de guantes y estar cambiando el segundo par.
- Monitorear y marcar las áreas contaminadas, controlar si hay elementos punzantes tales como aguas o vidrios rotos.
- La limpieza se realiza humedeciendo las toallas o paños absorbentes con detergente, cuidando de no extender la contaminación. La descontaminación se realiza siempre de la periferia hacia el centro del derrame, en forma de espiral.
- El proceso de limpieza y descontaminación deberá realizarse hasta que la contaminación esté entre los niveles mostrados en la Tabla E-2. Algunas referencias indican que la descontaminación se da usualmente por terminada cuando el conteo o la radiación medida es reducida al doble de la radiación de fondo o las medidas de descontaminación son ineficaces

(en el último caso será necesario tomar alternativas de protección radiológica) (Sarmiento, Sarmiento, Sarmiento, & Nespral).

- Los elementos usados para la limpieza deberán ser depositados en bolsas color púrpura (o blanco), y estas se deben rotular y ser dispuestas en un lugar adecuado.
- Al finalizar las tareas de limpieza y descontaminación se debe hacer el monitoreo de área y del personal, midiendo ropa, zapatos, manos y demás elementos que pudieron haber tenido contacto con el material radiactivo.

Así como se establecen protocolos para la limpieza de contaminación de área, es necesario relacionar los elementos necesarios para tal fin. Por lo anterior se presenta a continuación los implementos que debe tener el Kit de descontaminación

- Monitor de radiación de área, con baterías de repuesta (bien puede ser el usado en el servicio, no obstante, se debe tener precaución en que éste no esté contaminado para evitar medidas erróneas en el monitoreo de área).
- Ropa protectora, traje anti fluidos (de ser posible tyvek), guantes, monogafas, polainas desechables, cinta perimetral, gorros desechables.
- Equipo para descontaminación personal: jabón, cepillo de cerdas suaves para uñas, gasas y paños suaves.
- Equipo para descontaminación de superficie: balde, toallas de papel absorbente, detergente, paños, alcohol, contenedores rígidos apropiados para elementos punzantes, vidrios rotos, agujas.
- Carteles de advertencia para evitar la entrada, marcadores para delimitar áreas contaminadas, cinta para sellar bolsas de residuos
- Se sugiere que contenga el protocolo de descontaminación y números telefónicos importantes.

Nota: siempre se debe tener la facilidad para la consecución de agua limpia para los diversos procesos de descontaminación.

5. Monitoreo de fuentes, de área y del personal

El monitoreo es una de las actividades que se debe realizar constantemente en los lugares donde se hace uso de radiaciones ionizantes, no obstante, en situaciones de emergencia radiológicas dichos monitoreos se consideran indispensables para mantener la información adecuada sobre las tasas de dosis y los niveles de radiación. Como documento referencia para todos los procedimientos de monitoreo, se encuentra la publicación del OIEA “Monitorización del medio ambiente y de las fuentes de radiación con fines de protección radiológica”.

Los límites de contaminación superficial que sugiere el OIEA, y que están relacionados con el tipo de radionucleido usado, se muestran en la Tabla E-2

Tabla E-2: Niveles de contaminación (OIEA)

Clase de radiotoxicidad	Zona		
	Controlada (Bq/cm ²)	Supervisada (Bq/cm ²)	Cuerpo (Bq/cm ²)
Grupo A	30	3	3
Grupo B	300	30	30
Grupo C	3000	300	300

La radiotoxicidad es una propiedad de los residuos radiactivos que define su peligrosidad desde el punto de vista biológico. Así mismo la radiotoxicidad se relaciona con el tipo de radiación emitida, el periodo de semidesintegración, la rapidez en la que es eliminado del organismo, y si puede fijarse en órganos o tejidos específicos. Por lo anterior se consideran algunas categorías para el nivel de radiotoxicidad como (Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 2000):

- Grupo A: comprende los radionucleidos de más alta toxicidad, ejemplo: ²²⁶Ra, ²³⁹Pu
- Grupo B: comprende los radionucleidos de toxicidad entre media y alta, ejemplo ⁹⁰Sr, ¹²⁵I, ¹³¹I
- Grupo C: comprende los radionucleidos de toxicidad entre media y baja, ejemplos ³²P, ¹⁸⁹Au, ^{99m}Tc
- Grupo D: comprende radionucleidos de baja toxicidad entre los que se encuentren ³H, ⁹⁹Tc

