



**BUAP**

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA  
COMPLEJO REGIONAL NORORIENTAL  
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA SALUD TEZIUTLÁN

**“LA IMPORTANCIA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN SALA DE  
RAYOS X CONVENCIONALES”**

**TESINA**

Para obtener el título de:

**PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGÍA**

Presenta

***Daniel Hernández Ortega***

Director experto:

***T.R. Anallely Melgarejo Baltazar***

Director metodológico:

***Dr. Fabio Morandín Ahuerma***

Teziutlán, Puebla.

Agosto, 2023.



**BUAP**

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA  
COMPLEJO REGIONAL NORORIENTAL  
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA SALUD TEZIUTLÁN

**“LA IMPORTANCIA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN SALA DE  
RAYOS X CONVENCIONALES”**

**TESINA**

Para obtener el título de:

**PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGÍA**

Presenta

***Daniel Hernández Ortega***

Teziutlán, Puebla.

Agosto, 2023.



**BUAP**

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA  
COMPLEJO REGIONAL NORORIENTAL  
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA SALUD TEZIUTLÁN

**“LA IMPORTANCIA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN SALA DE  
RAYOS X CONVENCIONALES”**

**TESINA**

Para obtener el título de:

**PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGÍA**

Presenta

***Daniel Hernández Ortega***

Director experto:

***T.R. Anallely Melgarejo Baltazar***

Director metodológico:

***Dr. Fabio Morandín Ahuerma***

Revisores:

***T.R. Ulises Giovanni Romero García***

***T.R. Andrés Hernández Apango***

Teziutlán, Puebla.

Agosto, 2023.



**BUAP**

OFICIO:CRZN/2404/2021

**C. DANIEL HERNANDEZ ORTEGA  
P R E S E N T E .**

En atención a la solicitud con fecha 28 de octubre de 2021 presentada a la Responsable de Titulación y Seguimiento de Egresados para la revisión y autorización del anteproyecto titulado: **"LA IMPORTANCIA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN SALA DE RAYOS X CONVENCIONALES"** para sustentar examen profesional comunico a usted lo siguiente:

1.- Se acepta en lo general el anteproyecto con la salvedad de que se cumpla con las observaciones que tanto el Comité Académico del Programa Educativo notificó en el dictamen de aprobación como de las que los Directores de Tesina consideren convenientes, para lo cual se han designado:

**ASESOR DE TESINA EXPERTO: T. R. Anallely Melgarejo Baltazar.**

**ASESOR DE TESINA METODOLÓGICO: Dr. Fabio Moradín Aherma.**

2.- A partir de la fecha de emisión del presente documento, el tiempo máximo para concluir el trabajo y presentar el examen profesional es de seis meses.

3.- Una vez concluida la Tesina y que sea liberada de su(s) director(es), se turnará a dos revisores quien en un plazo no mayor a diez días hábiles rendirán su dictamen. En caso de ser liberada, se le informará la fecha, día, lugar y hora de su celebración de examen oral.

4.- Se asignan como revisores de la Tesina a los siguientes catedráticos:

**Revisor de Tesina: T. R. Andrés Hernández Apango.**

**Revisor de Tesina: T. R. Ulises Giovanni Romero García.**

Se hace de su conocimiento para los efectos correspondientes.

Atentamente

"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"

Teziutlán, Pue., 23 de noviembre de 2021.

  
Dr. Sergio Díaz Carranza

Director del Complejo Regional Nororiental

c.c.p.- Archivo y minutarario  
DR. SDC/mlol



Complejo Regional  
Nororiental

Arias y Bulevar sin número  
Col. El Carmen, Teziutlán, Puebla.  
222 2 29 55 00 Ext. 5538, 3700, 3701, 3702



**Oficio No. CRZN/2461/2023**

**C. Hernandez Ortega Daniel**  
**Egresado de Profesional Asociado en Imagenología**  
**Complejo Regional Nororiental**  
**Benemérita Universidad Autónoma De Puebla**  
**P R E S E N T E**

*Con base en el dictamen emitido por el T.R Osmar Javier Rodríguez Pazos (Director Experto), Dr. Fabio Morandin Ahuerma (Director Metodológico) y los revisores T.R. Ulises Giovanni Romero García, T.R. Andrés Hernández Apango, en calidad de Consejo Particular se autoriza la impresión del trabajo de tesis titulado:*

**"LA IMPORTANCIA DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN SALA DE RAYOS X CONVENCIONALES"**

*Correspondiente al Programa Educativo de Profesional Asociado en Imagenología.*

*Sin más por el momento, quedo de Usted como su seguro servidor.*

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
Teziutlán, Puebla., a 05 de julio de 2023

  
Dr. Sergio Díaz Carranza  
Director  
Complejo Regional Nororiental



c.c.p. Archivo y Minutario  
Dr.SDC

Complejo Regional Nororiental | Arias y Boulevard sin numero  
Col. El Carmen, Teziutlán, Puebla.  
222 2 23 55 00 Ext. 5538, 3700, 3701, 3702



**Oficio No. CRZN/2462/2023**

**Mtro. Ricardo Valderrama Valdez**  
**Director De Administración Escolar**  
**Benemérita Universidad Autónoma De Puebla**  
**P R E S E N T E**

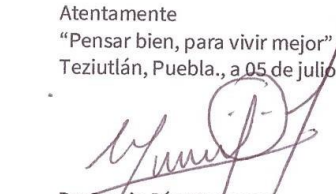
*Por este conducto me permito comunicar a Usted que el C. Hernandez Ortega Daniel, con matrícula 201718240 pasante del Programa Educativo de Profesional Asociado en Imagenología, ha cumplido con los requisitos establecidos en este Complejo Regional Nororiental en relación a la elaboración de su trabajo recepcional titulado " **LA IMPORTANCIA DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN SALA DE RAYOS X CONVENCIONALES** ", por lo que la modalidad de Titulación será por defensa de Tesis.*

*Así mismo, comunico a Usted el examen profesional que sustentará el mencionado pasante será el día 21 de agosto de 2023, a las 16:00 horas, en la modalidad presencial y el Jurado calificador estará constituido de la siguiente manera:*

PRESIDENTE T.R. Blanca Isabel Aparicio Zapata  
SECRETARIO T.R. Marcelo Antonio Sánchez Betancourt  
VOCAL Dr. Fabio Morandín Ahuerma  
SUPLENTE T.R. Andrés Hernández Apango

*Sin más por el momento, quedo de Usted como su seguro servidor.*

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
Teziutlán, Puebla., a 05 de julio de 2023.

  
Dr. Sergio Díaz Carranza  
Director  
Complejo Regional Nororiental



c.c.p. Archivo y Minutario  
Dr.SDC

Complejo Regional Nororiental | Arias y Boulevard sin numero  
Col. El Carmen, Teziutlán, Puebla.  
222 2 23 55 00 Ext. 5538, 3700, 3701, 3702

## **Agradecimientos**

Al ver finalizado este trabajo de investigación debo decir que me siento muy agradecido por el apoyo recibido.

Además, cabe mencionar que la investigación realizada no hubiera sido posible sin el apoyo de mi asesor especialista la T.R. Anallely Melgarejo Baltazar que me apoyó en cuanto al sustento del tema, y a mi asesor metodológico el Dr. Fabio Morandín Ahuerma, quien me ayudó con la redacción del trabajo.

Agradezco a mis padres por su paciencia, confianza y su apoyo para poder llegar al final de este importante momento en mi vida, y a mi hermano que me ayudó cuando en ocasiones me vi en necesidad de apoyo.

Agradezco a la licenciada de titulación Itzel Daysi Gutiérrez Hernández por tenerme paciencia y orientarme con lo que respecta al trabajo de investigación.

Por último, agradezco al T.R. Ulises Giovanni Romero García y al T.R. Andrés Hernández Apango por leer mi trabajo, orientarme y de ese modo, ser aceptado para su presentación.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes, ¡muchísimas gracias a todos!

## Tabla de contenido

Antecedentes.....	1
Capítulo I Principios Básicos .....	7
Estructura de la Materia .....	7
Ionización .....	9
Radiación .....	11
Equipos que Producen Rayos x .....	15
Interacción de los Rayos x con la Materia .....	22
Capítulo II Los Efectos de los Rayos x en el Cuerpo Humano .....	29
Interacción de los Rayos x con el Cuerpo Humano .....	29
Efectos de la Radiación en Moléculas y la Célula .....	34
Efectos Deterministas por Radiación .....	39
Efectos Estocásticos por Radiación .....	47
Capítulo III Filosofía y Principios de Protección Radiológica .....	54
Magnitudes y Unidades Radiológicas.....	54
Filosofía y Principios de Protección Radiológica .....	57
Factores Básicos de Protección Radiológica: Tiempo, Distancia y Barreras.....	61
Capítulo IV Legislación Mexicana en Materia de Diagnóstico Médico con Rayos x .....	64
Norma Oficial Mexicana .....	64
Requisitos de Instalación y Características de la Sala/Equipo de Rayos x .....	72
Capítulo V Protocolo de Protección y Seguridad Radiológica .....	83
Requisitos Previos.....	83
Protocolo de Atención a Pacientes.....	87

## Índice De Figuras

Figura 1: Componentes de un átomo.....	7
Figura 2: Desintegración radioactiva.....	8
Figura 3: Proceso de ionización.....	9
Figura 4: Comportamiento del átomo.....	10
Figura 5: Naturaleza de los tipos de radiación.....	13
Figura 6: Modelo sinusoidal de ondas electromagnéticas.....	14
Figura 7: Efecto talón.....	15
Figura 8: Partes del tubo de rayos x.....	16
Figura 9: Rayos x característicos.....	18
Figura 10: Rayos x de frenado.....	19
Figura 11: Sistema experimental para la determinación de la capa hemirreductora.....	22
Figura 12: Dispersión coherente.....	23
Figura 13: Efecto Compton.....	24
Figura 14: Efecto fotoeléctrico.....	25
Figura 15: Producción de Pares.....	27
Figura 16: Fotodesintegración.....	28
Figura 17: Interacciones responsables de la producción de una imagen radiográfica.....	28
Figura 18: La célula humana.....	32
Figura 19: Mitosis y meiosis.....	33
Figura 20: Formación de los sistemas que componen al cuerpo humano.....	34
Figura 21: El ADN.....	35
Figura 22: Efecto de la radiación en el ADN.....	37

Figura 23: Transferencia del código genético dañado .....	37
Figura 24: Interacción de los rayos x con las moléculas de agua .....	38
Figura 25: La piel.....	43
Figura 26: Partes de la epidermis.....	43
Figura 27: Variación de la intensidad con la distancia.....	62
Figura 28: Espesor de las láminas plomadas para las salas de rayos x.....	74

## Resumen

En esta investigación se abordó el tema de la importancia de la actividad multidisciplinar conocida como protección radiológica con el fin de recabar información útil y concisa que funcione para erradicar o disminuir la negligencia sobre el uso de medidas de protección dentro de la sala de rayos x, de modo que el trabajo abordó las recomendaciones y normativas que ofrecen los diversos organismos para salvaguardar la integridad de todo individuo que se encuentre en contacto con una sala de rayos x, además de informar sobre los riesgos y efectos negativos que conlleva el no cumplir con lo establecido por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas y la NOM-229-SSA1-2002 que, en el caso de México son los responsables de guiar a todo profesionista relacionado con las áreas en donde se manipule radiación ionizante (rayos x). Para este proyecto se planteó una metodología con enfoque cualitativo en conjunto con una técnica de investigación de tipo documental basada en literatura recabada que ha de sustentar las necesidades de la investigación.

De acuerdo con la investigación realizada, se comprende que a pesar de que existe una gran cantidad de factores que pueden influir con la negligencia o aplicación incorrecta de las medidas de protección pertinentes, es un hecho que existe una amplia gama de herramientas en la sala de rayos x convencionales que han de guiar y proteger a toda persona que entre a la sala, por lo que sí existe una solución palpable para el problema planteado. Además de que por normativa el binomio compuesto por el titular y el responsable de operaciones se ve obligado a proveer las herramientas y sistemas que fomenten la aplicación de todas las actividades de protección radiológica que apliquen en el área, e incluso si estas medidas no se estuvieran aplicando o se llevaran a cabo de forma incorrecta los responsables del establecimiento se verán obligados a aplicar medidas correctivas de forma inmediata para prevenir errores, negligencias u otras situaciones que representen una irresponsable manipulación de los equipos generadores de rayos x.

## Introducción

La protección radiológica es una actividad multidisciplinar de carácter científico y técnico, que tiene como finalidad proteger al medio ambiente, a la fauna, a la descendencia y a la humanidad de los daños generados por el contacto con radiación ionizante (Preciado y Luna, 2010).

Para poder llevar a cabo su función, la protección radiológica establece previsiones en el diseño de áreas de trabajo, mobiliario, equipo y materiales que permitan controlar la dispersión de la contaminación radioactiva y faciliten las actividades de descontaminación.

También cuenta con protocolos a seguir durante los procedimientos, al término de dichos procedimientos y al cierre de instalaciones, complementados con permisos de trabajo en zonas controladas.

Existen tres bases que son de gran importancia en todos los sectores que se encuentren expuestos a radiación, los cuales son: justificación, optimización y limitación de dosis. En el campo de la radiología se pueden ejemplificar de la siguiente manera:

**Justificación:** Cualquier estudio radiológico que aplique radiación al paciente deberá tener su justificación tomando en cuenta la necesidad de este y el riesgo/ beneficio que este tendrá al estado de salud del paciente.

En el caso del profesional ocupacionalmente expuesto "POE", solo estará justificada su exposición en caso de que el paciente requiera ser manipulado de forma particular, no se cuente con familiar o que el estudio requiera la presencia del especialista (fluoroscopia, cirugía, etc.), se debe tomar en consideración que cualquier especialista expuesto a radiación debe hacer uso de los blindajes de la sala y contar con equipo de protección personal adecuado para el tipo de estudio.

**Optimización:** Esta base tiene su sentido al tomar en cuenta que existen factores que modifican la intensidad, cantidad y el tiempo al que se estará expuesto un sujeto a radiación ionizante, estos factores existen para tener control sobre la exposición a radiación y de ese modo se obtengan los mejores resultados con la menor cantidad de

radiación aplicada. Se basa en el principio de ALARA, que son las siglas que representan: As Low As Reasonably Achievable (tan bajo como sea razonablemente posible).

Limitación de dosis: La dosis de radiación a utilizar es diferente entre cada paciente y clase de estudio, como cualquier estudio en el que se utilice radiación ionizante debe respetar los límites establecidos a los que una persona puede estar expuesta.

Con lo anterior mencionado se concluye que “cualquier estudio radiológico que emplee radiación ionizante se debe tomar a la menor dosis posible, pero obteniendo resultados valorables que justifiquen la aplicación de radiación” (Comisión Internacional de Protección Radiológica [ICRP], 1977).

Las bases antes mencionadas trabajan en conjunto con tres reglas fundamentales, que juntas son la clave para protegerse de toda fuente de radiación, estas son:

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

Blindaje: Hacer uso de barreras que tienen como función resguardar a todo individuo de una irradiación innecesaria. Estas barreras generalmente son muros de hormigón, láminas de plomo o acero y cristales especiales enriquecidos con plomo que impiden el paso de la radiación.

Tiempo: Reducir el tiempo de exposición de la fuente de radiación.

Estos puntos se encuentran regulados por la Norma Oficial Mexicana 229-SSA1-2002 y, en caso de México, por el organismo conocido como la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS).

## **Planteamiento y Delimitación del Problema**

El uso de la radiación es una actividad que conlleva un riesgo aceptable a perspectiva de la sociedad y que, en algunos casos se debe a la habitualidad, exceso de trabajo, falta de insumos, estado de las herramientas de protección y falta de tiempo, es que el personal olvida o se ve incapaz de seguir adecuadamente los protocolos de acción que tienen como finalidad salvaguardar la integridad personal de daños provocados por el contacto con radiación.

### **Justificación**

Con lo anteriormente mencionado es que nace el propósito de este proyecto que es brindar una guía que contenga los conocimientos más importantes que recordar sobre la protección radiológica en la sala de rayos x convencionales y que, por ende, se reduzca la cantidad de incidencias en donde el POE, personal en preparación y paciente se exponen a radiación ionizante innecesariamente.

### **Objetivo General**

Brindar información que funcione de guía para la adecuada aplicación de las medidas de protección y seguridad radiológica con su respectiva explicación de los beneficios que atribuye su uso, en conjunto con los riesgos de no aplicar dichas medidas de protección o hacerlo de forma incorrecta.

### **Objetivos Específicos**

- Dar a conocer las medidas, conocimientos y protocolos básicos para salvaguardar la integridad de las personas en contacto con radiación a fin de demostrar su importancia.
- Brindar conocimiento sobre los efectos que tiene la radiación en el cuerpo humano a fin de promover el uso de las recomendaciones dadas por los organismos que regulan la actividad multidisciplinar de protección radiológica.
  - Exponer los requisitos y características de un área de rayos x convencionales con base en las normativas de protección radiológica, a fin de que el lector las conozca y entienda su importancia.

## **Antecedentes**

Con relación al origen de los rayos x, su aplicación en el campo médico e industrial y al estudio de los efectos que tiene en los seres vivos, es que se originó la necesidad de crear una herramienta que guiara al ser humano a una forma más eficiente y segura de manipular la radiación, debido a esto es que se desarrolló la actividad multidisciplinar conocida hoy en día como protección radiológica la cual comenzó a originarse durante la década de 1895-1914 y evolucionó en paralelo a la investigación y comprensión de los rayos x.

La protección y seguridad radiológica ha evolucionado de forma positiva para los profesionistas relacionados con el área de radiología, dicho cambio se ha observado desde los años 30 en forma de una reducción considerable de la dosimetría personal de las personas relacionadas con el uso de radiación, siendo la dosimetría personal media de 70 mSv al año originalmente mientras que desde la aplicación de las normas y recomendaciones de protección y seguridad radiológica se logró reducir la dosimetría personal a valores que rondan desde los 20 a 50 mSv anuales para los profesionistas que trabajan con radiación (Boice, 2020).

A continuación, se hace una breve descripción de los periodos en los que hubo avances significativos que dieron forma a lo que hoy en día conocemos como protección y seguridad radiológica:

### **Antes de 1895**

Los primeros descubrimientos relacionados con la radiación ionizante como el tubo de Crooks (1879) y otros avances científicos que permitieron comprender y experimentar con esta clase de energía (Ozuna, 2020).

### **Década de 1895 y 1914**

Los rayos x son descubiertos en 1895 por el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen, comienza un periodo de experimentación con esta clase de energía, posteriormente a mediados de esta década se comenzó a utilizar con fines médicos e industriales, sin embargo, esta práctica se vio en descenso debido a los efectos dañinos para la salud por el uso excesivo de radiación, como: eritemas, lesiones oculares,

quemaduras, dermatitis y en algunos casos cáncer, por lo que posteriormente se restringió el uso de los rayos x solo al ámbito médico (Arias, 2006).

En 1896 en Chicago, pioneros en la protección y seguridad radiológica como Conrad Fuchs dan origen a las primeras guías para prevenir los efectos de los rayos x, los cuales consideraban aspectos como el tiempo de exposición y la distancia entre la emisión de los rayos x y las personas presentes en el área.

En 1896 el odontólogo norteamericano William Herber Rollins creó un fluoroscopio intraoral destinado al estudio de los molares y premolares, la manipulación de dicho equipo tuvo como resultado quemaduras por radiación en su mano, situación que originó en el odontólogo un interés por establecer medidas que lo mantuvieran a salvo de los efectos nocivos de la radiación. Posterior a su investigación creó y publicó el primer documento que analizaba los riesgos del uso de los rayos x donde introdujo conceptos como colimación, filtración y otros medios de protección personal, cabe mencionar que sus advertencias pasaron inadvertidas hasta muchos años después (Boice, 2020).

En 1907 durante la reunión de la sociedad llamada American Roentgen Ray un fabricante de equipos con apellido Wagner presentó una clase de dispositivos fotográficos que permitían identificar si el personal que los llevaban, habían estado expuestos a radiación (Boice, 2020).

En 1911 se asocia la interacción con los rayos x a varios casos de sarcoma, sin embargo, no fue hasta el año 1913 que la sociedad Roentgen Ray publicó las primeras recomendaciones oficiales sobre blindaje y medidas de prevención de los efectos nocivos por radiación (Ozuna, 2020).

### **Primera Guerra Mundial 1914-1918**

Se innovó en la producción de rayos x y se implementaron múltiples diseños (vehículos con equipos portátiles de rayos x) proporcionados por la científica Marie Curie de forma urgente para satisfacer la necesidad del uso de los rayos x en el campo de guerra con fines médicos diagnósticos. Debido al uso prolongado de estos equipos se comenzó a reportar múltiples casos de lesiones agudas por radiación, como fueron:

irritación ocular, quemaduras, eritemas, anemias aplásicas y casos de leucemia (Ozuna, 2020).

Debido a las lesiones observadas, un conjunto de científicos como Albers Schonberg que padecían de los efectos del uso de radiación durante la guerra, se dieron a la tarea de crear las bases para originar la ciencia de la protección y seguridad radiológica, además de contribuir con información sobre algunos aspectos como son: restricciones en la distancia, tiempo de exposición y las características de blindaje (Boice, 2020).

### **Durante la Guerra 1919-1938**

Gracias a la colaboración mundial se originan organismos responsables de las recomendaciones y normativas correspondientes al uso de radiación, siendo los que encabezan este proyecto los científicos americanos y británicos diferenciados por su especialidad (radio-tratamiento y radiodiagnóstico). Nace la Comisión Internacional de Protección Radiológica o ICRP por sus siglas en inglés y dicho organismo determina como el Roentgen a la unidad de medición de los rayos x (Arias, 2006; Binda, 2018).

En 1920 se establece la primera sociedad de tecnólogos radiólogos, para 3 años después darse a conocer como la American Society of Radiology Technicians (Ozuna, 2020).

En 1925 tiene lugar el primer Congreso Internacional de Radiología en la ciudad de Westminster Londres donde también se da origen a los primeros comités dedicados exclusivamente a protección radiológica (Arias, 2006).

Debido a la alta incidencia de lesiones tardías en el personal sanitario de la guerra, se unen esfuerzos a nivel mundial para determinar los efectos a largo plazo de la interacción con los rayos x, por lo que se inicia con la experimentación en vegetales para estudiar los efectos de la radiación en organismos vivos, dando como resultado mutaciones genéticas debido a la exposición con radiación (Arias, 2006; Binda, 2018).

Se implementan programas de riesgos laborales para el personal ocupacionalmente expuesto, en los que se establecen los límites máximos de dosis a la

que puede estar expuesto el personal, además de que se observa un aumento de periodos vacacionales, pruebas de sangre periódicos, la implementación de blindajes específicos y delimitación de zonas para reducir la irradiación de personal colindante a zonas donde se manipulan los rayos x (Boice, 2020).

### **Segunda Guerra Mundial 1939-1945**

La primera bomba nuclear es creada y da paso a la creación de otras armas de esta índole, a partir de la investigación para crear estas armas y los efectos resultantes de su uso se obtiene una gran cantidad de conocimiento sobre protección radiológica, el cual establece conceptos como: justificación del riesgo con el beneficio obtenido, precauciones sobre poblaciones susceptibles, detección de la radiosensibilidad de ciertos órganos, radiación dispersa, planificación y optimización (Arias, 2006).

### **Posterior a la Segunda Guerra Mundial 1946-1960**

Se introduce el uso de radioisótopos creados a partir de los reactores nucleares usados durante la guerra a la medicina terapéutica y basándose en el uso de estos elementos se establecen límites de dosis específicos para estos casos. Se obtienen conceptos como dosis equivalente, dosis absorbida, no riesgo cero, tan bajo como sea razonablemente posible ALARA por sus siglas en inglés y se da origen a la ciencia de la radiobiología (Boice, 2020).

En 1957 se crea el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) por sus siglas en inglés el cual tiene como objetivo promover la utilización de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física (Ozuna, 2020).

Se determinan los efectos tardíos por irradiación y se catalogan por severidad de cada órgano sistema, además dicho evento establece las 3 especialidades relacionadas con el uso de radiación, siendo estas: radiodiagnóstico, radioterapia y medicina nuclear (Boice, 2020).

## **Era moderna 1970-1990**

Este período se caracteriza principalmente por el descubrimiento y evolución de la tomografía computarizada, el desarrollo de nuevos fármacos a base del radioisótopo: Technetium (TC99), se da origen a la tomografía por emisión de positrones PET por sus siglas en inglés, se desarrollan nuevas técnicas de intervencionismo guiado por imágenes radiológicas, se desarrollan dosímetros más especializados, se optimiza el peso de los equipos de protección personal como son los mandiles plomados, además de que en este periodo se desarrollan los primeros artefactos que permitan simular exploraciones y tratamientos (fantomas) (Boice, 2020; Binda, 2018).

Se establecen 3 bases esenciales que guían la filosofía de la protección radiológica:

- Ninguna exploración debe ser realizada sin un beneficio claro.
- Todas las exposiciones deben cumplir el criterio ALARA.
- La dosis equivalente de los individuos no debe sobrepasar los límites recomendados (Arias, 2006).

## **Nuevo Milenio**

Las Comisiones internacionales modifican los límites de dosimetría anuales sobre la retina (20 mSv/año) y para el cuerpo entero (50 mSv/año) para personal ocupacionalmente expuesto. En el caso del público no a fin del área, pero que por situación médica se ve en contacto con radiación es de 5 mSv al año (Arias, 2006).

Durante la década de 2000-2010 supone grandes avances en la revolución digital, situación que representa una reducción considerable de gastos de recursos y una reducción notable de la dosis por imagen (Boice, 2020).

Se desarrolla un sistema de imagen híbrida, la cual reduce tanto el tiempo de exploración como la dosis de radiación durante procedimientos de fluoroscopia (Arias, 2006; Bince, 2018).

Por último, cabe mencionar que los comités internacionales y nacionales de cada país se encuentran en constante investigación, experimentación y desarrollo de métodos

que optimicen la manipulación de radiación y por ende reduzcan al mínimo las dosis de radiación a las que son sometidos tanto los pacientes como el personal relacionado con el área de imagen.

## Capítulo I Principios Básicos

### Estructura de la Materia

La materia es todo aquello que puede ser observado, medido, que tenga masa, forma o volumen y en general que ocupe un lugar en el espacio. La materia se encuentra compuesta por átomos, los cuales son partículas que tienen la característica de conservar las propiedades del elemento al que pertenecen (Andalucía, 2011).

Los átomos a su vez están compuestos por 3 tipos de partículas subatómicas, estas son: Los protones, electrones y neutrones, cada una de las partículas antes mencionadas, cuenta con una carga eléctrica diferente.

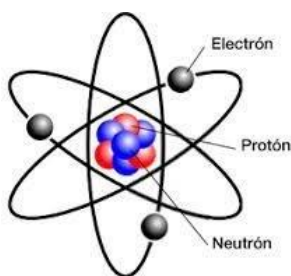
Los protones son partículas subatómicas de carga eléctrica positiva de gran tamaño, de hecho, cabe mencionar que los protones son la partícula de mayor tamaño de las 3 y están ubicados en el centro del átomo.

Los Electrones son partículas subatómicas de carga eléctrica negativa y se encuentran ubicados en las órbitas alrededor del núcleo de los átomos. Los electrones son 1800 veces más pequeños que los protones en cuanto a masa, sin embargo, a pesar de su gran diferencia de tamaño, la magnitud eléctrica es la misma (Andalucía, 2011).

Los neutrones son partículas subatómicas sin carga eléctrica, que cuentan con una masa comparable a los protones y que al igual que los protones se encuentran alojados en los núcleos de los átomos (Andalucía, 2011; ACS, 2020).

#### Figura 1

*Componentes de un átomo modelo Rutherford*



Astropedia, (s.f.). Átomo. <https://bit.ly/3PGDiLs>

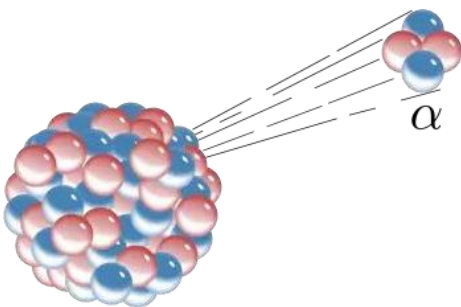
Los átomos en su forma original se encuentran compuestos por una cantidad equivalente de protones y electrones, estos se neutralizan entre ellos dando como resultado una carga eléctrica neutra. En un átomo neutro, el número de protones y electrones recibe el nombre de número atómico y es representado con la letra Z, mientras que al número de protones más neutrones que hay en el núcleo de un átomo se les denominan número de masa o número másico y está representado por la letra A (ARSA, 2009).

Todos los átomos de un elemento químico tienen el mismo número de protones, pero pueden diferenciarse en el número de neutrones. Y aquellos átomos que cuentan con el mismo número atómico pero diferente número másico se les denomina isótopos. Los isótopos tienen masa diferente, ya que tienen diferente número de neutrones (Recio, 2009).

Por último, aquellos átomos con núcleo inestable, exceso de energía y estado de excitación constante son denominados radionúclidos. Estos átomos se rigen por el principio de desintegración radioactiva, el cual nos dice que los radionúclidos buscan alcanzar estabilidad al emitir de forma espontánea partículas y energía, transformándose en consecuencia en otro átomo y produciendo radiación (ARSA, 2009).

## Figura 2

### *Desintegración radioactiva*



Planas, 2015. Energía nuclear. Que son los radionúclidos. <https://bit.ly/3wJRAU8>

En conclusión, la materia es todo aquello que ocupa un lugar en el espacio, se encuentra formada por átomos que a su vez están compuestos por las 3 partículas subatómicas antes mencionadas (protón, electrón y neutrón). Existen varios tipos de

átomos, los cuales se diferencian debido a su composición y a su estado de neutralidad o inestabilidad.

### Ionización

De acuerdo con la Federación de enseñanza de CCOO de Andalucía, 2009 “Ionización es el proceso químico o físico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra” (p.6).

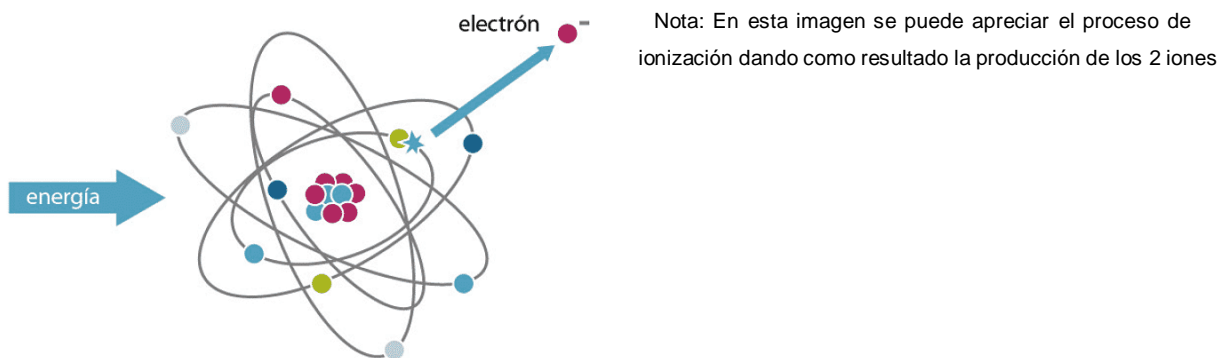
Los pulsos de energía radiante, como los fotones de rayos X y rayos gamma, pueden viajar a través de gases, líquidos o sólidos y expulsar electrones de los átomos dando como resultado ionización (Andalucía, 2009).

De forma más clara, el proceso de ionización consiste en que por cualquier mecanismo se logre expulsar un electrón de una de las órbitas de los átomos, como resultado se tiene la obtención de dos partículas: Un electrón con carga eléctrica negativa y un átomo con carga eléctrica positiva, a estas partículas resultantes se les da el nombre de iones.

Siguiendo a Andalucía, 2009, “A la especie química con más electrones que el átomo o molécula neutra se le llama anión, y posee una carga neta negativa, y a la que tiene menos electrones catión, teniendo una carga neta positiva” (p.6).

### Figura 3

*Proceso de ionización*



Reina, P. (s.f.). Educaplay. Propiedades de la tabla periódica. <https://bit.ly/3MJZEd0>

Sin embargo, la cantidad de energía que se requiere para sacar un electrón de su órbita no siempre será la misma. Para entender esto es necesario saber que las órbitas de los átomos están ubicadas una tras otra acercándose al núcleo del átomo y que dependiendo de la cercanía a la que se encuentre el electrón del núcleo será mayor la fuerza de enlace. Estas órbitas se identificaron con letras que van desde la K en adelante (K, L, M, N...) siendo la órbita K aquella más cercana al núcleo del átomo (ARSA, 2009).

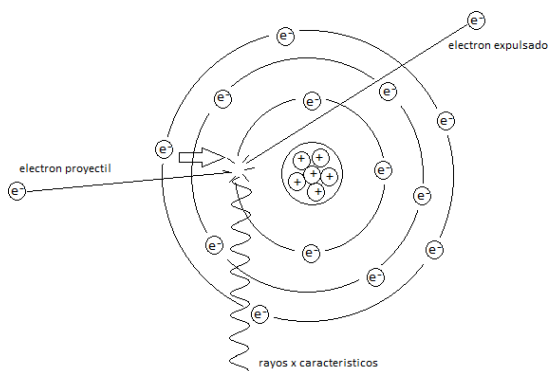
A manera de resumen del punto anterior, K es la órbita más cercana al núcleo, por lo que el enlace entre electrones y su órbita es el más fuerte de todos y requiere mayor energía para expulsar un electrón del átomo, en cambio, un electrón de las órbitas más externas requerirá menor energía para ser expulsado y crear el proceso físico de ionización (ACS, 2020).

Para finalizar el tema de ionización es necesario conocer lo que sucede en el átomo después de que uno de los electrones de su órbita es expulsado.

Cuando por algún proceso un electrón es expulsado del átomo (ionización), su lugar es ocupado por un electrón de la órbita más cercana, como podría ser que al expulsar un electrón de la órbita L un electrón de la órbita K ocupe su lugar. Dando como resultado que la interacción de la fuerza de amarre del vacío orbital y la del electrón migratorio generen radiación electromagnética, esta energía tendrá una potencia equivalente a la diferencia entre ambas fuerzas y se le conoce como radiación característica (ARSA, 2009).

## Figura 4

### Comportamiento del átomo



Comportamiento del átomo para estabilizarse después de perder un electrón.

Radiología, 2012. Introducción a la radiología. <https://bit.ly/3z3byd>

Para medir esta clase de energía resultante se utiliza la unidad denominada electrón-volt (eV) y sus múltiplos como son el kilo electrón-volt (mil unidades) y el mega electrón-volt (1 millón de unidades).

## **Radiación**

De acuerdo con el Consejo de Seguridad Nuclear, 2015 “La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas”

La radiación se puede clasificar a base de 3 criterios:

- Según su origen
- Según su naturaleza
- Según su energía (capacidad de ionización)

### **Radiación Natural o Artificial**

#### ***Radiación Natural***

La radioactividad de origen natural es aquella que está presente en el ambiente y que vio su nacimiento debido a una cadena de procesos químicos y/o físicos que con el tiempo dotaron a la materia de la capacidad de emitir radiación. Esta radiación puede provenir de gran variedad de fuentes como son: La radiación que proviene del espacio (radiación cósmica), el aire debido a la pequeña concentración de Radón que contiene, el material del que están compuestos los sitios que habitamos, de nuestro propio organismo: Potasio  $^{40}\text{K}$  y carbono  $^{14}\text{C}$  de algunos alimentos que ingerimos (CSN, 2010).

De hecho, se considera que en su totalidad el hombre recibe un total del 70% de radiación natural y un 30% de radiación artificial.

La cantidad de radiación natural a la que el ser humano está expuesto depende de varios factores como son: El factor de distancia, el factor tiempo y el factor blindaje.

## ***Radiación Artificial***

La radioactividad artificial es toda aquella radiación de origen humano y que, a pesar de su procedencia, los efectos son los mismos que las radiaciones producidas por la naturaleza.

La producción de radiación artificial (rayos x) comenzó el 8 de noviembre de 1895, con el físico Wilhelm Conrad Roentgen cuando experimentaba con rayos catódicos, dicho físico descubrió el primer tipo de radiación artificial que ha utilizado el ser humano: Los rayos x (CSN, 2010).

Este tipo de radiación, desde su nacimiento, ha sido empleada en diversas áreas, a continuación, el Consejo de Seguridad Nuclear, 2010 nos da algunos ejemplos:

El caso de los rayos x y gamma que se utilizan en medicina para diagnosticar mediante imágenes múltiples problemas físicos. También se usan radiaciones en el tratamiento del cáncer y otras enfermedades. La industria también se beneficia de las aplicaciones de las radiaciones en técnicas de medición industrial, esterilización de alimentos y control de plagas. Además, en las centrales nucleares se provocan reacciones de fusión que liberan una gran energía en forma de radiaciones permitiendo la producción de electricidad (CSN, 2010).

A forma de resumen, la radiación artificial representa una aportación importante con respecto al desarrollo de múltiples áreas de trabajo, además de que su manipulación ha permitido innovar en muchos procedimientos y técnicas de trabajo.

## **La Naturaleza de la Radiación**

De acuerdo con la Andalucía, 2009 las radiaciones pueden ser clasificadas también por su naturaleza:

### ***Radiaciones Electromagnéticas***

Es una propagación ondulatoria de energía eléctrica y magnética cuyas intensidades varían en planos perpendiculares. Todas tienen la misma velocidad en el vacío ( $c = 300$  mil km/segundos), diferenciándose por las longitudes de onda o frecuencia, de la que depende su energía (Andalucía, 2009, p. 2).

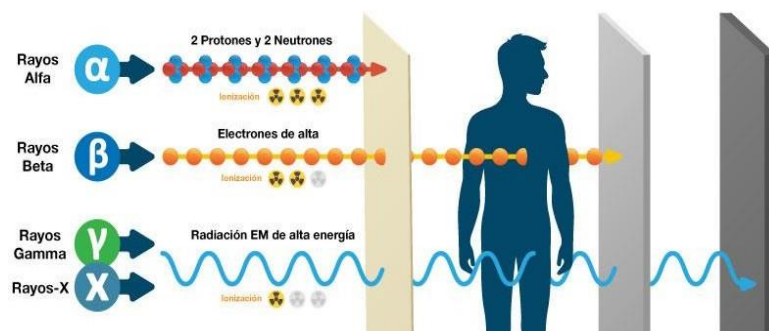
Entre las radiaciones que pertenecen a este grupo podemos encontrar: Rayos gamma, rayos x, radiación ultravioleta, radiación visible (violeta, azul, verde, amarilla, naranja, roja), radiaciones infrarrojas y radiofrecuencias (radar, microondas) (Andalucía, 2009).

### ***Radiaciones Corpusculares***

Son debidas a la propagación de partículas subatómicas (núcleos de helio, electrones, protones y neutrones) habitualmente dotados de gran velocidad, aunque siempre inferior a la de las radiaciones electromagnéticas. Las radiaciones corpusculares son: Radiaciones alfa, radiaciones beta, radiaciones neutrónicas o radiaciones cósmicas (Andalucía, 2009, p. 2).

### **Figura 5**

*Naturaleza de los tipos de radiación*



Novusmed, 2018. Acerca de la radiación. <https://bit.ly/3MO75QB>

### **Capacidad de Ionización**

#### ***Radiaciones ionizantes***

Las cuales cuentan con energía suficiente como para producir la ionización de los átomos de la materia que atraviesan (rayos x, rayos gamma, partículas alfa y partículas beta) (CSN, 2010).

## ***Radiaciones no ionizantes***

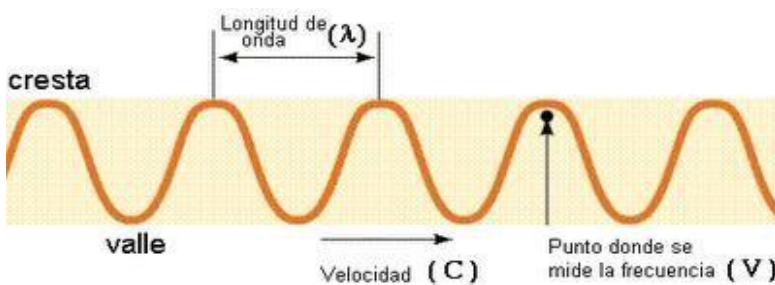
Las cuales no cuentan con suficiente energía para romper los enlaces de los átomos y producir la ionización (ondas de microondas y radiación ultravioleta) (CSN, 2010).

A continuación, se restringirá en gran parte del trabajo al estudio a los rayos x.

Los rayos x o también conocidos como fotones, son una forma de radiación electromagnética que se propaga a la velocidad de la luz y cuenta con la capacidad de penetrar cuerpos opacos y de ionizar la materia, también a diferencia de la luz transporta una cantidad mayor de energía y deposita una parte de esta en los cuerpos por los que pasa (Ruiz, 2012).

### **Figura 6**

#### *Modelo sinusoidal de ondas electromagnéticas*



Foro de la industria nuclear española, 2015. Nociones básicas sobre radiación. <https://bit.ly/3wPDWNZ>

A mayor frecuencia de ondas en la radiación electromagnética, menor es la longitud de onda y mayor será su energía, mientras que, a menor frecuencia, mayor longitud de onda y menor energía (CSN, 2010).

## Equipos que Producen Rayos x

Los rayos x son una forma de radiación electromagnética capaz de pasar a través del cuerpo humano, de producir ionización, de transportar energía y es capaz de depositar parte de su energía en los cuerpos por los que atraviesa (Ruiz, 2012).

### Equipo de Rayos x

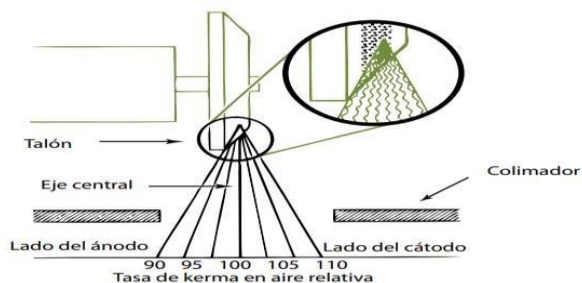
Los equipos generadores de rayos x son máquinas capaces de canalizar la corriente eléctrica proporcionada por un generador de alto voltaje para producir un flujo controlado de electrones con los que se obtendrá un haz de rayos x con la calidad y cantidad que se requiera para producir diversas imágenes con fines diagnósticos (Alcaraz, 2008).

### ***El Efecto Talón***

Es una falla de homogeneidad en dirección ánodo-cátodo de la producción del haz de rayos x y se genera a consecuencia del ángulo anódico. A nivel físico se traduce en que el haz compuesto de los electrones eyectados impacta con la diana y se producen los rayos x, sin embargo, hay una variación de la calidad de los fotones de rayos x producidos por dicha interacción la cual dependerá de cuanto penetraron los electrones en la materia de la diana, en resumen los electrones que penetren más en dirección al ánodo producirán rayos x de menor calidad que aquellos que sean producidos sin haber penetrado tanto en la materia de la diana, esta diferencia de penetración se debe a la forma del ángulo anódico (Ruiz, 2012).

### **Figura 7**

#### *Efecto talón*



Debido al efecto talón es que el haz de radiación producido cerca del lado del ánodo será, por lo tanto, de menor tasa de kerma en aire que la parte cercana al lado del cátodo.

En la producción de imágenes el efecto talón debe ser considerado cuando una misma zona varía en cuestión de espesor y densidad. Tomando en cuenta el efecto talón se colocará las zonas anatómicas más densas y grandes del lado del cátodo (donde tiene mayor potencia el haz de rayos x), debido a esta acción se obtendrá una imagen más uniforme (ARSA, 2009).

Citando a ARSA (2009)

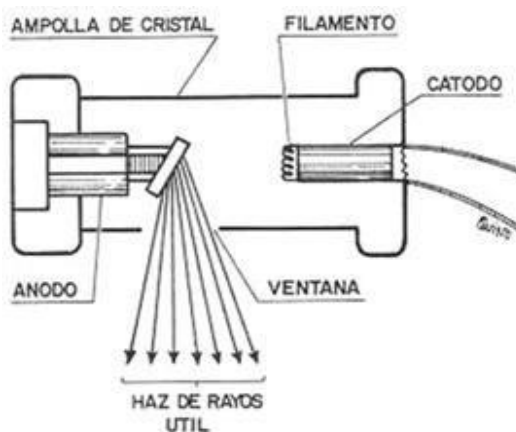
Ejemplo: En la radiografía de tórax, el cátodo debería estar en la parte inferior del paciente, ya que la parte baja del tórax es más gruesa en la región del diafragma, que la región superior, por lo que se requiere mayor intensidad de radiación para obtener una exposición más uniforme en la película (p.50).

## Producción de los Rayos x

El proceso de producción de rayos x comienza cuando un haz de electrones proyectil de alta energía es impulsado desde el cátodo hasta el ánodo ubicado al otro extremo del tubo de rayos x, de forma tal que cuando los electrones llegan al ánodo han adquirido energía cinética (energía de movimiento) (Ruiz, 2012).

### Figura 8

*Partes del tubo de rayos x*



Universidad Complutense Madrid. (s.f.). Tubos de rayos x.  
<https://bit.ly/3IJJUe8>

De acuerdo con ARSA, 2009

Estos electrones que viajan desde el cátodo hasta el ánodo constituyen la corriente del tubo de rayos x, cuando estos electrones interaccionan con los átomos del metal pesado del blanco transfieren su energía cinética al blanco. Estos electrones interaccionan con los electrones orbitales o los núcleos de los átomos del blanco. Las interacciones dan lugar a la transformación de energía cinética en energía térmica (calor) y en energía electromagnética (rayos x) (p.10).

La mayoría de la energía cinética producida al momento en que entran en contacto los electrones proyectiles con el ánodo se convierten en energía térmica, esto sucede debido a que la mayoría de dichos electrones interaccionan con los electrones de las órbitas externas de los átomos, teniendo como resultado la transferencia insuficiente de energía para ionizarlos (ARSA, 2009).

Siendo aún más claros: Los electrones que son afectados por los electrones proyectil al no producir ionización pasan a un estado de excitación, volviendo inmediatamente a su estado normal con su propia emisión de radiación térmica. La excitación y relajación constante son los responsables de generar calor en el ánodo.

De acuerdo con ARSA (2009): “Por lo general, más del 99% de energía cinética de los electrones “proyectil” se convierten en energía térmica, la cual deja menos del 1% disponible para producir rayos x” (p.11).