Figura E-3: Monitoreo del personal



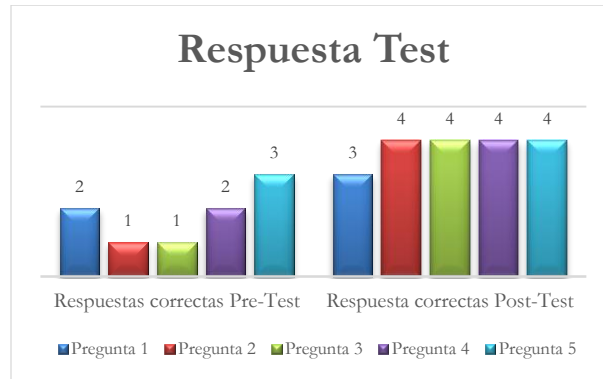
En la Figura E-3 se puede observar el momento en el que se demuestra cómo se debe hacer el monitoreo del personal, posterior a la limpieza y descontaminación del derrame, y retiro de los elementos de protección personal.

6. Post-test

Para concluir el ejercicio, los participantes resuelven nuevamente el test inicial, lo que permite identificar el cumplimiento del objetivo propuesto para la capacitación.

La capacitación estuvo dirigida a los estudiantes de la Maestría en Física Médica, con un total de 4 personas, con rangos de edad entre 24 y 27 años.

Figura E-4: Resultados Test



Los participantes tuvieron oportunidad de resolver las preguntas antes y después del proceso de capacitación. De acuerdo con las respuestas se puede asumir un resultado positivo en los conocimientos adquiridos, toda vez que las respuestas posteriores a la capacitación fueron en su mayoría acertadas por los participantes.

Tabla E-3: Resultados Test

Pregunta	% Respuestas correctas Pre-Test	% Respuestas correctas Post-Test
¿Qué es una emergentica radiológica?	50%	75%
¿Qué tipos de detectores se usan para el monitoreo de área y del personal?	25%	100%
¿Cuál es el nivel de contaminación que se debe alcanzar después de realizar la limpieza de un derrame?	25%	100%
¿Qué elementos tiene un kit de descontaminación?	50%	100%
¿En qué momentos se debe realizar el monitoreo de área cuando ocurre un derrame de material radiactivo?	75%	100%

Referencias

- Balderas Cañas, R. (2008). *Análisis de Riesgo de Instalaciones Radiológicas*. México : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cárdenas Herrera, J. (13 de Abril de 2015). *X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*. Obtenido de IRPA:
<http://www.irpabuenosaires2015.org/Archivos/archivos/Cursos/13%20ABR%20CR-1%20RESPUESTA%20MEDICA%20EN%20EMERGENCIAS%20RADIOLOGICAS/CA RDENAS%205-%20Sindrome%20cutaneo%20de%20la%20radiacion%20argentina.pdf>
- Chain, Y., & Illanes, L. (2015). *Radiofármacos en Medicina Nuclear. Fundamentos y aplicación clínica*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2008). Curso General de Formación de Actuantes en Emergencias Nucleares. España.
- Consuegra Mateus, O. (2015). Metodología AMFE como herramienta de gestión de riesgo en un hospital universitario. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración, Volumen XI*, 37-50.
- Decreto 70. (17 de Enero de 2001). Decreto 70 del 17 de enero de 2001. *Decreto de la Presidencia de la República*. Bogotá D.C., Colombia.
- Duménigo, C., Guerrero, M., López, R., & Paz, A. (2015). Matrices de riesgo en Medicina Nuclear. Modelación en SEVRRRA. *X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*.
- Durand, J. L. (Junio de 2000). *Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante*. Bariloche, Argentina.
- E.Christian, P., & Waterstram-Rich, K. M. (2012). *Nuclear Medicine and PET/CT Technology and Techniques*. St. Louis: Elsevier.
- FORO-OIEA. (2012). *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia*. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Gamma Imagen. (2016). *Fundación Hospital General de la Santísima Trinidad*. Obtenido de Gamma Imagen: <http://www.gammainimagen.es/>
- Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*. (2006). Washington.