Basándonos en la información anterior se comprende que existe un porcentaje de eficacia al momento de producir rayos x y este depende de la energía de los electrones “proyectil” emitidos. La eficiencia se define como la cantidad de fotones producidos a un kilovoltaje fijo, en combinación con la corriente y el tiempo. Por lo tanto, si se quiere incrementar la eficacia al momento de producir rayos x es necesario incrementar la energía de los electrones proyectil.

Siguiendo a ARSA, 2009 nos ofrece el siguiente ejemplo para comprender mejor la información anterior: “Cuando seleccionamos una corriente de 60 kVp en la consola de operación de la máquina, solo el 5% de esta energía se convertirá en rayos x, mientras que con 20 MeV la cifra sube a 70%” (p.11).

Existen dos tipos de rayos x que obtendremos gracias a los procesos antes explicados, estos son:

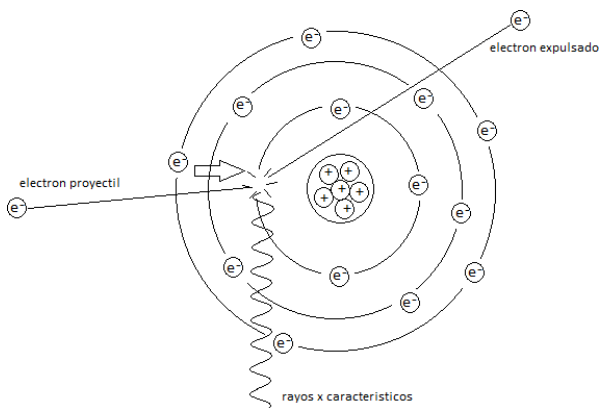
### ***Rayos x Característicos***

Los rayos x característicos son un tipo de radiación electromagnética, los cuales su mayor cualidad es la forma en que se producen.

Su origen comienza cuando un electrón proyectil impacta con un electrón de las órbitas internas de los átomos del blanco (órbita) y este impacto posee la cantidad de energía necesaria para eyectar el electrón impactado, de modo que se genere un hueco en la órbita del átomo del blanco y éste entre en un estado inestable, que lo obligue a corregir esta situación enviando un electrón de las capas subsecuentes a ocupar el lugar del electrón eliminado. La transición de un electrón de una órbita externa a interna va acompañada por la producción y emisión de un fotón de rayos x.

### **Figura 9**

#### *Rayos x característicos*



Radiología, 2012. Introducción a la radiología. <https://bit.ly/3yYPMk>

El fotón producido tiene una energía equivalente a la diferencia de las fuerzas de enlace correspondientes a los electrones relacionados en el proceso (Facultad de matemática, astronomía, física y computación, 2018).

Siguiendo a ARSA (2009):

Dado que la energía de ligadura de los electrones es distinta en cada elemento, los rayos x característicos producidos en diversos elementos también lo serán. Este tipo de rayos x se denominan característicos ya que su potencia se obtiene de las características del elemento receptor. La energía efectiva de los rayos x característicos aumenta con relación al número atómico del elemento del blanco. En el caso del tungsteno, los rayos x característicos K que constituyen una aportación importante para la imagen radiográfica y requieren un potencial de tubo de al menos 70 kVp (p.12).

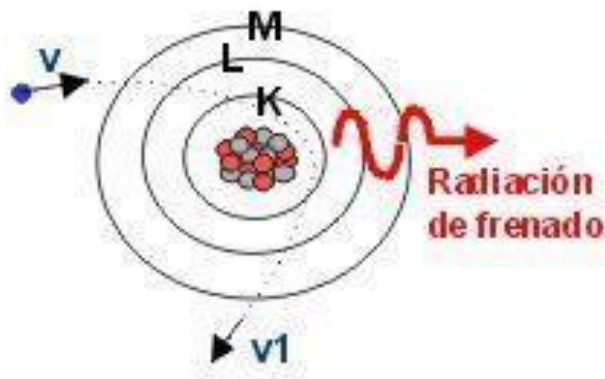
### **Rayos x de Frenado**

Los rayos x de frenado son un tipo de radiación electromagnética, los cuales su mayor cualidad es la forma en que se producen.

Este tipo de radiación tiene su origen cuando los electrones proyectil de algún modo evitan entrar en contacto con los electrones orbitales del átomo del blanco, posteriormente estos se movilizan en dirección cercana al núcleo del átomo, en consecuencia el electrón proyectil de carga negativa cae víctima de la influencia del núcleo con carga positiva, este evento tiene como resultado una fuerza electrostática de atracción y gracias a esta fuerza el electrón proyectil pierde energía cinética y cambia su curso. Esa energía cinética perdida reaparecerá como un fotón de rayos x (Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, 2018).

### **Figura 10**

#### *Rayos x de frenado*



En esta imagen se entiende como V al electrón proyectil con su trayectoria original y a V1 como el mismo electrón, pero con una pérdida de energía cinética y cambio de dirección.

Para resumir la información anterior, la radiación de frenado se origina del frenado de los electrones proyectil por la atracción del núcleo del átomo.

Es posible producir rayos x de frenado con electrones proyectil de cualquier energía. Un electrón proyectil puede perder cualquier cantidad de energía al interactuar con el núcleo de un átomo blanco, y la radiación de frenado, que se asocia con la pérdida, puede adoptar un rango que va desde 0, hasta la energía con la que fue acelerado. En el diagnóstico médico, casi todos los rayos x están originados por frenado (ARSA, 2009).

### **Cantidad de Rayos x**

Se le da el nombre de cantidad de rayos x a la intensidad del haz de rayos x medida en miliGray en el aire (mGya) [Antes medida en miliRoentgens (mR)]. El mGya es una medida del número de pares iónicos producidos en el aire por una cantidad de rayos x dada.

Los factores que afectan la cantidad de los rayos x son los siguientes:

Miliamperios-segundo (mAs): La cantidad de rayos x está relacionada directamente con el producto de la corriente en el tubo de rayos x (mA) y el tiempo en que es aplicada esta energía (s), este producto es conocido como mAs. Cuando se duplica este valor de mAs, el número de electrones proyectil que interactúan con los átomos del blanco también se duplican y por ende la cantidad de rayos x emitidos se multiplica por 2 (ARSA, 2009).

Kilovoltaje pico (kVp): El cambio ocasionado por el kilovoltaje pico es que al verse duplicado una cantidad dada de kVp, los rayos x aumentarán en un factor de 4, por lo tanto, la cantidad de rayos x es proporcional al cuadrado del kVp (ARSA, 2009).

Distancia: Este factor se encuentra definido por la Ley del Inverso al Cuadrado, la cual nos dice que la intensidad del haz de rayos x varía inversamente con el cuadrado de la distancia, es decir, si a 1 metro de la fuente recibimos una exposición de 1, a 2 metros se reducirá por un factor de  $2^2=4$ , es decir se tendrá  $\frac{1}{4}$  de la energía original, si nos vamos a 3 metros de distancia se reducirá por un factor de  $3^2=9$  es decir se tendrá  $\frac{1}{9}$  de la energía inicial y así sucesivamente (ARSA, 2009).

Filtración: Los equipos de rayos x tienen filtros metálicos, por lo general de aluminio, tienen un espesor de 1-3 mm colocados a la salida del haz útil. Esta herramienta sirve para eliminar los fotones de baja intensidad que no contribuyen a la calidad diagnóstica de una imagen (ARSA, 2009).

### **Calidad de los Rayos x**

Se conoce como calidad de los rayos x a la fuerza de penetración que tendrá sobre algún tejido. Los rayos x de alta energía, también conocidos como rayos x de alta calidad tienen una capacidad de penetrar en un tejido a mayor profundidad que los rayos x de baja energía (baja calidad) (Ruiz, 2012).

Los rayos x de una determinada energía son más penetrantes en un material de bajo número atómico que en uno de número elevado, esto se debe a que en un material con número atómico alto habrá una mayor concentración de átomos que lo constituyen y por ende habrá una mayor probabilidad de interacciones que reduzcan la fuerza de un haz de rayos x (Ruiz, 2012).

### **Capa Hemirreductora**

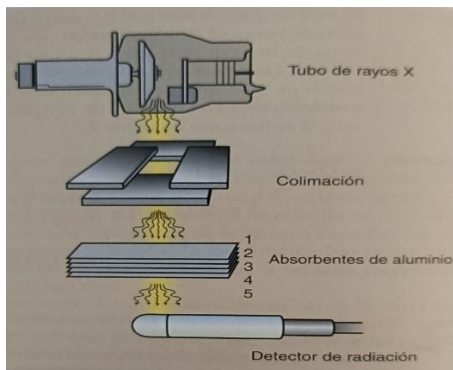
De acuerdo con Bushong, 2013

“La capa hemirreductora de un haz de rayos x es el grosor del material absorbente necesario para reducir la intensidad de los rayos x a la mitad de su valor original” (p.185).

La capa hemirreductora se determina experimentalmente usando un sistema que consta de tres partes: El tubo de rayos x, un detector de radiación y un conjunto de filtros de grosores graduados compuestos de aluminio. Este proceso comienza con la medición de la radiación sin ningún filtro entre el tubo de rayos x y un detector, posteriormente se van colocando filtros que van aumentando en grosor, teniendo como resultado que el grosor de los filtros reduce la intensidad del haz de rayos x a la mitad. En radiología un haz de rayos x diagnóstico suele tener un CHR comprendida entre 3 y 5 mm de aluminio (Ruiz, 2012).

## Figura 11

### *Sistema experimental para determinación de la capa hemirreductora*



Carlyle Bushong, S, 2013. p 136 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

Por lo tanto, la capa hemirreductora es una característica del tubo que nos permitirá identificar numéricamente la calidad del haz útil de rayos x.

### **Interacción de los Rayos x con la Materia**

La interacción de los rayos x con la materia se puede manifestar de cinco formas diferentes, las cuales son: La dispersión coherente, dispersión Compton, efecto fotoeléctrico, producción de pares y fotodesintegración. Es importante mencionar que solo el efecto Compton y el efecto fotoeléctrico son relevantes para la obtención de una imagen por rayos x.

El tipo de interacción de radiación electromagnética con los átomos de las diferentes sustancias dependerá de que sus átomos posean un tamaño similar a la longitud de onda del haz de rayos x (ARSA, 2009).

Los rayos x poseen longitudes de onda demasiado cortas, siendo estas no mayores de  $10^{-9}$  a  $10^{-10}$  m. Sin embargo, esta longitud se ve afectada al aumentar o reducir la cantidad de energía con la que se producen, teniendo como resultado rayos x con diferente calidad, de forma resumida: Los rayos x de calidad baja poseen longitudes de onda de gran tamaño e interactúan con el átomo entero, los rayos x de calidad moderada interactúan con los electrones orbitales de los átomos y los rayos x de alta calidad al tener longitudes de onda pequeñas le permiten eludir los electrones orbitales e interactúan con el núcleo o con electrones orbitales internos (Bushong, 2013).

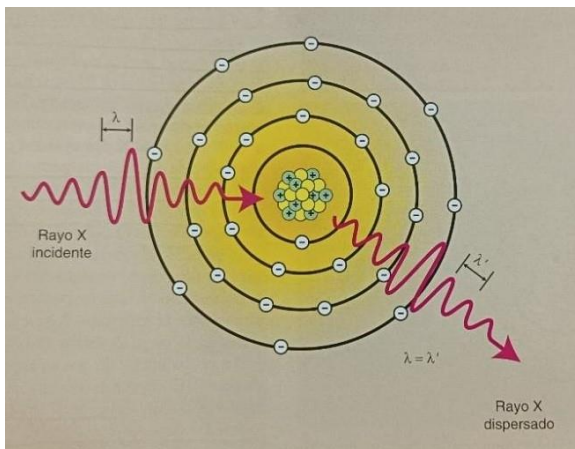
A continuación, se hablará de los cinco tipos de interacción de los rayos x con la materia:

### La Dispersión Coherente o Dispersión de Thompson

Consiste en la interacción de un haz de rayos x de baja energía con un átomo diana, lo que produce la excitación inmediata del átomo. El átomo diana al encontrarse en un estado de excitación libera de forma inmediata el exceso de energía en forma de rayos x dispersado con una longitud de onda y carga de energía igual al haz de rayos x incidente, pero con una dirección diferente.

#### Figura 12

##### *Dispersión coherente*



Carlyle Bushong, S, 2013, p 143 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

Esta clase de interacción se produce con rayos x con KeV de energía. La dispersión coherente tiene que ver con los rayos x de baja energía que apenas contribuyen a la producción de una imagen diagnóstica. Por ejemplo, a 70 KeV solo un pequeño porcentaje de los rayos x experimentan dispersión coherente, que contribuye ligeramente al ruido de la imagen (ARSA, 2009).

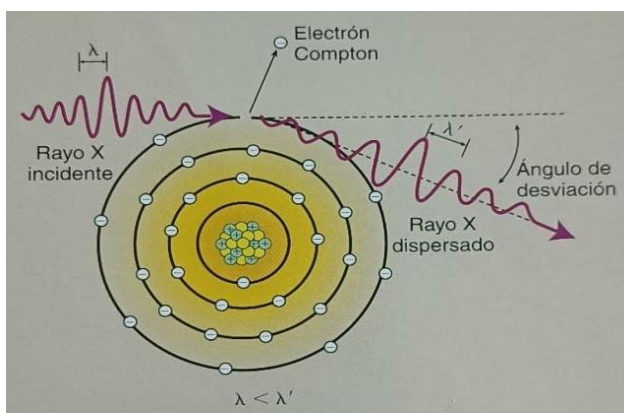
El ruido es el color grisáceo general de una radiografía que reduce el contraste de la imagen.

## La Dispersión Compton o Efecto Compton

Consiste en la interacción entre un haz de rayos x y un electrón orbital externo de algún átomo, esta interacción tendrá como resultado la dispersión del haz de los rayos x, disminución de su energía y se producirá ionización del átomo. El efecto Compton se produce cuando un haz de rayos x de energía moderada interaccionan con un electrón orbital externo y lo expulsa del átomo, este evento tiene como resultado la ionización del átomo y cambios de dirección, del tamaño de longitud de onda y cantidad de energía manifestados en el fotón dispersado. El electrón expulsado se conoce como electrón Compton (Ruiz, 2012, p.58).

### Figura 13

#### *Efecto Compton*



La probabilidad de que se dé un evento de dispersión Compton no depende del número atómico de la sustancia, en cambio este dependerá de forma inversa a la cantidad de energía del haz de rayos x (Ruiz, 2012).

Carlyle Bushong, S, 2013, p. 144 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

De acuerdo con Bushong, 2013 la energía del rayo con dispersión Compton es igual a la diferencia entre la energía del rayo incidente y la energía del electrón expulsado. La energía del electrón expulsado es igual a la energía de enlace más la energía cinética con la cual abandona el átomo (p.144).

A pesar de la pérdida de energía producida por el efecto Compton, tanto el haz de rayos x como el electrón Compton pueden experimentar más interacciones ionizantes antes de perder por completo su energía.

Siguiendo a Bushong, 2013 "Al final, el rayo x dispersado es absorbido fotoeléctricamente. El electrón Compton pierde toda su energía cinética mediante

ionización y excitación, y desciende para ocupar un hueco en una capa electrónica creada previamente por algún otro episodio de ionización” (p.144).

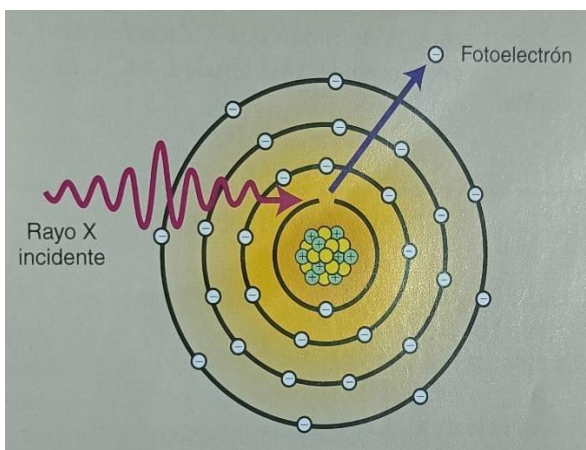
Los rayos x dispersados por el efecto Compton pueden representar un riesgo al momento de manipular radiación y debido a que no influyen positivamente en la imagen y producen una radiación innecesaria. Por esto es necesario el uso de blindajes tanto en el equipo de rayos x, en el personal ocupacionalmente expuesto y en el sujeto al que se le toma una imagen con fines diagnósticos.

### **El Efecto Fotoeléctrico**

Es un evento en el que interaccionan un haz de rayos x y los electrones internos de un átomo diana. Esta interacción se produce cuando un haz de rayos x es absorbido en su totalidad durante la ionización de un electrón de las órbitas internas, teniendo como resultado la pérdida del fotón incidente y la expulsión del electrón orbital interno, denominado ahora fotoelectrón. A este proceso se le conoce como efecto fotoeléctrico y fue descubierto por Albert Einstein (Ruiz, 2012).

### **Figura 14**

*Efecto fotoeléctrico*



Carlyle Bushong, S, 2013, p. 145 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

El fotoelectrón expulsado adopta una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón de rayos x y la energía del enlace orbital del electrón. La energía del fotoelectrón también tiende a variar en torno al número atómico del átomo diana, a menor

número atómico tendrá menor fuerza de enlace, por lo que habrá mayor diferencia de energía entre el fotón incidente y el enlace orbital, teniendo como resultado un fotoelectrón con energía casi idéntica a la del haz de rayos x incidente (Ruiz, 2012).

La expulsión del fotoelectrón por el impacto que provocó el haz de rayos x incidente crea un hueco en una órbita interna del átomo (órbita k). Este estado de inestabilidad es corregido de inmediato por el átomo, esto debido a que envía un electrón de la capa externa a ocupar el lugar del fotoelectrón, teniendo como resultado la estabilización del átomo (Ruiz, 2012).

Esta transición de electrones se acompaña de la emisión de un fotón de rayos x cuya energía es igual a la diferencia entre las energías de enlace de las capas implicadas. Estos rayos x constituyen una radiación secundaria y se comportan de forma similar a la radiación dispersa. No contribuyen, de ningún modo, en el valor diagnóstico y, por fortuna, su energía es lo suficientemente baja para impedirles penetrar en el receptor de imagen. (Bushong, 2013, p.146)

Por último, es importante mencionar que una interacción por efecto fotoeléctrico no sucederá a menos que la energía del fotón de rayos x incidente sea idéntica o superior a la fuerza de enlace de la órbita con el electrón.

### **Producción de Pares**

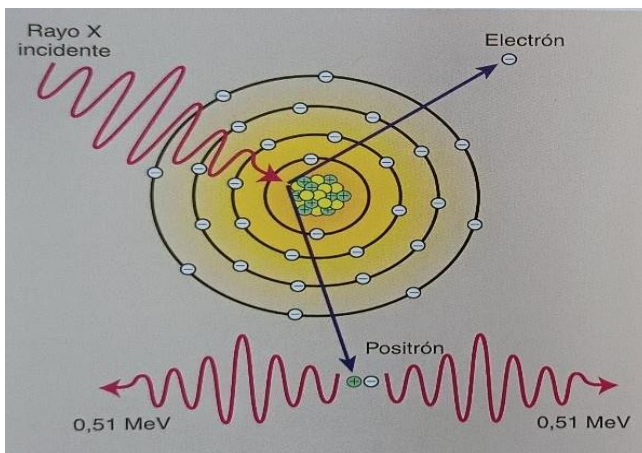
Esta clase de interacción se produce cuando un haz de rayos x posee suficiente energía para eludir la interacción con los electrones orbitales y logra llegar cerca del núcleo del átomo, posteriormente este haz de rayos x se verá afectado por las fuerzas de atracción del núcleo de modo que la interacción entre el haz de rayos x y las fuerzas del núcleo tendrá como resultado la desaparición del fotón incidente y la obtención de dos partículas, una de carga positiva (positrón) y el otro con carga negativa (electrón). A este proceso se le denomina producción de pares (Ruiz, 2012).

La producción de pares solo se puede producir con energías mayores a 1.02 MeV y esta misma energía se distribuye equitativamente entre ambas partículas en forma de energía cinética (Bushong, 2013).

De acuerdo con Bushong, 2013. El electrón resultante de la producción de pares pierde energía por excitación en conjunto con ionización y, finalmente, ocupa un hueco en la capa orbital del átomo. El positrón se une a un electrón libre y la masa de ambas partículas se convierte en energía, esto en un proceso que se denomina radiación de aniquilación (p.149).

## Figura 15

### Producción de pares



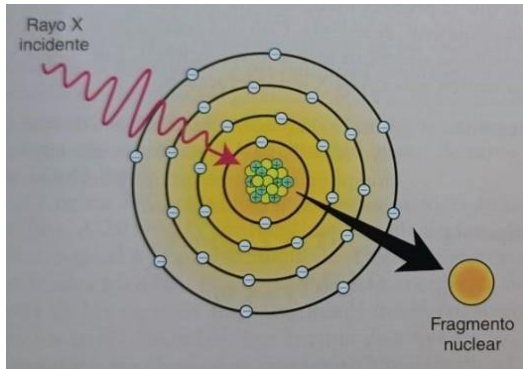
Carlyle Bushong, S, 2013, p. 148 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

## Fotodesintegración

Este tipo de interacción solo ocurre con fotones de rayos x con energía aproximada de 10 MeV. Este evento ocurre cuando el fotón elude los electrones orbitales y el campo nuclear, llegando directamente al núcleo y siendo absorbido por él. Al ser absorbido el fotón de rayos x con el núcleo provoca que el átomo entre en un estado de excitación y en ese instante emita un fragmento del núcleo. Este proceso se conoce como fotodesintegración y no interfiere en la radiología diagnóstica (Bushong, 2013).

**Figura 16**

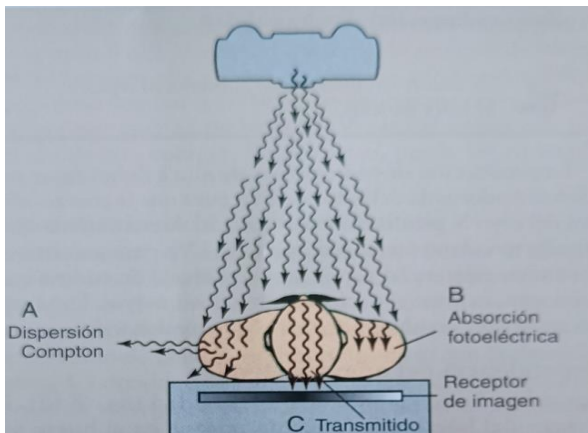
*Fotodesintegración*



Carlyle Bushong, S, 2013, p. 149 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier

**Figura 17**

*Interacciones responsables de la producción de una imagen radiográfica*



Se muestran la dispersión Compton, la radiación absorbida por el efecto fotoeléctrico y los fotones de alta calidad que alcanzan a llegar al receptor de imagen.

Carlyle Bushong, S, 2013, p. 149 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier

## **Capítulo II Los Efectos de los Rayos x en el Cuerpo Humano**

### **Interacción de los Rayos x con el Cuerpo Humano**

Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer los efectos que se desencadenan cuando el cuerpo humano es irradiado, exponer esto tiene como finalidad que los rayos x sean manipulados de manera segura tanto en el ambiente diagnóstico como en el área terapéutica.

La interacción de los rayos x con el ser humano comienza cuando los fotones de rayos x producen ionización o excitación en los electrones orbitales de los átomos del sujeto irradiado, teniendo como resultado la liberación de energía, esta energía estará destinada a ser almacenada en el tejido irradiado (Ruiz, 2012).

La energía almacenada puede causar cambios a nivel molecular, por ejemplo, en el caso de las moléculas de gran tamaño, un evento de ionización puede fragmentar la molécula o modificar su estructura atómica. La molécula alterada, con el paso del tiempo, puede dejar de funcionar correctamente, situación que puede desencadenar el deterioro o incluso la muerte de la célula con la que interactúa la molécula (Puerta, 2022).

Es importante mencionar que este evento es reversible. En el caso de los átomos se pueden estabilizar atrayendo un electrón libre para remplazar a los electrones perdidos durante la ionización, en el caso de las moléculas se pueden recuperar gracias a enzimas reparadoras y en el caso de la célula y tejidos poseen la capacidad de recuperarse y regenerarse tras una agresión por radiación leve o moderada (Bushong, 2013).

Los rayos x con intensidad suficiente en conjunto con las condiciones adecuadas son perjudiciales para la salud, estos efectos pueden ser los siguientes: Quemaduras cutáneas, cataratas, cáncer y leucemia. Debido a los efectos nocivos que tienen los rayos x sobre el ser humano, es de vital importancia su adecuada manipulación por parte de los profesionales ocupacionalmente expuestos, teniendo siempre en mente la obtención del mayor beneficio diagnóstico con el menor riesgo posible para todos los involucrados (paciente, acompañante, profesional en formación y profesionales del área diagnóstica). A esta práctica se le representa con ALARA: (as low as reasonably achievable) “tan bajo como sea razonablemente posible” (Bushong, 2013).

## **Composición del Cuerpo Humano**

El cuerpo humano está compuesto por los siguientes elementos: 60% de hidrógeno, 25.7% de oxígeno, 10.7% de carbono, 2.4% de nitrógeno, 0.2% de calcio, 0.1% de fósforo, 0.1% de azufre y 0.8% de varios minerales (oligoelementos). A un nivel atómico, el cuerpo humano se compone de átomos con estructuras subatómicas diferentes y características de cada elemento que compone al ser humano (Lesur, 2015).

De acuerdo con Bushong, 2013, “La composición atómica del organismo determina el carácter y el grado de interacción radioactiva. La composición molecular e histórica define la naturaleza de la respuesta radioactiva” (p.462).

Con un enfoque molecular, el cuerpo se compone de un 80% de agua, 15% de proteínas, 2% de lípidos, 1% de ácidos nucleicos, 1% de hidratos de carbono y un 1% de otras moléculas. Las proteínas, lípidos, hidratos de carbono y ácidos nucleicos son macromoléculas (moléculas de gran tamaño) y son las principales moléculas orgánicas (Lesur, 2015).

El agua es el componente molecular más abundante y simple del ser humano, esta molécula cumple con un papel importante en los efectos de los rayos x sobre el ADN.

Los ácidos nucleicos son de gran importancia en cuanto a daño por radiación, esto se debe a que el ácido desoxirribonucleico “ADN” (uno de los dos ácidos nucleicos del ser humano) denominado como la molécula diana debido a que es muy radiosensible y los efectos de la radiación al interactuar con esta pueden alterar la composición molecular de la célula desencadenando una amplia variedad de efectos (Bushong, 2013).

## **La Célula Humana**

La célula es la unidad básica y esencial que compone a los seres vivos. El cuerpo se compone de billones de células que brindan estructura al cuerpo, absorben nutrientes de los alimentos, convierten los nutrientes en energía y tienen la capacidad de alterar su estructura para especializarse, como en el caso de las células nerviosas, sanguíneas y musculares (Lesur, 2015).

## Composición de la Célula

La célula está compuesta por dos estructuras principales, el núcleo y el citoplasma.

El núcleo es un orgánulo membranoso ubicado en el interior de las células, cumple la función de almacenar la mayor parte del material genético de la célula, organizado en forma de macromoléculas de ADN, proteínas y agua (Lesur, 2015).

El núcleo contiene estructuras denominadas nucléolos, estos son orgánulos con forma redondeada que cumplen con la función de almacenar el ARN (el segundo tipo de ácido nucleico), los nucléolos se encuentran unidos a la membrana nuclear y gracias a esta conexión puede controlar el paso de moléculas, principalmente el paso del ARN a otras estructuras fuera del núcleo (Lesur, 2015).

El citoplasma es el contenido celular ubicado entre la membrana plasmática y el núcleo, este líquido constituye la mayor parte de la célula y contiene todos los componentes celulares a excepción del ADN. El citoplasma aloja en su interior varias estructuras que componen a la célula, estas se describen a continuación:

El retículo endoplasmático rugoso es un conjunto de canales en forma de sacos membranosos aplanados que se encargan de la síntesis de proteínas, creación de lípidos y carbohidratos, además de la desintoxicación. También es un medio que permite la comunicación entre el núcleo de la célula y el citoplasma (Lesur, 2015).

El aparato de Golgi es un conjunto de sacos membranosos apilados que modifican el empaque y la distribución tanto de proteínas como de lípidos para su secreción o uso interno.

Las mitocondrias son estructuras en forma de judía que se encargan de absorber las macromoléculas y convertirlas en energía, esta energía resultante queda almacenada en su interior hasta que la célula disponga de ella (Lesur, 2015).

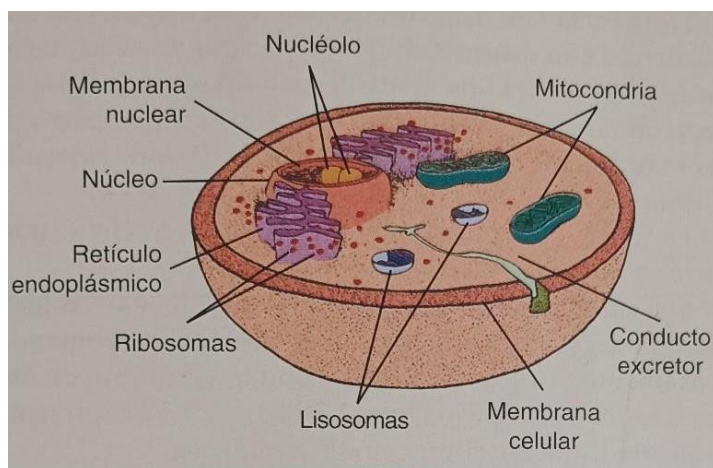
Los ribosomas son estructuras pequeñas ubicadas tanto en el citoplasma como en el retículo endoplasmático rugoso, estas estructuras se componen de ácidos ribonucleicos y proteínas. Estos orgánulos cumplen la función de sintetizar proteínas y ensamblar aminoácidos en una secuencia ordenada por el código genético.

Los lisosomas son estructuras en forma de guisante que contienen enzimas capaces de digerir fragmentos celulares y algunas veces partes de la célula con el fin de controlar contaminantes intracelulares (Lesur, 2015).

Todas las estructuras anteriores, incluyendo a la envoltura celular, están rodeados por membranas. Estas membranas están compuestas principalmente por proteínas y lípidos, además de ser responsables de dar forma y estructura tanto a la célula como a las estructuras intracelulares. También son responsables de permitir la transferencia de pequeñas moléculas como el agua (Lesur, 2015).

### Figura 18

#### *La célula humana*



Carlyle Bushong, S, 2013, p. 467 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

### Función Celular

La célula es la unidad fundamental que da estructura al cuerpo, absorbe nutrientes de los alimentos, convierte nutrientes en energía, controla la replicación del material genético y lo almacena. Las células tienen la capacidad de replicarse y diferenciarse, esto tiene como resultado la existencia de células especializadas que dan origen a tejidos, músculos, órganos y sistemas orgánicos importantes para el funcionamiento del cuerpo humano (Lesur, 2015).

## Proliferación Celular

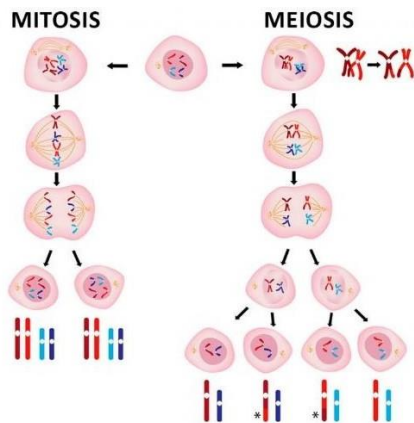
La proliferación celular es el mecanismo por el que la célula se reproduce y se multiplican en número. Existen dos formas en que se reproducen las células humanas, estos son:

Mitosis, mecanismo de reproducción de células somáticas (que no se diferencian en células sexuales) que dan como resultado la división de la célula original produciendo dos células hijas (Lesur, 2015).

Meiosis, mecanismo por el cual las células germinales se multiplican, en este proceso la célula original se divide en cuatro células que cuentan con la mitad de los cromosomas masculinos y la otra mitad femeninos. La principal diferencia entre mitosis y meiosis es que en el segundo proceso las células son diferentes a la célula progenitora, mientras que en el primero las células producidas son idénticas a la original (Lesur, 2015).

### Figura 19

#### *Mitosis y meiosis*



Núcleo visual, (s.f.). Mitosis y meiosis: resumen, diferencias y ejercicios. <https://bit.ly/3LJNnJW>

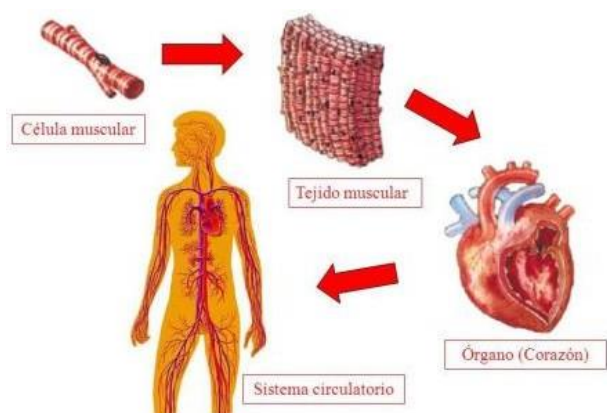
## Tejidos y Órganos

El origen del ser humano proviene de la unión de dos células germinales. Durante este proceso comienza la proliferación de células indiferenciadas que, a través de varias fases de desarrollo, reproducción y diferentes estadios se llega a una célula funcional.

A partir de la producción de células maduras es que comienza la formación de tejidos; los tejidos se forman cuando varias células con función y estructura similar se unen, posteriormente la unión de varios tejidos con algunas células diferenciadas crea músculos y los músculos en conjunto con células especializadas producen órganos. Existen algunos órganos que se unen para colaborar en procesos complejos que contribuyen al correcto funcionamiento del cuerpo humano, a estas agrupaciones se les denomina sistemas orgánicos (Lesur, 2015).

## Figura 20

*Formación de los sistemas que componen el cuerpo humano*



INSTITUCIÓN EDUCATIVA BOJACA, (s.f.). ¿Cómo están conformados los sistemas del cuerpo humano? <https://bit.ly/3wKglzo>

Por último, es importante mencionar que la radiosensibilidad de un tejido depende de su estado de maduración y las tareas que desempeña en el cuerpo.

## Efectos de la Radiación en Moléculas y la Célula

### Metabolismo Celular y la Radiación

El metabolismo celular es un proceso que comienza con la difusión de nutrientes macromoleculares a través de la membrana celular en dirección a la propia célula, donde estos pasarán por un proceso denominado catabolismo que consiste en la reducción de moléculas nutrientes y viene acompañado de la liberación de energía. Posteriormente, la energía obtenida se utilizará para producir macromoléculas a partir de moléculas más pequeñas, a este proceso se le denomina anabolismo. El conjunto de ambos procesos

es fundamental para el crecimiento, buen funcionamiento y reproducción celular (Lesur, 2015).

La producción de proteínas y ácidos nucleicos es fundamental para la supervivencia y reproducción celular. Este proceso comienza con la transcripción del código genético transportado del ADN al ARN, posteriormente el ARN transfiere información a las moléculas obtenidas durante el catabolismo (ARN transferido) y por último se dará la traslación del ARNt a proteína (Lesur, 2015).

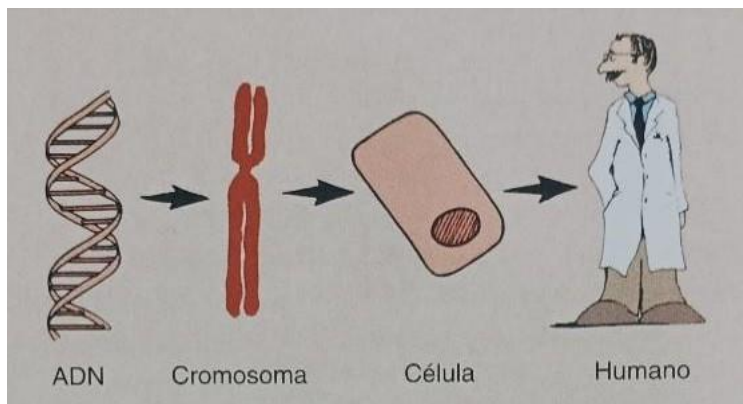
Es importante mencionar que cualquier daño radiológico en cualquiera de las macromoléculas involucradas en el proceso anterior puede causar efectos estocásticos tardíos (efecto producido por la exposición a bajas dosis de radiación por un tiempo prolongado) o la muerte de la célula (Bushong, 2013).

### **Efectos de la Radiación en el ADN**

Cada célula del ser humano posee un núcleo, dicho núcleo contiene en su interior dos clases de ácidos nucleicos, el ADN y el ARN los cuales son la información genética de la célula. Las moléculas de ADN en conjunto con otras moléculas dan origen a los cromosomas, los cromosomas son estructuras que controlan el crecimiento y desarrollo celular, que a su vez determinará las características que poseerá un individuo (Lesur, 2015).

### **Figura 21**

#### *EI ADN*



Carlyle Bushong, S, 2013, p. 483 *Manual de radiología para técnicos* (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

Cuando una molécula de ADN es dañada por radiación puede o no ser que se produzcan aberraciones en los cromosomas, esta situación, aunque reversible, puede llevar a la muerte celular. En el peor de los casos, si muchas células irradiadas con características similares responden con muerte celular, los tejidos y órganos que estas compongan serán destruidos. Esta es la causa del efecto determinista (Puerta, 2022).

El daño por radiación en las moléculas de ADN también puede causar una alteración en las instrucciones de reproducción, causando la proliferación rápida y desenfrenada de células defectuosas que son la principal característica de enfermedad maligna inducida. Esta es la causa del efecto estocástico (Puerta, 2022).

Por último, si el daño por radiación en el ADN se produce en células germinales, este evento provocará alteraciones en las características del sujeto en formación o de sus descendientes. Esta es la causa de un efecto genético (Puerta, 2022).

#### Repuestas estructurales del ADN a la exposición con radiación

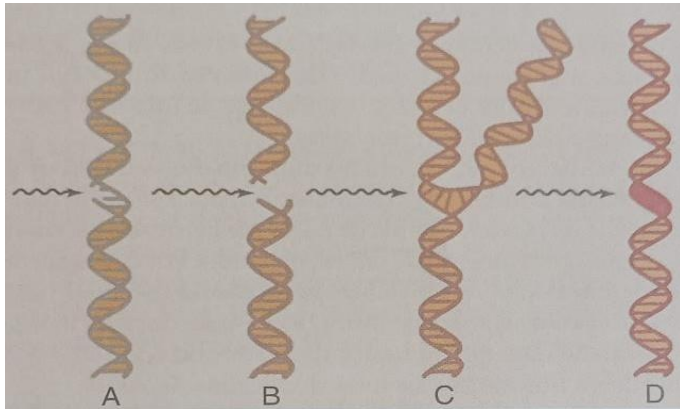
Existen cinco tipos de respuesta que se producen cuando hay interacción del ADN con radiación, estos son los siguientes:

- a) Escisión de la cadena principal con un lado alterado.
- b) Escisión de la cadena principal con ambos lados alterados.
- c) Escisión de la cadena principal y la subsiguiente unión cruzada.
- d) Rotura de escalón y consiguiente separación de bases.
- e) Cambio o pérdida de una base.

En el caso del quinto efecto (cambio o pérdida de una base) se puede producir la destrucción de parte del código genético, causando un daño irreversible para la molécula. A estas lesiones moleculares se les denomina mutaciones puntuales y pueden tener consecuencias graves, ya que alteran los componentes genéticos de la célula, modificando su comportamiento y transfieren el código genético alterado a la descendencia de la célula (Bushong, 2013).

## Figura 22

### *Efecto de la radiación en el ADN*

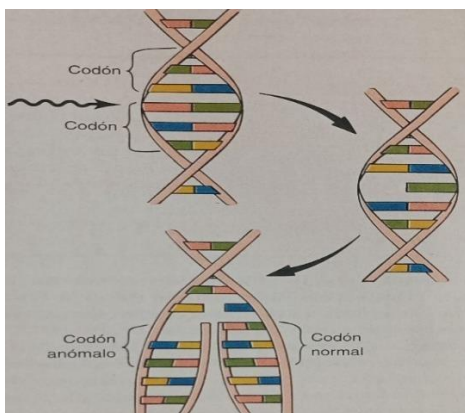


Carlyle Bushong, S, 2013 p, 482 Manual de radiología para técnicos (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

Cualquiera de los efectos anteriores causa la alteración de la estructura molecular del ADN, sin embargo, todos son reversibles hasta cierto punto. Pero cuando uno de estos efectos llega al punto de alterar el código genético, como en el caso del quinto efecto, provocará una mutación en la molécula de ADN que será irreversible y dicha mutación del código genético será transferido a las células hijas, teniendo como resultado un mal funcionamiento en éstas (Bushong, 2013).

## Figura 23

### *Transferencia de un código genético dañado*



Carlyle Bushong, S, 2013, p. 483 Manual de radiología para técnicos (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

## Radiólisis del agua

El proceso denominado Radiólisis del agua, consiste en la separación de moléculas de agua en otros productos moleculares. Este evento tiene su origen durante una irradiación de las moléculas de agua y se le considera como la principal interacción de radiación con el cuerpo humano (Puerta, 2022).

Este proceso comienza con la irradiación de las moléculas de agua del cuerpo, teniendo como resultado la separación de la molécula en dos iones, uno positivo (el átomo) y el otro negativo (un electrón) (Puerta, 2022).

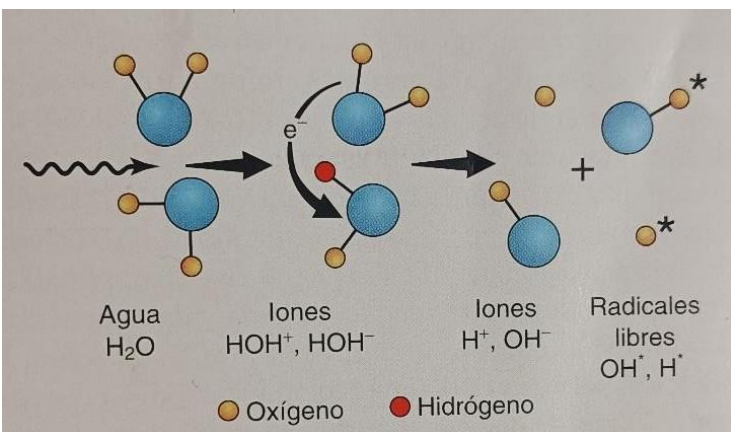
Este resultado puede producir diferentes reacciones:

En el primer caso, el par iónico vuelve a formar la molécula de agua estable y no ocurre ningún efecto que altere o dañe al organismo.

En el segundo caso, los iones no reaccionan entre sí, por lo que existe la posibilidad de que el ion negativo se una a otra molécula de agua y se produzca un tercer ion. Cabe mencionar que el ion positivo y el tercer ion producido tienden a ser inestables, situación que provoca la fragmentación de ambos iones y dan origen a un par de radicales libres. Los iones fragmentados se suelen unir de nuevo y de ese modo no generan algún efecto negativo para el organismo (Bushong, 2013).

### Figura 24

*Interacción de los rayos x con moléculas de agua*



Carlyle Bushong, S. (2013), p. 483 Manual de radiología para técnicos (10.a ed., Vol. 1). Elsevier.

Siguiendo a Bushong, 2013, “Un radical libre es una molécula sin carga que contiene un único electrón desapareado en su capa más externa” (p.483).

El caso de los radicales libres es diferente, estas partículas son muy reactivas e inestables y tienden a transferir su energía al ADN, cuando esto sucede la energía transferida romperá enlaces químicos y dará origen a lesiones puntuales que afectarán al funcionamiento celular (Puerta, 2022).

Otra reacción que provocan los radicales libres es que al unirse con partículas similares se produce peróxido de hidrógeno, el cual es venenoso para la célula. Estos productos en conjunto son considerados como el principal efecto perjudicial durante la radiólisis del agua (Puerta, 2022).

En conclusión, los efectos de la radiación en el ADN pueden ser directos o indirectos:

El efecto directo de la radiación sobre el cuerpo humano consiste en la irradiación de la molécula blanco ADN alterando su estructura molecular y causando un incorrecto crecimiento, desarrollo, funcionamiento y la transferencia de códigos alterados durante la reproducción celular.

El efecto indirecto sucede cuando el evento de ionización inicial ocurre en una molécula que no es crítica para el funcionamiento celular, esta molécula alterada transferirá su energía inestable a la molécula blanco ADN como en el caso de la radiólisis del agua, causando daños irreversibles a la célula. Cabe mencionar que el efecto principal de la radiación en el cuerpo humano es de tipo indirecto.

### **Efectos Deterministas por Radiación**

El efecto determinista de la radiación es la respuesta que tiene el cuerpo después de una exposición aguda a altas dosis de radiación en un periodo de tiempo reducido, la gravedad de este efecto dependerá en su gran mayoría de la dosis de radiación aplicada (ARSA, 2009).

Existen tres tipos de respuesta celular a una exposición aguda por radiación: Muerte celular, fallo reproductivo y/o retraso en la división celular durante un determinado período de tiempo (Puerta, 2022).

La radiación utilizada con fines diagnósticos generalmente lleva un enfoque muy específico de la zona a irradiar, situación que evita que hallan exposiciones totales del cuerpo humano y que por ende la radiación no sea suficiente para provocar alguna alteración considerable.

Cuando existe una exposición aguda a un alto nivel de radiación que conduzca a la muerte en días o semanas se le denomina síndrome de radiación aguda. Existen tres tipos principales de síndromes por radiación aguda, estos son: Muerte hematológica, el síndrome de muerte gastrointestinal y el síndrome del sistema nervioso central. El síndrome de muerte del sistema nervioso ocurre con dosis de radiación por encima de 50Gy y causa la muerte del sujeto en cuestión de horas, mientras que en el caso del síndrome de muerte hematológica y de muerte gastrointestinal requieren una exposición a menos radiación y tardan más tiempo en causar la muerte del sujeto (Bushong, 2013).

Existen tres períodos asociados con una exposición aguda con radiación, estos son: el periodo prodrómico, el periodo de latencia y la enfermedad manifiesta. Los tres periodos solo están en caso de que la irradiación sea moderada, ya que si la radiación es muy alta el periodo de latencia desaparece y si es muy baja no suele haber periodo prodrómico ni la manifestación de alguna enfermedad subsecuente (Bushong, 2013).

El periodo prodrómico consiste en los síntomas agudos como son: Náusea, vómito, diarrea, sensación de ardor y vienen acompañados por una reducción de células sanguíneas de la zona irradiada. Se requieren dosis por encima de 1 Gy liberadas en todo el cuerpo para que se produzca algún efecto considerable. Estas manifestaciones ocurren dentro de las primeras horas de exposición y se prolonga durante 1-2 días (Bushong, 2013).