- ICRP. (2007). *ICRP 103. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Madrid: Senda Editorial S.A.
- Ilustre Colegio Oficial de Físicos. (2000). *Origen y gestión de residuos radiactivos*. Enresa.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Nuclear Medicine Physics. A Handbook for Teachers and Students*. Vienna: IAEA Library Cataloguing in Publication Data.
- Ley 1523. (24 de Abril de 2012). Ley 1523 de 2012 - Congreso de la República de Colombia. *Diario Oficial de la República de Colombia*.
- Ley 9. (24 de Enero de 1979). Ley 9 de 1979 - Congreso de la República de Colombia. *Diario Oficial de la República de Colombia*.
- OIEA. (1997). *Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las fuentes de Radiación*. Viena.
- OIEA. (2004). *Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear radiológica*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2007). *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2007). *Manual para Primeros Actuantes ante Emergencias Radiológicas*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2009). *Clasificación de las fuentes radiactivas*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2009). *Método para elaborar disposiciones de respuesta a emergencias nucleares o radiológicas*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2010). *Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2014). *Enseñanzas extraídas de la respuesta a emergencias radiológicas (1945-2010)*. Viena: OIEA.
- OIEA. (11 de Noviembre de 2016). *International Nuclear Information System*. Obtenido de IAEA: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/052/33052454.pdf
- OIEA. (s.f.). OIEA Material de Capacitación en Protección Radiológica en PET/CT. *Protección Radiológica en PET/CT*. Viena: OIEA.
- OIT. (2001). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Madrid: Chantal Dufresne, BA.
- OMS. (Abril de 2016). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Centro de Prensa: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>
- Otero Ruiz, E. (2002). *La Medicina Nuclear. Temprana historia y reminiscencias personales*. Bogotá: Kimpres Ltda.
- Podgorsak, E. (2010). *Radiation Physics for Medical Physicists*. Springer.

- Powsner, R., & Powsner, E. (2006). *Essential Nuclear Medicine Physics*. Massachusetts: Blackwell Publishing Ltd.
- Quintero Mejía, P. A. (2012). Estudio in vitro de la supervivencia en células tumorales irradiadas con un acelerador lineal de uso clínico. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Resolución 180052. (21 de Enero de 2008). Resolución 180052 de 2008. *Resolución 180052 del Ministerio de Minas y Energía*. Bogotá D.C., Colombia.
- Resolución 181434. (12 de Mayo de 2002). Resolución 181434 de 2002. *Resolución 181434 del Ministerio de Minas y Energía*. Bogotá D.C., Colombia.
- Resolución 2003. (28 de Mayo de 2014). Resolución 2003 de 2014. *Resolución 2003 del Ministerio de Salud y Protección Social*. Bogotá D.C., Colombia.
- Resolución 90874. (12 de Agosto de 2014). Resolución 90874 de 2014. *Resolución 90874 del Ministerio de Minas y Energía*. Bogotá D.C., Colombia.
- Sarmiento, F., Sarmiento, A., Sarmiento, A., & Nespral, D. (s.f.). Emergencias Radiactivas.
- Sociedad Argentina de Radioprotección. (2011). *ICRP Publicación 105. Protección Radiológica en Medicina*. Buenos Aires.
- Sociedad Española de Física Médica. (2011). *Fundamentos de Física Médica* (Vol. I: Medida de la Radiación). Madrid: ADI Servicios Editoriales.
- Sociedad Española de Física Médica. (2014). *Fundamentos de Física Médica* (Vols. Vol 6. Medicina Nuclear: bases físicas, equipos y control de calidad.). Madrid: ADI Servicios Editoriales.
- Sopena Novalesca, P., Plancha Mansanet, M., Martínez Carsi, C., & Sopena Monforte, R. (2013). Medicina Nuclear y Radiofármacos. *Elsevier España*, 56, 9.
- Trabajo, I. N. (2004). NTP 679. *NTP 679: Análisis Modal de Fallos y efectos*. AMFE. España.
- Turner, J. E. (2007). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Zimmermann, R. (2006). *Nuclear Medicine Radiactivity for Diagnosis and Therapy*. Les Ulis: EDP Sciences.