El periodo de latencia es el periodo de tiempo en el que los malestares iniciales aparentan desaparecer, situación que suele malinterpretarse con una recuperación precoz a una exposición moderada. En el caso de que la exposición a radiación exceda

los 50 Gy este periodo durará unas cuantas horas, mientras que si la dosis se encuentra entre 1 a 5 Gy el periodo de latencia puede durar algunas semanas (Bushong, 2013).

El periodo denominado enfermedad manifiesta está representado por los tres síndromes anteriormente mencionados y es el efecto principal que se origina por la exposición a elevadas dosis de radiación. Estos síndromes son explicados a continuación:

El síndrome hematológico se caracteriza por la reducción considerable de células sanguíneas y tiene lugar cuando el sujeto se expone a una dosis de radiación de 2 a 10Gy. La manifestación inicial de este síndrome son náusea, vómito y diarrea que aparecen en cuestión de horas y que pueden persistir por varios días. Posteriormente, se produce un periodo de latencia que dura aproximadamente cuatro semanas y se caracteriza por la disminución constante de células sanguíneas, cabe mencionar que durante este periodo el sujeto no presenta algún malestar (Bushong, 2013).

Si la dosis no es letal, el tiempo de recuperación puede ser de seis meses y generalmente comienza a partir de la segunda a la cuarta semana posterior al evento de exposición. Si la dosis es letal, la reducción de células sanguíneas continuará hasta acabar con las defensas del organismo, esto causará que el sujeto sea propenso a infecciones, hemorragias y deshidratación, Al final el sujeto sucumbirá a las infecciones generalizadas, trastornos electrolíticos y deshidratación que le causarán la muerte (Bushong, 2013).

El síndrome gastrointestinal ocurre debido a un daño grave de las células que recubren al intestino y ocurre cuando el sujeto es expuesto a dosis de radiación que van desde 10 Gy hasta 50 Gy. Los síntomas prodrómicos del síndrome GI son vómito y diarrea constante que se manifiestan a las pocas horas del evento de irradiación, estos síntomas pueden persistir hasta un máximo de 24 horas. Posteriormente, se manifiesta el periodo de latencia que durará de 3 a 5 días y vendrá acompañado de una sensación de aparente bienestar (Puerta, 2022).

El periodo de enfermedad manifiesta comienza con la destrucción de células madre y la reducción considerable de la reproducción celular en el intestino, causando

que el revestimiento intestinal desaparezca y en consecuencia los líquidos pasen de forma incontrolada sin su debido filtro, esta situación provocará que se dé un desequilibrio electrolítico que favorecerá la posibilidad de una infección grave. Estos eventos se manifiestan en forma de una nueva oleada de síntomas como son náusea, vómito, inapetencia, letargia y diarrea con restos hemáticos, que darán como resultado la muerte del sujeto en 4 o 10 días tras la exposición (Bushong, 2013).

El síndrome del sistema nervioso central se caracteriza por el incremento de la presión intracraneal, inflamación en vasos sanguíneos del cerebro e inflamación de las meninges. Este evento tiene su origen cuando el sujeto se ve expuesto a una dosis de radiación que superen los 50 Gy. Su periodo prodrómico ocurre a unos pocos minutos de la irradiación y pueden durar hasta una hora, este evento se ve manifestado por náusea, vómito, confusión, ansiedad, pérdida de la visión, sensación de quemazón en la piel e incluso pérdida de conciencia (Puerta, 2022).

Posteriormente, comienza su periodo de latencia que puede durar más de 12 horas y en el cual el sujeto no percibe ninguna sensación de malestar. Después del periodo de latencia comienza el periodo de enfermedad manifiesta en el que reaparecen los síntomas iniciales con una mayor intensidad, esto causará que el sujeto se desoriente, pierda la coordinación muscular, tendrá dificultad para respirar, padecerá crisis convulsivas, pérdida del equilibrio, letargo, estado de coma y finalmente la muerte (Bushong, 2013).

Es importante mencionar que los eventos donde el sujeto esté expuesto a dosis de radiación lo suficientemente fuerte para causar daños en el sistema nervioso central tendrán siempre como desenlace la muerte a los pocos días de la exposición (Bushong, 2013).

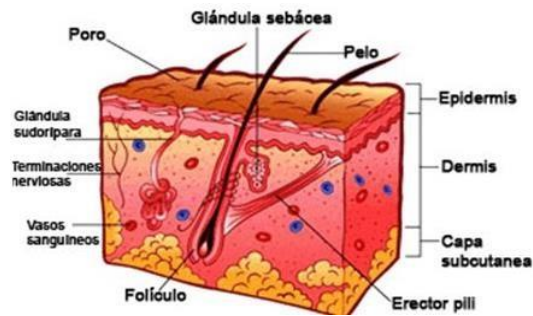
### **Efectos en la Piel por Interacción de Dosis Altas de Radiación**

El primer tejido en ser irradiado durante una exposición a radiación es la piel. La piel consta de una capa externa llamada epidermis, una capa media llamada dermis y la capa más profunda se conoce como tejido subcutáneo o hipodermis. Las tres capas, en conjunto con los folículos pilosos, glándulas sudoríparas, vasos sanguíneos y los

receptores nerviosos, son las estructuras que dan forma y funcionalidad a la piel (Lesur, 2015).

## Figura 25

### *La piel*

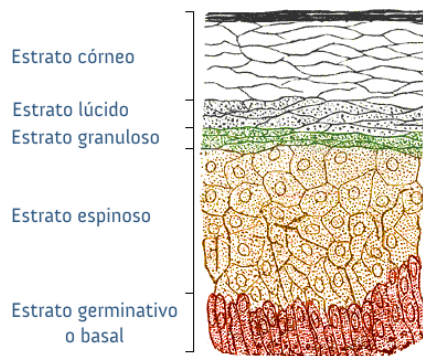


Antonia Vieira Vender, 2018. SINTESIS. Dermatología. <https://bit.ly/3sXRaqJ>

A pesar de que todas las estructuras antes mencionadas están involucradas en la respuesta que tiene la piel a un evento de irradiación, existe una zona que es particularmente radiosensible y se denomina como estrato basal. El estrato basal se ubica en lo más profundo de la epidermis colindando con la dermis y se encarga de producir de forma cíclica células madre que servirán para ir renovando constantemente la piel (Bushong, 2013)

## Figura 26

### *Partes de la epidermis*



Gelambi, 2019. Estrato basal: características y funciones. Liferder. <https://bit.ly/3PTIewG>

Debido a su radiosensibilidad el estrato basal es el responsable de la formación de eritemas como manifestación inmediata de lesión por radiación, esta situación se puede agravar dependiendo la dosis aplicada y puede pasar a un estado de descamación. En sí para que se pueda producir un eritema como efecto por irradiación es necesario exponer al sujeto a dosis que van de 3 a 10 Gy y puede tardar de 24 a 48 horas en manifestarse, posteriormente el eritema alcanzará su intensidad máxima en 2 semanas, esta situación puede conducir a la pérdida permanente del pelo en el área irradiada y puede venir acompañada de atrofia dérmica o endurecimiento (Bushong, 2013).

En caso de que las dosis a las que se exponga al sujeto superen los 10 Gy el eritema puede evolucionar a un estado de descamación húmeda (adelgazamiento de la piel y secreción de fluidos por daños en la integridad epitelial), y si este se agrava puede conducir a un estado de descamación seca (pérdida de la piel), situación que estará acompañada de pérdida permanente del pelo, atrofia dérmica y la acumulación anormal de pequeños vasos sanguíneos (Bushong, 2013).

Con dosis mayores a 15 Gy puede generarse una reacción inmediata que se manifiesta en forma de edema (inflamación de la piel), ulceración aguda y pérdida permanente de los folículos pilosos (Bushong, 2013).

Por último, también hay que mencionar que a dosis moderadas la aparición y desarrollo del eritema depende de la radiosensibilidad del individuo y a la tasa de dosis absorbida.

### **Efectos de la Radiación en las Gónadas**

Las gónadas son órganos muy radiosensibles que se encargan de la producción de células germinales, células que controlan la herencia y la fertilidad. La dosis de radiación necesaria para alterar de forma significativa a las gónadas es considerablemente baja, siendo esta de tan solo 100 mGy. Las gónadas masculinas (testículos) y las gónadas femeninas (ovarios) responden de forma diferente a la interacción con radiación ionizante, esto se debe a que la maduración (gametogénesis) de sus células no diferenciadas (células madre) llamada ovogonia en el caso de la mujer

y espermatogonia en el caso del hombre, ambos procesos difieren en cuanto a velocidad y tiempo de desarrollo (Puerta, 2022).

### ***Efectos por Género***

En las gónadas femeninas el efecto por radiación dependerá de la edad del sujeto. En la etapa fetal e infancia temprana, la radiación puede causar atrofia múltiple por muerte de células germinales. En la pubertad causa supresión y retraso de la menstruación. A la edad adulta de 20 y 30 años la radiosensibilidad decrece, sin embargo, aún se pueden presentar algunas alteraciones, a dosis de 100 mGy puede presentar retraso o supresión de la menstruación, a dosis de 2 Gy infertilidad temporal y a 5 Gy en adelante provocará infertilidad permanente. En algunos casos, la supresión de la menstruación por dosis de 250 a 500 mGy puede provocar en el sujeto mutaciones genéticas (Bushong, 2013).

En las gónadas masculinas la radiación puede provocar la reducción de tamaño de los testículos debido a la pérdida súbita de células germinales (atrofia) que a dosis altas puede llevar a la esterilidad temporal o incluso permanente del individuo (Puerta, 2022).

A partir del periodo prepuberal, una irradiación a dosis de 100 mGy puede causar una reducción en el número de espermatozoides y a dosis mayores la reducción de espermatozoides se prolongará de forma lineal en torno a la dosis aplicada. La irradiación a dosis de 2 Gy puede causar infertilidad temporal que se puede prolongar hasta un año posterior a la exposición y a dosis de 5 Gy o más el individuo se volverá estéril de forma permanente (Bushong, 2013).

### **Efectos de la Radiación en la Sangre**

El sistema hematopoyético se compone de: Medula ósea, sangre periférica y tejido linfático, estas estructuras se encargan de producir o contener células madre pluripotenciales (capaces de diferenciarse a múltiples células) que pasarán por un proceso de diferenciación para posteriormente convertirse en una de las cuatro clases de células sanguíneas maduras (eritrocito, granulocito, plaquetas y leucocito), los cuales

protegen y forman el ambiente adecuado para el correcto funcionamiento de tejidos, músculos y órganos (Lesur, 2015).

El principal efecto de la radiación sobre el sistema hematopoyético durante una exposición aguda es la reducción de todas las clases de células sanguíneas en el área irradiada, este efecto se origina a partir de dosis de 250 mGy y va aumentando en torno a la dosis, estado de maduración celular y a la clase de célula sanguínea (Bushong, 2013).

### ***Respuesta de Cada Clase de Célula Sanguínea a la Interacción con Radiación***

**Linfocitos:** Los linfocitos son células sanguíneas que se encargan de proteger al cuerpo de la invasión de agentes infecciosos o sustancias extrañas. La vida media de esta célula depende del tipo de leucocito y puede variar de unas cuantas horas hasta años. El efecto de la radiación en estas células es la reducción inmediata de la cantidad de leucocitos en la zona irradiada (Lesur, 2015).

**Granulocitos:** Los granulocitos son un grupo de leucocitos especializados combatir infecciones bacterianas, estas células componen el 60% de los leucocitos del cuerpo y tienen una vida media de 2 días. El efecto que tiene la radiación en esta clase de células es manifestado como un aumento rápido en el número de granulocitos durante 15 o 20 días, que posteriormente experimentará una disminución constante de dicha clase de células durante los 30 días posteriores a la exposición inicial (Bushong, 2013).

**Eritrocitos:** Los eritrocitos son las células sanguíneas más abundantes del cuerpo humano y se encargan de la absorción/distribución de gases como el oxígeno y el dióxido de carbono. La vida media del eritrocito es de cuatro meses. Los eritrocitos son las células sanguíneas más radiorresistentes y esto se debe a la falta de núcleo en ellos. El efecto de la radiación en los eritrocitos es la reducción no inmediata de sus números y se puede prolongar unas cuantas semanas (Lesur, 2015).

**Plaquetas o trombocitos:** Las plaquetas son células sanguíneas que cumplen la función de iniciar el proceso de recuperación de una herida, esta clase de célula se reunirá en el centro de la lesión para controlar la pérdida de células sanguíneas y evitar el paso de agentes infecciosos, a este proceso se le conoce como coagulación. Esta

clase de célula tiene una vida media de 1 semana. El efecto de la radiación en los trombocitos se manifiesta en forma de una reducción considerable de la cantidad de trombocitos y este efecto puede prolongarse hasta 30 días posteriores a la irradiación original (Lesur, 2015).

### **Efectos Estocásticos por Radiación**

Los efectos estocásticos tienen su origen cuando el sujeto es irradiado durante un largo periodo de tiempo a dosis bajas de radiación. Los principales efectos estocásticos por radiación son: La malignidad inducida, efectos genéticos, acortamiento de esperanza de vida y efectos locales sobre los tejidos. Estos efectos se basan en una relación dosis respuesta lineal sin umbral, por lo que muestran un incremento en la incidencia de su respuesta (no en su gravedad) con el aumento de dosis (Puerta, 2022).

### **Efectos Locales por Radiación**

#### ***Efectos de la Radiación en la Piel***

La irradiación crónica sobre la piel provocará cambios graves (no malignos) tanto en la apariencia como en su estructura, teniendo como resultado una radio dermatitis que se caracteriza por callosidades, despigmentación, descamación, fragilidad y piel agrietada. Estos efectos generalmente no se presentan en la práctica radiológica (Puerta, 2022).

#### ***Efectos Hematológicos***

La irradiación de los órganos productores de células sanguíneas a dosis continuas provocará aberraciones cromosómicas que alteran tanto a su replicación como a su maduración, situación que puede conducir a un estado patológico denominado leucemia, el cual se caracteriza por la producción continua de glóbulos blancos inmaduros que se ven incapaces de funcionar correctamente (Bushong, 2013).

### **Acortamiento de Esperanza de Vida**

El acortamiento de esperanza de vida inducido por radiación se basa en una relación lineal de reducción de esperanza de vida y dosis absorbida sin umbral, no está

relacionado con enfermedades o malignidad inducida. Básicamente, consiste en el envejecimiento acelerado del sujeto (Bushong, 2013).

### **Riesgos Estimados**

En los efectos estocásticos es prácticamente imposible el poder asociar una respuesta concreta a una exposición a radiación previa, por lo que se recurre a un sistema denominado riesgo estimado, dicho sistema se basa en tres cálculos aproximados de riesgo (riesgo relativo, riesgo excesivo y riesgo absoluto), los cuales se explican a continuación:

**Riesgo relativo:** Consiste en los efectos estocásticos que presenta una población en concreto sin conocer la dosis a la que fue expuesta. El riesgo relativo se calcula realizando una comparación entre una población expuesta que presente cierto efecto estocástico con otra muestra poblacional que haya presentado los mismos efectos (Bushong, 2013).

Esta clase de riesgo se calcula en un intervalo de 1 a 2, siendo 1 la ausencia absoluta de riesgo, 1.5 cuando la población irradiada presenta un 50% más de incidencias estocásticas que una población no irradiada y 2 cuando la muestra poblacional irradiada es de un 100% del número de incidentes a comparación de una población no irradiada (Bushong, 2013).

Un riesgo menor a 1 indicará que la población expuesta recibirá una protección beneficiosa, esta afirmación se basa en la teoría de hormesis de la radiación, la cual sugiere que una irradiación a dosis menores de 100 mGy es beneficiosa debido a que estimulan la reparación molecular y activan mecanismos de respuesta inmunológica. Sin embargo, en cualquier situación donde se esté en contacto con radiación se debe utilizar el principio de ALARA (as low as reasonably achievable) “tan bajo como sea razonablemente posible” para reducir o prevenir daños a la salud (Bushong, 2013).

**Exceso de riesgo:** Es la incidencia de efectos estocásticos en una población la cual excede la cantidad esperada, la diferencia entre el número de casos observados y el número de casos esperados será el exceso de riesgo (Bushong, 2013).

Riesgo absoluto: Se basa en la detección de factores de riesgo por medio de la comparación de como mínimo dos muestras poblacionales irradiadas a dosis diferentes, esto permite encontrar el factor absoluto que da origen a los efectos nocivos por el contacto con radiación (Bushong, 2013).

### **Malignidad Inducida**

Se ha demostrado gracias a experimentos e investigaciones que se pueden desarrollar diferentes tipos de cáncer en el ser humano por contacto con radiación. A continuación, se presentan los principales tipos de cáncer inducidos por radiación:

Leucemia: Es un cáncer de la sangre que comienza cuando las funciones y reproducción de las células sanguíneas se ve alterado, de modo que dichas células se vean incapaces de funcionar correctamente y proliferen de forma descontrolada. La leucemia inducida por radiación se basa en una relación de dosis respuesta sin umbral y se origina cuando los órganos productores de células sanguíneas se ven afectados significativamente por la interacción a dosis altas de radiación durante un periodo largo de tiempo, esto se puede ejemplificar con el caso de la bomba de Nagasaki e Hiroshima. Gracias a la información recabada durante esta clase de eventos es que ahora se conoce el periodo de latencia de la leucemia inducida por radiación, el cual va de 4 hasta 7 años y su periodo de riesgo manifiesto es de 20 años (Bushong, 2013).

Cáncer de tiroides: Es un cáncer que se origina en las glándulas tiroideas y se caracteriza por la proliferación descontrolada de células anormales e inmaduras las cuales no pueden realizar sus tareas pertinentes, por lo que se ve afectada la glándula tiroidea tanto en función como en tamaño, esta clase de cáncer se encuentra asociado a tratamientos de irradiación dirigidos al cuello o cabeza durante la infancia, en este tipo de cáncer existe una relación importante entre la cantidad de radiación aplicada y la edad del sujeto, dicho esto de forma más clara, la probabilidad de que se produzca un cáncer de tiroides aumenta de forma lineal con base a la dosis y la edad del sujeto (Bushong, 2013).

Cáncer óseo: El cáncer óseo se caracteriza por la proliferación descontrolada de células anormales que no pueden llevar a cabo sus tareas pertinentes, esta proliferación

anormal altera la estructura de los huesos y la probabilidad de ocurrencia está asociado a la existencia de otra clase de cáncer en el sujeto, por lo que se considera un cáncer secundario producido a consecuencia de la migración del cáncer inicial. El cáncer óseo inducido por radiación se encuentra asociado a tratamientos radioterapéuticos a dosis mayores de 60 Gy en el que el área a tratar coincida con algún hueso, otro factor que juega un papel importante en la probabilidad de que ocurra un cáncer óseo es la edad, esto se debe a que entre más joven sea el sujeto mayor radiosensibilidad tendrán sus tejidos (Bushong, 2013).

**Cáncer de piel:** El cáncer de piel es el más común de todos los tipos de cáncer y se caracteriza por una alteración tanto de sus funciones como de su aspecto, esto se debe a la proliferación de células inmaduras que no cumplen con sus funciones correspondientes. Existen varios tipos de cáncer de piel que se clasifican en torno a la estructura de origen del lugar donde se produzca el cáncer, por ejemplo, si el cáncer afecta a las células que dan la pigmentación a la piel se llamará melanoma o si el cáncer se origina en la parte más profunda de la epidermis se llamará carcinoma de células basales (Puerta, 2022).

El cáncer de piel inducido por radiación generalmente comienza con una radio dermatitis inducida por radioterapia, la cual puede evolucionar a alguna clase de cáncer de piel y se ve en aumento la probabilidad de incidencia en torno a la dosis y la cantidad de terapias a las que tenga que exponerse el sujeto. De acuerdo con la investigación y experimentación realizada, se ha determinado que el periodo de latencia del cáncer de piel es de 5 a 10 años, sin embargo, no se posee actualmente con un periodo de tiempo establecido en el que se pueda manifestar (Puerta, 2022).

**Cáncer de mama:** El cáncer de mama se manifiesta en forma de una proliferación de células anormales que pueden formar un tumor o bulto en la mama. El cáncer de mama generalmente se manifiesta en mujeres, sin embargo, existe una baja probabilidad de que también se produzca en hombres (Bushong, 2013).

El cáncer de mama inducido por radiación se encuentra asociado a eventos en el que el sujeto se haya expuesto a dosis altas de radiación, como, por ejemplo, en el caso

de los supervivientes de las bombas de Nagasaki e Hiroshima, en los tratamientos antiguos por radiación para tratar mastitis aguda postparto y en los tratamientos por radiación para pacientes con tuberculosis (Bushong, 2013).

**Cáncer de pulmón:** Este tipo de cáncer se origina en los pulmones y se caracteriza por la proliferación descontrolada de células anormales incapaces de cumplir con sus funciones pertinentes. El cáncer de pulmón inducido por radiación es asociado a labores intensas de minería debido a la irradiación por elementos radioactivos en estado natural que abundan en minas, como, por ejemplo, el uranio (Bushong, 2013).

### **El Riesgo Total de Malignidad**

El riesgo absoluto global para la inducción de malignidad es de aproximadamente ocho casos por cada 100 Sv, con un periodo de riesgo que se prolonga durante 20 a 25 años tras la exposición. El riesgo de fallecimiento por enfermedad maligna inducida por radiación es de cinco por cada cien casos. Expresado de modo más simple, una dosis efectiva de 10 mSv se acompaña de un riesgo de inducir una neoplasia maligna de aproximadamente uno por cada diez mil casos, la mitad de las cuales será mortal. (Bushong, 2013, p. 520)

### **Efectos sobre la fertilidad**

La irradiación crónica con dosis bajas no perjudica la fertilidad. La declaración anterior se basa en el análisis continuo que lleva realizando desde 1982 para conocer los efectos de la radiación sobre enfermedades laborales que puedan presentar alguno de los ciento cincuenta mil trabajadores norteamericanos implicados en el análisis. Este análisis es realizado por la Radiological Society of North América (Bushong, 2013).

### ***Irradiación en el Útero***

La irradiación en el útero da gran preocupación debido a que el embrión es un sistema celular en rápido desarrollo que es particularmente sensible a la radiación. Se ha observado que los efectos por irradiación uterina son dependientes del periodo de gestación y de la dosis de radiación. Estos efectos incluyen: Muerte prenatal, muerte

neonatal, anomalías congénitas, inducción de malignidad, retraso en el crecimiento, anomalías genéticas y retraso mental (Puerta, 2022).

A base de la experimentación con animales e investigaciones realizadas durante el uso de la primera bomba nuclear, la bomba de Hiroshima y Nagasaki y otros eventos históricos que involucran la irradiación de poblaciones a dosis muy altas se ha logrado identificar cuatro respuestas principales de la irradiación en el útero, estas son: el aborto espontáneo, el retraso mental, anomalías congénitas y la enfermedad maligna en la infancia (Puerta, 2022).

### ***Aborto Espontáneo***

Dentro de las primeras dos semanas de gestación, el efecto principal de la radiación en el feto es la inducción de aborto espontáneo, sin embargo, se ha demostrado que solo se manifiesta este efecto con dosis altas de radiación, como en el caso de pacientes sometidos a radioterapia. Esta respuesta es la de menor preocupación de las cuatro debido a que se categoriza como un todo o nada en el sentido de que si se produce un aborto espontáneo se pierde al feto y si no se produce dicho efecto, la gestación llegará a término sin problemas (Bushong, 2013).

### ***Retraso Mental***

La exposición a la radiación durante el primer trimestre de embarazo puede producir efectos visibles como microcefalia, estatura baja, peso menor a lo normal y retraso en el desarrollo físico, acompañados de un retraso mental considerable (Puerta, 2022).

### ***Anomalías Congénitas***

Si se produce un evento de irradiación durante el periodo de gestación comprendido entre la cuarta y duodécima semana, se pueden producir algunos efectos que se manifiestan según en qué etapa de la organogénesis se encuentre el feto. Durante la organogénesis se manifestará en forma de anomalías esqueléticas y anomalías en diferentes órganos y posterior a la organogénesis se manifiesta en forma de anomalías en el sistema nervioso. Si se somete al feto a dosis idénticas o superiores a 2 Gy, el

resultado tiene un 100% de manifestar anomalías congénitas graves que tienen un 80% de inducir la muerte del producto (Puerta, 2022).

Estos efectos son infrecuentes con los niveles de exposición utilizados en el diagnóstico radiológico y son esencialmente indetectables a dosis menores de 100 mGy.

### ***Enfermedad Maligna en la Infancia***

La irradiación uterina se encuentra asociado con enfermedades malignas que se presentan en la infancia del producto. Esta declaración se basa en el estudio llamado Oxford Survey realizado por Alice Stewart y Cols que consiste en el seguimiento del nacimiento y desarrollo de personas que hayan estado expuestas a radiación durante su gestación. La principal enfermedad que se manifiesta por estos eventos de irradiación es la leucemia en la infancia y tiene un índice de aparición de catorce casos por cada 100 mil personas irradiadas. Aunque estos efectos se hayan confirmado en varias poblaciones norteamericanas, no existe consenso entre los radiólogos en que este efecto ocurra tras el contacto a dosis bajas de radiación (Bushong, 2013).

Es importante mencionar que no existe ninguna evidencia en seres humanos o en la experimentación con animales que indique que los niveles de radiación experimentados tanto de forma ocupacional como médica produzcan ningún efecto sobre el crecimiento ni el desarrollo.

### **Efectos Genéticos**

Hasta el momento no se cuenta con información que sugiera la producción de efectos genéticos inducidos por radiación en el ser humano, ni siquiera a dosis extremadamente altas, como en el caso de los supervivientes de la bomba atómica. Por tanto, se puede afirmar con certeza que la incidencia de mutaciones genéticas inducidas por radiación tras los niveles de exposición utilizados en radiodiagnóstico es prácticamente nula (Bushong, 2013).

## **Capítulo III Filosofía y Principios de Protección Radiológica**

### **Magnitudes y Unidades Radiológicas**

Para poder identificar de forma cuantitativa y precisa las dosis de rayos x y sus posibles efectos es necesario contar con un conjunto de magnitudes y unidades, las cuales se clasifican en las cinco categorías descritas a continuación:

1.- Radiometría, la cual consiste en las magnitudes asociadas a un área donde se produzca o se encuentre la radiación. Como puede ser la cantidad (fluencia de partículas) y calidad (distribución espectral) de un haz de radiación (Ministerio de la presidencia de España [MPE], 2001).

2.- Coeficientes de interacción, se trata de las magnitudes asociadas a la interacción de la radiación con la materia. Como puede ser atenuación y absorción. Los coeficientes de interacción tienen como objetivo el relacionar las magnitudes radiométricas con las magnitudes dosimétricas. Por ejemplo, los factores radiológicos aplicados a dosis.

3.- Dosimetría, son magnitudes relacionadas con la medida de la energía absorbida y su distribución, estas magnitudes son generalmente el producto de las magnitudes radiométricas y los coeficientes de interacción. Como puede ser la dosis absorbida. La dosimetría además es identificada como una medida física que se correlaciona con los efectos reales o potenciales de la radiación.

4.- Radiactividad, son todas las magnitudes asociadas con el campo de radiación producido por las sustancias radiactivas.

5.- Radioprotección, donde las magnitudes están relacionadas con el efecto biológico de la radiación y se enfocan tanto al tipo de radiación como a la naturaleza del medio irradiado (MPE, 2001).

A continuación, se mencionan las magnitudes más importantes para el tema de protección radiológica:

## **Exposición**

Es una magnitud que pertenece a la categoría de dosimetría y se define como una medida obtenida durante un evento de irradiación que se cuantifica en el momento en el que se detienen completamente en el aire. La exposición es una magnitud que disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente emisora (MPE, 2001).

Esta magnitud tiene ciertas condiciones las cuales son:

- Es una magnitud utilizada para la medición de un haz o campo de fotones (rayos x o gamma) en el aire.
- Es una magnitud de paso para la magnitud de dosis absorbida.
- Con la tecnología actual esta magnitud se le dificulta medir la exposición a dosis muy bajas o altas.

La unidad actual de exposición fue definida por el Sistema Internacional de Unidades y este es el coulombio por kilogramo.

## **Tasa de Exposición**

La tasa de exposición es la magnitud que nos indica los valores de exposición con respecto a un tiempo específico. Al igual que la exposición, la tasa de exposición se basa en el coulombio como su unidad de medición (MPE, 2001).

## **Kerma**

El nombre de esta magnitud proviene de las siguientes palabras inglesas: Kinetic Energy Released per unit MAAss (energía cinética liberada por unidad MAAss). El kerma es una magnitud utilizada para medir campos de partículas no cargadas (neutrones y fotones), del cual se obtienen valores numéricos expresados en Gray los cuales tienen similitud con los resultados de dosis absorbida en aire, agua o en tejido biológico blando. La información anterior hace al kerma una magnitud muy parecida al de exposición, pero, superior a ella en el tema de alcance debido a que esta no solo abarca el aire como materia de estudio (MPE, 2001).

La unidad en el SI de kerma es el julio/kilogramo y es denominado como Gray (Gy)

## **Dosis Absorbida**

La dosis absorbida es una magnitud que nos permite conocer la cantidad de cualquier clase de radiación que se queda en cierto volumen de materia (MPE, 2001).

La dosis absorbida es una magnitud que depende de especificar el material que será expuesto y es útil para cuantificar cualquier tipo de radiación.

La unidad actual de la dosis absorbida es joule/kg o el Gray.

## **Tasa de Dosis Absorbida**

Es la magnitud que nos indica la variación de la dosis absorbida durante un periodo de tiempo dado y su unidad es el joule/kg (MPE, 2001).

## **Dosis Equivalente**

La dosis equivalente es una magnitud utilizada para determinar el daño biológico a cierta dosis de radiación. Esta magnitud depende de la dosis absorbida y del tipo de radiación aplicada, además de que la unidad con que es medida es el sievert (sv).

## **Tasa de Dosis Equivalente**

Esta magnitud nos permite conocer la variación de la dosis equivalente en torno al tiempo y es representada por  $H$  y su unidad de medición es el sv.

## **Dosis equivalente efectiva**

Es una magnitud que tiene como objetivo sumar los productos de las dosis de radiación para órganos o tejidos, es indispensable mencionar que existe un factor importante para esta magnitud y es el peso de cada órgano o tejido relacionado con el evento de irradiación (MPE, 2001). Esencialmente, esta magnitud es utilizada para conocer la probabilidad de que ocurra un efecto estocástico y su unidad representativa es el sv.

## **Filosofía y Principios de Protección Radiológica**

De acuerdo con el Consejo de Seguridad Nuclear, 2010 “La protección radiológica es una actividad multidisciplinar, de carácter científico y técnico, que tiene como finalidad la protección de las personas y del medio ambiente contra los efectos nocivos que pueden resultar de la exposición a radiaciones ionizantes (p.86)”.

La protección radiológica en el ámbito médico diagnóstico se basa en un principio fundamental, el cual es la relación del riesgo con el beneficio, lo cual quiere decir que cualquier exposición innecesaria a la radiación ionizante es un riesgo inaceptable que se debe prevenir en lo posible para resguardar la integridad, tanto del paciente, familiares, profesional ocupacionalmente expuesto, personal que se ponga en contacto con el área de imagen y del profesional en preparación.

En el caso de un paciente, el riesgo por irradiación se justifica por el beneficio obtenido al aportar información precisa que ayude a determinar el diagnóstico de alguna enfermedad, y en el caso del profesional asociado al área de imagen el riesgo es controlable y se encuentra equilibrado en torno al salario obtenido, siendo este el beneficio.

### **Organizaciones Responsables de la Seguridad y Protección Radiológica**

El organismo responsable del estudio de los efectos nocivos de la radiación en conjunto con las recomendaciones y medidas de protección durante la manipulación de radiación es la Comisión Internacional de Protección Radiológica, generalmente conocida como ICRP por sus siglas en inglés (ARSA, 2009).

El ICRP fue fundado en 1928 como respuesta a la necesidad de continuar con el uso de radiaciones ionizantes de la forma más segura posible, siempre teniendo en mente la obtención de los mejores resultados con la menor dosis posible (ARSA, 2009).

El ICRP se encarga de crear recomendaciones que se basan en un sistema regido por tres condiciones: optimización, justificación y limitación de dosis, además de esto el ICRP genera recomendaciones a partir de la idea de que todas las actividades humanas

conlleven riesgos sin excepción alguna y que este es comúnmente aceptado debido a los beneficios obtenidos (ARSA, 2009).

Las recomendaciones del ICRP generalmente son aceptadas y pasan a formar parte de las normativas que rigen la manipulación de radiaciones ionizantes en otros países. En el caso de México, el organismo encargado de analizar, aceptar y establecer como norma estas recomendaciones es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), dicho organismo público su reglamento general de seguridad radiológica en 1988 y tiene su fundamento en las recomendaciones publicadas por el ICRP en 1977 (Consejo de Seguridad Nuclear [CSN], 2001).

El CNSNS, 1988 menciona “Misión: Regular la seguridad nuclear, radiológica, física y las salvaguardias del uso pacífico de la energía nuclear para proteger la salud de la población y el ambiente (p.1)”.

### **Sistema de Limitación de Dosis: Optimización, Justificación y Limitación de Dosis**

Este sistema está basado en valores que no deben ser superados por el bien de aquellos que manipulen o se encuentren presentes durante el uso de la radiación, dichos niveles de referencia se han obtenido mediante registros, investigaciones o intervenciones.

Optimización: Esta condición parte del principio de ALARA “As Low As Reasonably Achievable” (tan bajo como sea razonablemente posible), el cual nos dice que cualquier actividad que implique el uso o contacto con radiación ionizante debe llevarse a cabo con dosis de radiación lo más bajas posibles obteniendo el mayor beneficio posible. Esta condición radiológica se cumple al seleccionar las técnicas radiológicas adecuadas con cada paciente (CSN, 2010).

Justificación: Toda exposición debe tener un beneficio para el sujeto irradiado, situación que en caso contrario solo significaría una alteración que cuenta con la probabilidad de generar daños en el organismo de el/los sujetos. Dicho principio se lleva a cabo en una sala de rayos x con la selección y toma correcta de las técnicas radiológicas, limitando la entrada de acompañantes de los pacientes a las áreas de exposición, evitando la exposición accidental o innecesaria de los profesionales

ocupacionalmente expuestos, especialistas o trabajadores que entren a las áreas radiológicas y también a los profesionales en formación (CSN, 2010).

Limitación de dosis: Existen diferentes clases de límites y se clasifican en primarios, secundarios, derivados y autorizados.

Los límites primarios: Son aquellos que definen el equivalente de dosis, el equivalente de dosis efectiva y el equivalente de dosis comprometida dependiendo de las circunstancias de cada evento de irradiación. Estos límites están orientados para todos los individuos y para casos donde la irradiación abarque a cierta población (MPE, 2001).

Límites secundarios: Los límites secundarios son utilizados para conocer los límites de dosis de radiación por irradiación externa o interna y solo son empleados cuando los límites primarios no pueden aplicarse directamente (MPE, 2001).

Límites derivados: Esta clase de límites utilizan magnitudes diferentes a la de los límites primarios y son utilizados para conocer la rapidez de exposición en un área de trabajo, la contaminación del aire, el agua y de superficies (MPE, 2001).

Límites autorizados: Son aquellos establecidos por la CNSNS para cualquier magnitud. Estos límites se aplicarán solo en circunstancias particulares y tienen prioridad sobre los derivados (MPE, 2001).

### ***Límites Equivalentes de Dosis***

Esta clase de límites no se aplican a la exposición médica de pacientes con fines terapéuticos ni a la radiación natural, en cambio, deberán ser utilizados para establecer las dosis máximas a las que debe estar expuesto un sujeto con fines diagnósticos o la que son expuestos los operarios de los equipos radiológicos.

Las siguientes dosis se encuentran basadas en las investigaciones y análisis llevados a cabo por la ICRP de 1988.

Para el personal ocupacionalmente expuesto, las dosis límites anuales para efectos estocásticos es de 50 mSv (MPE, 2001).

La dosis para el POE (Profesional Ocupacionalmente Expuesto) para cada tejido individual es de 500 mSv, a excepción del cristalino, para dicha estructura el límite establecido es de 150 mSv (MPE, 2001).

Las mujeres ocupacionalmente expuestas que se encuentren embarazadas solo podrán trabajar en condiciones donde la irradiación se distribuya lo más uniformemente posible y no deberán recibir dosis anuales mayores a 15 mSv (MPE, 2001).

Las mujeres ocupacionalmente expuestas que se encuentren en periodo de gestación o lactancia no deberán trabajar en áreas donde se manipulen radioisótopos (MPE, 2001).

Para los estudiantes, la dosis máxima a la que pueden estar expuestos será de una décima parte de la de los POE y serán considerados como individuos del público (MPE, 2001).

Los estudiantes que se encuentren en un curso de capacitación a nivel profesional o técnico para la manipulación adecuada de radiación se encontrarán sujetos a las siguientes reglas:

Si tienen 18 años o más, serán consideradas como personas ocupacionalmente expuestas, por lo tanto, estarán sujetos al mismo límite de dosis que los POE (MPE, 2001).

Si son menores de 18 años, pero mayores de 16, serán considerados como personal ocupacionalmente expuesto, pero no deberán recibir dosis de radiación mayores a 15 mSv (MPE, 2001).

Las personas no ocupacionalmente expuestas que laboren en las proximidades de las zonas controladas o que ingresen ocasionalmente a estas tendrán un límite de 5 mSv/año (MPE, 2001).

La dosis límite establecida para el público en general es de 5 mSv al año (MPE, 2001).

Cuando un individuo se encuentre expuesto a irradiaciones prolongadas a dosis cercanas o equivalentes a la dosis límite anual debido a algún tratamiento o estudio, se deberán reducir las dosis aplicadas a un promedio de 1 mSv/año por el resto de su vida (MPE, 2001).

En el cálculo del equivalente de dosis para individuos expuestos a radioisótopos se deberá tener en cuenta los parámetros biológicos y metabólicos, así como otros factores característicos del individuo, como son, por ejemplo, las costumbres alimenticias (MPE, 2001).

### **Factores Básicos de Protección Radiológica: Tiempo, Distancia y Barreras**

Para poder manipular de forma segura la radiación ionizante se hizo necesario contar con tres reglas fundamentales basadas en tres factores esenciales, los cuales son: Tiempo, distancia y el uso de barreras.

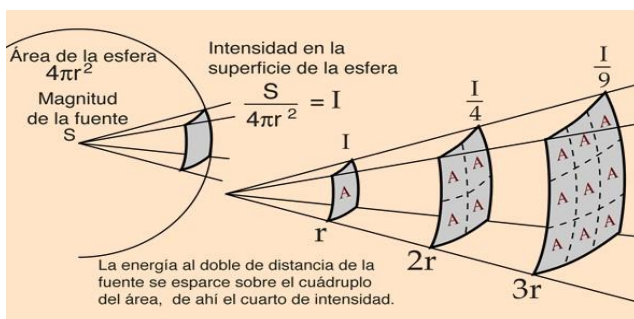
**El tiempo:** La dosis equivalente depende directamente del periodo del tiempo durante el cual el sujeto esté expuesto a cierta cantidad de radiación. Por lo tanto, es imprescindible reducir el tiempo de exposición y la cantidad de estudios en la menor cantidad posible. Esta regla se cumple por los profesionales de imagen evitando la repetición de estudios y el uso excesivo de la fluoroscopia (ARSA, 2009).

**Distancia:** La distancia es un factor importante tanto para protección radiológica como para la formación de imágenes. Para protección radiológica este factor consiste en que cualquier interacción con radiación se debe llevar a cabo a la mayor distancia posible, obteniendo el mayor beneficio para el sujeto expuesto y en el caso de la formación de imágenes la distancia debe ser la adecuada para evitar una sobreexposición para el sujeto o distorsiones en los estudios realizados. Como norma todo individuo implicado en la interacción con radiación debe alejarse de la fuente, puesto que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia, es decir que a 1 metro recibimos cierta dosis de radiación, a 2 metros la dosis se reducirá por un factor de  $2^2$  que dará como resultado  $1/4$  de la dosis original, a 3 metros se reducirá por un factor de  $3^3$  que dará como resultado  $1/9$  de la dosis original (ARSA, 2009).

Blindaje: Las barreras juegan un papel importante al momento de salvaguardar la integridad tanto del POE como de todo individuo que pueda estar expuesto a radiación. Esta clase de blindajes los podemos encontrar, por ejemplo: En la coraza del tubo de rayos x, paredes y suelo plomado, equipos de protección personales (mandiles, guantes, gafas y protectores de gónadas plomados). Como norma se deben colocar blindajes biológicos entre las fuentes radioactivas y las personas (ARSA, 2009).

**Figura 27**

*Variación de la intensidad con la distancia*



M Olmo R Nave. 2006. Ley general del inverso al cuadrado. HyperPhysics. <https://bit.ly/3IFC8Cd>

## La Imagen Radiológica como Objetivo Fundamental

La imagen obtenida a partir de algún estudio que involucre el uso de radiación debe ser tal que permita realizar un diagnóstico certero y a la vez mantener la dosis de radiación aplicada lo más bajo posible. En referencia a esto, no es permisible obtener una imagen diagnóstica a dosis muy elevadas o disminuir demasiado la dosis, afectando la calidad de imagen y por ende al diagnóstico médico (ARSA, 2009).

Para obtener una imagen de forma adecuada es necesario tener en condiciones óptimas tanto el equipo imagenológico como el sistema que interviene en la formación de la imagen como son: Película, chasis, equipo de revelado o de adquisición de imagen y el cuarto oscuro.

Para poder evaluar correctamente la imagen también es importante contar con equipos de observación adecuados que proporcionen: Intensidad de luz y homogeneidad

de los negatoscopios, iluminación del área de interpretación y una buena calidad de reproducción de imagen en los monitores.

De acuerdo con ARSA (2009) es necesario hacer las siguientes recomendaciones:

- 1.- Solo deberán aceptar a pacientes para estudios radiológicos, cuando la solicitud sea hecha por un médico.
- 2.- El estudio solamente podrá realizarse por médicos y técnicos radiólogos.
- 3.- Personal en entrenamiento solamente podrá realizar estudios radiológicos bajo la supervisión de médicos y técnicos radiólogos.
- 4.- Si dos tipos de exámenes dan un rendimiento diagnóstico parecido, se debe preferir el menos intervencionista o peligroso.
- 5.- La siguiente recomendación será seleccionar el procedimiento que imparta al paciente la menor dosis de radiación.
- 6.- En caso de que se requieran varios exámenes radiológicos, evaluar cada examen, antes de efectuar el siguiente (p.54).

Por lo tanto, siempre debe existir un compromiso entre la dosis, la calidad de la imagen y las recomendaciones anteriores para obtener la mejor imagen diagnóstica posible y el mayor beneficio para la salud del paciente.

## **Capítulo IV Legislación Mexicana en Materia de Diagnóstico Médico con Rayos x**

### **Norma Oficial Mexicana**

Existen normativas que cualquier establecimiento de diagnóstico médico que utilice radiación ionizante en México debe acatar, dichas reglas o normativas se encuentran establecidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-229-SSA1-2002, Salud ambiental. Requisitos técnicos para las instalaciones, responsabilidades sanitarias, especificaciones técnicas para los equipos y protección radiológica en establecimientos de diagnóstico médico con rayos x.

A continuación, se darán a conocer los requisitos, responsabilidades y condiciones idóneas con las que debe contar un área de diagnóstico médico que utilice equipos generadores de rayos x.

### **Responsabilidades Sanitarias**

Son los requisitos específicos con los que debe contar cualquier área de diagnóstico médico que emplee el uso de radiación ionizante. Estos se mencionan a continuación:

#### **Requisitos Administrativos**

Cualquier área que emplee el uso de radiación ionizante para uso médico diagnóstico debe contar con una licencia expedida por la Secretaría de Salud (NOM-229-SSA1-2002).

De acuerdo con la NOM-229-SSA1-2002, para obtener la licencia se requiere contar con:

La solicitud de la licencia, acta constitutiva del establecimiento, poder notarial del representante legal, planos o diagramas de la instalación, planos o diagramas de la ubicación de los equipos de rayos x y procesadores de imagen y una memoria analítica del cálculo de blindajes, la memoria analítica antes mencionada deberá estar avalada por un asesor especializado en seguridad radiológica (numeral 6.2).

Con respecto a los requerimientos anteriores, cabe mencionar que los detalles de cada requerimiento se encuentran en la Norma Oficial Mexicana NOM-229-SSA1-2002 del numeral 6.2 al 6.2.1.6.

En el caso de que la unidad se encuentre en operación de forma activa, la unidad deberá contar con una verificación de blindajes realizada por un asesor especializado en seguridad radiológica y una cédula de información técnica que contenga lo siguiente:

Una relación del profesional ocupacionalmente expuesto, una descripción clara y concisa del equipo con el que se está trabajando, un listado de las técnicas radiológicas utilizadas en la sala, inventario del equipo de protección radiológica de la sala, permiso del uso y posesión de cada equipo con el que se cuente, permiso vigente del responsable de operación y funcionamiento del área expedido por Secretaria de Salud, manual de seguridad y protección radiológica, manual de procedimientos técnicos y se debe contar con un programa de calidad (NOM-229-SSA1-2002).

El antes mencionado programa de calidad deberá ser impartido y coordinado por el titular de la instalación, dicho titular debe contar con el asesoramiento para la elaboración del programa de calidad por parte de algún asesor especializado en seguridad radiológica que sea ajeno a la instalación. El titular asignará las tareas de protección radiológica a todo el personal relacionado con la sala (responsable de operación y funcionamiento, médico y técnico radiólogo) (NOM-229-SSA1-2002).

En el programa de calidad se deberá anexar un programa de vigilancia del funcionamiento y mantenimiento preventivo del sistema de rayos x de acuerdo con el calendario preestablecido, en caso de que se detecte alguna falla se deberá realizar un mantenimiento correctivo de forma inmediata (NOM-229-SSA1-2002).

En el programa de vigilancia del funcionamiento y mantenimiento preventivo del sistema de rayos x se deberán tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Características del funcionamiento del equipo de rayos x, características y estado del chasis, rejilla, pantalla intensificadora, cuarto oscuro, sistema de procesado de imagen y negatoscopios (NOM-229-SSA1-2002).

El programa debe incluir el registro de la calendarización, fechas y resultados de las prácticas de vigilancia, del control de calidad, las dificultades encontradas, las medidas correctivas aplicadas, la fecha de su aplicación y su efectividad, así como la evaluación del programa (NOM-229-SSA1-2002, numeral 8.6).

También se debe contar con un Manual de Garantía de Calidad que se encuentre a la disposición de todo el personal ocupacionalmente expuesto del establecimiento, el cual debe contener la siguiente información:

Lista de los responsables del programa de calidad, lista de los parámetros que serán vigilados y la frecuencia de las pruebas, procedimientos a seguir en caso de que se detecten anomalías, lista de documentos donde se pueden encontrar instrucciones detalladas para la vigilancia y el mantenimiento, constancia de calidad del equipo ensamblado, una copia de las especificaciones de compra del equipo actual para la futura adquisición de otro equipo, sesiones de capacitación para todo el personal que tenga responsabilidades en el programa de garantía de calidad en conjunto con un registro de la constancia y duración de estas sesiones (NOM-229-SSA1-2002).

Por último, el programa de garantía de calidad debe tener al menos una revisión anual por el comité o responsable de operación y funcionamiento para determinar su funcionalidad y si requiere alguna actualización (NOM-229-SSA1-2002).

### **Responsabilidades Generales**

El equipo de trabajo de un área de diagnóstico médico que utiliza radiación ionizante está compuesto por: El titular, el responsable de operación y funcionamiento, el médico radiólogo, técnico radiólogo, el asesor especializado en seguridad radiológica y los trabajadores o empleados involucrados, cada uno de los eslabones que componen este equipo de trabajo deben cumplir con ciertas responsabilidades que se mencionaran a continuación:

El titular debe: Apoyar al responsable de operación y funcionamiento en la planeación, implantación, ejecución, supervisión y aplicación de un programa de calidad y protección radiológica (NOM-229-SSA1-2002).

## **Promover una Cultura de Calidad.**

Contar con una instalación adecuada, proveer el equipo y accesorios necesarios indispensables para la aplicación adecuada de las medidas de protección y seguridad radiológica (NOM-229-SSA12002).

Realizar verificaciones necesarias para garantizar el buen funcionamiento del equipo y de los demás instrumentos relacionados (NOM-229-SSA1-2002).

Proporcionar al POE entrenamiento, información, equipo, accesorios y dispositivos de protección radiológica adecuados al trabajo que realicen, así como los servicios necesarios de vigilancia médica. El entrenamiento que el titular proporcione debe estar de acuerdo con las disposiciones legales aplicables (NOM-229-SSA1-2002, numeral 7.2.5).

Esto con el fin de capacitar de forma adecuada al personal implicado en el área de imagen y obtener los mejores resultados posibles y reduciendo al mínimo los errores que puedan cometer durante su labor.

Informar al POE respecto de los riesgos que implica el trabajo con radiaciones ionizantes, además entregarle copia de los informes periódicos y los certificados anuales del equivalente de dosis individual acumulado, así como una constancia del total de equivalente de dosis acumulado al término de la relación laboral (NOM-229-SSA1-2002, numeral 7.2.6).

Por norma, todo el personal implicado en un área que se emplee radiación ionizante tiene el derecho de conocer los riesgos por manipulación de radiación y la acumulación de dosis media que tiene el personal en el establecimiento.

Escuchar y atender las inquietudes u opiniones del responsable de la operación y funcionamiento y del asesor especializado en seguridad radiológica en cuanto a las necesidades para la aplicación adecuada de las medidas de protección radiológica, así como sus sugerencias respecto a procedimientos de trabajo u otras situaciones (NOM-229-SSA1-2002, numeral 7.2.7).

Esto se realiza con el fin de cumplir las recomendaciones de calidad y que se lleven a cabo las normas de protección y seguridad radiológica.

Entregar a la Secretaría de Salud, anualmente, un informe de actividades relevantes en seguridad radiológica y garantía de calidad, en el cual se debe incluir, como mínimo: Altas y bajas de equipos radiológicos, modificaciones a la instalación, dosimetría anual y su análisis (NOM-229-SSA1-2002, numeral 7.2.8).

Este informe tiene como meta manifestar el hecho de que se cumplen de forma adecuada las normativas de seguridad y protección radiológica, de que existe una bitácora del funcionamiento de los equipos en el área, además de presentar el registro de modificaciones que se hayan realizado en las instalaciones o los equipos y por último mostrar los registros de las dosis a las que ha estado expuesto el personal.

### **Responsabilidades del Médico Solicitante**

El médico solicitante debe:

- Solicitar el examen diagnóstico adecuado para el padecimiento del paciente y en caso de duda se deberá consultar con el médico radiólogo, de no ser posible el apoyo del médico radiólogo, dicho médico radiólogo asumirá la responsabilidad de la exploración radiológica (NOM-229-SSA1-2002).
- Deberá firmar toda solicitud de estudios que requieran el uso de radiación ionizante, en dicha solicitud se deberá anexar el nombre, número de cédula profesional y fecha de prescripción (NOM-229-SSA1-2002).
- Aportar la mayor cantidad de información clínica para que el médico radiólogo pueda seleccionar y aplicar el procedimiento o técnica adecuada para el estado del paciente (NOM-229-SSA1-2002).
- Valorar con antelación si el uso de los rayos x es la opción adecuada y si el beneficio de usar radiación compensa el riesgo. Es importante que el médico tenga en cuenta el historial de los estudios realizados previamente para evitar la toma de exámenes innecesarios (NOM-229-SSA1-2002).

## **Responsabilidades del Médico Radiólogo**

El médico radiólogo debe:

- Entregar un reporte de los hallazgos radiológicos obtenidos mediante el estudio que se haya realizado. Es necesario que en dicho reporte se encuentre plasmado tanto la firma, nombre y número de cédula profesional de dicho médico radiólogo (NOM-229-SSA1-2002).
- Ser responsable de dirigir y autorizar cualquier técnica radiológica que se realice, será el responsable de hacer cumplir las medidas de radio/protección para los pacientes y deberá vigilar que cualquier proceso que involucre a otro profesional (anestesiólogos y médicos intervencionistas) se lleve a cabo de forma correcta porque de existir algún percance la responsabilidad recae en el médico radiólogo (NOM-229-SSA1-2002).
- Evaluar el estudio solicitado e identificar cuál es el estudio adecuado para obtener la mayor cantidad de información diagnóstica y que represente el menor riesgo para la salud del paciente (NOM-229-SSA1-2002).

## **Responsabilidades del Encargado de Operación y Funcionamiento**

El encargado de operación y funcionamiento debe:

- Contar con un manual de protección radiológica que sirva de guía para conocer los valores máximos de dosis de radiación a la que puede estar expuesto tanto el paciente como los profesionales ocupacionalmente expuestos. Siendo este manual una guía y no una limitante (NOM-229-SSA1-2002).
- Responsabilizarse de que las normas e información expuesta en el manual antes mencionado se lleven a cabo a la práctica laboral (NOM-229-SSA1-2002).
- Analizar los procedimientos que se llevan a cabo en el área de imagenología y establecer medidas de protección para las diversas situaciones que se susciten en dicha área. Responsabilizarse de que dichas medidas se lleven a la práctica laboral (NOM-229-SSA1-2002).
- Contar con un registro de los procedimientos realizados en el área de imagen, dicho registro debe contener información sobre si se llevaron a cabo las medidas

de radio/protecciones pertinentes en cada caso. En el caso contrario de que no se lleven a cabo las medidas de radio/protección de forma correcta, el responsable de operación deberá aplicar medidas correctivas a fin de que no se repitan los mismos errores y deficiencias (NOM-229-SSA1-2002).

- Deberá prestar atención a opiniones y sugerencias del POE sobre las medidas de radio/protección a fin de mejorar las condiciones de trabajo (NOM-229-SSA1-2002).

### **Responsabilidades del Técnico Radiólogo**

El técnico radiólogo debe:

- Deberá aplicar la técnica y medidas de radio/protecciones adecuadas para cada procedimiento que implique el uso de radiación, deberá guiarse por el manual de seguridad y protección radiológica con el fin de reducir la dosis de radiación a la que estará expuesta tanto el paciente como los profesionales asociados al área (NOM-229-SSA1-2002).
- Estar al pendiente de cualquier anomalía que presenten los equipos generadores de radiación ionizante y de los equipos de revelado, ya que estas anomalías pueden significar un riesgo para el paciente y el POE debido a que podrían estar expuestos a dosis de radiación diferentes de las esperadas o puede darse el caso de que la imagen presente alteraciones que impidan que sea diagnóstica y que de forma colateral se deban repetir de forma innecesaria las imágenes. En caso de que se suscite cualquier anomalía, el técnico radiólogo deberá informar de forma oportuna al médico radiólogo (NOM-229-SSA1-2002).
- Evaluar el estudio solicitado basándose en las necesidades diagnósticas del paciente con el fin de utilizar la técnica adecuada y evitar la repetición del estudio (NOM-229-SSA1-2002).
- Asegurarse de tomar una imagen de forma adecuada y que presente todos los elementos necesarios para que permita realizarle un análisis detallado con fines diagnósticos (NOM-229-SSA1-2002).

- Colaborar con el responsable de operaciones en el programa de revisión de placas repetidas con el fin de identificar los motivos de esta práctica deficiente y aplicar medidas correctivas (NOM-229-SSA1-2002).

### **Responsabilidades del POE**

El POE debe:

- Seguir las normas y medidas que se encuentran en el manual de protección radiológica en torno a las actividades que desempeñen en el área de imagen.
- Deberá utilizar de forma correcta tanto los equipos de protección radiológica de uso individual como los dispositivos de vigilancia dosimétrica proporcionados por la institución (NOM-229-SSA1-2002).
- Brindar un registro de actividades dirigido al titular o responsable de operaciones a fin de mejorar los protocolos de protección y seguridad radiológica tanto para el POE como para el paciente (NOM-229-SSA1-2002).
- Asistir y acreditar el curso de protección y seguridad radiológica que el titular indique.
- Informar al titular y los responsables de operación sobre el caso de que se labore en más de un establecimiento, vigilar que la suma de las dosis recibidas de radiación no supere los límites establecidos y brindar copias de los informes, constancias y certificados obtenidos en las otras instituciones (NOM-229-SSA1-2002).
- Evitar todo acto deliberado o por negligencia que pudiera conducir a situaciones de riesgo o de incumplimiento de las normas de protección y seguridad radiológica vigentes, así como comunicar oportunamente al titular o al responsable de la operación y funcionamiento la existencia de circunstancias que pudieran afectar el cumplimiento adecuado de dichas normas (NOM-229-SSA1-2002, numeral 7.7.5).

De modo que se mejore la comunicación entre los responsables de mayor autoridad y el POE para situaciones que pongan en riesgo la aplicación de normas y medidas de seguridad y protección radiológica.

## **Responsabilidades del AESR**

El AESR debe:

El AESR debe entregar a la Secretaría de Salud, anualmente, un informe de actividades relevantes en seguridad radiológica y garantía de calidad, en el cual se debe incluir, al menos: Altas y bajas de instrumentación y herramientas, certificados de calibración vigente de los equipos, exámenes médicos del POE, dosimetría anual con su análisis y al menos un listado del número de establecimientos que se han verificado indicando el número y tipo de equipos verificados durante el año (NOM-229-SSA1-2002, numeral 7.8).

El AESR es el asesor especializado en seguridad radiológica y realiza el informe para poder prescindir del permiso impartido por la Secretaria de Salud para poder laborar.

### **Requisitos de Instalación y Características de la Sala/Equipo de Rayos x**

La instalación debe contar con:

Sala de espera, sala de rayos x, área de consola de control, vestidores, sanitarios, almacén de película, cuarto oscuro, área de interpretación, área de preparación de medios de contraste. Las dimensiones de las áreas mencionadas se establecerán en torno al tipo y cantidad de estudios a realizar durante la semana (NOM-229-SSA1-2002).

### **Señaléticas**

En el caso de los pacientes de sexo femenino que estén en edad fértil es necesario indagar sobre la probabilidad de que pudiera estar embarazada, esto se realiza con el fin de prevenir la irradiación del feto en gestación. Además, el servicio debe contar con una señalética que diga lo siguiente: "Si existe la posibilidad de que usted se encuentre embarazada, informe al médico o técnico radiólogo antes de hacerse la radiografía" (NOM-229-SSA1, 2002).

El área de vestidores y sanitarios ubicados cerca del equipo de rayos x para los pacientes debe contar con un blindaje para ser considerado una zona supervisada, de lo contrario se le considerara una zona controlada (NOM-229-SSA1-2002).

Zona controlada: Es el área donde se requiere tener en cuenta medidas o procedimientos de protección, en condiciones de trabajo normal (ARSA, 2009).

Zona supervisada: Es el área que delimita la zona controlada y que se mantiene bajo vigilancia (ARSA, 2009).

En caso de que el interior de los sanitarios y vestidores se les considere una zona supervisada, debe contar con una señalética que contenga lo siguiente: “No abrir esta puerta hasta que lo llamen” (NOM-229-SSA1-2002, numeral 5.1.4).

Es necesario contar con un faro o indicador de un tamaño visible de luz roja en la entrada de la sala de rayos x, este indicador nos servirá para identificar si dentro de la sala se está emitiendo radiación y por ende se encuentre ocupada, este indicador debe estar acompañado de una señalética que mencione lo siguiente: “Cuando la luz esté encendida solo puede ingresar personal autorizado” (NOM-229-SSA1-2002).

Continuando con la entrada de la sala de rayos x, es necesario que exista un letrero con el símbolo internacional de radiación ionizante, el cual mencione lo siguiente: “Radiaciones/zona controlada” (NOM-229-SSA1-2002).

Por último, en la entrada de la sala de rayos x se debe contar con una señalética que mencione lo siguiente: “En esta sala solo puede permanecer un paciente a la vez” (NOM-229-SSA1-2002).

### **Estructura de la Sala de Rayos x y Consola de Control**

Ya sea que la instalación sea fija o móvil, se debe delimitar la zona controlada de la sala de rayos x por medio de paredes, suelo y techo plomado. La ubicación de la consola de control debe estar posicionada dentro de la zona controlada (NOM-229-SSA1-2002).

**Figura 28**

*Espesor de las láminas plomadas para la sala de rayos x*

Espesores para láminas de plomo sugeridos y calculados para salas de Rayos X			IngenieríaReal.com
Rayos X generados por picos de tensión no superiores a:	Mínimo espesor del plomo:		Peso por pie cuadrado en libras
	Milímetros	Pulgadas	
75 Kv	1.0 mm	0.039 "	10.5
100 Kv	1.5 mm	0.059 "	4
125 Kv	2.0 mm	0.079 "	5
150 Kv	2.5 mm	0.093 "	7
175 Kv	3.0 mm	0.118 "	8
200 Kv	4.0 mm	0.157 "	10
225 Kv	2.0 mm	0.197 "	13
300 Kv	9.0 mm	0.354 "	24
400 Kv	15.0 mm	0.591 "	38
600 Kv	34.0 mm	1.343 "	81
900 Kv	51.0 mm	2.000 "	120

IngenieríaReal.com, 2014. Blindaje sala de rayos X.

<https://bit.ly/3acdsyw>

En el caso de que exista más de una sala de rayos x en el establecimiento, se deben modificar los pasillos colindantes de modo que no invadan la zona supervisada (NOM-229-SSA1-2002).

Las dimensiones del equipo de rayos x deben basarse en la guía del fabricante y se debe tomar en cuenta el hecho de contar con el espacio libre suficiente para poder maniobrar al paciente de forma eficiente, ya sea que se encuentre de pie, silla de ruedas o camilla (NOM-229-SSA1-2002).

El diseño de la sala debe tomar en cuenta que el haz directo de rayos x no esté dirigido a la consola de control, puertas de acceso o ventanas. En el caso de que el haz directo de radiación este en dirección al cuarto oscuro, dicho cuarto debe contar con el blindaje adecuado (NOM-229-SSA1-2002).

Debe existir un medio por el cual el personal ocupacionalmente expuesto pueda observar al paciente en todo momento, en caso de que sea por medio de una ventanilla es necesario que esté blindada a modo que la radiación no afecte al operador (NOM-229-SSA1-2002).

La sala de rayos x debe estar diseñada de modo que exista comunicación entre el operador y el paciente durante la toma del estudio (NOM-229-SSA1-2002).

La sala debe contar con instrumentos plomados para protección personal como son: Mandiles, collarines, protector de tiroides, protector de gónadas, gafas y todo aquel implemento necesario según la NOM-229-SSA1-2002.

En la sala de rayos x solo debe estar presente los equipos y material necesario para tomar el estudio por el que acude el paciente (NOM-229-SSA1-2002).

### **Estructura del Cuarto Oscuro**

Se debe determinar el sitio de esta sala tomando en cuenta la optimización en tiempo y distancia para el cambio de chasis, revelado y otras actividades que requieran el uso del cuarto oscuro (NOM-229-SSA1-2002).

Las dimensiones del cuarto oscuro deben tener el espacio suficiente para almacenar película, llevar a cabo tareas de revelado, realizar el mantenimiento de la máquina de revelado, realizar la tarea de carga y descarga de la película radiográfica (NOM-229-SSA1-2002).

La sala debe contar con un sistema de extracción e inyección de aire para evitar el estancamiento del aire que contiene cierto porcentaje del líquido de revelado y de fijador. Se debe cambiar el volumen total del aire 10 veces como mínimo al día (NOM-229-SSA1-2002).

En aquellos equipos de revelado automático se debe implementar un sistema de inyección y extracción de aire, al igual que en los cuartos oscuros con revelado manual (NOM-229-SSA1-2002).

Ubicar los tanques que contengan líquido de revelado y fijador lejos de las películas radiográficas y de las pantallas intensificadoras (NOM-229-SSA1-2002).

El suelo del cuarto oscuro debe contar con ciertas características como lo son el ser impermeable, antideslizante para evitar accidentes y anticorrosivo en caso de alguna fuga química. El techo debe ser de algún material que no pueda descamarse para evitar la contaminación de líquidos y que la presencia de estos materiales residuales en la película dé falsos positivos (NOM-229-SSA1-2002).

El cuarto oscuro debe estar diseñado de modo que evite la filtración de luz por las ventilaciones de aire y por la puerta. Se aconseja que la puerta posea algún cerrojo interior para evitar accidentes (NOM-229-SSA1-2002).

Sellar las posibles entradas de luz por cualquier medio que se adapte a la instalación, como puede ser con unos guardapolvos o cinta adhesiva oscura (NOM-229-SSA1-2002).

En caso de que el cuarto oscuro tenga un sistema de carga y descarga de los chasis, se debe garantizar que no entre luz durante el intercambio. Se aconseja tener seguros tanto en el lado de emisión como de recepción del chasis para evitar accidentes (NOM-229-SSA1-2002).

Los muros deben estar pintados de un color claro mate y se deben cubrir los muros y zonas que puedan entrar en contacto con los líquidos de la máquina de revelado con pintura anticorrosiva (NOM-229-SSA1-2002).

La lámpara de seguridad no debe rebasar la potencia máxima que indique el fabricante del filtro de seguridad de las películas en uso. Deberá estar colocada a una distancia de por lo menos 1.20 m por arriba de la superficie de las mesas de trabajo y con el tipo de filtro de lámpara de seguridad recomendado para la película con la que se está trabajando (NOM-229-SSA1-2002, numeral 5.3.16).

Esto con el fin de que tanto las películas nuevas como aquellas que se encuentren en una etapa temprana de la formación de la imagen no se vean alteradas por el contacto con la luz de la lámpara.

En el caso del uso de más de una lámpara de seguridad se debe analizar que los haces de luz de dichas lámparas no se superpongan y otorguen la mayor visibilidad posible sin que se vean afectadas las películas, esto se debe a que la superposición de las luces de seguridad puede amplificar el haz de luz que generan y que por ende aumenta el riesgo de que se velen las películas (NOM-229-SSA1-2002).

## **Área de Almacenamiento**

El área de almacenamiento de película debe contar con un blindaje para prevenir una probable exposición de la película virgen que recién será almacenada (NOM-229-SSA1-2002).

La unidad de almacenamiento de película debe contar con una temperatura ambiente que se encuentre entre los 10 C° a los 21 C° y una humedad relativa no mayor al 50%. Los valores antes mencionados pueden variar solo en caso de que el fabricante del tipo de película a utilizar lo recomiende (NOM-229-SSA1-2002).

El área de almacenamiento debe ubicarse fuera de la sala de trabajo que emplee el uso de rayos x para evitar que se altere la película nueva (NOM-229-SSA1-2002).

## **Área de Interpretación**

El área de interpretación o cuarto azul es el sitio diseñado para que los médicos y especialistas puedan llevar a cabo sus tareas diagnósticas, Durante la revisión de la Norma Oficial Mexicana 229-SSA1-2002 que se realizó en el año 2016, se estableció que el área contara con un color oscuro mate (azul) y una luz que no genera reflejos en la pantalla de los monitores.

Los negatoscopios en el área de interpretación deben ubicarse de forma que la luz ambiente o emitida por otros dispositivos no afecten el análisis diagnóstico de algún estudio imagenológico (NOM-229-SSA1-2002).

Se debe tener en consideración las siguientes recomendaciones:

- Evitar que se produzca deslumbramiento o reflexión.
- Procurar tener una adecuada iluminación en el área para obtener una interpretación de las imágenes lo más exacta posible.
- Reducir la cantidad de luz ambiental para disminuir los niveles de fatiga en el personal y aumentar el grado de exactitud en las tareas diagnósticas.
- Procurar que el área brinde un ambiente oscuro para que el ojo pueda adaptarse a la escala de visión nocturna (blanco y negro).

Se debe ubicar de forma estratégica los monitores de fluoroscopia a fin de evitar que la luz ambiente o de otros dispositivos impida apreciar de forma correcta la imagen obtenida durante la toma de algún estudio. En caso de utilizar monitores de televisión, estos deberán contar con una resolución adecuada con la que se pueda apreciar de forma clara la imagen (NOM-229-SSA1-2002).

### **Diseño de Blindajes**

El blindaje para utilizar puede estar compuesto por láminas de plomo, concreto normal, concreto baritado, tabique u otro material que cumpla con tener un espesor similar al plomo y que lleve a cabo de forma eficiente la contención de la radiación generada (NOM-229-SSA1-2002).

Los blindajes de la construcción se determinarán por un asesor especializado en seguridad y protección radiológica, el cual será el encargado de elaborar una memoria analítica, la cual debe tener cierta información que se mencionará a continuación:

Debe contener el plano y diagrama de todas las salas del establecimiento, debe contener información sobre la función que tendrá cada sala y la ubicación de cada aditamento de la sala de rayos x, como son consola de control, equipo de rayos x, mamparas y procesador de imagen (NOM-229-SSA1-2002).

La altura de los blindajes de las paredes no debe ser menor a los 2.1 metros (NOM-229-SSA1-2002).

Datos para tomar en cuenta de los blindajes:

Los blindajes deben ser de una composición y densidad que impidan totalmente el paso de radiación (NOM-229-SSA1-2002).

Es importante contar con un blindaje adecuado que proteja al operador de la radiación que se emita durante el evento de exposición, esto se puede lograr por medio de una mampara fija (NOM-229-SSA1-2002).

Todas las estructuras blindadas, puertas, paredes, marcos, ventanillas de control, pasa placas y otras estructuras que rodeen el equipo de rayos x deben formar en conjunto

un circuito cerrado que impida que se filtre la radiación al exterior (NOM-229-SSA1-2002).

Las uniones entre los blindajes de piezas estructurales como son muros, columnas, tableros pres construidos u otro elemento de instalación deberán colocarse de forma que mantengan su forma y unión a pesar de que exista movimiento. Para todos aquellos aditamentos de la sala de rayos x como son cajas de instalación y tableros de control que podrían interrumpir el blindaje antes mencionado, se deberá agregar un blindaje interno o por el lado opuesto del muro (NOM-229-SSA1-2002).

Cuando se utiliza como blindaje el plomo o un material similar, este debe estar montado de tal manera que no se deslice bajo su propio peso y el empalme entre las láminas deberá ser de 1 cm como mínimo. Las cabezas de clavos, tornillos o remaches deben estar cubiertos con plomo del mismo espesor que el de la lámina (NOM-229-SSA1-2002, numeral 5.6.7).

Se debe acatar la medida anterior con el fin de que no se deslice la lámina de plomo, alterando el diseño y dando como efecto fugas de radiación (NOM-229-SSA1-2002).

La sala blindada debe contar con la verificación de blindaje por parte de un asesor especialista en seguridad radiológica, de modo que este garantice que el blindaje cumple su función y no hay fugas de radiación (NOM-229-SSA1-2002).

En caso de que la estructura se vea comprometida por cualquier eventualidad, se deberá someter a la sala de rayos x a una nueva verificación (NOM-229-SSA1-2002).

## **Blindajes**

Cualquier instalación que tenga como objetivo la manipulación de radiación ionizante con fines diagnósticos debe ser acondicionada de forma que garantice la seguridad del POE, personal asociado al área y el público que acuda a dicha instalación.

Para continuar es necesario conocer lo que son las barreras primarias y barreras secundarias en la sala de rayos x:

Barreras primarias: Son estructuras que tienen como objetivo la contención de la radiación ionizante generada en la instalación, esta clase de barreras se encuentran en los sitios donde ha de incidir directamente el haz de rayos x (blindaje de la pared donde se ubica el bucky y el blindaje del suelo de la sala) (ARSA, 2009).

Barreras secundarias: Son aquellas herramientas utilizadas en las salas de rayos x para proteger al personal y al paciente de la radiación de fuga y de la radiación dispersa (ARSA, 2009).

### **Cálculo de Blindajes**

Para poder realizar el cálculo de los blindajes a utilizar es necesario contar con cierta información previa que se expone a continuación.

Un análisis del área en el que se exprese cuál será el uso de cada sala e identificaciones de cuáles serán las zonas controladas y zonas supervisadas (NOM-229-SSA1-2002).

Planos y diagramas que expresen la posición de todos los componentes de la sala de rayos x (NOM-229-SSA1-2002).

Características de los equipos que se utilizarán en el establecimiento: marca, modelo, tipo de estudios para los que está diseñado, tensión máxima del tubo, corriente máxima durante operaciones continuas y el número de tubos de rayos x. Se deben considerar también el factor de carga de trabajo, factor de uso y factor de ocupación (NOM-229-SSA-2002).

Basándonos en la NOM-229-SSA1-2002 “Los puntos de interés para los cálculos de blindaje deben tomarse a 30 cm más allá de la barrera de protección (numeral 5.7.2)”, este análisis se realiza para tener un margen de error en la instalación del blindaje.

El blindaje del área de control, área de interpretación, pasa placas, mamparas, ventanillas o mirillas debe ser calculado con el apoyo de un asesor especialista en seguridad radiológica y debe ser avalado por la Secretaría de Salud.

El blindaje de las barreras que resguardan zonas controladas, pasillos, puertas de acceso, ventanas y otras áreas debe ser calculado con apoyo de un asesor especialista en seguridad radiológica y debe ser avalado por Secretaria de Salud (NOM-229-SSA1-2002).

En instalaciones fijas colindantes con propiedad privada, casas, habitación, oficinas, comercios, fábricas o algún otro sitio donde la permanencia de personas sea comparable al tiempo de trabajo del gabinete, el blindaje debe calcularse para ocupación total y para un equivalente de dosis efectivo que no exceda 5 mSv/año, considerando otras contribuciones, optimizando mediante el concepto ALARA (NOM-229-SSA1-2002, numeral 5.7.5).

Esto se realiza con la intención de evitar la exposición innecesaria del personal o población que ocupe tanto la propia instalación como zonas aledañas al área de imagen (NOM-229-SSA1-2002).

Si se cuenta con más de un tubo de rayos x el blindaje se calculará individualmente y se aplicará el de mayor grosor para todos los tubos con los que se cuente (NOM-229-SSA1-2002).

Una vez que la sala se encuentre instalada, se debe realizar una verificación del blindaje para valorar si es que el blindaje cumple de forma adecuada su función, en caso de que los equivalentes de dosis efectivos calculados sean mayores que los límites establecidos, debe ser colocado un blindaje adicional con el fin de reducir las dosis a valores menores a los límites establecidos (NOM-229-SSA1-2002).

Después de que el blindaje de la sala de rayos x se encuentre instalado y entre en operación se requerirá implementar medidas periódicas que garanticen que el blindaje esté cumpliendo su función, el método utilizado para dicha verificación es el levantamiento de niveles.

Para que se pueda llevar a cabo un levantamiento de niveles se debe contar con ciertos requisitos previos:

El medio por el que se hará la verificación será con un volumen de agua de como mínimo 25 cm por lado y 15 cm de profundidad (NOM-229-SSA1-2002).

La distancia a la que se colocará el antes mencionado volumen de agua será con una distancia con la que se trabaje a menudo, siendo esta 1 m o 1.8 m por lo general (NOM-229-SSA1-2002).

El tiempo de disparo se deberá programar basándonos en el tiempo de respuesta del detector que se esté utilizando (NOM-229-SSA1-2002).

Las lecturas se tomarán por fuera de la sala y a 30 cm de la pared del lado a utilizar (NOM-229-SSA1-2002).

El asesor especialista en seguridad y protección radiológica debe adaptar las lecturas obtenidas en torno al factor de calibración, dependencia de energía, presión, temperatura, relación de corriente utilizada durante la verificación y la utilizada en práctica para poder dar los resultados de su análisis. Después, el AESR debe relacionar los datos obtenidos con la carga laboral registrada para poder estimar la dosis de radiación generada a la semana y luego al año (NOM-229-SSA1-2002).

Para esta clase de verificación se encuentra prohibido el uso de pacientes para realizar el levantamiento de niveles (NOM-229-SSA1-2002)

## **Capítulo V Protocolo de Protección y Seguridad Radiológica**

### **Requisitos Previos**

Los protocolos de protección radiológica tienen como fin establecer estrategias que minimicen la exposición a radiación tanto de los profesionales relacionados con el área de imagenología como de los pacientes que acuden con fines diagnósticos o terapéuticos.

El protocolo cuenta con diversos requisitos y etapas, los cuales se explican a continuación:

#### **Mantenimiento Preventivo de los Equipos:**

Realizar un mantenimiento anual del equipo de rayos x, en caso de reparaciones, contar con la documentación pertinente emitida por parte del ingeniero que realizó dicha tarea, donde deberá explicar el problema del equipo, solución y pruebas de funcionamiento que demuestren que dicho problema ha sido corregido y el equipo se encuentra en condiciones óptimas para ser utilizado (NOM-229-SSA1-2002).

Los documentos antes mencionados deben encontrarse disponibles y ordenados por sala y en forma secuencial en cuestión de fechas, además de anexar un reporte del desarrollo del mantenimiento.

Los equipos deben contar con etiquetas las cuales permiten identificar si el equipo cuenta con su respectivo mantenimiento, en esta etiqueta se debe manifestar la última fecha de mantenimiento, fecha del próximo mantenimiento y nombre del responsable (NOM-229-SSA1-2002).

Calibración periódica: Los equipos deben encontrarse calibrados en sus parámetros básicos: Kv, mA, mAs, tiempo de disparo y unidades hounsfield.

Se debe contar con certificados de cada calibración, los cuales deben estar accesibles y organizados de forma secuencial. Generalmente, son solicitados durante inspecciones de rutina (NOM-229-SSA1-2002).

## Capacitación y Certificaciones

El profesional ocupacionalmente expuesto debe estar capacitado de acuerdo con las necesidades del establecimiento, se debe contar con las licencias de manejo de equipos y dosimetría personal.

Además de contar con el curso de protección radiológica emitido por cualquier institución que sea avalada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias en el caso de México.

También debe poseer las acreditaciones o experiencia en la manipulación de los equipos con los que trabaje o planea trabajar.

El profesional que trabaje con radiación ionizante deberá contar con su certificado de dosimetría personal, el cual deberá estar accesible en caso de que se requiera.

La institución debe asumir los costos de renovación de licencias de operación de equipos de los profesionales contratados. Dicha norma toma en cuenta a todo el personal expuesto, de remplazo y practicantes (NOM-229-SSA1-2002).

El personal ocupacionalmente expuesto deberá:

- Estar registrado como profesionista capacitado en el área de imagen.
- Deberá tener de 18 años o más.
- Contar con su certificado de estudios correspondiente al área y profesión.
- Recibir capacitaciones y cursos para poder laborar en el área de forma adecuada.
- Conocer y aplicar correctamente los principios básicos de seguridad radiológica.
- Evitar la irradiación innecesaria del personal y de los pacientes.
- Estar al pendiente del estado de los equipos y reportar cualquier anomalía o fallo que puedan presentar para que se lleven a cabo las reparaciones lo antes posible.
- Poner en práctica las normativas, instrucciones y procedimientos contenidos en el Manual de Seguridad Radiológica.
- Proporcionar con veracidad los datos que le sean requeridos durante las inspecciones, auditorias, verificaciones y reconocimientos que realice los

organismos reguladores de las normativas de protección y seguridad radiológica (NOM-229SSA1-2002).

De acuerdo a lo anterior, si es que un profesional desea laborar en un área donde se use radiación ionizante, deberá cumplir con todos los requisitos anteriormente mencionados y en caso contrario se considera como no apto, y, por lo tanto, no podrá trabajar en el gabinete de rayos x.

### **Dosimetría Personal**

Es una conducta sanitaria específica basada en el uso de un dispositivo denominado dosímetro, el cual capta las dosis de radiación a las que está sometido el POE y que corresponden la carga de trabajo en la que el trabajador se desempeña. El organismo que regula la dosimetría en México es el CNSNS en conjunto con la Comisión Federal de Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) (NOM-229-SSA1-2002).

#### ***Para el POE:***

Es obligatorio el uso de dosímetro para todo el personal ocupacionalmente expuesto.

El dosímetro debe ser colocado en una zona en donde se encuentre expuesto y que en caso de que el personal que lo porte sea irradiado registre dicha exposición (bolsillo de la bata, filipina o camisa), debe llevarse en todo momento durante el horario laboral y en caso de que el personal este utilizando mandiles plomados el dosímetro debe ir debajo de este (NOM-229-SSA1-2002).

El dosímetro es de uso personal y debe permanecer dentro de la instalación.

Se debe evitar la exposición del dosímetro a fuentes de calor intenso o fuentes de radiación fuera del ambiente laboral debido a que alteran las lecturas obtenidas (NOM-229-SSA1-2002).

El personal ocupacionalmente expuesto tiene derecho a conocer las dosis de radiación que recibe por medio de las lecturas que se obtienen de su dosímetro personal, una vez que el POE conoce dicha información debe colocar su firma en el informe dosimétrico (NOM-229-SSA1-2002).

El titular del establecimiento será el responsable de que se cumplan estas reglas, además deberá reportar cualquier anomalía al organismo responsable de la regulación de estas normas (NOM-229-SSA1-2002).

La instalación debe contar con las siguientes señaléticas:

Cartel de advertencia para pacientes que se puedan encontrar embarazadas, esta señalética se debe encontrar ubicada en zonas que se encuentren a la vista como, por ejemplo: En las salas de espera, pasillos colindantes a las salas donde hay uso de radiación y dentro de la misma sala (NOM-229-SSA1-2002).

Cartel que restrinja el paso a solo personal autorizado, dicha señalética debe ubicarse en las puertas de acceso de las salas donde se utiliza radiación, zonas de interpretación u otras áreas en las que los pacientes y familiares/acompañantes no tengan permiso de entrar sin la presencia de algún profesional del área que les esté guiando (NOM-229-SSA1-2002).

Faros de luz roja ubicados en las puertas de acceso de las salas en donde se manipule radiación, estos faros se encuentran enlazados con los equipos generadores de radiación y debido a esto es que el faro se enciende durante el uso del equipo y se apaga en ausencia de actividad (NOM-229-SSA1-2002).

La sala de rayos x convencionales debe contar con:

- Mandil con un plomado de 0.5 mm.
- Protector de gónadas con un plomado de 0.5 mm.
- Guantes con un plomado de 0.5 mm para tareas de compresión y 0.25 mm en caso de que sea para intervención.
- Collarín para tiroides con un plomado de 0.5 mm.
- Gafas con un plomado de 0.02 mm.

## **Protocolo de Atención a Pacientes**

Primero se programa la toma del estudio con antelación suficiente para preparar la sala, los materiales y herramientas a utilizar.

Verificar el estado de los parámetros de operación del equipo.

Verificar que los datos en la solicitud sean del paciente que se está atendiendo.

Verificar que la solicitud del paciente cuente con nombre y firma del médico que envió la solicitud, datos del paciente y centro o unidad médica que lo refiera.

Ingresar a la sala en compañía del paciente y familiar, realizando una breve anamnesis del motivo de su ingreso con el fin de saber si el estudio encaja con el diagnóstico y síntomas, además de determinar si se requiere la presencia del acompañante, en caso contrario de que no encaje el diagnóstico se informara al médico radiólogo en turno para valorar otras alternativas para el estudio solicitado que si encajen con el problema del paciente.

Se debe realizar un análisis de la condición en la que se encuentra el paciente con la finalidad de buscar si existe algún riesgo extra por el cual se pueda cancelar y reprogramar el estudio (NOM-229-SSA1-2002).

En caso de tener dudas con respecto al estudio solicitado, el operador debe acudir al manual de procedimientos técnicos que como antes se mencionó es obligatoria su presencia en la sala y de este modo evitar la repetición innecesaria de la toma del estudio.

Dar las indicaciones pertinentes de preparación y una explicación del procedimiento a realizar al paciente y familiar/acompañante.

Una vez que el paciente esté listo para el estudio, le colocaremos al paciente las protecciones individuales que precise.

En torno al manejo del paciente se debe comunicar de forma tranquila y segura antes de comenzar con el posicionamiento anatómico, apoyarse con el familiar en caso de que se requiera, manipular de forma lenta y firme las zonas que lo precisen, de esta forma obtener las imágenes solicitadas sin dañar al paciente.

Durante el procedimiento se debe evitar:

- Mantener abiertas las puertas de las salas de rayos x porque la radiación se puede dispersar y contaminar el ambiente fuera de la sala.
- La presencia innecesaria del acompañante durante la toma del estudio.
- Repetición innecesaria de estudios por mala técnica, posición del paciente, indicaciones mal acatadas, errores prácticos o una deficiente operación de revelado.

En caso de que el paciente se esté atendiendo médicamente en una institución oficial diferente a la que se acude para la toma del estudio y no haya un sistema compartido funcional con el cual el médico que lo atiende pueda disponer de las imágenes, se puede proporcionar el estudio en disco o en película radiográfica para evitar que se repita el estudio.

El protocolo también debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

Control de repetición de placas.

Con respecto al tema de repetición de placas o de estudios, se estima que el 10% de todos los estudios pertenecen a este tipo en el cual se repite debido a varios factores como son: Las solicitudes mal indicadas, mala técnica de factores radiológicos, posición inadecuada, indicaciones poco claras o dificultad para comunicarlas al paciente, equipos en mal estado, mal funcionamiento del sistema de revelado, sobrecarga laboral, falta de experiencia para adaptar la posición del paciente en estado de postración, paciente inconsciente, inestable o en estado crítico.

Para mejorar y evitar que ocurran al mínimo posible estos errores es importante que el operador:

- Que corrobore, en caso de dudas, las técnicas a utilizar con un manual de técnicas radiológicas del servicio.
- Tenga en consideración lo establecido en el manual de protección y seguridad radiológica con el que cuente la sala.
- Tenga siempre en mente la norma de protección y seguridad radiológica.

- Busque consejo de otros compañeros del servicio más experimentados.
- Busque asesoramiento del médico radiólogo en turno.
- Realice las tareas de calibración pertinentes antes de realizar la toma de los estudios.

En caso de ser una serie de imágenes, tomar una imagen preliminar para valorar los factores aplicados, estado del equipo y que se haya realizado la toma del estudio con las indicaciones adecuadas.

De igual manera, en el revelado se aconseja revisar la primera imagen con el fin de valorar el estado del sistema de revelado.

También se aconseja realizar estudios retrospectivos que enlisten los principales motivos por los que el operador ha cometido estos errores a fin de aplicar las medidas correctivas correspondientes (NOM-229-SSA1-2002).

Además de establecer programas de control de calidad que abarquen todo el equipo correspondiente de la sala a fin de que el operador trabaje con equipos en un estado óptimo para la toma de los diversos estudios imagenológicos.

#### Protección de gónadas:

Las gónadas son órganos muy radiosensibles por lo que se debe reducir al máximo la incidencia del haz de radiación en estas estructuras anatómicas, a base lo que marca la NOM-229-SSA1-2002 todo paciente debe prescindir de equipo de protección en caso de que el haz primario se encuentre a menos de 5 cm de las gónadas, sin embargo, en el caso de que dicho equipo de protección intervenga con la obtención de la imagen se recomienda no colocar el equipo blindado (ARSA, 2009).

La importancia del uso de equipos de protección como es el protector de gónadas plomado de 0.5 mm gana fuerza debido a las estimaciones científicas que mencionan que el uso de equipos de seguridad personal contra la radiación reducen la dosis incidente a las gónadas en un 95%, sin embargo en las mujeres el porcentaje es más bajo siendo este un 50%, esto se debe a que la posición de las gónadas femeninas es variable y que por ende la colocación del protector no abarque de forma eficiente estas estructuras (ARSA, 2009).

Además, en el caso de las pacientes femeninas, una mala colocación del protector de gónadas también puede ocultar información diagnóstica y aumentar la probabilidad de que se repita el estudio (ARSA, 2009).

### **Alternativas Para Pacientes Embarazadas**

La toma de estudios imagenológicos para pacientes embarazadas depende únicamente de la necesidad de la paciente y los beneficios que este aporta para su bienestar. Es importante enfatizar que durante el uso de radiación siempre se debe reducir la dosis de radiación aplicada al mínimo posible obteniendo una imagen con calidad diagnóstica (principio de ALARA), situación que se vuelve aún más importante con esta clase de pacientes porque pueden generar cambios importantes en el desarrollo del embrión o feto dependiendo del periodo de gestación en el que se encuentre (ARSA, 2009).

### ***Por lo Tanto, en Pacientes Embarazadas***

Se debe evaluar otras opciones que no requieran el uso de radiación ionizante, como, por ejemplo, el ultrasonido.

Se debe ser muy selectivo con las posiciones técnicas a emplear, de modo que se reduzca el número de exposiciones al mínimo.

El operador debe ser muy cuidadoso en la toma de los estudios para evitar la repetición de los estudios.

Se debe seleccionar la clase de estudio que represente la menor dosis de radiación para el feto.

Al momento de colimar se debe ser muy preciso y cerrar en lo posible el colimador, estas acciones han de reducir el campo y focalizar el haz útil de radiación hecho que reducirá la dosis de radiación, que ha de recibir el producto (embrión o feto).

Se debe contar con los equipos calibrados y en óptimas condiciones.

Los equipos de protección personal como los mandiles plomados, protector de tiroides y otros deben estar en buenas condiciones para su uso.

## Conclusión

A lo largo de este trabajo se buscó fomentar una cultura de calidad con respecto al tema de protección radiológica a fin de solucionar el problema original, el cual consiste en la existencia de factores que impiden la aplicación de medidas de protección y que representan un riesgo para la salud de los implicados.

Aun con lo desarrollado en la investigación, falta un largo camino por recorrer para que los estudios de rayos x estén plenamente justificados debido a los siguientes factores:

- o Falta de apego de las guías clínicas por parte del médico clínico.
- o Falta de conciencia sobre los riesgos biológicos potenciales de las radiaciones ionizantes.
- o Falta de dialogo entre el clínico y el radiólogo.
- o Poca disponibilidad de equipos que no usen radiación (ultrasonido).
- o Presiones por parte del paciente o de los familiares por realizar estudios de imágenes.
- o La práctica de la llamada medicina defensiva la cual busca proteger al médico de responsabilidades medicolegales.

Es necesario avanzar en la educación de los profesionales relacionados al área de imagenología dada la tendencia creciente de trabajar en salas de informe con poca experiencia clínica. Así mismo es necesario insistir en la educación sobre la radiación ionizante para evitar el uso irresponsable de esta.

Para futuras investigaciones se recomienda continuar con la línea de investigación conforme los avances técnicos y tecnológicos vayan apareciendo en el ámbito de imagenología pues, como se pudo advertir los beneficios que pueden obtenerse de su adopción son tangibles en el corto, mediano y largo plazo.

## Bibliografías

- ACS. Chemistry of Life. (2020). Protones, neutrones y electrones. <https://www.middleschoolchemistry.com/espanol/capitulo4/leccion1/>
- Alcaraz Baños, M. (2008). Equipos radiológicos convencionales. <https://bit.ly/3Nwa681>
- Binda, M. C. (2018). Historia de la Radiología. Revista Argentina de Radiología/Argentinian Journal of Radiology, 82(01), 053-054.
- Asesores en radiaciones S.A. (2009). Curso teórico práctico de seguridad radiológica en diagnóstico médico con rayos x. ARSA.
- Carlyle Bushong, S. (2013). Manual de radiología para técnicos (10a ed.). Elsevier.
- Cesar F, A. (2006). La regulación de la protección radiológica y la función de las autoridades de salud. <http://bitly.ws/x244>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2010). Radiación y protección radiológica. <http://bitly.ws/ygk4>
- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. (1988). La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. <http://bitly.ws/ygJG>
- Facultad de matemática, astronomía, física y computación. (2018). Curso Dosimetría: Tubos de Rayos-X. <https://bit.ly/3ICzPjc>
- Federación de Enseñanza de CCOO de Andalucía. (2011). LA MATERIA. <https://bit.ly/3yZxoPL>
- Federación de enseñanza de CCOO de Andalucía. (2009). RADIACIONES. <https://bit.ly/3LFXGcf>
- Lesur, L., Ortega, O., Saldívar, C & Cinta, V. (2015). ANATOMÍA FISIOLOGÍA Y SALUD (2a ed). TRILLAS.
- Ministerio de la presidencia. (2001). Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. <https://bit.ly/3x3PnSz>

- Secretaría de Salud [SSA1], (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-229-SSA1-2002, Salud ambiental. Responsabilidades sanitarias y protección radiológica en establecimientos de diagnóstico médico con rayos x. <http://bitly.ws/yyHV>
- Ozuna, Y. (2020). Línea de Tiempo historia de la Protección Radiológica. Timetoast. <http://bitly.ws/x25H>
- Ozuna, Y. (2020). Imagenología Convencional. UNAD. <https://www.calameo.com/read/006396987e10795a60a4c>
- Puerta-Ortiz, A. (2022). Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Revista Colombiana de Cardiología. <http://bitly.ws/wTEen>
- Preciado, M & Luna, V. (2010). Medidas Básicas de Protección Radiológica. <http://bitly.ws/EdnA>
- Recio Miñarro, J. (2009). EL ATOMO. <https://bit.ly/38bVADj>
- Ruiz Manzano, P. (2012). Fundamentos de Física Médica (1a ed.). ADI. <http://bitly.ws/yqZG>
- Thomas, A. M., & Banerjee, A. K. (2013). The history of radiology. Oxford University Press.